



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.24.17.13-TDI

**FREQUÊNCIA DE EVENTOS SECOS E CHUVOSOS
EXTREMOS MENSAIS NO NORTE E NORDESTE DO
BRASIL E SUAS TENDÊNCIAS NO SÉCULO XXI
USANDO SPI**

Thalyta Soares dos Santos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelo Dr. Clóvis Angeli Sansigolo, aprovada em 10 de março de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/398G9AH>>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR :

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.24.17.13-TDI

**FREQUÊNCIA DE EVENTOS SECOS E CHUVOSOS
EXTREMOS MENSAIS NO NORTE E NORDESTE DO
BRASIL E SUAS TENDÊNCIAS NO SÉCULO XXI
USANDO SPI**

Thalyta Soares dos Santos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelo Dr. Clóvis Angeli Sansigolo, aprovada em 10 de março de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/398G9AH>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Santos, Thalyta Soares dos.
Sa59f Frequência de eventos secos e chuvosos extremos mensais no Norte e Nordeste do Brasil e suas tendências no século XXI usando SPI / Thalyta Soares dos Santos. – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxiv+120 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.24.17.13-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
Orientador : Dr. Clóvis Angeli Sansigolo.

1. Índice de Precipitação Normalizada (SPI). 2. Norte. 3. Nordeste. 4. Brasil. 5. Tendências. I.Título.

CDU 551.583 (811) (812/813)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

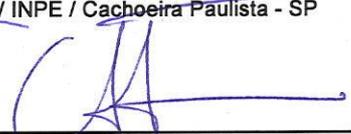
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dr. José Antonio Marengo Orsini



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Clóvis Angeli Sansigolo



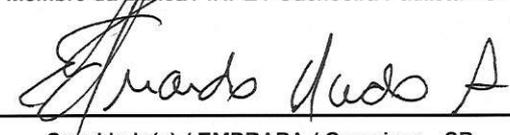
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. David Mendes



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Eduardo Delgado Assad



Convidado(a) / EMBRAPA / Campinas - SP

Aluno (a): Thalyta Soares dos Santos

São José dos Campos, 10 de março de 2011

*A meus pais Tânia Consuêlo e Zorildo José,
pelo amor e dedicação que me
acompanharam por toda essa caminhada.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua presença constante na minha vida, sem que eu precise pedir. Sem Ele nada seria possível, nem teria sentido.

A meus pais Tânia Consuêlo e Zorildo José e a minha avó Inah Rocha por acreditarem em mim mesmo quando eu não acreditava. E por serem o alicerce sobre o qual a minha vida está construída: AMO MUITO VOCÊS.

Ao Allan Rodrigues Silva que esteve sempre presente apesar da distância, pelo carinho, paciência, dedicação, incentivo, amizade e amor durante essa caminhada. Obrigada por estar sempre ao meu lado: TE AMO.

Ao meu professor e orientador Dr. Clóvis Angeli Sansigolo, pela confiança, atenção e ensinamentos durante este período.

Aos membros da banca examinadora pelos comentários, críticas e sugestões construtivas.

Aos meus familiares e amigos muito amados (eles sabem quem são e por isso existe necessidade de citar nomes) que sempre me apoiaram para alcançar mais esta vitória.

As minhas amigas, que também foram o meu suporte durante toda essa caminhada e tiveram contribuições importantes neste trabalho: Aline Castro, Tatiane Felinto (minha Tatiolina), Bruna Barbosa (meu anjo da guarda) e Madeleine Sánchez.

E às amigas, não menos importantes, que estiveram comigo sempre: Camila, Cristina, Cláudia, Adriana.

Aos meus colegas da turma de mestrado.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior) pela ajuda financeira dessa pesquisa durante o curso.

Finalmente, a todas aquelas pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para o êxito do meu trabalho.

RESUMO

Analisaram-se as frequências e tendências de eventos secos e chuvosos severos e extremos no Norte e Nordeste do Brasil no século passado, usando dados de precipitação do GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) e do modelo ECHAM5 na rodada 20C e projeções para o século XXI deste mesmo modelo em dois cenários distintos, um mais pessimista (A2) e um intermediário (A1B). As frequências dos diferentes eventos secos e chuvosos foram obtidas através do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) nas escalas 3, 6 e 12 meses. Foi feita uma análise sazonal da variabilidade espacial das frequências e intensidades destes eventos, assim como as tendências seculares dos SPIs 3, 6 e 12, para todos os 4 conjuntos de dados. O modelo ECHAM5 não conseguiu reproduzir bem as precipitações médias anuais quando comparado à climatologia das observações obtidas pelo GPCC. O viés das precipitações médias anuais variou de -1 a 1 na maior parte da região, e chegou a 4 vezes no Nordeste. As intensidades médias dos eventos de seca e de chuva foram inversamente proporcionais a escala de tempo do SPI. As maiores frequências dos eventos severos e extremos de seca e de chuva, em todos os conjuntos de dados, ocorreram no inverno e na primavera. A tendência desses eventos mostrou-se bastante similar para os SPIs 3, 6 e 12, mas apresentaram diferenças entre os dois conjuntos de dados analisados. A década de 90, segundo o GPCC, apresentou elevada frequência de eventos severos e extremos de seca, que não foi observada na rodada 20C do ECHAM5. No século XXI os eventos severos e extremos de seca e chuva apresentam comportamento similar ao século XX. Apesar do cenário A2 ser mais pessimista em relação ao A1B, ele apresentou uma menor frequência de eventos severos e extremos de chuva. Ambos os cenários indicam uma tendência significativa de decréscimo na ocorrência dos eventos severos e extremos em grande parte da região Amazônica e no litoral do Nordeste e tendências positivas no noroeste e sudeste da Amazônia.

FREQUENCY OF MONTHLY EXTREME DRY AND WET EVENTS IN THE NORTH AND NORTHEAST OF BRAZIL AND THEIRS TRENDS IN THE XXI CENTURY USING SPI

ABSTRACT

The frequencies and trends of extreme and severe dry and wet events in the North and Northeast of Brazil in the last century were analyzed using monthly precipitation GPCP data (Global Precipitation Climatology Centre) and ECHAM5 data in the 20C run. The predictions for the XXI century were made with ECHAM5 model for two distinct scenarios, an intermediary scenario (A1B) and one more pessimist (A2). The frequencies of the different dry and wet events were obtained through the Standard Precipitation Index (SPI) at the scales of 3, 6 and 12 months. The seasonal analysis of the spatial variability of the frequencies and intensities of dry and wet events, as well as its tendencies through the century, were made for the SPIs 3, 6 and 12, for all data ensembles. The ECHAM5 model did not reproduced well the average annual precipitation when compared to the climatology of observations obtained from the GPCP. The bias of the annual average precipitation varied from -1 to 1 in the major part of the region, and reach up to 4 times in the Northeast. The average intensities of the events of drought and rain was inversely proportional to the time scale of the SPI. The highest frequencies of extreme and severe events of drought and rain, in all of the data set, occurred during winter and spring. The tendency of these events showed similar for the SPIs 3, 6 and 12, and showed differences for both ensembles of analyzed data. The 90's decade, according to the GPCP, presented an anomalous behavior, due to the high frequencies of extreme and severe drought events, that was not observed in the 20C run of ECHAM5. In the XXI century the dry and wet events showed a similar behavior that for the XX century. In spite of the A2 scenario being more pessimist in comparison with the A1B, it presented a lower frequency of extreme and severe rainy events. Both scenarios showed a significant trend of decrease in the occurrence of extreme and severe events in a great part of the Amazon region and in the coast of the Northeast region, and a positive trend in the Northwest and Southeast of the Amazon region.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 4.1– Distribuição dos pontos de grade na área de estudo.	20
Figura 4.2 - Exemplo de uma transformação equiprobabilística de uma distribuição gama ajustada para uma distribuição normal. Variável é a média de precipitação de 3 meses no sudoeste da Inglaterra.....	29
Figura 5.1 –Precipitações médias anuais obtidas com dados do GPCC, no período de 1901 a 2000, para as regiões Norte e Nordeste do Brasil.....	36
Figura 5.2–Precipitações médias anuais obtidas com dados do modelo ECHAM5, na rodada 20C, no período de 1901 a 2000, para as regiões Norte e Nordeste do Brasil.....	37
Figura 5.3– Vieses percentuais das precipitações anuais médias anuais do modelo ECHAM5 (20C) em relação aos dados do GPCC, no período de 1901-2000.	38
Figura 5.4– Teste t de Student para as diferenças entre as precipitações médias anuais do GPCC e do ECHAM5 (20C). As áreas sombreadas são significativamente diferentes a 5% pelo teste t Student.....	39
Figura 5.5– Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.	40
Figura 5.6- Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.	41
Figura 5.7 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.....	42
Figura 5.8 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 (20C), no período de 1901-2000.....	44
Figura 5.9 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 (20C), no período de 1901-2000.....	45

Figura 5.10 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 (20C), no período de 1901-2000.	46
Figura 5.11– Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.....	49
Figura 5.12 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.....	50
Figura 5.13 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.	51
Figura 5.14 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.....	54
Figura 5.15 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.....	55
Figura 5.16 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.....	56
Figura 5.17 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.	59
Figura 5.18 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.	60
Figura 5.19 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e	

extremos de chuva pelo SPI-12 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.....	61
Figura 5.20 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.	64
Figura 5.21 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.	65
Figura 5.22 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.	66
Figura 5.23 - Tendências nas frequências de eventos secos/chuvosos, avaliados pelo teste de Mann-Kendall, pelos SPIs 3 (a, b), 6 (c, d) e 12 (e, f), para o século XX, obtidos com dados do GPCC (esquerda) e do modelo ECHAM5 20C (direita). Valores superiores a 2 (coloridos) indicam tendências significativa a 5% de aumento e inferiores a -2 de decréscimo.	70
Figura 5.24 – Frequências decenais dos eventos severos e extremos de chuva, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901 a 2000.....	73
Figura 5.25 - Frequências decenais dos eventos severos e extremos de seca, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901 a 2000.....	74
Figura 5.26 - Frequências decenais dos eventos severos e extremos de chuva, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no experimento 20C, no período de 1901 a 2000.	76
Figura 5.27 - Frequência decenais dos eventos severos e extremos de seca, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no experimento 20C, no período de 1901 a 2000.	77
Figura 5.28– Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, no período de 2001-2100.	80
Figura 5.29 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, no período de 2001-2100.	81

- Figura 5.30 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, no período de 2001-2100. 82
- Figura 5.31 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A2, no período de 2001-2100. . 83
- Figura 5.32 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A2, no período de 2001-2100. . 84
- Figura 5.33 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A2, no período de 2001-2100. 85
- Figura 5.34 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100. 88
- Figura 5.35 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100. 89
- Figura 5.36 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100. 90
- Figura 5.37 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100. 92
- Figura 5.38 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100. 93
- Figura 5.39 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e

extremos de seca pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.	94
Figura 5.40 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.	96
Figura 5.41 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.	97
Figura 5.42 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.	98
Figura 5.43 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.	100
Figura 5.44 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.	101
Figura 5.45 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.	102
Figura 5.46– Tendências futuras na frequências de eventos secos/chuvosos, avaliados pelo teste de Mann-Kendall, pelos SPIs 3 (a, b), 6 (c, d) e 12 (e, f), derivados das projeções de precipitação para o modelo ECHAM5 para o século XXI nos cenários A1B (esquerda) e A2 (direita). Valores superiores a 2 indicam tendências significativas a 5% de aumento e inferiores a -2 de decréscimo.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do SPI segundo McKee <i>et al.</i> (1993)	29
---	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CRU	Climatic Research Unit
CCA	Coeficiente de Correlação de Anomalias
DJF	Dezembro, janeiro e fevereiro
ENOS	El- Niño-Oscilação Sul
GEO	Grupo de Observações da Terra
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Junho, julho e agosto
MK	Mann-Kendall
MAM	Março, abril e maio
NE	Nordeste Brasileiro
NNE	Norte do Nordeste
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PDSI	Palmer Drought Severity Index
ppm	Partes por milhão
RAI	Rainfall Anomaly Index
SON	Setembro, outubro e novembro
TAR	Third Assessment Report
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura
VCANs	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivos Específicos	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1. Região Norte e Nordeste do Brasil	7
3.2. Precipitação	7
3.3. Climatologia das precipitações na região Norte do Brasil	8
3.4. Climatologia das precipitações na região Nordeste do Brasil	9
3.5. Secas	10
3.6. Índices para avaliação de escassez ou excedentes de precipitação	12
3.6.1. Índice de Precipitação Normalizada.....	12
3.7. Tendências das precipitações no século XXI	16
4. DADOS E METODOLOGIA	19
4.1. Área de Estudo	19
4.2. Dados Utilizados	20
4.2.1. GPCC.....	20
4.2.2. Modelo: ECHAM5/MPI-OM	22
4.3. Cálculo do Índice de Precipitação Normalizada (SPI)	24

4.4.	Análises estatísticas	30
4.4.1.	Teste t-Student	30
4.4.2.	Teste de Mann-Kendall	31
4.5.	Estatísticas Adicionais	32
4.5.1.	Viés da precipitação.....	32
4.5.2.	Coeficiente de Correlação de Anomalias	33
4.5.3.	Médias sazonais	34
4.5.4.	Médias decenais.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1.	Século XX - GPCC e 20C	35
5.1.1.	Variabilidade da Precipitação Anual	35
5.1.2.	Frequências e Intensidades médias anuais dos SPIs.....	39
5.1.3.	Frequências e intensidades sazonais dos SPIs.....	47
5.1.4.	Tendência nas frequências de eventos secos e chuvosos dos SPIs 3, 6 e 12..	68
5.1.5.	Frequências Decenais dos eventos severos e extremos de seca e de chuva pelo SPI-6.....	71
5.2.	Projeções para o Século XXI – Cenários A1B e A2	79
5.2.1.	Frequências e intensidades anuais dos SPIs	79
5.2.2.	Frequências e intensidades sazonais dos SPIs.....	86
5.2.3.	Tendências futuras nas frequências de eventos secos e chuvosos dos SPIs 3, 6 e 12.....	104
6.	CONCLUSÕES	107
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	109
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, devido a sua grande extensão territorial, possui diferenciados regimes de precipitação. De norte a sul encontra-se uma grande variedade de climas com distintas características regionais. Na região Norte do Brasil diversos trabalhos mostram que existem diferenças significativas na distribuição temporal, espacial e na natureza das precipitações. Marengo e Nobre (2009) numa revisão sobre a climatologia da Amazônia esta região, onde se situa a floresta amazônica, observa-se um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca. Ainda segundo esses autores, esta região apresenta significativa heterogeneidade espacial e sazonal da pluviosidade, sendo a região com maior total pluviométrico anual. Dessa forma, o conhecimento conciso da distribuição espaço-temporal da precipitação é de extrema importância para o entendimento dos sistemas locais, de meso e grande escala que atingem a região, contribuindo então para a evolução do clima e da sustentabilidade dos seus ecossistemas como um todo.

De acordo Molion e Bernardo (2002) a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o Nordeste Brasileiro (NE), tanto nas escalas espacial quanto temporal, está intimamente relacionada com as mudanças nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico. Dentre os mecanismos que produzem chuva no Nordeste Brasileiro, destacam-se os sistemas frontais, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os complexos convectivos e brisas marinha e terrestre, dentre outros (MORAES, 2003). Kousky (1979) afirma que o sistema de brisa marítima/terrestre é um dos principais mecanismos responsáveis pelo regime de precipitação observado no Nordeste do Brasil (NE). O setor norte do Nordeste do Brasil (NE), particularmente o semi-árido, constitui-se numa região extremamente anômala quanto à distribuição de chuvas, em relação a outras regiões localizadas nas mesmas latitudes (como é o caso da Amazônia).

O estudo da ocorrência de precipitações intensas e escassas tem importante papel sócio-econômico, ambientais, dentre outros. Períodos em que são observadas chuvas

intensas e severas afetam a população de uma maneira geral, já que geram enchentes em várias cidades. Por outro lado, períodos de secas prolongadas atingem a agricultura, a pecuária, o abastecimento de energia (produzido por hidrelétricas) e o abastecimento de água.

Dessa forma, o estudo da distribuição, quantidade e monitoramento das precipitações, têm sido estudadas em diversas pesquisas. Para isso são utilizados modelos estatísticos e também índices de precipitação como: o de Severidade de Secas (Palmer Drought Severity Index, PDSI), o de Anomalia de Precipitação (Rainfall Anomaly Index, RAI), o de Precipitação Normalizada ("Standardized Precipitation Index", SPI), dentre outros.

O índice de precipitação normalizada (SPI) foi proposto por Mckee *et al.*(1993) para quantificar o déficit de precipitação nas diversas escalas de tempo, e comparar regiões com diferentes características climáticas, podendo também ser utilizado para excedentes de precipitação. Esse índice pode ser calculado em diversas escalas de tempo (1, 2, 3, 6, 12, 24, ... meses). Apesar de sua origem na América do Norte, a utilização desse índice se encontra em expansão por todo mundo. No Brasil, o SPI é um dos métodos preconizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para caracterizar anomalias de precipitação. Desde janeiro de 2002 o SPI vem sendo calculado para todo país e, recentemente, esses resultados têm sido disponibilizados para o público em forma de mapas.

Alguns pesquisadores afirmam que o Brasil é vulnerável às mudanças climáticas atuais e mais ainda às que se projetam para o futuro, especialmente quanto aos extremos climáticos. As áreas mais vulneráveis compreendem a Amazônia e o Nordeste do Brasil, como mostrado em estudos recentes (MARENGO, 2007; AMBRIZZI *et al.*, 2007; MARENGO *et al.*, 2007).

Segundo o IPCC (IPCC, 2007a), os impactos sócio-ambientais das mudanças climáticas devem aumentar significativamente até o final do século, já que todos os

modelos climáticos prevêm um clima mais quente, excesso ou falta de chuva em diferentes áreas, um ciclo hidrológico mais intenso e um aumento do nível do mar, mesmo no cenário mais otimista. É importante ressaltar, contudo, que os diversos modelos utilizados no IPCC-AR4 divergem com relação à intensidade destas mudanças e quando e onde irão acontecer, especialmente para precipitação (IPCC, 2007b). Dessa forma, o conhecimento sobre possíveis cenários climático-hidrológicos futuros e as suas incertezas pode ajudar a estimar demandas de água no futuro e também a definir políticas ambientais de uso e gerenciamento de água para o futuro.

2. OBJETIVOS

Realizar uma climatologia para século XX das frequências de eventos severos e extremos, de seca e chuva, usando o índice de precipitação normalizada (SPI) nas escalas 3, 6 e 12 meses computado a partir de dados de reanálise do GPCC e do modelo ECHAM5 e avaliar as tendências futuras desses eventos no século XXI para dois diferentes cenários do IPCC, nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

2.1. Objetivos Específicos

- Avaliar a variabilidade temporal e regional das frequências dos eventos secos e chuvosos severos e extremos nas escalas de tempo de 3, 6 e 12 meses usando os SPIs computados a partir dos dados de precipitação do GPCC e do modelo ECHAM5 para o século passado (século XX) e projeções do modelo ECHAM5 para o século XXI, em dois cenários do IPCC;
- Avaliar comparativamente as frequências e tendências regionais dos eventos severos e extremos, de seca e de chuva, nas suas diversas escalas de tempo no século XX e suas tendências para o século XXI nos dois cenários considerados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Região Norte e Nordeste do Brasil

A região norte do Brasil é formada por sete estados: Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, perfaz uma área de aproximadamente 3.869.637 km² e é com a região de maior extensão territorial. Essa área compreende grande parte da Amazônia, representando a maior extensão de floresta quente e úmida do planeta, no qual as precipitações podem atingir até 3000 mm.

O Nordeste do Brasil (NE) engloba os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Piauí, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe, possuindo uma área de cerca de 1.558.196 km². Esta região é banhada ao norte e a leste pelo Atlântico. Apesar dessa localização, o NE apresenta uma diversidade no clima devido à atuação de diversos mecanismos físicos que interagem e são responsáveis pela distribuição de chuvas nessa região.

3.2. Precipitação

A precipitação é um elemento meteorológico de fundamental importância para definição do clima de uma região, e que possui uma grande variação na região em estudo (tanto espacial, quanto temporal).

Moraes que (2003) afirma a precipitação na região tropical é o elemento meteorológico de maior importância, pois é o que apresenta maior variação em termos de mudanças sazonais, sendo também o principal fator na utilização da subdivisão do clima numa região. É diferente de outros elementos que pouco variam, como, por exemplo, temperatura e pressão.

3.3. Climatologia das precipitações na região Norte do Brasil

De acordo com Nimer (1979) a região Norte possui uma homogeneidade espacial e sazonal da temperatura, porém isso não ocorre com a pluviosidade. O autor ainda afirma que esta é a região com maior total pluviométrico anual, sendo mais notável no litoral do Amapá, na foz do rio Amazonas e no setor ocidental da região, onde a precipitação excede 3000 mm.

De acordo com Nobre (1983) nesta região são encontrados três núcleos de precipitação abundante. O primeiro localizado no noroeste da Amazônia, com chuvas acima de 3000 mm/ano, que estaria associada à condensação do ar úmido trazido pelos ventos de leste da ZCIT, que são elevados quando o escoamento sobe os Andes. A chuva no noroeste da Amazônia pode ser entendida como resposta à flutuação dinâmica do centro quase permanente de convecção nessa região, ocorrendo principalmente no trimestre abril, maio e junho. O segundo núcleo, localizado na parte central da Amazônia, com precipitação de 2500 mm/ano, onde a estação chuvosa ocorre em março, abril e maio. E o terceiro, na parte leste da Amazônica, próximo à Belém, com precipitação de 2800 mm/ano, com máximo nos meses de fevereiro, março e abril, que de acordo com Kousky (1979, 1980) estão associados às linhas de estabilidade que se formam ao longo da costa e são forçadas pela brisa marítima durante o fim de tarde e ZCIT que modulam a chuva na região.

De acordo com Virji (1981) a penetração de sistemas frontais, o deslocamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e a Alta da Bolívia influenciam as chuvas na região. Conforme Vianello e Alves (1991) os mecanismos dinâmicos que produzem precipitação na região Norte do Brasil, resultam da combinação ou da atuação predominante da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), das linhas de instabilidade, da penetração de sistemas frontais, da fonte de vapor d'água representada pela floresta amazônica e pela atuação da cordilheira dos Andes.

3.4. Climatologia das precipitações na região Nordeste do Brasil

O NE apresenta uma variabilidade intrasazonal, com pelo menos três regimes de precipitação para três áreas distintas: uma área mais ao norte, onde as precipitações significativas ocorrem no bimestre março-abril; a faixa litorânea leste do Nordeste que se estende desde o Rio Grande do Norte até o sul da Bahia, com período chuvoso entre maio-julho; uma terceira região que abrange grande parte da Bahia e que tem máximos de precipitação nos meses de novembro e dezembro (ALVES *et al.*, 2001; MENEZES *et al.*, 2003).

Conforme Rao *et al.* (1993) no norte da região a estação chuvosa principal é de março a maio, no sul e sudeste as chuvas ocorrem principalmente durante o período de dezembro a fevereiro e no leste a estação chuvosa é de maio a julho. A principal estação chuvosa do NE, incluindo o norte e leste da região, que explica 60% da chuva anual é de abril a julho e a estação seca, para a maior parte da região, ocorre de setembro a dezembro.

Hastenrath and Lamb (1977) mostram que o máximo de precipitação no norte do Nordeste, deve-se ao deslocamento anual da ZCIT para latitudes mais ao sul no Hemisfério Norte, o que afeta o NE, principalmente nos meses de abril e maio. Kousky (1979) associa o máximo no sul da região à penetração de frentes frias vindas do sul que alcançam latitudes mais baixas nos meses de novembro a fevereiro. O mesmo afirma ainda que na região costeira, o máximo de maio a julho está ligado à maior atividade de circulação de brisa, através de bandas de nebulosidade média para o continente e à ação das frentes frias remanescentes que se propagam ao longo da costa.

Molion e Bernardo (2002) realizando uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro identificaram o norte do NE como o Ceará e partes do Rio Grande do Norte, Piauí, Maranhão e oeste da Paraíba e de Pernambuco, e afirmou que os índices pluviométricos dessa região variam de 400 mm/ano (interior) a mais de 2.000 mm/ano (litoral), e os meses mais de fevereiro a maio. O sul do NE (SNE) os autores

determinaram como praticamente toda a Bahia, norte de Minas Gerais, noroeste do Espírito Santo, e as partes sul do Maranhão e Piauí e extremo sudoeste de Pernambuco e sugeriram que os índices pluviométricos variam de 600 mm/ano (interior) a mais de 3.000 mm/ano (litoral) e possui uma quadra chuvosa de dezembro a março, e está associada com as incursões dos sistemas frontais na direção equatorial. De acordo com estes mesmo autores os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no NE podem ser classificados em mecanismos de grande escala, em geral responsáveis pela maior parte da precipitação observada, e mecanismos de meso e microescalas, que completam os totais observados. Dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se os sistemas frontais e a zona de convergência intertropical (ZCIT); os mecanismos de mesoescala incluem perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios, complexos convectivos e brisas marinha e terrestre, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas se constituem fenômenos da microescala.

Pensar em precipitação na região Nordeste é pensar em alta variabilidade temporal e espacial. Em termos de variabilidade temporal podemos dividir as escalas de tempo em interanual e a intra-sazonal. A variabilidade interanual é associada a fenômenos de grande escala, tais como o El-Niño-Oscilação Sul (ENOS), o Dipolo do Atlântico e a Zona de Convergência Intertropical, sendo que está intimamente relacionada com mudanças na configuração da circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera. A variabilidade intra-sazonal da precipitação é influenciada por oscilações que variam entre 7 e 60 dias, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), Sistemas Frontais, distúrbios de leste e brisas (Unemet, 2005).

3.5. Secas

Os desastres naturais fazem parte do ambiente em que vivemos afetando a vida de um grande número de pessoas em todo o mundo. Em geral, suas principais implicações estão relacionadas a prejuízos materiais, econômicos e perdas de vidas humanas. Dentre todos os desastres naturais, aproximadamente 85% estão diretamente

relacionados ou associados com adversidades climáticas, sendo a seca o fenômeno ambiental mais impactante (KOGAN, 1997). O mesmo autor afirma ainda que a determinação de informações, tais como início da seca, sua extensão, intensidade, duração e impactos causados, podem minimizar consideravelmente seus efeitos.

No decorrer dos anos os pesquisadores perceberam que diversos setores da sociedade possuem em relação com essa anomalia climática. Essa evolução resultou na definição de tipos de seca, entre os quais se pode citar: a agrícola, a meteorológica, a hidrológica e a socioeconômica. A seca meteorológica é definida como o resultado de um déficit de precipitação, isto é, quando o valor de chuva acumulado em um período e em uma área encontra-se significativamente abaixo do valor climatologicamente esperado. Enquanto a hidrológica é uma deficiência no volume de água disponível, incluindo lençol freático, reservatórios e rios (WILHITE, 2000). A seca agrícola está relacionada à baixa disponibilidade de umidade no solo, a qual torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas por evapotranspiração (World Meteorological Organization, 1975). Keyantash e Dracup (2002) afirmam que, a menos que a demanda por água da sociedade exceda significativamente o suprimento natural, a seca socioeconômica é uma consequência dos demais tipos de seca, sendo caracterizada monetariamente.

A seca meteorológica pode se desenvolver rapidamente e "acabar abruptamente" enquanto a hidrológica necessita de um período prolongado de déficit de precipitação pluvial, entretanto persistirá por mais tempo que a meteorológica. Já a seca agrícola pode estar relacionada às fases de desenvolvimento/crescimento dos vegetais (HEIM JUNIOR, 2002).

Segundo Wilhite e Glantz (1985), todos os tipos de seca são originados por um déficit de precipitação que resulta em uma baixa disponibilidade hídrica para a atividade que a requer.

3.6. Índices para avaliação de escassez ou excedentes de precipitação

Diferentes métodos vêm sendo utilizados para detectar e monitorar a seca. Os critérios para determinação do mais adequado e eficiente para se adotar dependem: da definição de seca, da aplicação específica, da amplitude da área de interesse e da consistência dos dados básicos de entrada (VIAU *et al.*, 2000). Dentre os principais índices existentes para quantificar e monitorar a seca estão: o Índice de Severidade de Palmer, o Índice de Anomalia de Seca, o Índice de Precipitação Normalizada, dentre outros (BRUNINI *et al.*, 2001).

3.6.1. Índice de Precipitação Normalizada

O Índice de Precipitação Normalizada ("Standardized Precipitation Index", SPI) proposto por McKee *et al.* (1993) foi elaborado a fim de quantificar o déficit de precipitação nas diversas escalas de tempo, podendo também ser utilizado para comparar regiões com diferentes características climáticas. O SPI considera a natureza estocástica da seca e é, portanto, uma boa medida das secas meteorológicas de curta e longa duração (NARASIMHAN e SRINIVASAN, 2005), permitindo também a comparação entre locais e climas diferentes (PAULO *et al.*, 2005).

O SPI é calculado pelo ajuste da função densidade de probabilidade para a distribuição de frequência de precipitação resumido sobre a escala de tempo de interesse. Isto é realizado separadamente para cada mês e para cada localização no espaço. Cada função densidade de probabilidade é depois transformada na distribuição normal. Assim, o SPI é dito ser normalizado no local e escala de tempo, compartilhando os benefícios da padronização descrita para o PDSI (LLOYD-HUGHES e SAUNDERS, 2002). Dessa forma, a média do SPI para um determinado local e período assume valor

zero. Valores positivos de SPI indicam precipitação maior do que a precipitação mediana, enquanto valores negativos indicam precipitação abaixo da mediana.

O índice SPI foi desenvolvido com a finalidade de quantificar anomalias de precipitação tomando por base os registros históricos observados. Conceitualmente, o índice SPI está relacionado ao número de desvios padrão que a precipitação acumulada para uma determinada escala de tempo (1 mês, 3 meses, 6 meses, etc.) se afasta da média climatológica para uma variável aleatória com distribuição normal (MORAES *et al.*, 2008). De maneira geral, o SPI denota quantidade de precipitação para uma dada escala de tempo, dando a indicação da relação dessa quantidade com uma distribuição normal, indicando então se vai ocorrer um período seco ou chuvoso.

Moraes *et al.* (2008) ainda afirmam que a versatilidade do SPI está na capacidade de identificar episódios de seca para múltiplas escalas de tempo, ou seja, 1 mês, 3 meses, 6 meses, etc. Nesse sentido, o SPI1 está relacionado ao déficit de precipitação mensal, ou seja, quanto o valor de precipitação em um determinado mês se afastou da média climatológica observada historicamente para aquele mês. Enquanto o SPI3 está associado ao déficit de precipitação de 3 meses e assim por diante. Anomalias de precipitação em diferentes escalas refletem impactos sobre a disponibilidade de diferentes fontes de água (conteúdo de água no solo, águas superficiais e águas subterrâneas). Dessa forma, a possibilidade de identificar anomalias de precipitação para diferentes escalas de tempo, pode permitir o direcionamento de ações mitigadoras para setores específicos como produção agrícola, pecuária, consumo humano, dentre outros.

Hayes *et al.* (1999) discutiu as vantagens e desvantagens de usar o SPI para caracterizar a severidade da seca. De acordo com esse autor o SPI tem três vantagens principais. A primeira e principal vantagem é a simplicidade, já que é baseado exclusivamente em precipitação e requer apenas o cálculo de dois parâmetros, em comparação com os 68 termos computacionais necessários para descrever o PDSI; o SPI pode ser utilizado de forma eficaz, tanto no verão quanto no inverno. Outra vantagem

do SPI é a sua escala de tempo variável, que permite descrever as condições de seca importante para um gama de aplicações da meteorologia, agricultura e hidrologia; esta versatilidade temporal também é útil para a análise da dinâmica da secas, especialmente a determinação do início até o final, que sempre foi difícil conseguir com outros índices. Outra vantagem é a padronização, que garante que a frequência de eventos extremos em qualquer local e em qualquer escala de tempo são consistentes.

O SPI também tem desvantagens; uma delas é um problema associado a quantidade e confiabilidade dos dados utilizados para ajustar a distribuição; McKee *et al.* (1993) recomendaram o uso de pelo menos 30 anos de dados de alta qualidade. Outra limitação do SPI decorre da natureza padronizada do índice em si; ou seja, secas extremas (ou qualquer outro limiar da seca), medido pelo SPI, quando considerado um período de tempo mais um longo, ocorrerá com a mesma frequência em todos os locais; assim, o SPI é capaz de identificar as regiões que podem ser “mais propensas” a seca do que outros. Além disso, um problema pode surgir quando se aplica o SPI em escalas de tempo curto (1, 2 ou 3 meses) para regiões de baixa precipitação sazonal. Nestes casos, o SPI pode resultar em grandes valores positivos ou negativos.

Segundo Guttman (1998) comparando o PDSI e o SPI, observou que o SPI é recomendado como um índice de seca porque é simples, especialmente coerente (invariante), e pode ser adaptado para períodos de tempo de interesse de um usuário (por exemplo, três meses para o ciclo de vida de uma cultura, ou vários anos para o armazenamento de água). Afirmou ainda que o SPI representa melhor os possíveis períodos de déficit ou excesso de precipitação quando comparado ao PDSI.

Autores como, McKee *et al.* (1993; 1995), Hayes *et al.* (1999) e Keyantash e Dracup (2002) observaram que o SPI é uma ferramenta que vai otimizar o "tempo de identificação" de condições emergentes de uma seca, devendo por esse fato substituir naturalmente o PDSI como ferramenta de monitoramento.

Bussay *et al.* (1998) e Szalai e Szinell (2000) avaliaram a utilidade do SPI para a descrição da seca na Hungria. Eles concluíram que o SPI foi adequado para quantificar a maioria dos tipos de eventos de seca. Forte relação com o nível de água no solo foram encontrada em escalas de tempo de 5-24 meses.

De acordo com Hayes (1999) o uso do SPI tem-se mostrado bastante útil no monitoramento de secas nos EUA, pela sua flexibilidade, simplicidade de cálculo e interpretação. Lana *et al.* (2001) usou recentemente o SPI para investigar padrões de precipitação na região da Catalunha, Espanha.

Ainda assim alguns autores já desenvolvem têm utilizado o SPI para monitorar secas em determinadas regiões, como: Brunini *et al.* (2001) estudaram o Índice Padronizado da Seca (SPI) para o monitoramento espacial e temporal da seca no Estado de São Paulo; Santos e Anjos (2001) utilizaram para o estado de Pernambuco; outros autores utilizaram tanto o SPI como o PDSI para avaliar períodos de seca, como: Sansigolo (2004) que comparou as características espectrais do PDSI e SPI no município de Piracicaba, São Paulo; e Blain *et al.* (2005) que avaliaram o PDSI e SPI para as diversas condições climáticas do Estado de São Paulo.

Keyantash e Dracup (2002) realizando um estudo para o estado de Oregon nos EUA comparou diferentes índices de seca entre eles: PDSI, RAI, SPI, e percebeu que para seca meteorológica o SPI é o que melhor consegue estimar a severidade de uma seca. Lloyd-Hughes e Saunders (2002) concluíram que o SPI tem uma padronização espacial mais efetiva na Europa do que o PDSI. De acordo com Sansigolo (2004) o interesse na utilização do SPI e PDSI no monitoramento de secas é relativamente recente no Brasil, principalmente em relação ao SPI. Aproximadamente 60 países usam o SPI para avaliação da severidade das secas (WU *et al.* 2005).

Li *et al.* (2008) utilizando dados do CRU (Climatic Research Unit) avaliou as mudanças observadas no SPI ao longo do século XX e suas implicações para futuras alterações climáticas na Amazônia (Rondônia), e observaram uma tendência negativa

no SPI sobre o sul da Amazônia entre 1970-1999, o que aumentaria as condições de seca. Estes autores afirmam que este resultado pode estar associado a uma possível causa antropogênica no final do século passado, e que no atual serão observadas mudanças em relação ao século XX já que SPIs extremos de seca se tornarão mais frequentes.

3.7. Tendências das precipitações no século XXI

O Quarto Relatório Científico do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas ("Intergovernmental Panel on Climate Change" - IPCC), AR4, (TRENBERTH *et al.*, 2007; MEEHL *et al.*, 2007), divulgado em fevereiro de 2007, apresenta evidências de mudanças de clima que podem afetar significativamente o planeta, especialmente nos extremos climáticos, com maior rigor nos países menos desenvolvidos na região tropical.

As evidências científicas divulgadas por este relatório sugerem que é muito provável, que a maior parte do aumento na temperatura global média observada no planeta, desde meados do século XX possa ser explicada pelo aumento nas concentrações de gases de efeito estufa (IPCC, 2007a), associada às atividades antrópicas. Neste contexto, observam-se mudanças significativas no clima e extremos climáticos, e os seus impactos nos diversos sistemas físicos e biológicos. No clima estas mudanças em regimes de extremos de curto e longo prazo, poderiam ser semelhantes aos extremos de chuva e temperatura que se vêm registrando na América do Sul, como por exemplo, as secas de 2005 na Amazônia (MARENGO *et al.*, 2007a).

De acordo com Marengo (2004) para a Amazônia não se observa uma tendência clara de aumento ou redução nas chuvas (em razão do desmatamento), apresentando mais uma tendência de variações interdecadais contrastantes entre a Amazônia do Norte e do Sul.

As projeções de mudança nos regimes e distribuição de precipitação, provenientes dos modelos globais do IPCC AR4, não são conclusivas e as incertezas ainda são grandes, pois dependem muito dos modelos e das regiões consideradas. Na Amazônia e no Nordeste, ainda que alguns modelos climáticos globais do IPCC AR4 apresentem reduções drásticas de precipitações, outros modelos apresentam aumento. A média de todos os modelos, por sua vez, é indicativa de maior probabilidade de redução de chuva em regiões como o leste e o nordeste da Amazônia. De acordo com IPCC AR4 haverá reduções na precipitação no Norte e no Nordeste do Brasil durante os meses de inverno JJA (junho, julho, agosto), o que pode comprometer a chuva na região Leste do Nordeste, que apresenta o pico da estação chuvosa nessa época do ano (MEEHL *et al.*, 2007).

Cox *et al.* (2008) ainda afirma que as chances de ocorrerem períodos de intensa seca na região da Amazônia podem aumentar dos atuais 5% (uma forte estiagem a cada vinte anos) para 50% em 2030 e até 90% em 2100.

As projeções de clima futuro, liberadas pelo Quarto Relatório do IPCC AR4 (IPCC, 2007 a, b), e pelo Relatório do Clima do INPE (MARENGO *et al.*, 2007 a e b; AMBRIZZI *et al.*, 2007) têm mostrado cenários de secas e eventos extremos de chuva em algumas regiões do Brasil. Esses relatórios apontam que uma região bastante vulnerável, do ponto de vista social à mudança de clima, seria o interior de Nordeste, conhecida como semi-árido, ou simplesmente o “sertão”. Reduções de chuva aparecem na maioria dos modelos globais do IPCC AR4. Isso acarreta reduções de até 15-20% nas vazões do rio São Francisco.

O Relatório do Clima do Brasil, produzido em 2007 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), estudou as mudanças de clima no Brasil, e para o Nordeste, para finais do século XXI. Este relatório usando modelos regionais de até 50 km de resolução aninhado no modelo global de HadAM3 do Centro Climático do Reino Unido (Hadley Centre). Segundo este relatório do INPE, os possíveis impactos da mudança de clima, considerando os cenários otimistas e pessimistas propostos pelo IPCC: No

cenário climático pessimista, as chuvas de reduziriam entre 15-20% (2-4 mm/dia) no Nordeste até o final do século XXI; Enquanto no cenário otimista, a chuva ficaria entre 10-15% (1-2 mm/dia) menor que no presente.

Em relação a eventos extremos de clima, o impacto mais importante seria um aumento no índice de dias consecutivos de secas (CDD - indicadores dos chamados “veranicos” - Estiagem durante a estação chuvosa, com dias de intenso calor e insolação), chegando até mais de 30 dias/ano entre 2071- 2100 no cenário A2 (pessimista) comparado à 12 dias/ano no clima do presente, assim como uma redução de dias com extremos intensos de chuva, especialmente no interior do Nordeste e no litoral de Piauí e na Bahia.

4. DADOS E METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho esta dividida em quatro etapas distintas. A primeira é apresentação da área de trabalho. A segunda refere-se à descrição dos dados utilizados para realização do trabalho. A terceira esta relacionada ao cálculo do Índice de Precipitação Normalizada. Na última parte, são descritas as análises estatísticas, pelo teste t-Student, para as diferenças entre médias, e o teste de Mann-Kendall para as tendências.

4.1. Área de Estudo

O estudo será realizado para as regiões Norte e Nordeste do Brasil. A escolha destas regiões deve-se ao fato que a região Norte inclui a maior extensão de floresta tropical da Terra, superior a 5 milhões de quilômetros quadrados, e responde por aproximadamente um quarto das espécies animais e vegetais do planeta. Além disso, a floresta Amazônica funciona como regulador climático em escala global através dos balanços de energia e hídrico. Além disso, a floresta exerce uma forte influência sobre a circulação atmosférica e a precipitação local. A Região Nordeste possui uma diversidade de climas que pode ser associado à distribuição de chuvas nessa região, que segundo Kayano e Andreoli (2009) são três: litorâneo úmido (do litoral da Bahia ao Rio Grande do Norte); tropical (em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí); e tropical semi-árido (em todo sertão nordestino), que influencia a produção agrícola com um crescimento expressivo nos últimos tempos.

Os dados utilizados tanto do GPCC como do modelo, totalizaram 210 pontos de grade, espaçados de $1,875^\circ$, numa região compreendida entre as latitudes de 15°S a 5°N e as longitudes de 75°O a 35°O (como mostrado na Figura 4.1).

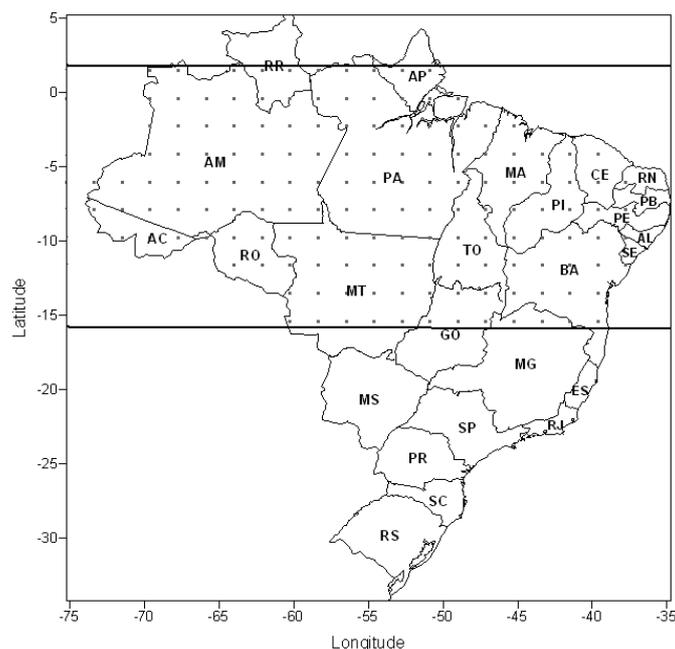


Figura 4.1– Distribuição dos pontos de grade na área de estudo.

4.2. Dados Utilizados

Para o cálculo do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) nas suas diferentes escalas foram usados dois conjuntos de dados: Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), representado as observações no século XX, e do modelo global acoplado oceano-atmosfera ECHAM5, representando as observações no século XX e suas projeções para o século XXI em dois cenários.

4.2.1. GPCC

O GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) é uma análise global de precipitação mensal sobre a superfície da terra baseado nos dados pluviométricos *in situ*. O GPCC foi estabelecido em 1989, a pedido da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e é operado pelo Serviço Meteorológico Nacional da Alemanha.

Todos os produtos do GPCC, baseados nas precipitações mensais em ponto de grade fixa, estão disponíveis em resoluções espaciais de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ e $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude por longitude geográfica. Os diferentes produtos do GPCC são usados no mundo inteiro por diversas instituições, em particular no contexto de pesquisas relacionadas à água e clima, como: OMM, UNESCO (Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura), GEO (Grupo de Observações da Terra), dentre outros (SCHNEIDER *et al.*, 2008).

A precisão das análises baseadas nas precipitações pluviométricas depende principalmente da densidade espacial das estações a serem utilizadas. Para calcular a precipitação média mensal de área com grade $2,5^\circ$ e com um erro amostral inferior a 10%, são necessárias entre 8 e 16 estações (WMO 1985, Rudolf *et al.* 1994). Para cobrir a superfície terrestre mundial com dados em grade desta precisão, são necessárias 40.000 estações distribuídas igualmente em todo o mundo.

De acordo com Gomes (2008) os dados utilizados do GPCC sobre o Brasil são de pluviômetros dos Serviços Meteorológico e/ou Hidrológico com a Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), entre outros com um total de aproximadamente 50.026 estações de coleta de dados em todo o globo. Entretanto, este conjunto de dados apresenta uma baixa densidade de pluviômetros na Amazônia Oriental em relação às demais localizações do globo, o que pode resultar em incertezas na real distribuição de chuvas na região.

Os dados mensais de precipitação do GPCC utilizados neste trabalho abrangem o período 1901-2007, numa resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, que foram degradados para a resolução do modelo ECHAM5 e passaram para $1,875^\circ \times 1,875^\circ$, cerca de $180^\circ \times 180^\circ$ km.

4.2.2. Modelo: ECHAM5/MPI-OM

Para realização de uma revisão climática do século passado e projeções climáticas para o século atual foi selecionado a quinta geração do Modelo de Circulação Geral Atmosférica (MCGA), o modelo ECHAM5/MPI-OM.

O modelo ECHAM5 foi desenvolvido no Instituto Max-Planck de Meteorologia (MPIM) de Hamburgo na Alemanha. As duas componentes do modelo são: o ECHAM5 para a atmosfera, e o MPI-OM para o oceano, e estão bem documentados em Jungclaus *et al.* (2006). Sua versão acoplada foi utilizada para os cenários climáticos do relatório do IPCC, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (ROECKNER *et al.*, 2003).

O modelo acoplado ECHAM5/MPI-OM utiliza o modelo atmosférico mais recente o ECHAM5, e se difere da versão ECHAM4 pelo número de mudanças no esquema numérico e nas parametrizações (ROECKNER *et al.*, 2003). O modelo ECHAM5 possui uma resolução espectral T63 que corresponde a uma resolução espacial de cerca de $1,875^\circ \times 1,875^\circ$, que representa aproximadamente 180 x 180 Km e 31 níveis verticais.

De acordo com o IPCC (2007a) as projeções para as precipitações sobre a Amazônia variam mais entre os vários modelos, para um mesmo cenário, do que entre os vários cenários simulados por um mesmo modelo.

Segundo Barbosa (2008) os motivos para os resultados dos utilizados no IPCC-AR4 serem tão distintos em regiões específicas esta a baixa resolução espacial e a não representação de alguns processos que ocorrem na atmosfera assim como a simplificação de outros, em maior ou menor grau, em cada um dos modelos. O autor afirma ainda que em parte isto se deve ao nosso desconhecimento a respeito de alguns destes processos, e em parte à limitação dos recursos computacionais. Por exemplo, hoje ainda é inviável integrar os modelos climáticos globais por centenas de anos

utilizando uma resolução de centenas de metros e microfísica completa para resolver cada nuvem individualmente, ou mesmo incluir a química e o transporte dos aerossóis.

O modelo ECHAM5 foi selecionado, pois além de ter sido utilizado no terceiro relatório do IPCC (“Third Assessment Report – IPCC TAR”), vários autores comprovaram seu bom desempenho. Liebmann *et al.* (2004) e Lin *et al.* (2006) afirmam que o ECHAM5/MPI-OM simula razoavelmente bem o ciclo sazonal, em termos de temperatura, precipitação e umidade relativa em comparação com a reanálise do NCEP. May (2004) utilizando a quarta geração do modelo examinou a variabilidade e extremos de precipitação diária e verificou que este simula muito bem a variabilidade e os extremos de precipitação na maior parte da Índia, quando comparado às precipitações obtidas por satélite. Bengtsson *et al.* (2006) mostraram que os indicadores globais de ciclones tropicais são largamente reproduzidos pelo ECHAM5, mesmo em função da intensidade.

Foram utilizados dados mensais de precipitação do modelo ECHAM5 no século XX, através da rodada 20C3M, no período de 1900 a 2000. A rodada 20C é caracterizada por experimentos com aumento dos gases do efeito estufa como observado no século XX. O experimento 20C3M representa o clima atual com uma mudança temporal na taxa de CO₂ atmosférico de 350 partes por milhão (ppm), para 370 ppm de 1900 a 2000. As simulações da rodada 20C3M são conduzidas pelas mesmas estimativas de forçantes antrópicas de gases do século XX, diferindo apenas nas forçantes naturais externas e outros fatores, como variação da radiação solar, aerossóis vulcânicos e uso da terra (LI, 2008).

A projeção para o século XXI foi realizada utilizando dois cenários: SRA1B e SRA2, ambos considerando o período de 2001 a 2100 e totais mensais de precipitação.

O cenário A1B projeta uma descrição de um estado futuro de emissões dos principais gases estufa e aerossóis, e é caracterizado por um mundo de crescimento econômico muito rápido, onde a população global alcança um pico em meados do

século e diminui em seguida, uma rápida introdução de novas e mais eficientes tecnologias, com o desenvolvimento equilibrado das fontes de energia. Este cenário apresenta concentrações máximas de CO₂ de 720 ppm (SHEFFIELD e WOOD, 2008). Já o cenário A2 supõe um crescimento contínuo da população global, que é regionalmente orientada para o crescimento econômico, que é mais fragmentado e lento que nos outros cenários. Sheffield e Wood (2008) afirmam este pode ser um cenário mais pessimista, no qual as emissões de CO₂ aumentam cerca de cinco vezes entre 2000 a 2099. Neste cenário, as emissões de gases de efeito estufa aumentam ao longo do século 21, até o CO₂ atingir um valor de 850 ppm em 2100 (NAKICENOVIC *et al.*, 2000).

Para o cálculo dos SPIs foram usadas as médias das quatro rodadas do modelo ECHAM5 da rodada 20C e do cenário A1B e de três rodadas para o A2. Os diversos SPIs tanto para os dados mensais de precipitação do GPCC quanto para os do modelo são calculados conforme McKee *et al.* (1993), que será detalhada a seguir.

4.3. Cálculo do Índice de Precipitação Normalizada (SPI)

Foram selecionadas as escalas de tempo do SPI de 3, 6 e 12 meses, para as quais constroem-se médias móveis das séries temporais de SPI trimestral (SPI-3), semestral (SPI-6) e anual (SPI-12) centrada nos 12 meses do ano.

O SPI trimestral reflete as condições de curto prazo, é importante para monitoramento das precipitações sazonais. De acordo com Pereira (2004) a escala de tempo de 3 meses é adequada, por exemplo, para avaliar secas climatológicas, pois a agricultura é uma atividade que é afetada quase imediatamente por situações de déficit hídrico. A escala semestral do SPI representa os eventos de média duração. É importante para monitoramento do período de transição entre estação seca e a chuvosa. O SPI anual reflete padrões de precipitação de longo prazo. É uma importante ferramenta para monitorar a variabilidade anual e interanual.

A escolha da escala temporal usada para o cálculo do índice relaciona-se com o tempo necessário para que os efeitos para que os eventos de seca e de chuva se façam sentir sobre os diferentes setores de atividade e sobre os recursos hídricos em geral. Deste modo, escalas de tempo mais curtas ou mais longas refletem diferentes tempos de resposta dos recursos hídricos às anomalias de precipitação. À medida que a escala temporal aumenta, o SPI responde mais lentamente a mudanças na precipitação (MCKEE *et al.*, 1993).

As séries temporais de SPI foram obtidas a partir das médias móveis de 3, 6 e 12 meses das séries temporais das precipitações mensais acumuladas. O SPI-3 é uma média móvel trimestral, o SPI-6 é uma média semestral e o SPI-12 uma média móvel anual, centrados nos 12 meses do ano.

O cálculo do SPI consiste ainda em determinar a função densidade de probabilidade que descreve as escalas temporais escolhidas (3, 6 e 12 meses, no caso). Como as precipitações têm uma distribuição assimétrica, a distribuição gama, é geralmente utilizada para representar a distribuição teórica para essa variável. Vários estudos mostram que a distribuição gama descreve adequadamente o comportamento das chuvas, dentre os quais podem ser citados os de Thom (1958), Castro (1996) e Cunha *et al.* (1997). De acordo com Wilks (1990), a vantagem da distribuição gama para descrever dados de precipitação se deve do fato de que ela fornece uma representação flexível envolvendo apenas dois parâmetros (forma e escala), daí ser amplamente utilizada em climatologia de precipitação.

Os parâmetros de forma (alfa) e escala (beta) são estimados para cada ponto de grade, para cada mês do ano e para cada escala temporal (3, 6 e 12 meses).

A distribuição gama de probabilidade tem como função densidade $g(x)$:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad \text{para } x > 0 \quad (4.1)$$

na qual:

$\alpha > 0$ = parâmetro de forma da distribuição gama (simetria e achatamento dos dados)

$\beta > 0$ = parâmetro de escala da distribuição gama (dispersão)

$x > 0$ = quantidade de precipitação para o mês de interesse (mm)

$\Gamma(\alpha)$ = função gama completa

Os parâmetros α e β da distribuição gama para uma dada variável aleatória (x) foram inicialmente estimados pelo método da máxima verossimilhança conforme Thom (1958), por:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4.2)$$

na qual:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (4.3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4.4)$$

Esta abordagem foi posteriormente aperfeiçoada através de um processo sugerido por Wilks (1990), que também é utilizado por Lloyd-Hughes (2002). Neste método, denominado gama truncada, novos parâmetros (α^* e β^*) são calculados iterativamente e geralmente são melhores estimativas de α e β do que $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$. De acordo com Lloyd-Hughes (2002), o processo é repetido até um valor de convergência, que se não atingido, utiliza as estimativas iniciais de Thom.

Ao integrar a função densidade de probabilidade em relação à x , inserindo-se as estimativas de α e β , resulta na distribuição probabilidade acumulada $G(x)$ de uma quantidade de precipitação observada durante um determinado mês e escala de tempo:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (4.5)$$

Substituindo t por $x/\hat{\beta}$ reduz a equação para

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad (4.6)$$

Essa equação é conhecida como gama incompleta. Como a distribuição gama é indefinida pra $x = 0$, deve-se corrigi-la para as não ocorrências de chuva $P(x = 0) = q > 0$:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (4.7)$$

na qual:

q = probabilidade de ocorrência de precipitação zero (m/n)

m = número de observações com chuva igual a zero

n = número total de observações

A conversão equiprobabilística de uma variável (x_i) gama distribuída numa normal (SPI) pode ser feita simplesmente usando a média ($\bar{x} = \hat{\alpha} \cdot \hat{\beta}$) e o desvio padrão da gama ($\sigma = \sqrt{\hat{\alpha} \hat{\beta}^2}$) na variável reduzida da normal $z = SPI = (x_i - \bar{x})/\sigma$.

Na qual:

$i = 3, 6, 12$ meses

Segundo um exemplo de Lloyd-Hughes (2002), a distribuição de probabilidade acumulada é transformada numa distribuição normal para gerar o SPI. Esse processo é ilustrado na Figura 4.2, que mostra a distribuição de probabilidade acumulada empírica para uma média de 3 meses (DJF) das precipitações sobre o sudeste da Inglaterra no período de 1901-1999. A curva contínua em: a) mostra distribuição da probabilidade acumulada para a distribuição gama ajustada; em b) a probabilidade acumulada (H). Para converter um nível de precipitação, por exemplo, 77 milímetros, para o valor correspondente SPI, em primeiro lugar localiza-se 77 milímetros na abscissa da figura do lado esquerdo, localiza o ponto de intersecção com a distribuição teórica, que é horizontalmente projetada até encontrar a intersecção até o gráfico de probabilidade acumulada. Na abscissa deste ponto obtém o valor do SPI.

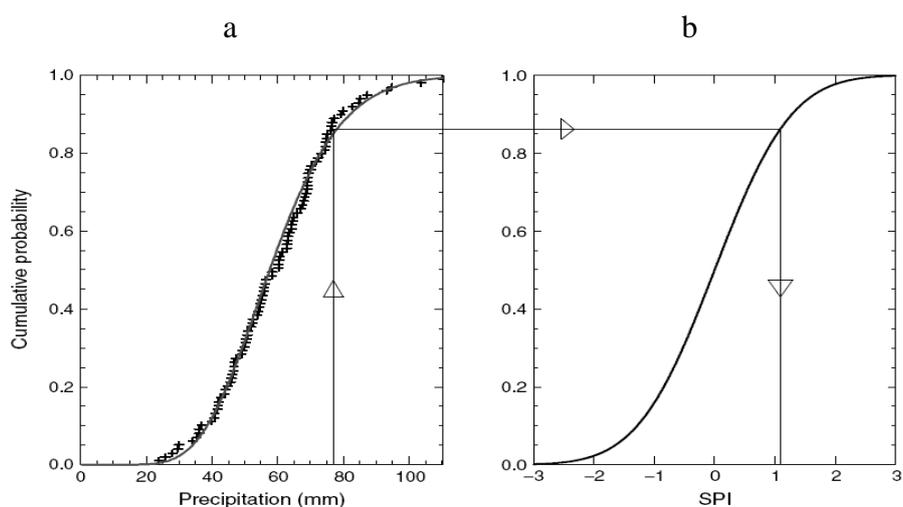


Figura 4.2 - Exemplo de uma transformação equiprobabilística de uma distribuição gama ajustada para uma distribuição normal. Variável é a média de precipitação de 3 meses no sudoeste da Inglaterra.
 Fonte: Edwards; McKee (1997)

Os valores de SPI obtidos foram classificados segundo McKee *et al.* (1993) cujas categorias encontram-se na Tabela 1. Esse autor também definiu um critério para eventos de seca e de chuva em qualquer escala de tempo. Um evento de seca/chuva ocorre quando o SPI assume valores continuamente negativos/positivos e atinge intensidades iguais ou superiores a -1,0/1,0. Dessa forma, pode-se definir o início, fim e duração destes eventos, assim como sua intensidade mensal. Para cada valor de SPI ou severidade pode ser associados probabilidades de ocorrência diretamente decorrentes da função densidade de probabilidade normal.

Tabela 1- Classificação do SPI segundo McKee *et al.* (1993)

Valores do SPI	Categoria	Probabilidade (%)
> 2	Chuva extrema	2.3
1,5 a 1,99	Chuva severa	4.4
1,0 a 1,49	Chuva moderada	9.2
-0,99 a 0,99	Normal	68.2
-1,0 a -1,49	Seca moderada	9.2
-1,5 a -1,99	Seca severa	4.4
< -2	Seca extrema	2.3

Eventos severos e extremos de seca ou de chuva nas suas diferentes escalas de tempo, segundo os vários SPIs são definidos neste trabalho como meses sob estas condições (severas e extremas), conforme um dado SPI (3, 6 e 12) que tem uma chance de ocorrência menor que 6,7%.

O início, fim, duração e magnitude destes eventos, que tem bastante interesse nos estudos de casos, mas não serão objeto deste trabalho, são definidos a partir de

sequências de meses consecutivos de seca ou de chuva sob estas condições (severas e extremas).

4.4. Análises estatísticas

Foram aplicados testes estatísticos paramétricos e não-paramétricos aos SPIs em todas as escalas temporais. Os métodos estatísticos utilizados foram: teste t-student e teste de Mann-Kendall (MK). Conceitualmente, o teste t-student é denominado de paramétrico por assumir que a amostra pode ser ajustada a uma distribuição teórica. O MK não faz distinção quanto à distribuição que os dados são oriundos, sendo, com isso, considerado não-paramétrico (BLAIN, 2010).

4.4.1. Teste t-Student

O teste t-Student, analisa se os valores médios entre dois grupos são estatisticamente diferentes, levando-se também em consideração a variabilidade da distribuição de cada grupo. Neste caso, os grupos foram: GPCC e 20C. Para isso foi utilizada a seguinte formulação:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (4.8)$$

Onde,

\bar{X} é o valor médio do grupo X;

\bar{Y} é o valor médio do grupo Y;

n_i é o número de amostras de cada grupo, respectivamente para X (n_1) e Y (n_2);

S_i^2 é a variância de cada grupo, respectivamente para X (S_1) e Y (S_2)

Adicionalmente, é necessário o intervalo de confiança e o número de graus de liberdade para a análise do resultado do teste. O intervalo de confiança deste estudo é 95%. O índice p é utilizado para referenciar o intervalo de confiança, onde p igual a 0,05. O número de graus de liberdade é definido como $n - 1$, já que os dois grupos apresentam o mesmo número de dados, ou seja, $n_1=n_2=n$.

Rosolen (2005) afirma que a hipótese de que um grupo é estatisticamente diferente de outro é corroborada quando o valor obtido, t , é superior ao valor de referência, t_r . As informações de t_r são geralmente obtidas através de uma tabela de referência que utiliza informações cruzadas do intervalo de confiança com o número de graus de liberdade.

4.4.2. Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (MK), proposto inicialmente por Sneyers (1975), considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples). Goossens & Berger (1986) afirmam que o teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar mudanças climáticas em séries climatológicas e permite também a detecção e localização aproximada do ponto inicial de determinada tendência. O teste MK (KENDALL e STUART, 1967) é utilizado por Goossens e Berger (1986), Moraes *et al.* (1995), Back (2001) e Marengo *et al.* (2007c), na detecção de tendências em séries temporais de precipitação pluvial.

Este teste consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores precedentes sempre em ordem seqüencial. É contado o número de vezes que os termos anteriores são menores do que o valor analisado. Assim, o teste de Mann-Kendall verifica se a série apresenta ou não valores numa mesma direção, indicando a existência de eventos.

O teste consiste na soma t_n do número de termos m_i da série, relativo ao valor X_i cujos termos anteriores ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($X_j < X_i$), assim:

$$t_n = \sum_{i=1}^n m_i \quad (4.9)$$

Segundo Sneyers (1975), se as séries utilizadas forem longas (como neste estudo), na ausência de tendências (hipótese de nulidade, H_0), t_n apresentará distribuição normal com média $[E(t_n)]$ e variância $[Var(t_n)]$. O teste é calculado por:

$$E(t_n) = N(N - 1)/4 \quad (4.10)$$

$$Var(t_n) = N(N - 1)(2N + 5)/72 \quad (4.11)$$

$$u(t) = (t_n - E(t_n)) / (Var(t_n))^{1/2} \quad (4.12)$$

Se o valor de $u(t)$ foi inferior à -1,96 há tendências significativas de redução nos valores da série observados. Quando $u(t)$ é superior a 1,96 há tendências significativas de aumento na série. O MK foi aplicado nas diferentes escalas de SPI, tanto para o século XX (GPCC e 20C) como para o século XXI (A1B e A2).

As tendências significativas pelo teste de MK serão regionalmente apresentadas para o SPI-6.

4.5. Estatísticas Adicionais

4.5.1. Viés da precipitação

Para cada ponto de grade foi calculado o viés (V) das precipitações entre o modelo e as reanálises do GPCC, para o século passado por:

$$V = \frac{(P_S - P_O)}{P_O} \times 100 \quad (4.13)$$

Onde: P_S = Precipitação Simulada

P_O = Precipitação Observada

Dessa forma, o viés expressa percentualmente, para cada ponto de grade, quanto o modelo superestima ($V > 0$) ou subestima ($V < 0$) as observações.

4.5.2. Coeficiente de Correlação de Anomalias

Foi calculado também o coeficiente de correlação de anomalias (CCA) das precipitações anuais do GPCC e o do modelo ECHAM (20C), no do período de 1901 a 2000. O CCA quantifica a correlação espacial entre os dois campos e é uma medida de similaridade dos padrões que variam de -1 a +1.

$$CCA = \frac{\sum_{m=1}^M f'_m O'_m}{\sqrt{[\sum_{m=1}^M (f'_m)^2 \sum_{m=1}^M (O'_m)^2]}} \quad (4.14)$$

$$f'_m = f_m - c_m \quad (4.15)$$

$$O'_m = O_m - c_m \quad (4.16)$$

na qual:

M = número de pontos de grade

f = precipitação do modelo

O = precipitação observada

c_m = precipitação média

A significância do CCA foi verificada através de teste do teste t de Student a 95%, dado por:

$$t_{95\%} = \frac{CCA \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-CCA^2}} \quad (17)$$

na qual:

n é o número de observações da amostra

4.5.3. Médias sazonais

Tanto para as frequência como para as intensidades dos diversos SPIs foram construídos campos médios anuais e sazonais, estes centrados nos meses das diferentes estações do ano. Os campos sazonais foram divididos em dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON), representando as quatro estações do ano, verão, outono, inverno e primavera, respectivamente, visando-se melhor avaliar a contribuição de cada estação do ano para os padrões anuais.

4.5.4. Médias decenais

Além disso, foram analisadas as frequências decenais dos SPI-6 (sazonal) no século XX, GPCC e 20C, para desta forma, observar o comportamento século das frequências deste SPI.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa do trabalho será dividida em duas partes. A primeira abrange o século XX, na qual são apresentados os resultados correspondentes ao GPCC e a rodada 20C do modelo ECHAM5. E na segunda etapa, serão expostos os resultados para o século XXI, nos cenários A1B e A2.

5.1. Século XX - GPCC e 20C

5.1.1. Variabilidade da Precipitação Anual

A precipitação média anual na região norte e nordeste, utilizando dados do GPCC, no período de 1901 a 2000, é apresentada na Figura 5.1. Verifica-se na região Norte uma grande variabilidade espacial, com as precipitações anuais variando de 1700 a 3100 mm. Observa-se na foz do rio Amazonas, no litoral do Pará e no setor ocidental da região, um alto total pluviométrico anual, que pode exceder a 3.000 mm. Na direção noroeste-sudeste de Roraima e a leste do Pará, tem-se um corredor menos chuvoso, com totais anuais da ordem de 1.700 mm. Já a distribuição das chuvas na região Nordeste é mais complexa, não só em relação ao período de ocorrência, como em seu total anual, que varia de 300 a 2.000 mm. De uma forma geral, a precipitação média anual na região Nordeste é inferior a 1.000 mm, sendo que no norte e nordeste da Bahia observam-se precipitações inferiores a 300 mm/ano. Além disso, no sertão desta região, o período chuvoso é, normalmente, de apenas dois meses no ano, podendo, em alguns anos até não existir, ocasionando as denominadas secas regionais.

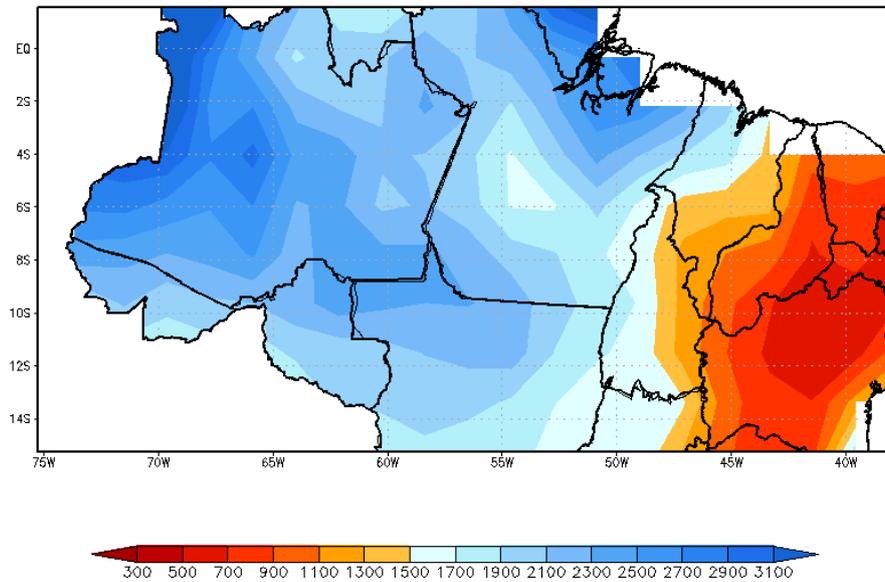


Figura 5.1 –Precipitações médias anuais obtidas com dados do GPCC, no período de 1901 a 2000, para as regiões Norte e Nordeste do Brasil.

As precipitações médias anuais estimadas pelo modelo ECHAM-5, no mesmo período (1901 a 2000) pode ser observada na Figura 5.2, na qual verifica-se que o modelo não reproduz satisfatoriamente as precipitações no Pará, Acre, Amapá e parte do Tocantins. Já no leste da região Norte e na região Nordeste estes valores são similares aos do GPCC. Segundo Olson (1995) a chuva é uma variável difícil de modelar devido à complexidade dos processos que a originam e a alta variabilidade no espaço e tempo.

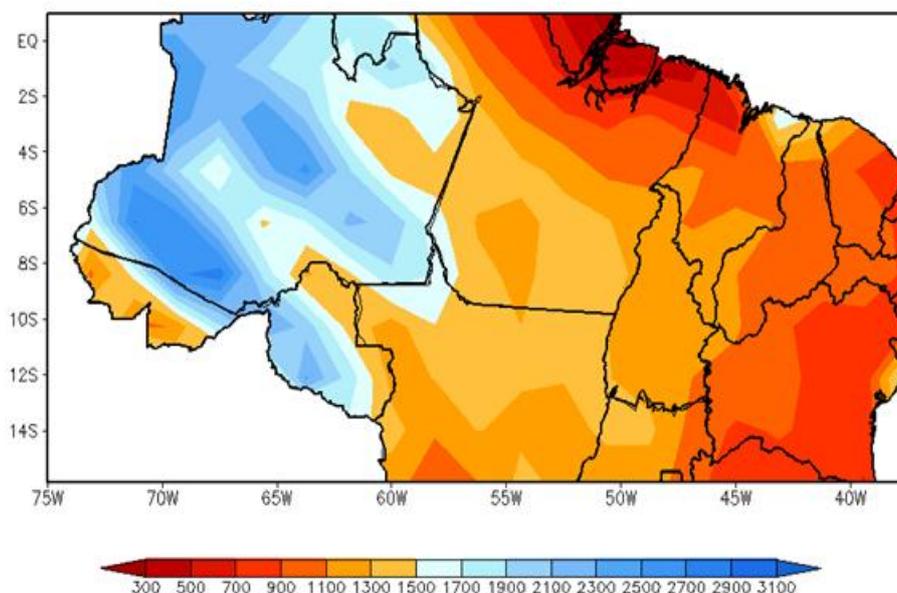


Figura 5.2–Precipitações médias anuais obtidas com dados do modelo ECHAM5, na rodada 20C, no período de 1901 a 2000, para as regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Na Figura 5.3 encontram-se os vieses das precipitações médias anuais do ECHAM5 (20C) em relação às do GPCC. A precipitação simulada é subestimada em grande parte do Amazonas e na porção norte do estado do Pará, as precipitações simuladas pelo ECHAM5 apresentam um viés negativo, de cerca de 100%. No restante da região de estudo o modelo superestimou as precipitações, apresentando um viés positivo da ordem de 100%, que na região semi-árida chegou a 400%. Valverde e Marengo (2010) estudando as mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul usando modelos globais do IPCC AR4 observou que todos apresentam anomalias positivas de chuva sobre o norte do Nordeste (Piauí e Maranhão) por localizar seu máximo de chuva sobre esta região. Esses mesmos autores ressaltam ainda que em geral os modelos, apresentam dificuldades em simular corretamente a chuva sobre a Amazônia e sobre os Andes, e afirmam que a redução de chuva sobre a Amazônia está relacionada com o tipo de esquema de convecção e com a camada limite planetária.

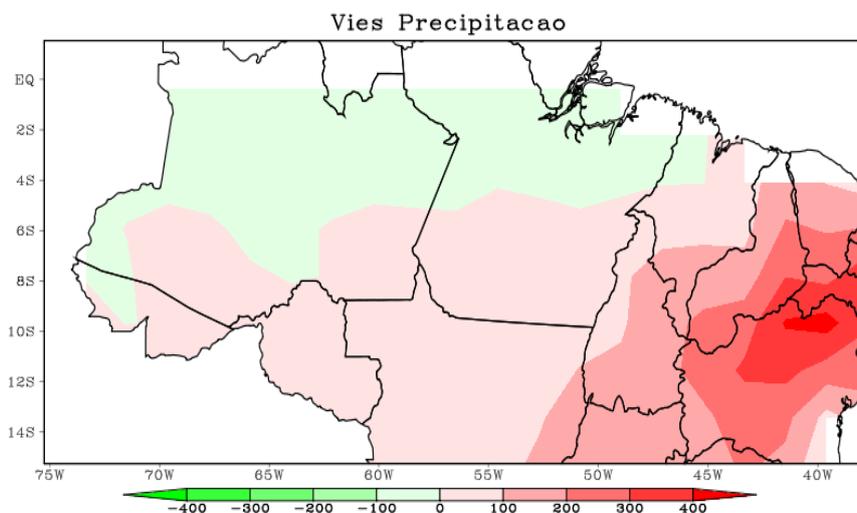


Figura 5.3– Vieses percentuais das precipitações anuais médias anuais do modelo ECHAM5 (20C) em relação aos dados do GPCC, no período de 1901-2000.

Os resultados do teste t de Student para as diferenças entre as precipitações médias anuais do GPCC e do ECHAM (20C) podem ser vistas na Figura 5.4, na qual observa-se que a diferença das precipitações anuais são positivas em grande parte da região Norte, indicando que a precipitação do GPCC foi maior que a estimada pelo modelo. A situação inversa pode ser notada na região Nordeste que corroborando com o viés apresentado na Figura 5.3, o modelo superestima a precipitação por volta de 200 mm. Nota-se ainda que no norte da região Norte e sul-oeste da mesma as diferenças de precipitação são significativas pelo teste t de Student a 95% de confiança.

O coeficiente de correlação de anomalias anuais entre os campos de precipitação do GPCC e do ECHAM5 (20C) foi de -0,24, duas variáveis inversamente correlacionadas (fracamente) apesar de significativamente diferentes de zero a 95% de confiança.

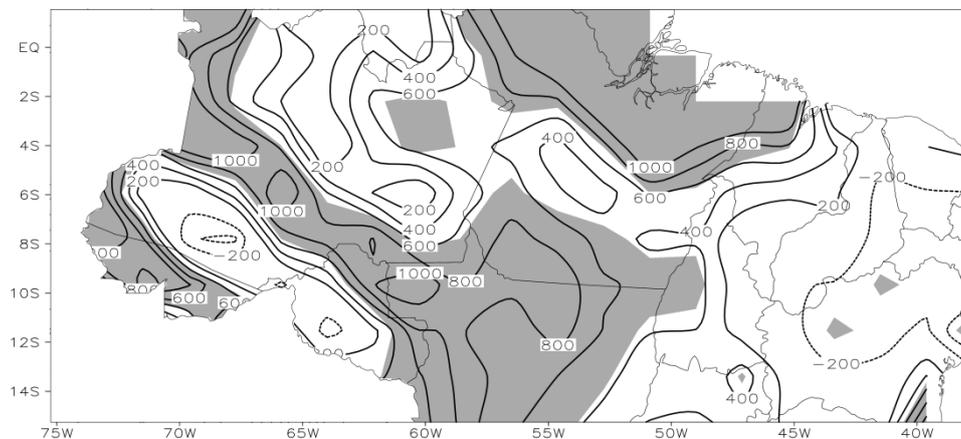


Figura 5.4– Teste t de Student para as diferenças entre as precipitações médias anuais do GPCC e do ECHAM5 (20C). As áreas sombreadas são significativamente diferentes a 5% pelo teste t Student.

5.1.2. Frequências e Intensidades médias anuais dos SPIs

As Figura 5.5, 5.6 e 5.7 mostram, respectivamente, frequências e intensidades dos eventos severos e extremos de seca e chuva pelo SPI-3, 6 e 12, obtidos com as precipitações totais anuais do GPCC, no período de 1901-2000.

Verifica-se que os eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 (Figura 5.5-a) apresentam alta frequência em toda região estudada. Destaca-se o semi-árido e seu entorno com frequência atingindo mais de 80 casos em 100 anos. Por ser uma região preferencialmente seca, tornam-se mais comuns eventos severos e extremos de chuva, já que a média é relativamente baixa quando comparadas às outras regiões estudadas. Esta mesma explicação pode ser utilizada para justificar os poucos eventos severos e extremos de seca (expostos na Figura 5.5-b) para esta mesma região, enquanto o litoral norte do Nordeste e região central da Amazônia, regiões com alto índice pluviométrico mostram altas frequências de eventos secos.

No que diz respeito às intensidades médias, nota-se que os eventos de chuva pelo SPI-3 (Figura 5.5-c) são considerados extremos ($SPI \geq 2$) em toda a região

Nordeste, e na maior parte do Norte, exceto no estado do Amazonas e numa pequena porção do Pará, que possuem intensidades no limite entre severo e extremo e, logo são menos intensas. Destaca-se o norte do Pará e Amapá com SPI médio acima de 2,5, esta mesma região exibe as secas mais intensas (que pode ser vista na Figura 5.5-d), juntamente com o oeste da Amazônia. As demais regiões apresentam seca severa.

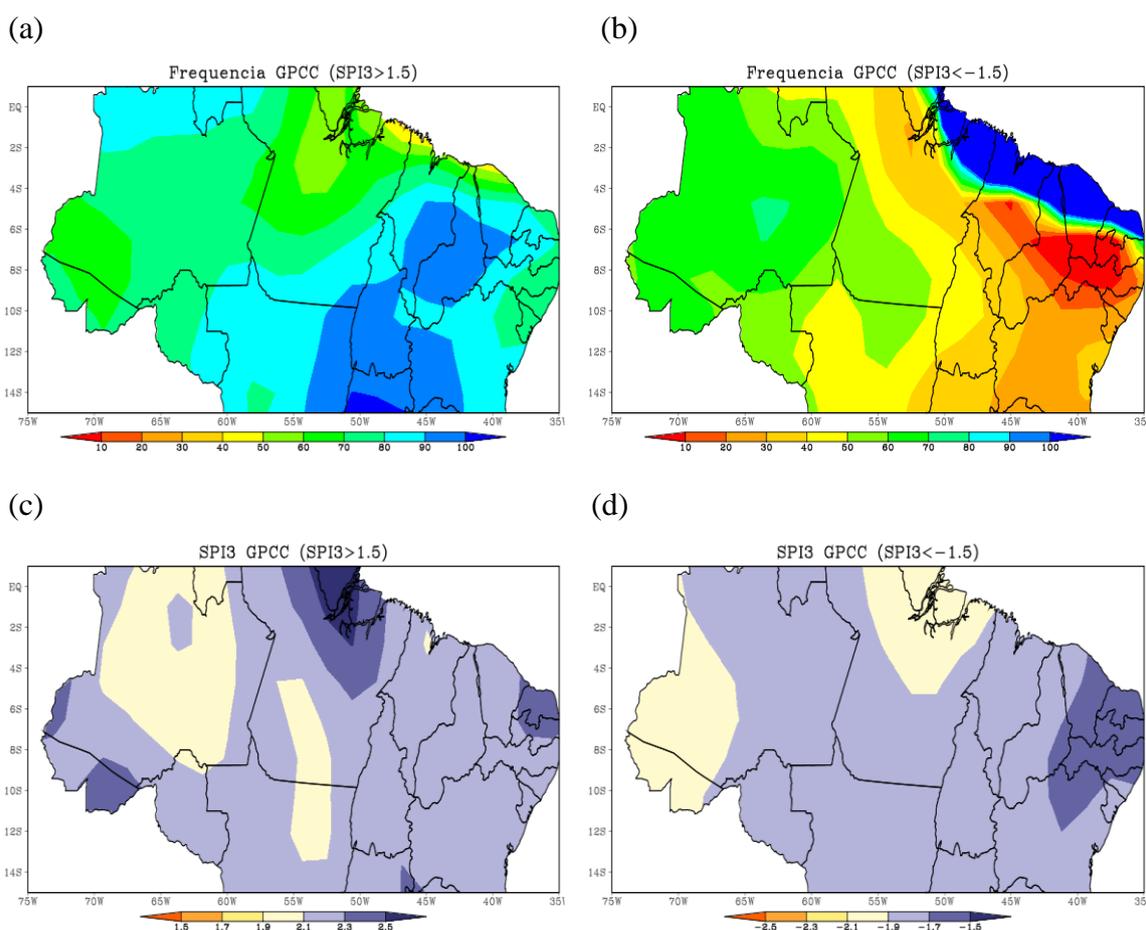


Figura 5.5– Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

A frequência de eventos severos e extremos de chuva para SPI-6 (Figura 5.6-a) expõe um padrão bastante similar ao SPI-3. Enquanto os eventos de severos e extremos de seca (Figura 5.6-b) indicam que, exceto pelo a região litorânea do norte do Nordeste e pelo semi-árido, ocorre um aumento de cerca de 20 casos na frequência para toda

região. Indicando que eventos severos e extremos de seca de média duração (SPI-6) foram mais frequentes que os de curta duração (SPI-3).

As intensidades referentes ao SPI-6 para as ocorrências de chuvas severas e extremas podem ser vistas na Figura 5.6-c, onde se observa uma diminuição nas intensidades dos eventos na maior parte da área de estudo, apenas um núcleo no norte do Pará e Amapá apresenta aumento na região de abrangência. Para os eventos de seca (Figura 5.6-d) as intensidades se mantêm constantes em relação ao SPI-3 em toda o Nordeste, e decresce abaixo de -1,9 em quase toda região Norte.

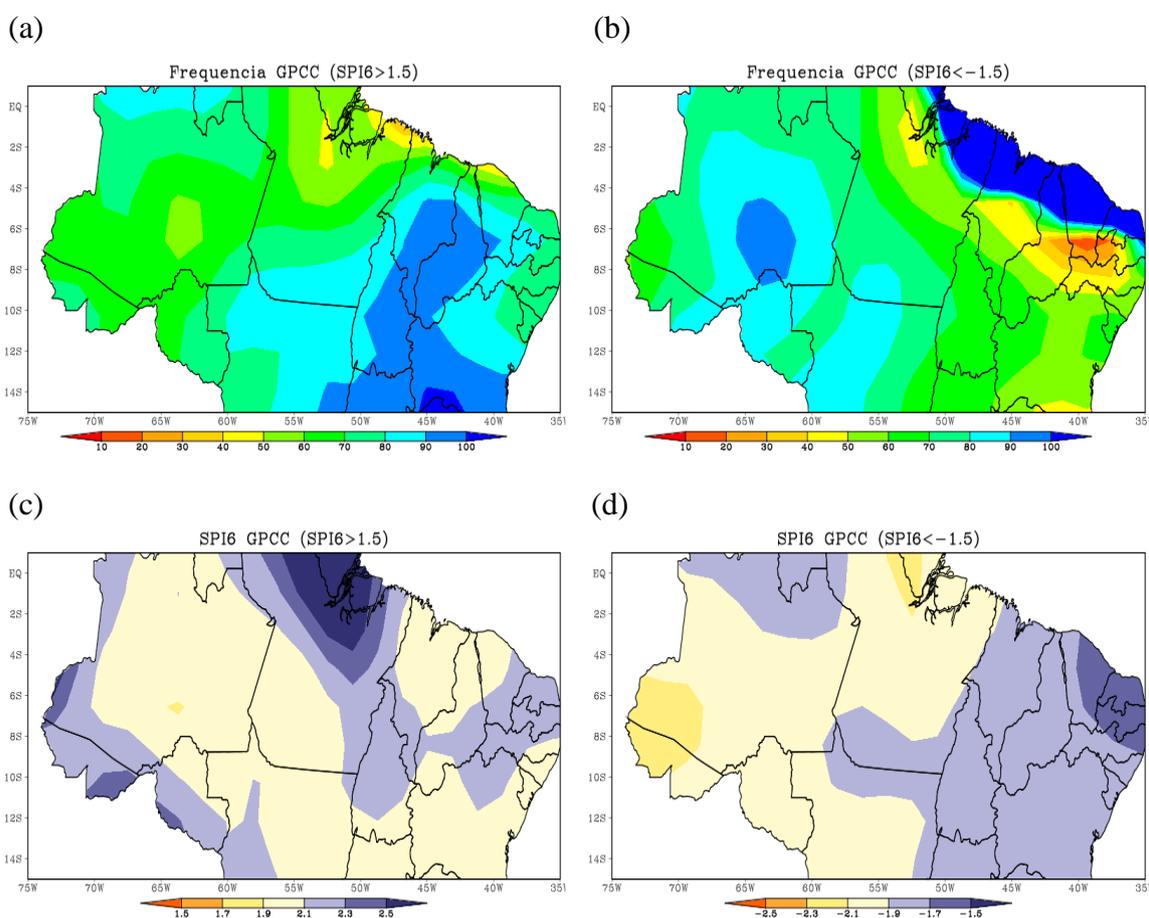


Figura 5.6- Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

O comportamento apresentado pelo SPI-12 (Figura 5.7) é bastante similar ao SPI-6. Para os eventos severos e extremos de precipitação (Figura 5.7-a) verifica-se um núcleo de menor ocorrência quando comparados aos SPIs de menor escala de tempo na região centro-sul da Amazônia, enquanto os eventos de seca (Figura 5.7-b) continuam aumentando para a mesma região.

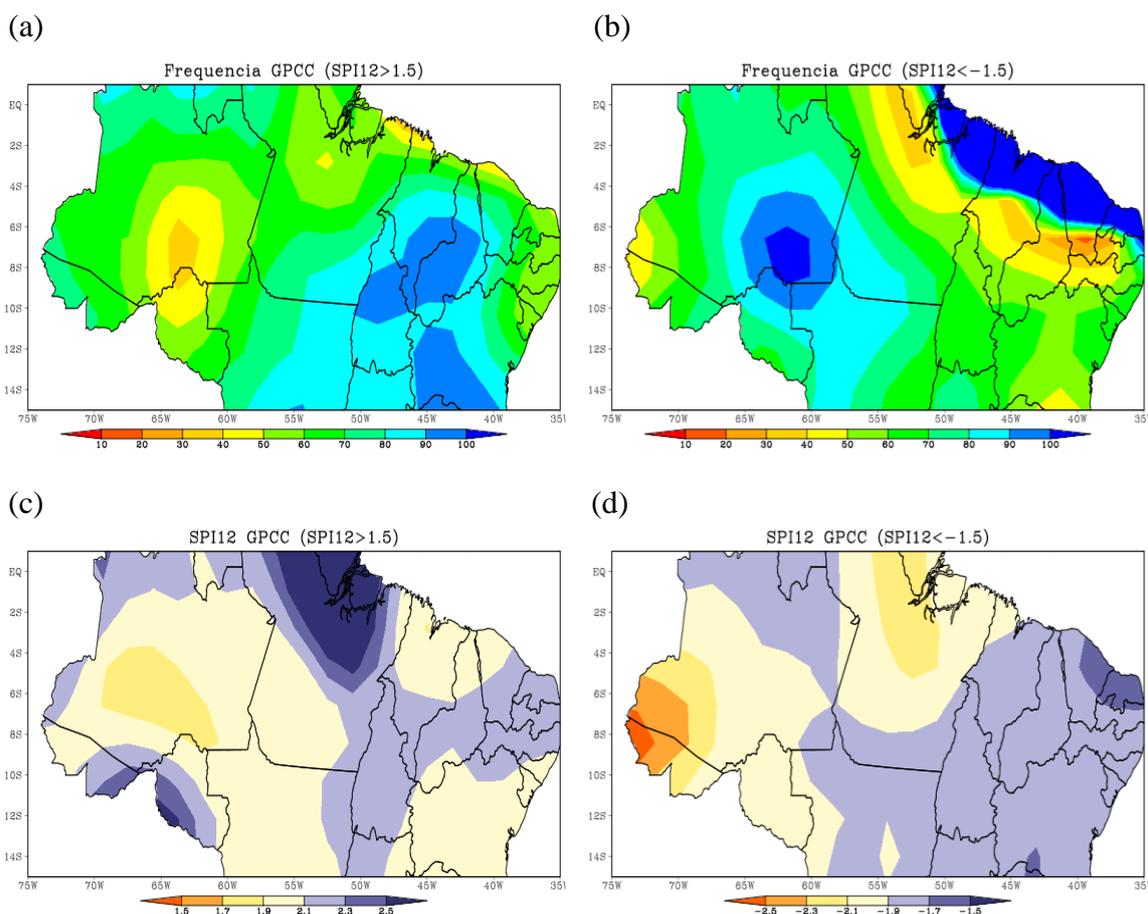


Figura 5.7 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

As frequências e intensidades anuais de eventos severos e extremos de seca e chuva pelos SPIs 3, 6 e 12 meses obtidos com dados de precipitação do modelo ECHAM-5 (20C), no período de 1901-2000, encontram-se nas Figura 5.8, 5.9 e 5.10.

Através das frequências obtidas para o SPI-3 nota-se que os casos de chuvas severas e extremas (Figura 5.8-a) uma diminuição no gradiente das frequências, passando a prevalecer valores mais elevados tanto para seca como para chuva. Destaca-se para os eventos de chuva o litoral norte do país (norte dos estados do Pará, Maranhão, Piauí e Ceará) que apresentavam mínimos relativos utilizando dados do GPCC apresentam comportamento inverso aos obtidos com dados do ECHAM-5 (20C). O mesmo comportamento pode ser visto nos eventos de seca (Figura 5.8-b), com uma área restrita ao Amapá e norte do Pará, onde havia máximos de chuva com o GPCC se observam mínimos com os dados do modelo.

As intensidades do SPI-3 revelam que para os eventos severos e extremos de chuva (Figura 5.8-c) todo o Nordeste apresentou apenas casos extremos, enquanto no Norte ocorrem valores entre 1,9 e 2,1 (limite entre severo e extremo). Quanto aos eventos de seca (Figura 5.8-d) em torno da Amazônia eles são menos intensos, entre -1,7 e -1,9, apresentando pouca variação. As intensidades referentes ao SPI-6 (Figura 5.9-c e d) e ao SPI-12 (Figura 5.10-c e d) também não indicam padrões relevantes, já que em toda a região de estudo os valores possuem um comportamento relativamente constante.

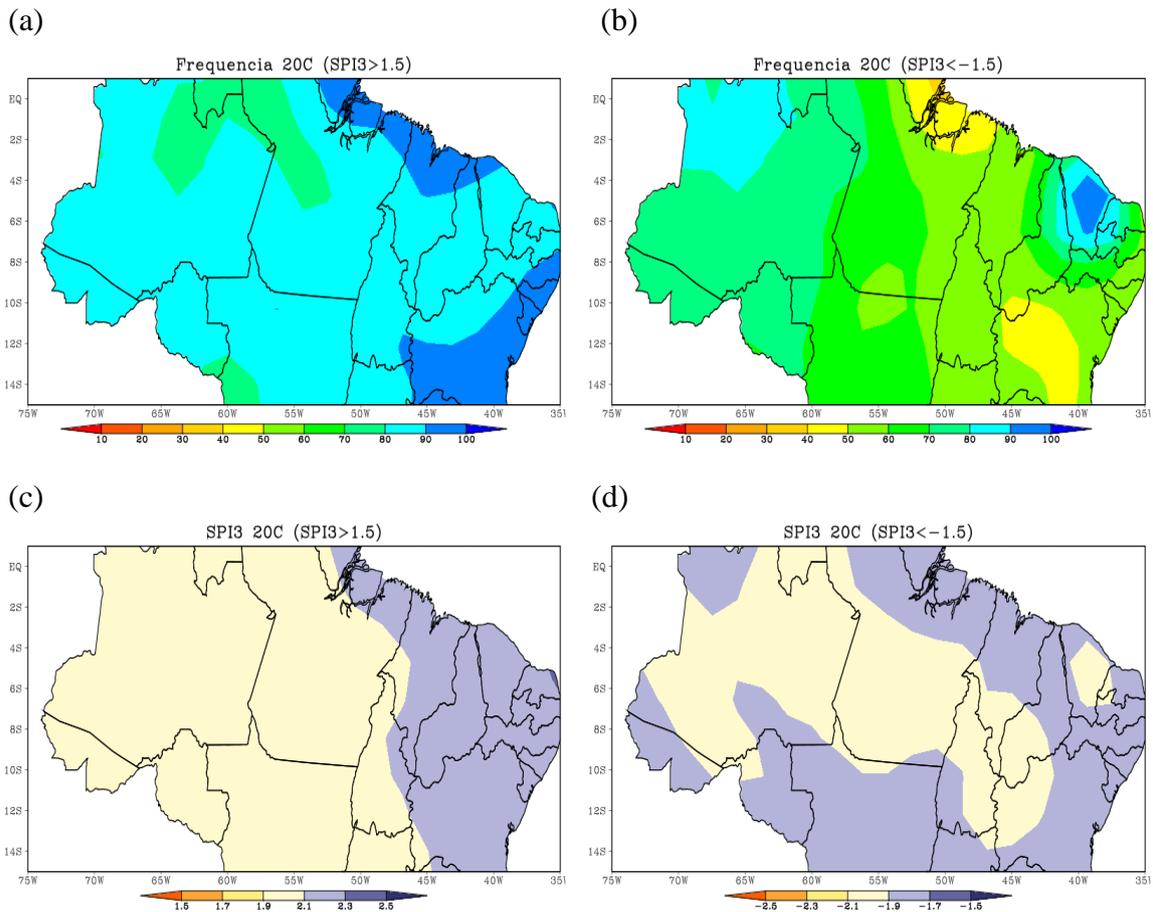


Figura 5.8 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 (20C), no período de 1901-2000.

O comportamento das frequências dos SPI-6 chuvosos (Figura 5.9-a) mostra o mesmo padrão de diminuição dos gradientes em relação ao GPCC. Em relação ao SPI-3 do modelo, a diferença se dá apenas pela diminuição da frequência na região central da área de estudo. Para os casos de seca (Figura 5.9-b) ocorre aumento na frequência em toda região.

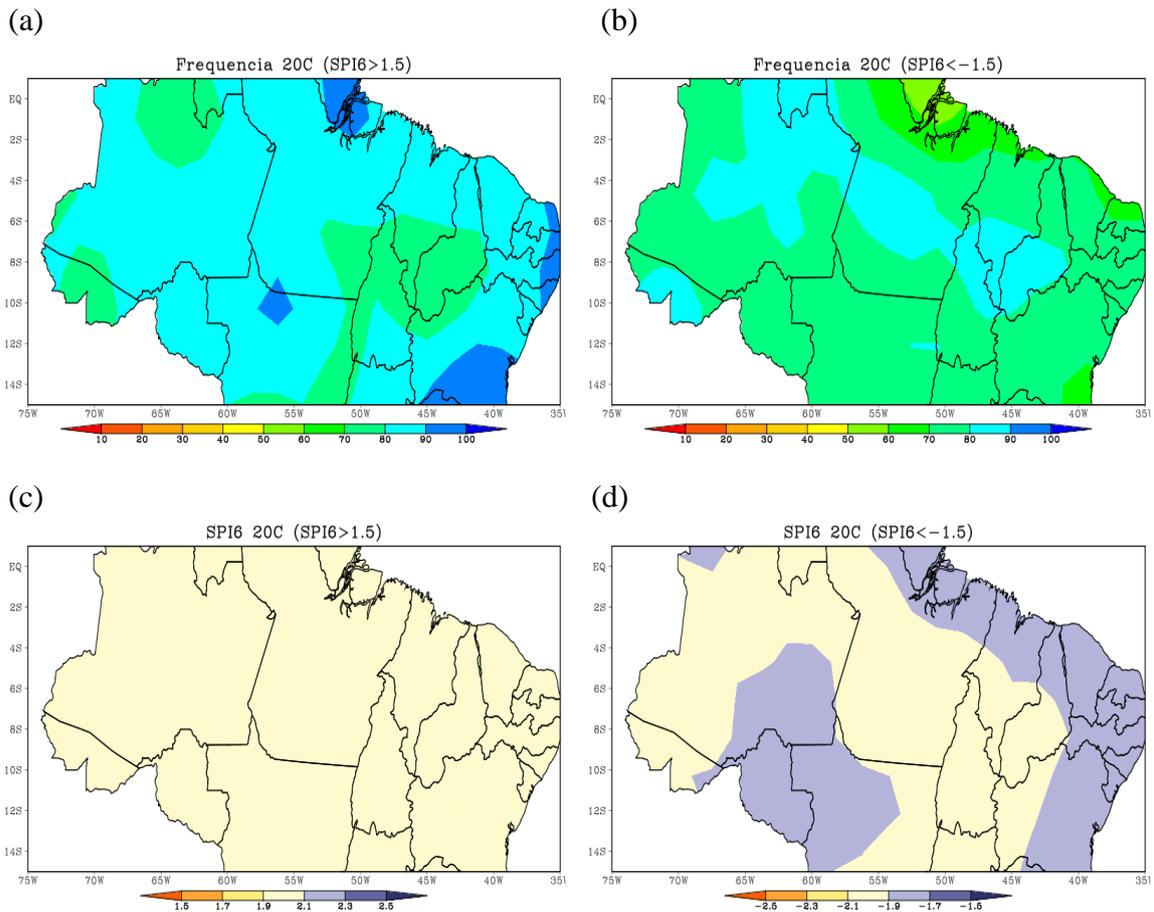


Figura 5.9 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 (20C), no período de 1901-2000.

A frequência dos eventos de chuva pelo SPI-12 (Figura 5.10-a) indica máximos de ocorrência no sul da Bahia, Amapá, noroeste do Pará e norte do Piauí. O SPI-12 para ocorrência de secas (Figura 5.10-b) expõe intensificação no aumento já apresentando no SPI-6, onde pode-se ver núcleos de máximos no centro-sul do Pará e Piauí e no norte da Amazônia.

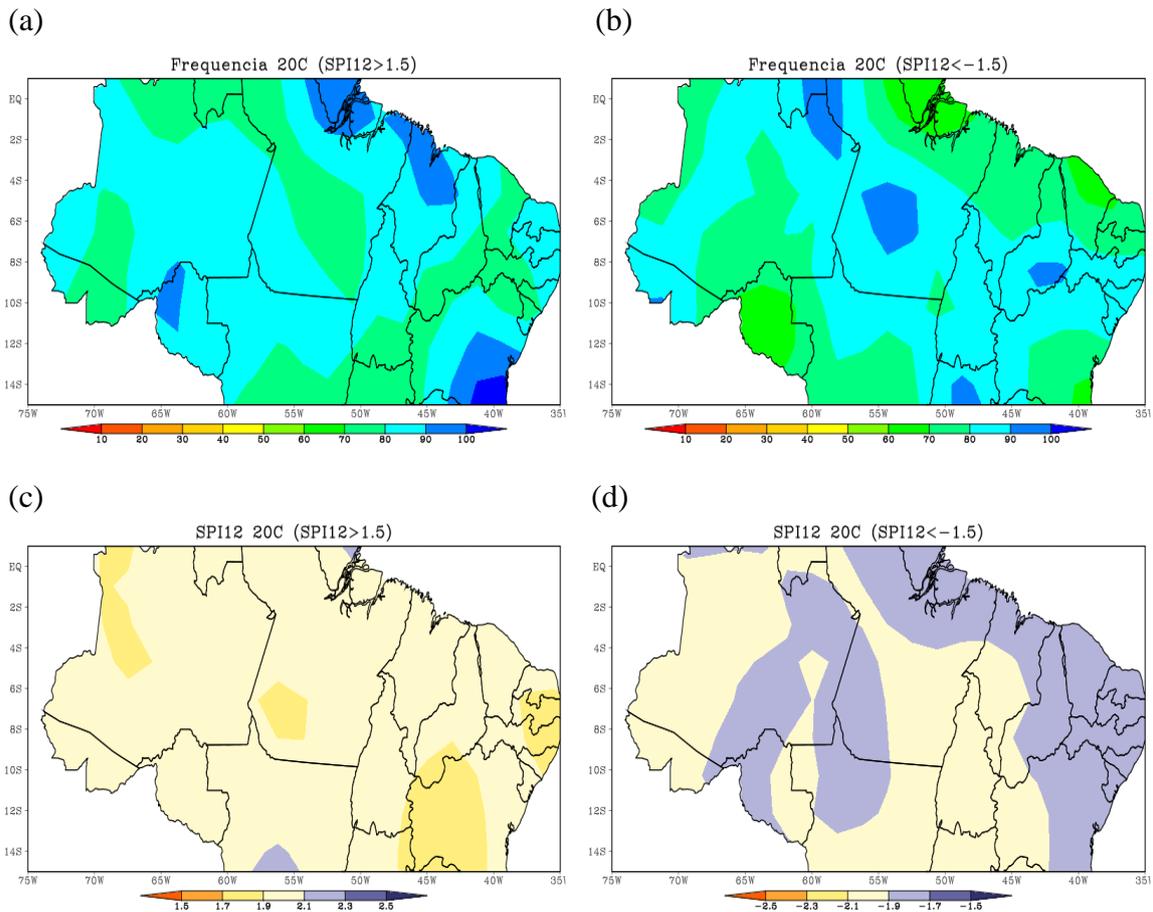


Figura 5.10 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 (20C), no período de 1901-2000.

As frequências de eventos chuvosos com dados do modelo ECHAM5 (20C) possuem uma distribuição espacial mais homogênea que os do GPCC, já que os valores mínimos são superiores a 60 ocorrências em 100 anos, para as três escalas do SPI estudadas. Para os eventos de seca apresentados pelo modelo, o comportamento é bastante semelhante para o SPI-6 e 12, apresentando maiores gradientes apenas no SPI-3.

5.1.3. Frequências e intensidades sazonais dos SPIs

Uma análise sazonal dos eventos severos e extremos de chuva pelos SPI-3, 6 e 12 com dados de precipitação do GPCC é apresentada nas Figura 5.11, 5.12 e 5.13, respectivamente nas quais observam-se que os padrões anuais de distribuição de frequências (Figura 5.5, 5.6 e 5.7-a), são melhores caracterizados sazonalmente.

A variação sazonal dos eventos de chuva de curta duração (definidos pelo SPI-3) indica que os máximos ocorrem no inverno e na primavera (Figura 5.11-e, g, respectivamente), onde vê-se um núcleo de máxima frequência na região central e sudoeste do Nordeste, com até 30 casos no período. As mínimas frequências ocorrem em toda região no verão e outono (Figura 5.11-a, c), período que coincide com a estação chuvosa no sul da Amazônia (verão) e norte da Amazônia e Nordeste (outono) de acordo os resultados obtidos por Marengo (2007b). Este padrão permanece nos meses de junho a agosto na região litorânea da Bahia, no norte do Pará e no Amapá.

Em relação às intensidades médias desses eventos nota-se que os máximos anuais (Figura 5.5-c) ocorrem nos meses de verão e outono (Figura 5.11-a, c), no norte do Pará e Amapá. Nos meses de inverno (Figura 5.11-e) este núcleo ocorre na porção mais ao sul da região e desloca-se para o litoral nordestino na primavera (Figura 5.11-h).

Na Figura 5.12, relativa ao SPI-6 nota-se que o comportamento apresentado no verão e outono (Figura 5.12- a, c) é bastante similar, assim como no inverno e primavera (Figura 5.12- e, g), que de maneira análoga ao SPI-3 são as estações que apresentam uma maior frequência de eventos severos e extremos de chuva. Os mínimos no norte do Pará e no Amapá podem ser vistos em todas as estações.

As intensidades médias desses eventos encontram-se na Figura 5.12 na qual observa-se uma região de maior intensidade ($SPI \geq 2,5$), no norte do Pará e Amapá, nas quais ocorrem as menores frequências de eventos severos e extremos. Dessa forma, os

poucos eventos observados nessa área foram bastante extremos. Esta situação pode ser notada na maior parte do ano, de dezembro a agosto (Figura 5.12- b, d, f), não acontecendo apenas na primavera (Figura 5.12- h), em que são observadas menores intensidades.

De maneira similar aos SPIs de menor escala, o SPI-12 mostrado na Figura 5.13 as maiores frequências ocorrem de junho a novembro (inverno e primavera, Figura 5.13- e, g, respectivamente). Os núcleos de máxima e mínima frequência, interior da região Nordeste e centro-sul da Amazônia, respectivamente, observados no comportamento anual (Figura 5.7-a) podem ser vistos nos 4 trimestres analisados (Figura 5.13). Destaca-se ainda que a frequência dos eventos severos e extremos de longa duração (SPI-12) encontra-se bem distribuída ao longo do ano, ou seja, não depende das estações.

As intensidades médias desses eventos é bastante parecida em todas as estações, apresentado máximos no norte do Pará e Amapá e sul da Amazônia, região que em todas as estações do ano indicaram eventos extremos de chuva. Já os mínimos na Amazônia central, coincidindo conseqüentemente com a intensidade anual (Figura 5.7- c). Como as intensidades foram bem distribuídas ao longo de todo ano (Figura 5.13), tanto os eventos severos como extremos não tiveram um deslocamento espacial para eventos de longa duração.

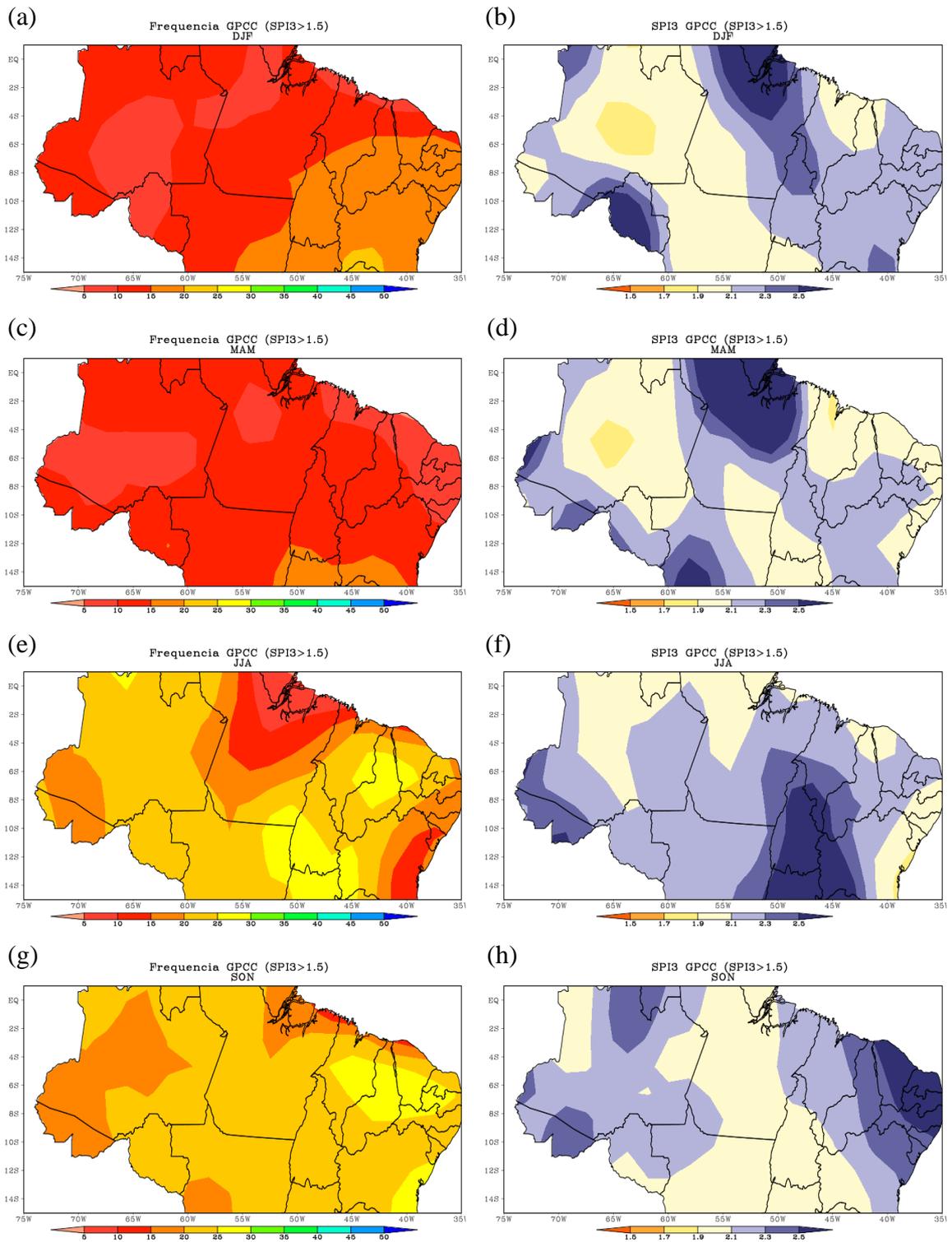


Figura 5.11– Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

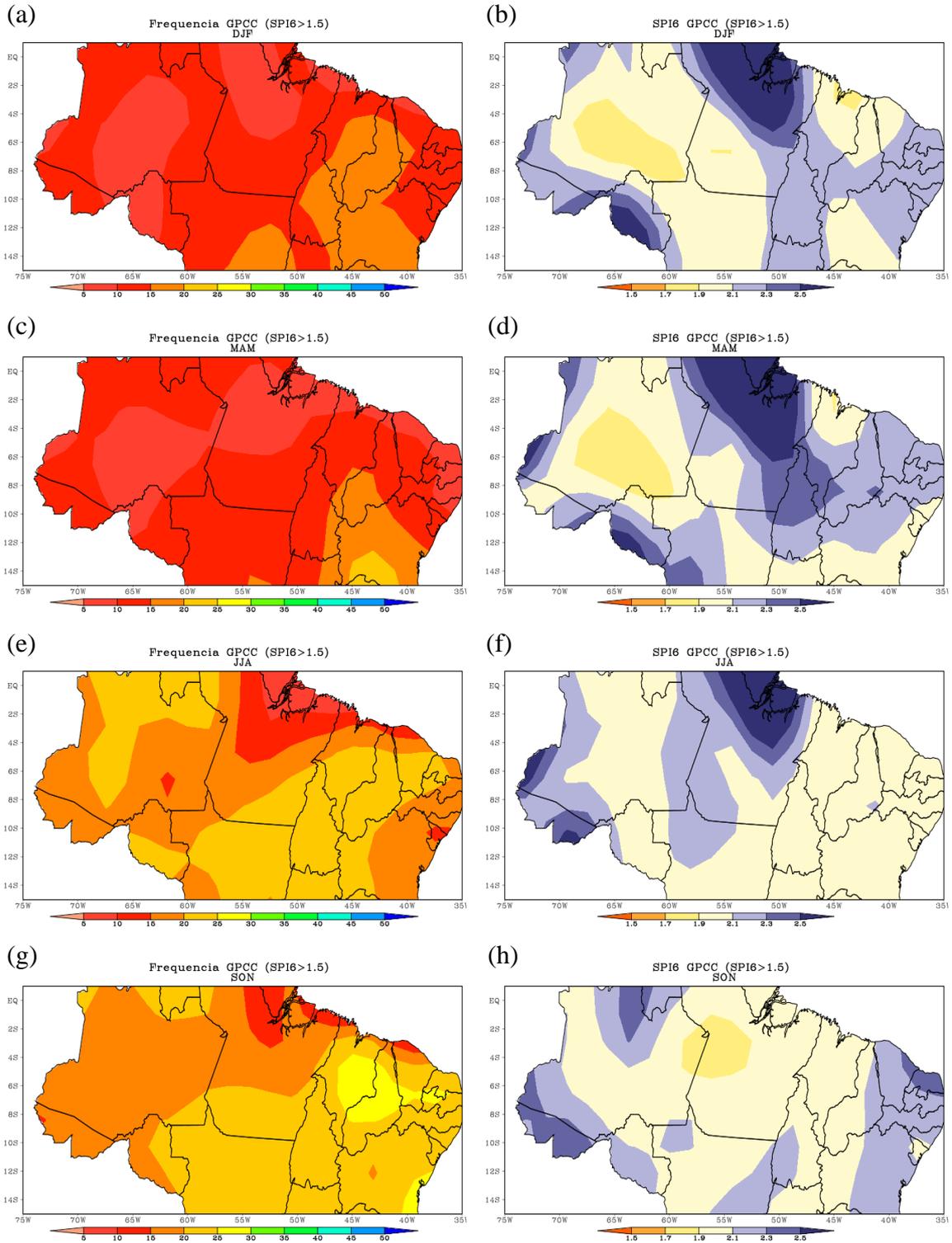


Figura 5.12 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

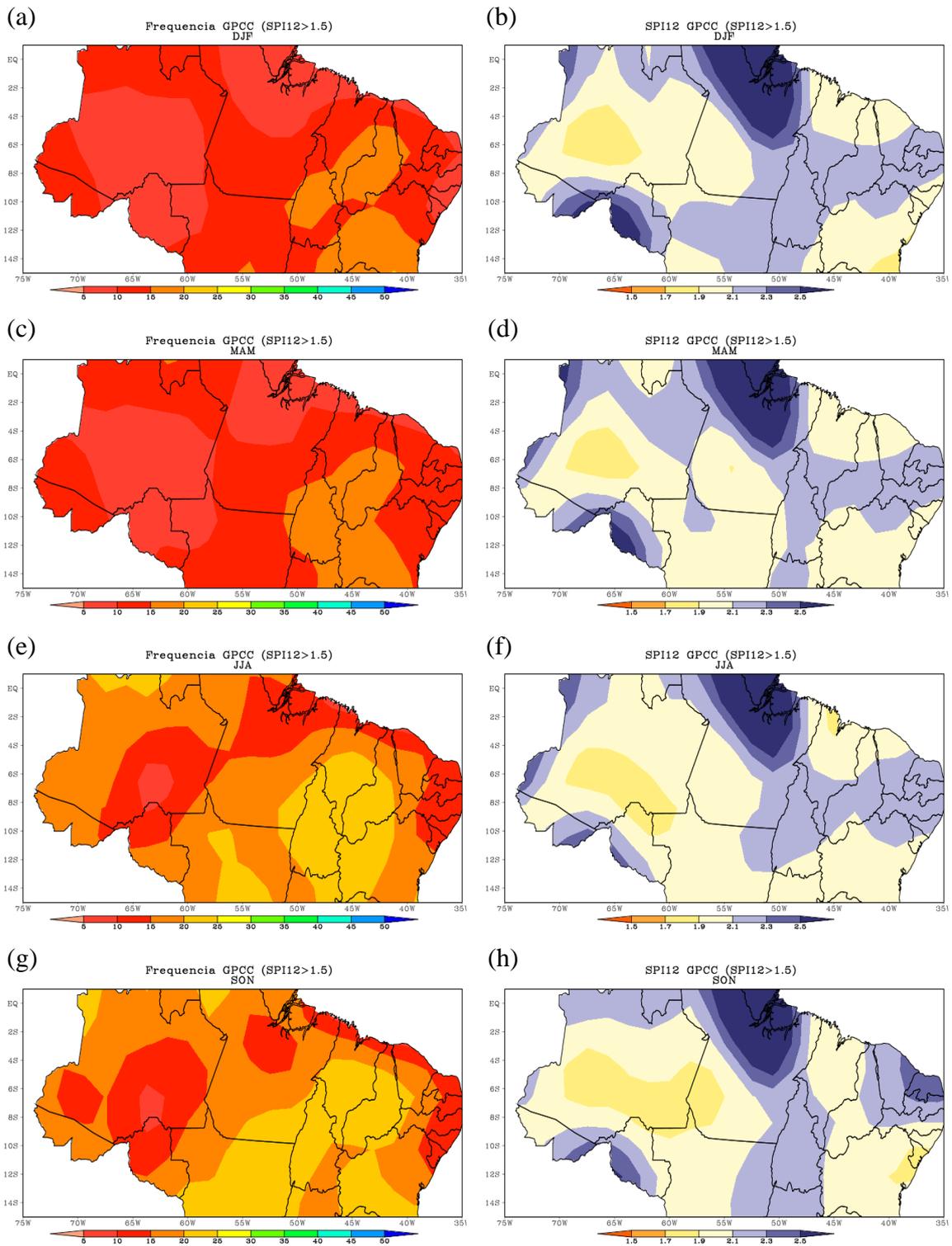


Figura 5.13 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

A variabilidade sazonal dos eventos severos e extremos de seca definidos pelos SPI-3, 6 e 12 obtidos com dados de precipitação do GPCC é mostrada nas Figura 5.14, 5.15 e 5.16. Verifica-se que a frequência de secas de curta duração (SPI-3) comporta-se de maneira bastante similar durante todo o ano (Figura 5.14) no litoral norte do Nordeste, apresentando as máximas frequências observados anualmente (Figura 5.5-b). De maneira análoga as menores ocorrências na região Nordeste, o núcleo de máximo relativo na Amazônia central é destacado no outono e inverno (Figura 5.14- c, e), que abrange grande parte da estação seca para esta região.

As intensidades médias referentes aos eventos severos e extremos de seca observados na Figura anual (Figura 5.5-d) no norte do Pará e Amapá são destacadas nos meses de março, abril e maio (Figura 5.14- d). Na região Nordeste foram observados apenas eventos severos em todas as estações do ano (Figura 5.14).

Os eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6, assim como pelo SPI-3 apresentam no litoral norte do Nordeste uma alta frequência em praticamente todas as estações do ano (Figura 5.15), coerente com a frequência do SPI-6 anual (Figura 5.6-b). O núcleo de máximo relativo na Amazônia central possui uma região de maior abrangência que os eventos de curta duração no outono e inverno.

Às intensidades médias dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6, são relevantes de outono e inverno, no norte do Pará e Amapá. Observa-se também um núcleo de extremos no sudoeste da Amazônia em todas as estações (Figura 5.15), enquanto na região Nordeste apenas eventos severos de seca. Os eventos de seca de longa duração (SPI-12) mostram que a frequência observada no litoral norte do Nordeste possui um comportamento típico em todas as estações para todas as escalas de SPI analisadas. Na região central da Amazônia observa-se um núcleo bem característico com frequências relativamente altas em todas as estações (Figura 5.16).

Com relação às intensidades médias observa-se dois núcleos de eventos extremos que podem ser destacados, no norte do Pará e Amapá (observados também na

outras escalas de SPI) para o outono e inverno (Figura 5.16-c, e), e outro no sudoeste na Amazônia visto em todas as estações. Na região Nordeste começa a aparecer um núcleo eventos extremos no período da primavera (Figura 5.16-g), observado apenas nos eventos de maior duração.

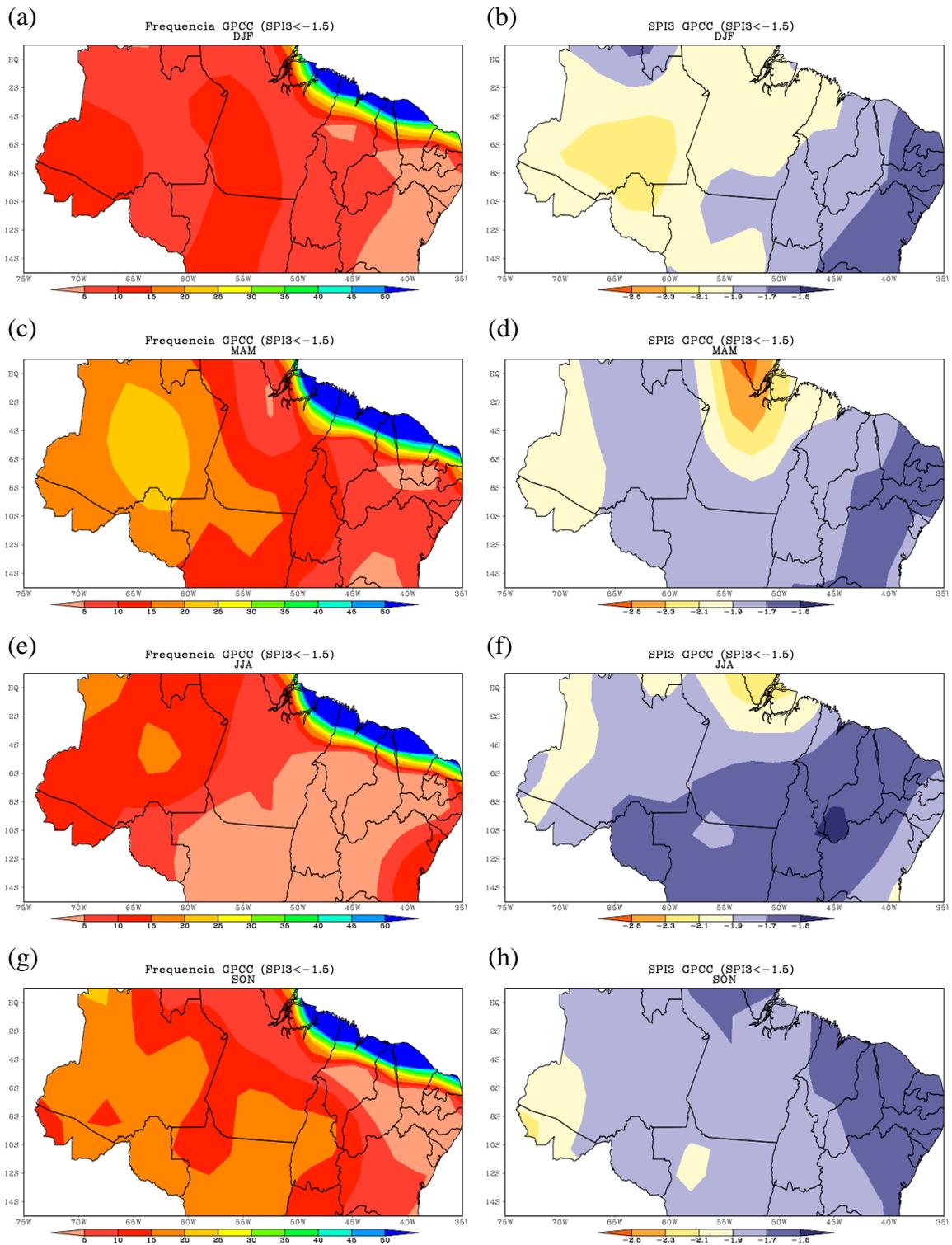


Figura 5.14 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

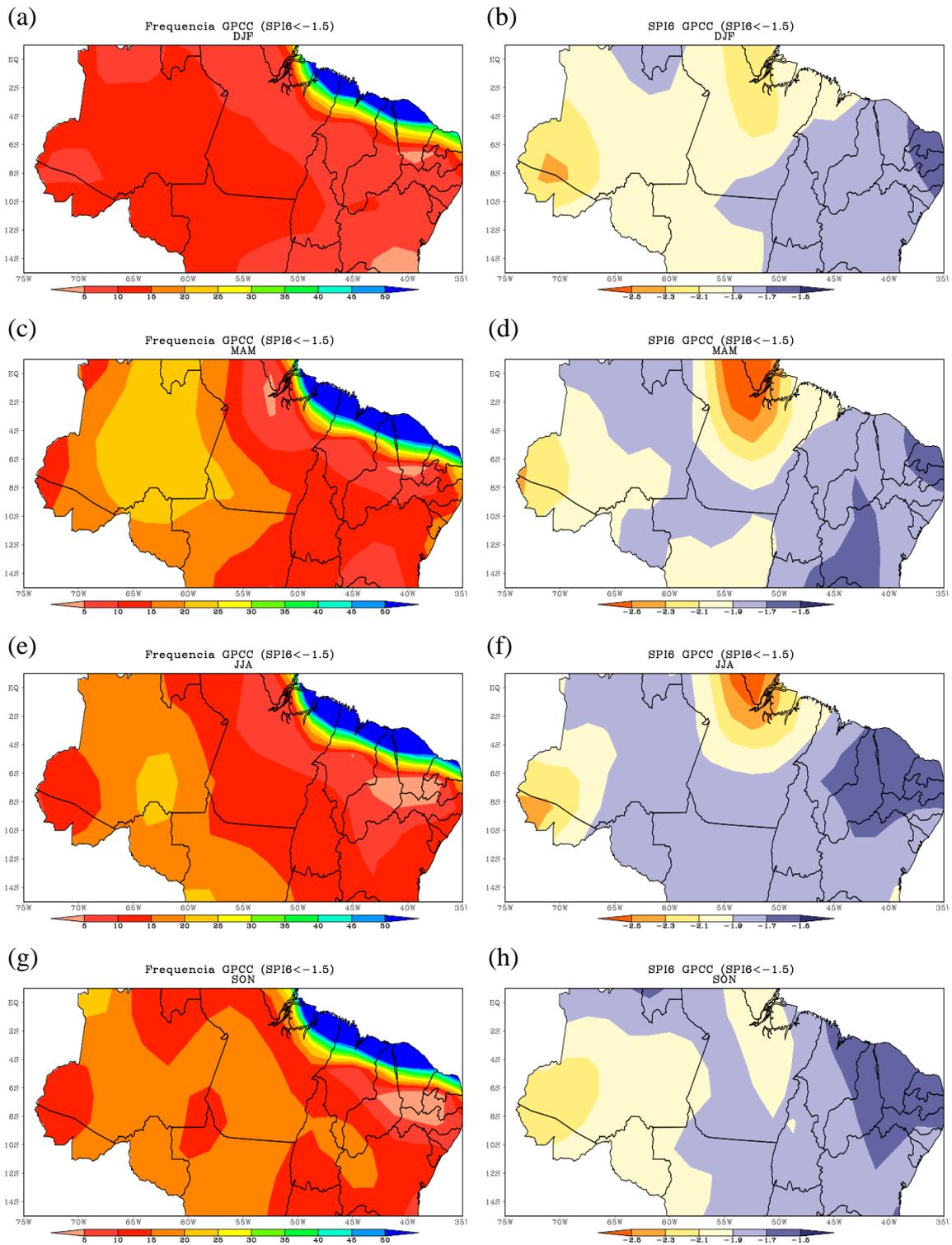


Figura 5.15 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

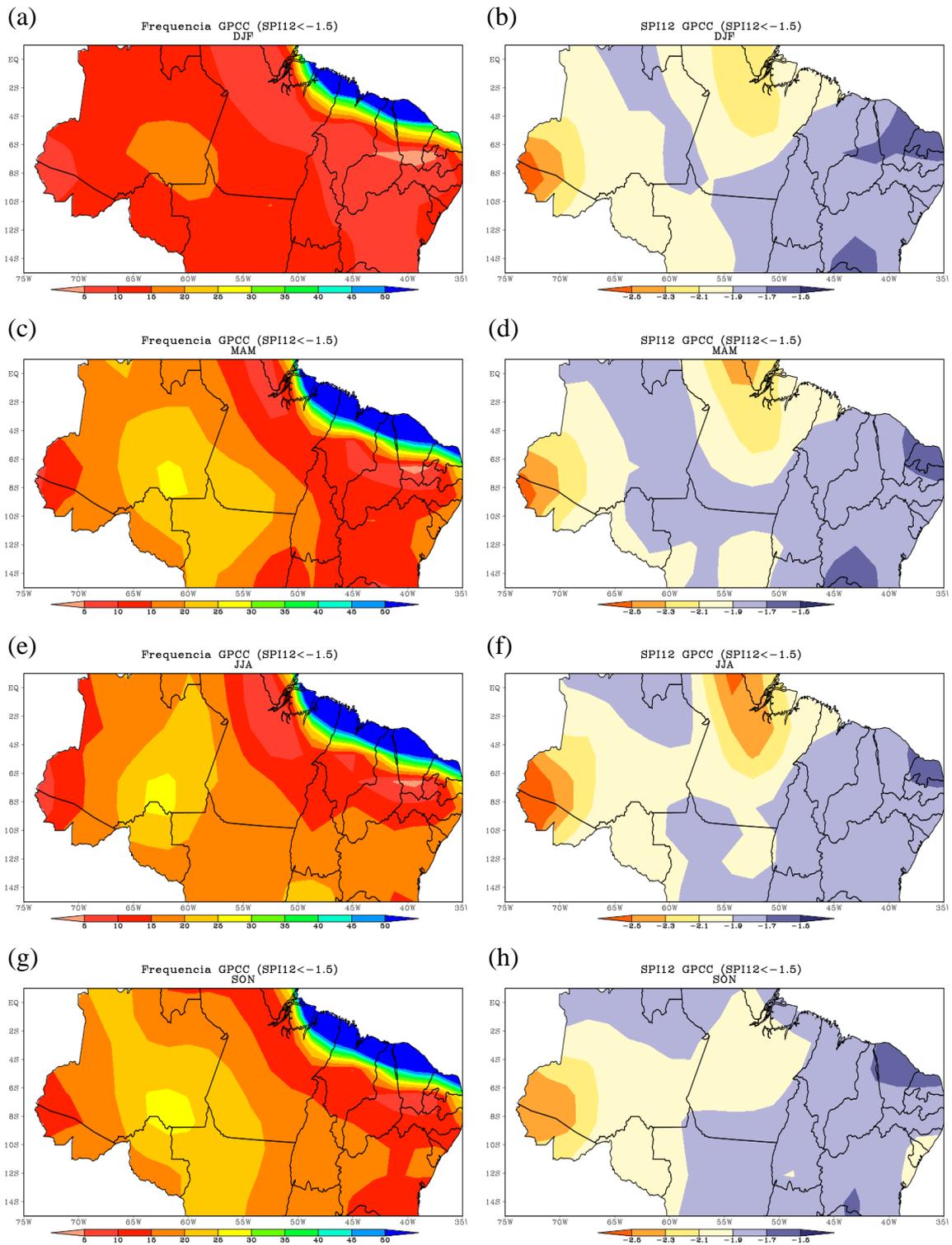


Figura 5.16 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901-2000.

A análise sazonal dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3, 6 e 12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C é apresentada nas Figura 5.17, 5.18 e 5.19.

Na Figura 5.17 nota-se que assim como no comportamento anual, (Figura 5.8-a) as frequências dos eventos são bastante homogêneas em todas as estações do ano. Observa-se que as maiores frequências ocorrem no período do inverno e primavera. As maiores intensidades médias do SPI, representando a ocorrência de eventos extremos ocorrem em todo o Nordeste no inverno (Figura 5.17-f) e no norte do litoral nordestino na primavera (Figura 5.17-h). A intensidade desses eventos diminuem quando são somadas todas as estações do ano e não se observa nenhum padrão destacado na intensidade anual (Figura 5.8-c).

De maneira análoga ao SPI-3 o comportamento sazonal apresentado pelo SPI-6 do modelo ECHAM5 para a rodada 20C observado na Figura 5.18, vê-se que a frequência é bem distribuída ao longo do ano. Em todas as estações do ano a região a sudoeste da Amazônia (próximo ao Rondônia) apresenta entre 15 e 20 casos severos e extremos de chuva nos 100 anos. Assim como para os eventos de curta duração no inverno (Figura 5.18-e) e na primavera (Figura 5.18-g) a frequência dos eventos de média duração são mais intensas.

Em relação às intensidades médias do SPI-6 a em todas as estações grande parte da região de estudo apresenta eventos entre 1,9 e 2,1, no limite entre severo e extremo. Observa-se apenas alguns núcleos isolados com SPI de 2,1 para diferentes regiões em cada estação do ano, não apresentando dessa maneira um padrão característico.

A frequência de eventos de chuva de longa duração (SPI-12) o comportamento do verão é bastante parecido com o outono, enquanto o inverno é similar a primavera. A frequência anual máxima desses eventos que ocorrem no Amapá, norte Pará e Maranhão e no sul da Bahia, são caracterizados no verão e outono (Figura 5.19-a, c, respectivamente). É possível perceber ainda, um núcleo na região central do Pará e

sudoeste do Nordeste notado no inverno (Figura 5.19-e) e primavera (Figura 5.19-g), que representam as regiões de menores frequência desses eventos na Figura anual. Assim como nos eventos de curta e média duração, o inverno e a primavera apresentam as maiores frequências.

Às intensidades médias do SPI-12 assim como nos eventos de escala menor apresentam-se de maneira bastante homogênea. Na região Nordeste assim como no comportamento anual, exceto no inverno (Figura 5.19-f), as demais estações do ano apresentam SPI entre 1,7 e 1,9, caracterizando eventos severos. As outras regiões não apresentam um comportamento característico.

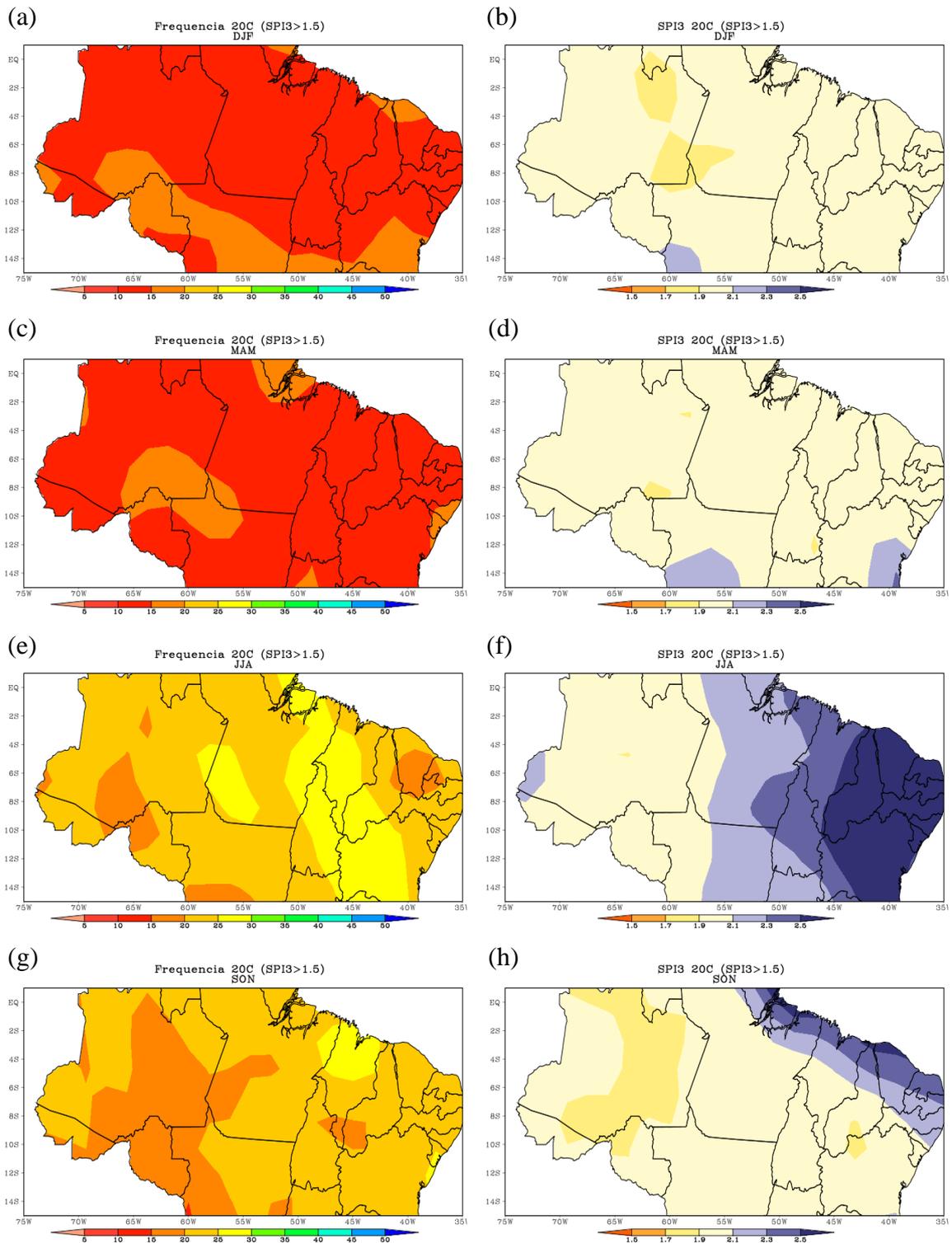


Figura 5.17 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.

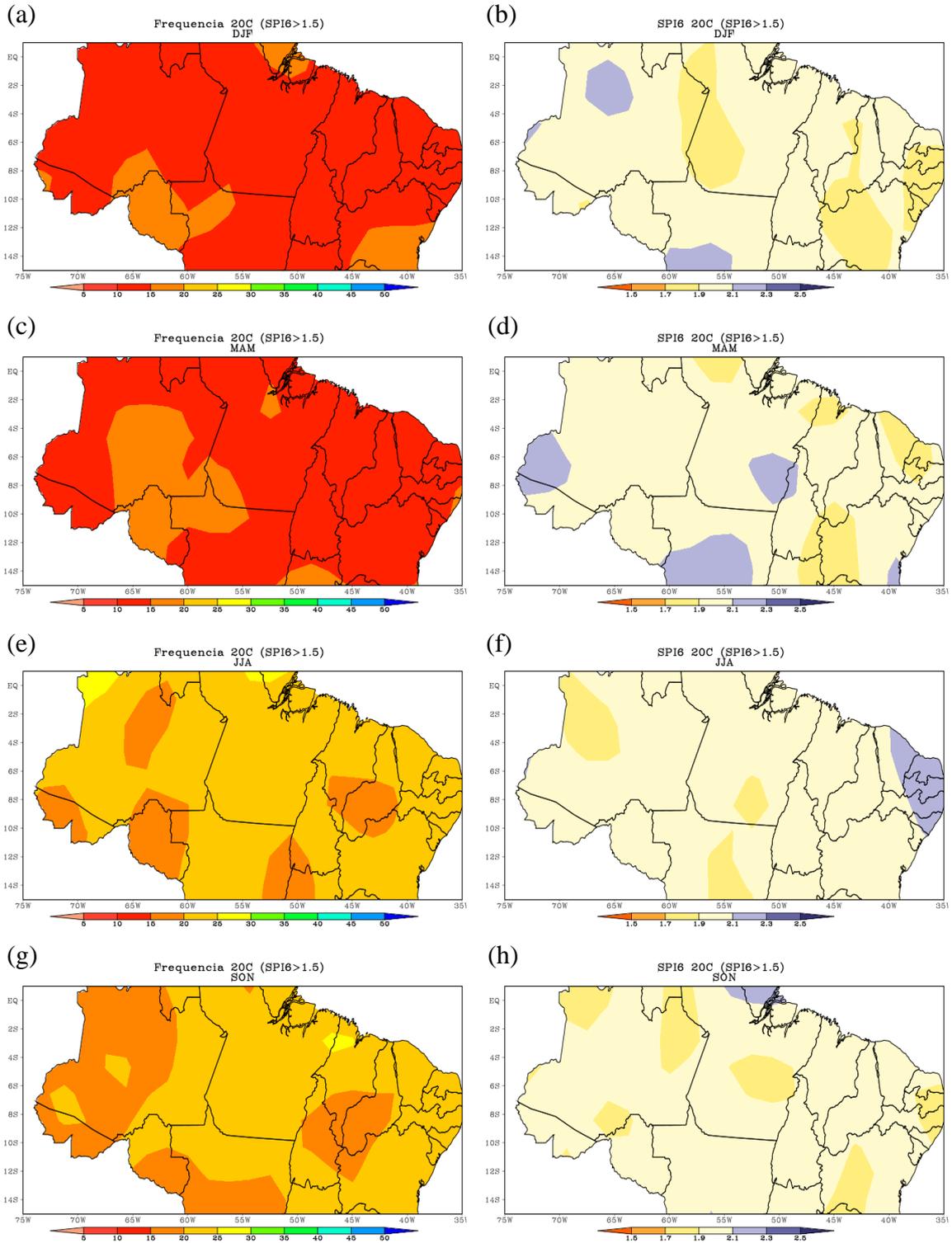


Figura 5.18 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.

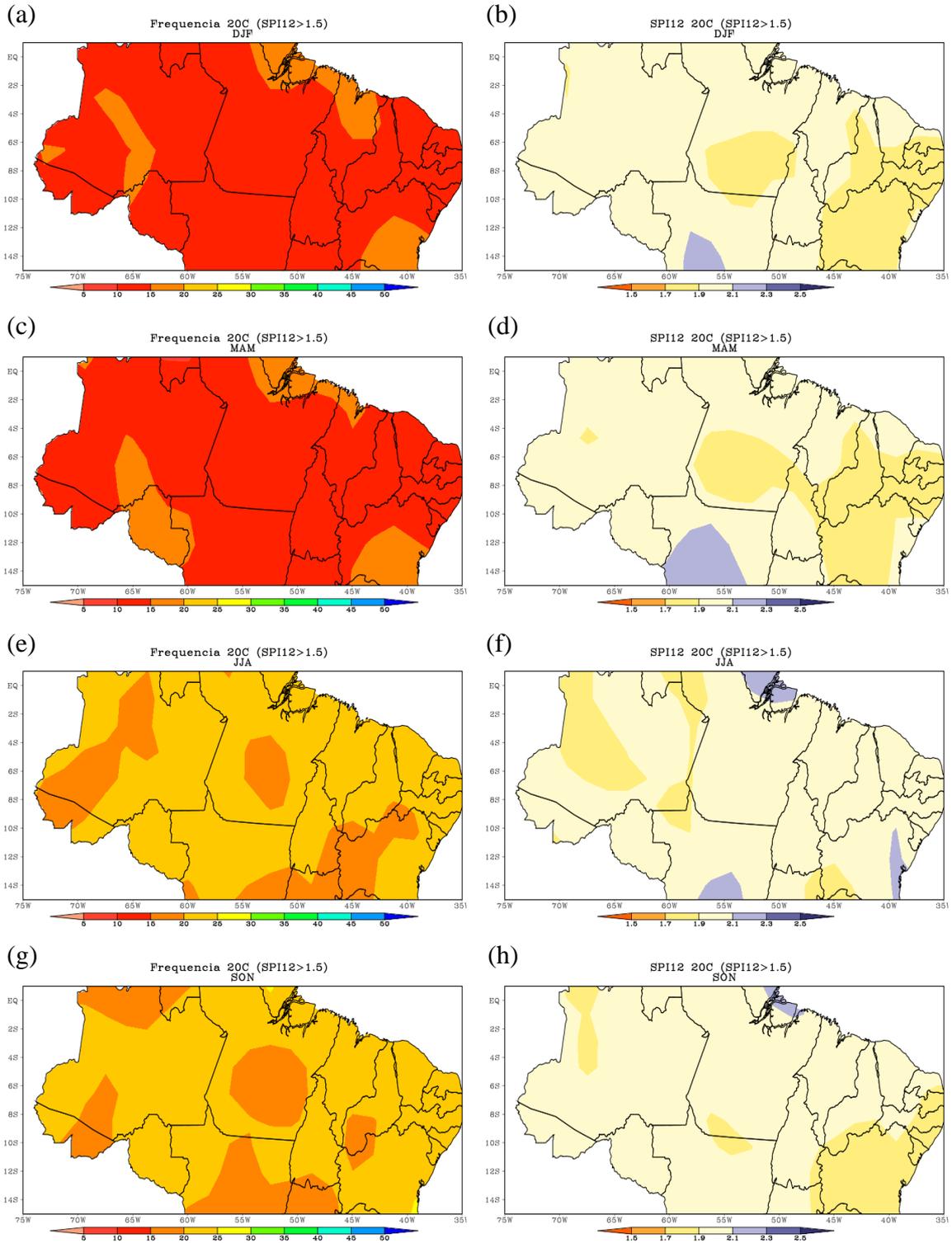


Figura 5.19 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.

A análise sazonal dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI para eventos de curta, média e longa duração, SPI-3, 6 e 12, respectivamente, através dos dados de precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C é apresentada nas Figura 5.20, 5.21 e 5.22.

Em relação aos eventos severos e extremos de seca de acordo com o SPI-3 pode-se destacar que o núcleo de maior frequência no Nordeste observado na Figura anual (Figura 5.8-b) é bem caracterizado no período do inverno (Figura 5.20-e), enquanto o núcleo de alta frequência no noroeste da Amazônia é bem destacado no outono (Figura 5.20-c) e primavera (Figura 5.20-g), com uma área de abrangência maior.

Nas intensidades médias apresentados por esses eventos vê-se que no período do inverno (Figura 5.20-f) a ocorrência de eventos severos em praticamente toda região. Nas demais estações do ano os valores de SPI mostraram-se bastante homogêneos, apresentando no litoral nordestino em quase toda sua extensão entre -1,7 e -1,9 e em grande parte da região Amazônica entre -1,9 e -2,1.

A frequência dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 encontram-se na Figura 5.21 na qual nota-se que no Amapá e a Ilha de Marajó apresentam eventos entre 5 e 15 eventos em todas as estações do ano, representando os mínimos observados para toda a região de estudo. Destaca-se também a região de Alagoas até o Rio Grande do Norte de 10 a 15 eventos, exceto na primavera (Figura 5.21-g), que apresenta uma frequência um pouco maior.

Observa-se que a distribuição das intensidades médias apresentou-se de maneira bastante homogênea em todas as estações, vê-se ainda que em quase todo litoral nordestino eventos severos entre -1,7 e -1,9, coincidindo com o gráfico anual (Figura 5.9-b). Os eventos severos e extremos de seca de acordo com o SPI-12 (Figura 5.22) apresentam frequências que possibilitam destacar as estações de transição (primavera e outono) e indicam uma maior abrangência de altas frequências. No verão observa-se as menores frequências desses eventos.

Às intensidades médias têm uma distribuição bastante similar em todas as estações (Figura 5.22), com as maiores valores ocorrendo no intervalo entre -1,9 e -2,1, não podendo desta forma definir extremos bem destacados.

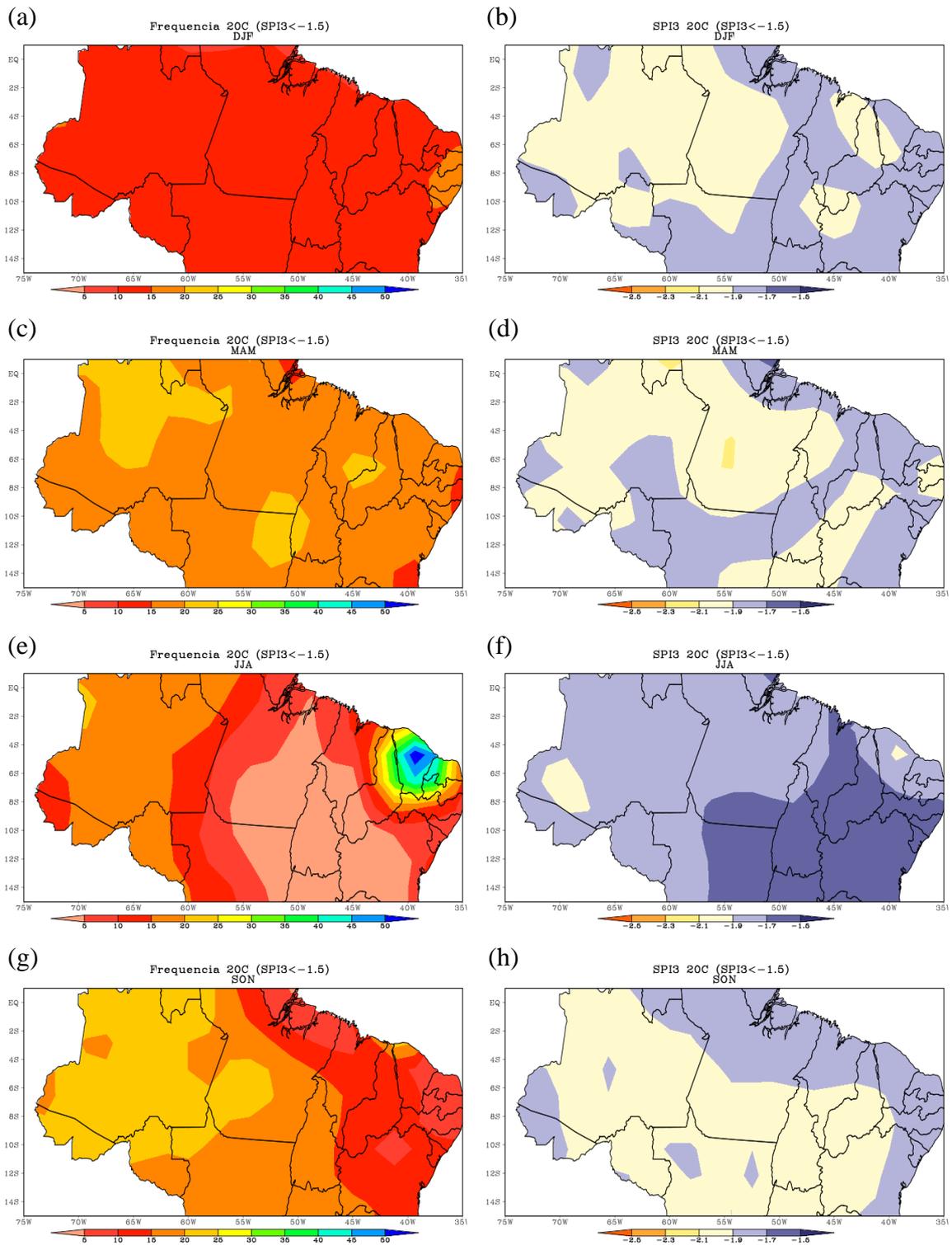


Figura 5.20 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.

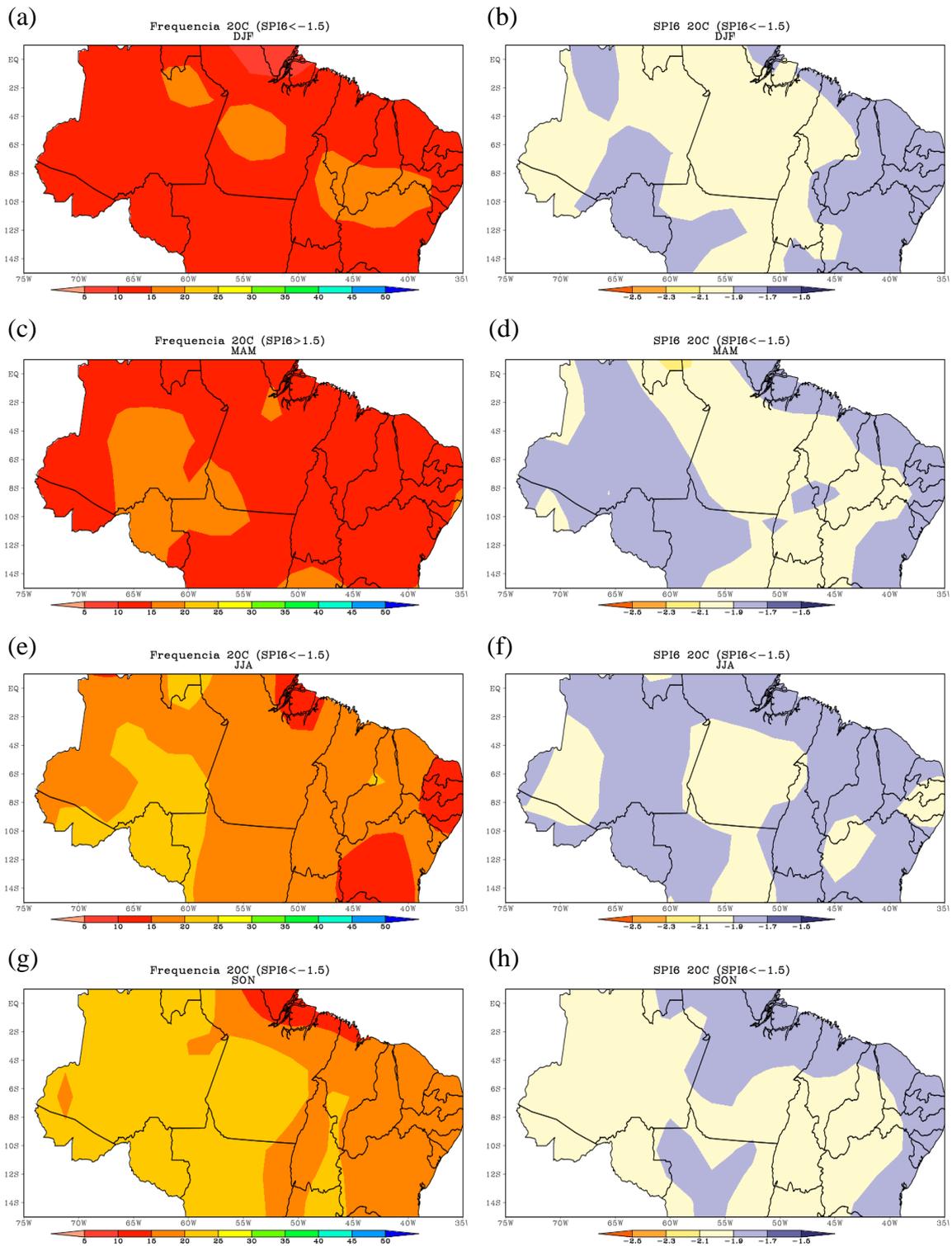


Figura 5.21 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.

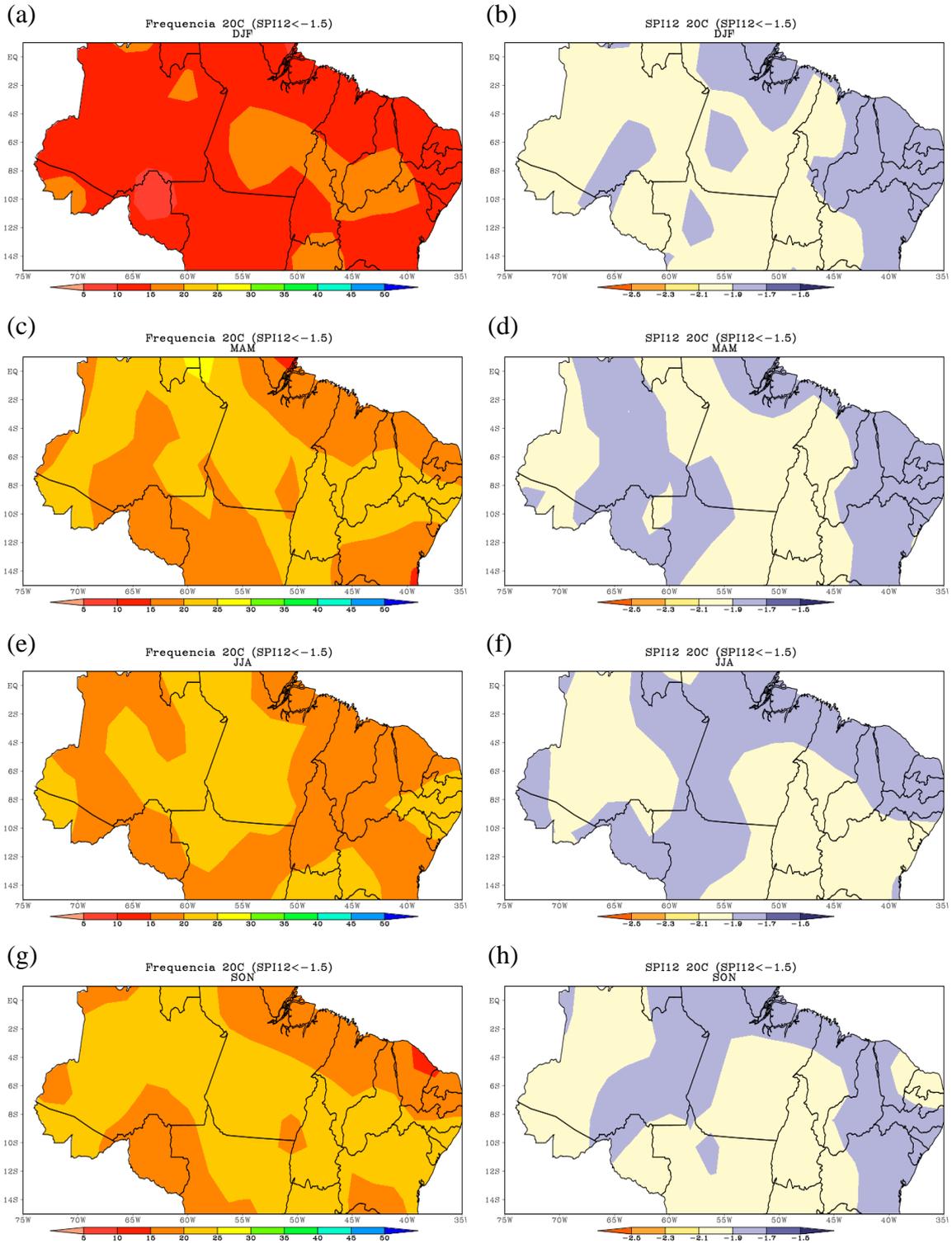


Figura 5.22 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 derivadas da precipitação do modelo ECHAM5 para a rodada 20C, no período de 1901-2000.

De maneira geral, as frequências dos eventos severos e extremos de chuva e seca tanto para as precipitações do GPCC quanto para as do modelo apresentam-se maiores no inverno e na primavera, período seco na Amazônia e no Nordeste.

O verão foi caracterizado por não apresentar grandes frequências de eventos severos e extremos tanto de chuva como de seca, exceto pelos eventos de seca na costa norte do Nordeste pela reanálise do GPCC. Além disso, esses eventos indicaram uma distribuição espacial mais heterogênea que os eventos de chuva, para os dois conjuntos de dados estudados. Nestes dois conjuntos analisados, os eventos chuvosos severos e extremos apresentaram pouca variabilidade sazonal no século XX em todas as escalas temporais dos SPIs. Os eventos severos e extremos de seca indicaram maior variabilidade sazonal na escala trimestral do SPI (SPI-3).

Outra característica importante do SPI é a intensidade dos eventos chuvosos e secos. Nota-se que as intensidades médias dos eventos de chuva permanecem constantes com a base de dados do GPCC, mas diminuem utilizando as saídas do modelo ECHAM5. Ambas as séries de SPI indicaram que as intensidades médias dos eventos secos severos e extremos crescem conforme aumenta a escala temporal do SPI.

5.1.4. Tendência nas frequências de eventos secos e chuvosos dos SPIs 3, 6 e 12

As tendências de redução/aumento no número de eventos severos e extremos de chuva e seca pelos SPIs estudados nas regiões Norte e Nordeste do Brasil foram analisadas através de teste de Mann-Kendall, conforme a metodologia.

As tendências dos SPIs 3, 6 e 12 obtidos através dos dados de precipitação do GPCC e do modelo ECHAM5 para o experimento 20C podem ser vistas na Figura 5.23. Os dados do GPCC (painel esquerdo) indicam uma tendência de aumento desses eventos na região Amazônica e no litoral nordestino de maneira bastante semelhante para eventos de curta, média e longa, SPI-3, SPI-6 e SPI-12, respectivamente. Chu *et al.* (1995) constataram um aumento sistemático da convecção sobre o norte da Amazônia desde 1975, que poderia indicar um aumento das chuvas na região. Marengo (2004) identificou que desde finais de 1920 a chuva na Amazônia apresenta leves tendências positivas, que não são estatisticamente significativas. Há ainda evidência de tendência de seca nessa região, já que, segundo Fearnside (2009) vários modelos entre eles o ECHAM5 indicam tendências de seca na Amazônia.

Esta tendência de aumento dos eventos severos e extremos no litoral nordestino observada na mesma figura corrobora o trabalho de Hastenrath (2001), que identificou tendências de longo prazo nas chuvas do Nordeste e do setor do Atlântico Tropical adjacente, caracterizado por um deslocamento da ZCIT e banda de chuvas mais para o Sul da sua posição climatológica. Isto poderia explicar as tendências positivas de chuva no Nordeste, identificadas por Hastenrath e Greischar (1993) e Marengo *et al.* (1998), e que aparecem detalhes nos mapas de anomalias globais de chuva no IPCC-TAR (2001 a). No estado do Maranhão o núcleo observado que indica a tendência de eventos positivos compreende uma área mais representativa para eventos de média e longa duração.

Por outro lado, as áreas que apresentam redução dos eventos severos e extremos são bem menores, e encontram-se no oeste da Bahia e sul do Tocantins, e um núcleo no estado do Pará, que abrange uma área maior em eventos de longa duração (SPI-12).

Os SPIs baseados nas precipitações do ECHAM5 (20C) mostram tendências divergentes às encontradas com os dados do GPCC. Já que a região do nordeste apresenta uma tendência de decréscimo desses eventos em todas as escalas temporais do SPI. A diminuição de tais eventos de média duração, representado pelo SPI-6, abrange uma área maior que abrange todo litoral nordestino, e vai desde o sudoeste da Bahia ao nordeste do Pará e região litorânea do norte do nordeste. A tendência de aumento desses eventos é observada apenas no noroeste da Amazônia (para o SPI-3), esta área aumenta com o aumento da escala temporal do SPI, e no SPI-12 atinge todo o oeste do Amazonas, Acre e uma faixa no estado do Amazonas que se estende até o Mato Grosso.

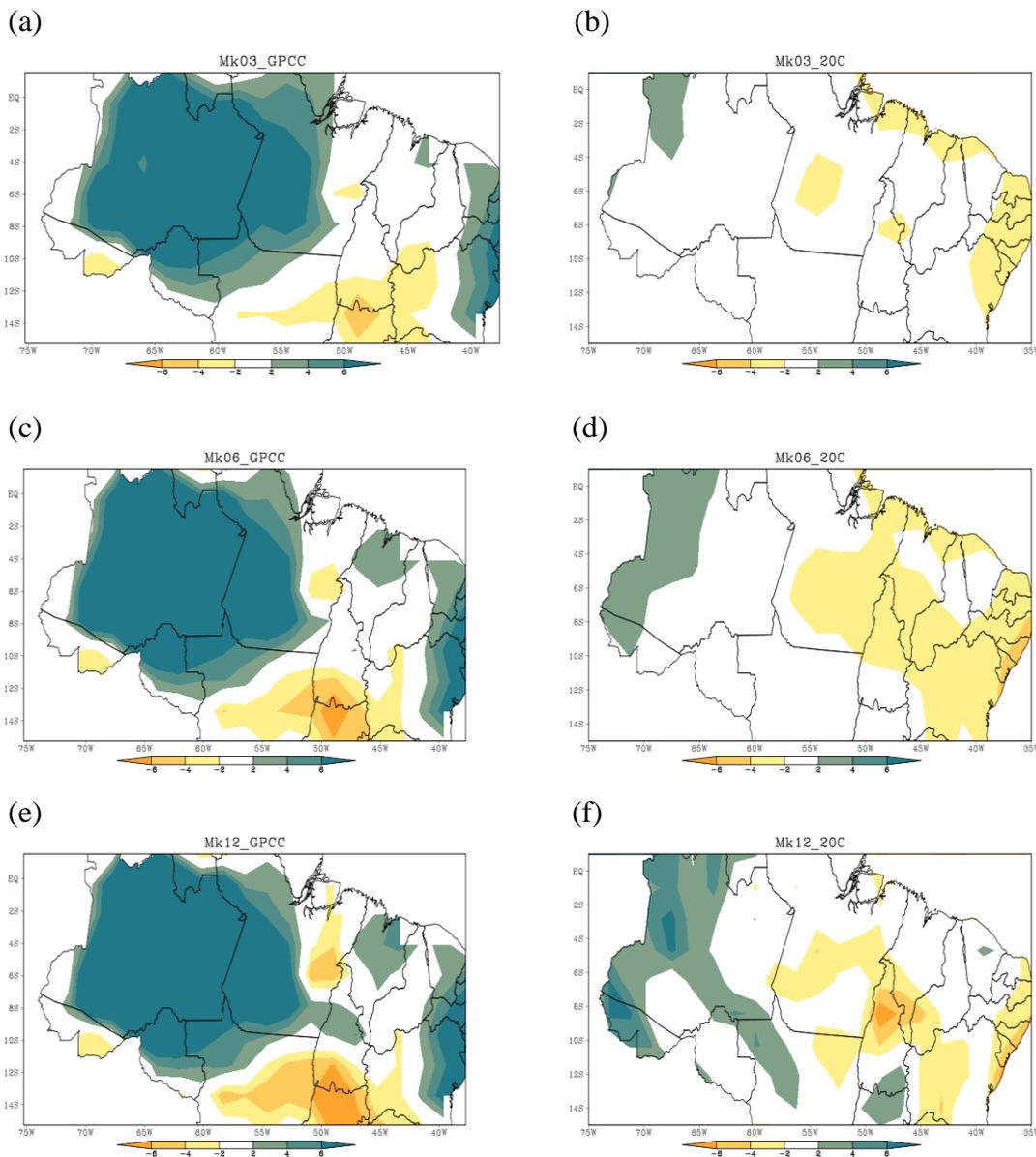


Figura 5.23 - Tendências nas frequências de eventos secos/chuvosos, avaliados pelo teste de Mann-Kendall, pelos SPIs 3 (a, b), 6 (c, d) e 12 (e, f), para o século XX, obtidos com dados do GPCC (esquerda) e do modelo ECHAM5 20C (direita). Valores superiores a 2 (coloridos) indicam tendências significativa a 5% de aumento e inferiores a -2 de decréscimo.

5.1.5. Frequências Decenais dos eventos severos e extremos de seca e de chuva pelo SPI-6

As frequências decenais de eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 (meses de chuva sob estas condições) computado com dados de precipitação do GPCC são apresentadas na Figura 5.24, na qual pode-se notar na primeira década uma grande região com valores abaixo de 5 ocorrências (5 em 120 meses), com exceção de uma porção no centro-norte do Pará e Roraima, onde os valores chegam a ultrapassar 25 meses mais ao norte. Para a década de 10 (Figura 5.24- a) as menores frequências abrangem uma área menor, se limitando à Amazônia. Ainda nesta década vê-se as maiores frequências no Sul da Bahia e do Tocantins, atingindo até 20 eventos. A década de 20 (Figura 5.24- b) apresenta as maiores frequências observadas em todo o século, com valores menores que 10 ocorrências apenas no norte do Pará e Roraima e na região sudoeste-leste da Amazônia. Os máximos nesta década se encontram à sudeste da Amazônia, passando dos 25 casos.

As 4 décadas seguintes apresentam um comportamento similar, mantendo uma grande região com menos de 5 ocorrências e pequenos núcleos de máxima ocorrência que poucas vezes ultrapassam 20 casos e variam de posição no decorrer do período. Inicialmente (década de 30) eles se encontram no sudeste da Amazônia (Rondônia, acre e sul do amazonas). Na década seguinte (anos 40) passam para a porção mais ao sul da área de estudo e nas duas outras (50 e 60) se encontram no norte da Amazônia, sendo que a década de 60 apresenta, também, um núcleo no litoral da Bahia. Nos anos 70 (Figura 5.24- h) os valores sobem para mais de 10 casos na maior parte da região estudada, apresentando um comportamento bastante homogêneo, este comportamento permanece assim na década seguinte (anos 80- Figura 5.24- i). E nos anos 90 (Figura 5.24- j) voltam apresentar uma grande região de mínimos, além de ter os núcleos de máxima com a menor frequência de todo o período estudado.

Na Figura 5.25 observam-se as frequências decenais de eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6. Nota-se que na primeira década (Figura 5.25-a) uma

grande heterogeneidade na distribuição espacial das frequências, com máximos atingindo mais de 30 casos na porção centro-sudeste da Amazônia e nas porções norte e leste do litoral brasileiro, e áreas de grande frequência abrangendo quase toda a Amazônia e todo o litoral brasileiro. Na década seguinte, (1911-1920 - Figura 5.25-b), os máximos na porção norte do litoral (desde a costa do Pará até o Ceará) se mantêm, e o núcleo no centro-sudeste da Amazônia também se destaca em relação à região a sua volta, mas agora com frequências entre 15 e 20. A alta frequência no litoral norte da região Nordeste se mantêm ao longo de todo o século. As 7 décadas seguintes (1921-1990) apresentam menos que 5 casos em grande parte da região estudada, com pequenos núcleos de máximo relativo passando de 20 casos apenas nas décadas de 20 (localizado no oeste da Amazônia) e de 60 (na porção sudoeste da região estudada). Além disso, não se observa nenhum padrão relevante neste período. Já nos anos 90 (Figura 5.25-j), foram observadas as maiores frequências de todo o século para toda a região de estudo, com mínimos passando dos 20 casos e máximos acima de 30 no sudoeste e noroeste da Amazônia, toda a porção sul da região de estudo e em uma área de maior abrangência na costa norte do Brasil quando comparada às outras décadas.

A década de 90 que foi a de maior destaque ao longo de todo o século, por indicar altas frequências de eventos severos e extremos de secas, fato este que pode estar associado aos eventos El Niño desta década, que ocorreram com forte intensidade em 1990 a 1993 e 1997 a 1998. Este resultado corrobora os de Cutrim *et al.* (2000) que observou que eventos de El Niño no Pacífico tendem a diminuir os totais pluviométricos na Amazônia e Nordeste do Brasil, enquanto nos de La Niña se observam anomalias positivas de precipitação.

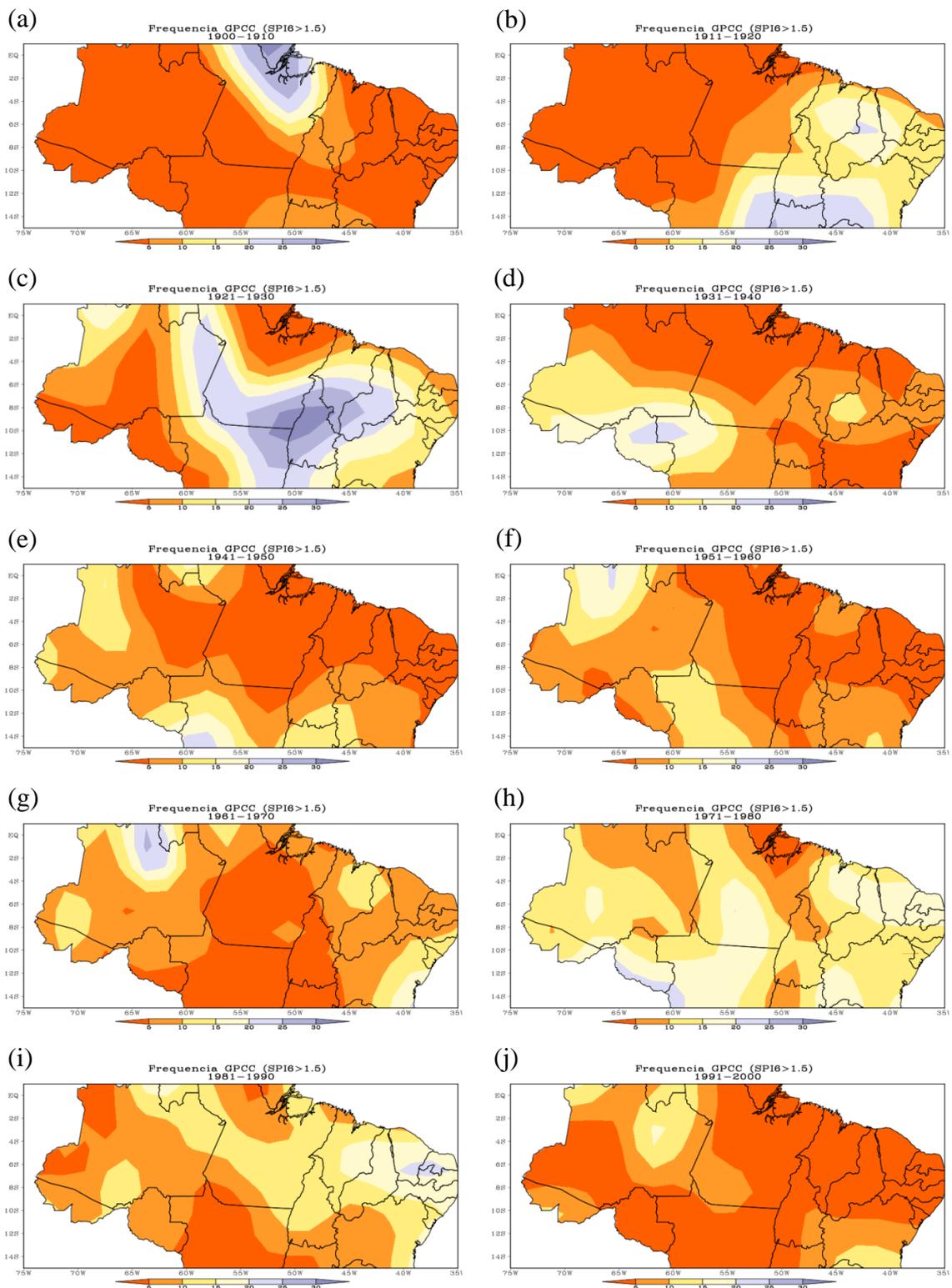


Figura 5.24 – Frequências decenais dos eventos severos e extremos de chuva, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do GPCC, no período de 1901 a 2000.

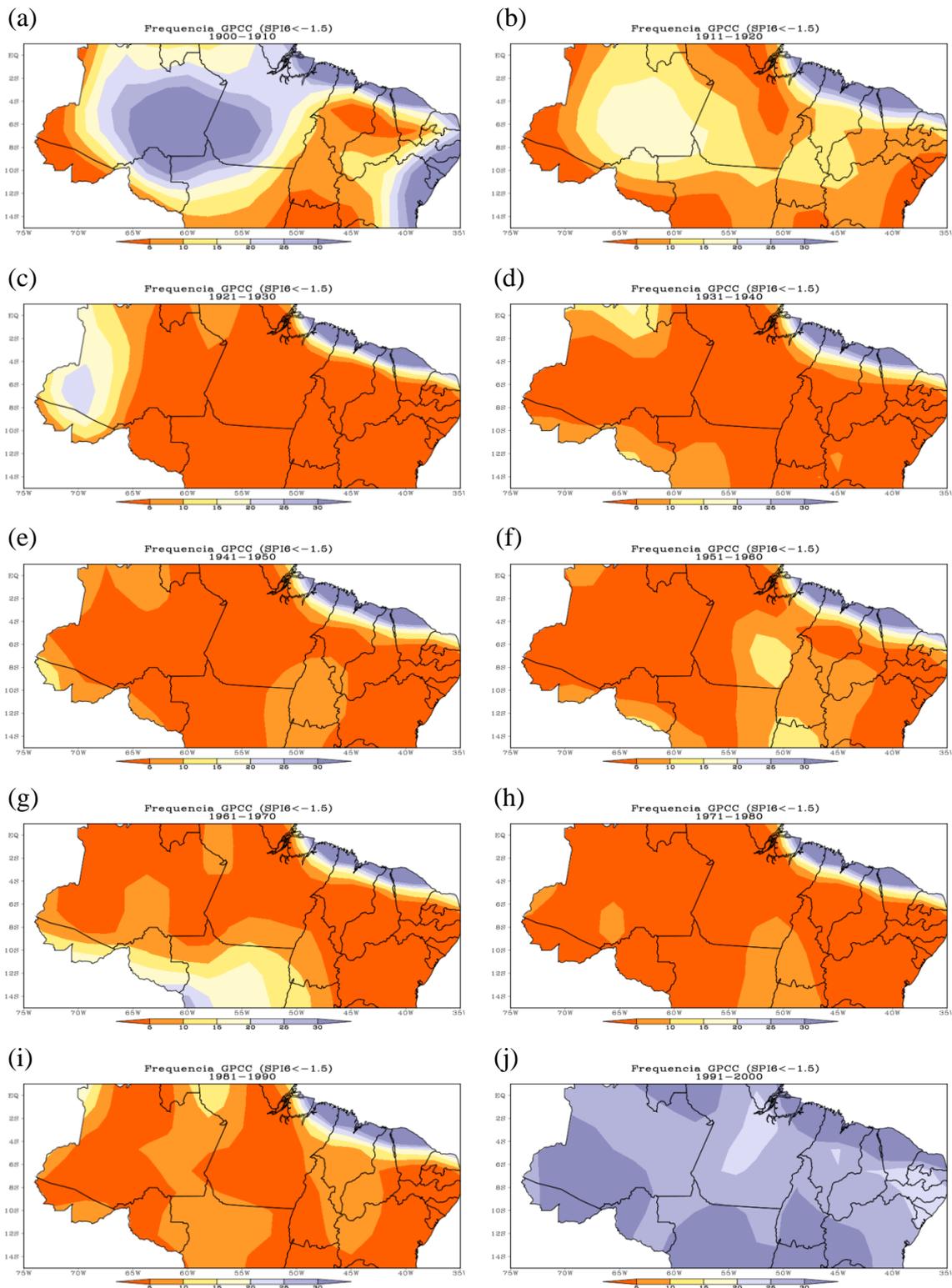


Figura 5.25 - Frequências decenais dos eventos severos e extremos de seca, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do GPCP, no período de 1901 a 2000.

As frequências decenais de eventos severos e extremos de chuvas pelo SPI-6 derivados das precipitações do modelo ECHAM5 no experimento 20C, no período de 1901 a 2000 é apresentada na Figura 5.26. A primeira década (1901-1910) apresenta frequências máximas em Roraima e litoral do Pará, atingindo valores acima de 20 ocorrências, com máximos secundários de cerca de 15 casos em toda a porção norte e litoral da região de estudo. Na segunda década são observadas altas frequências dos eventos observados em quase toda região de estudo, abrangendo, principalmente, os estados do Pará, Amapá e Tocantins. As décadas seguintes apresentam valores abaixo de 15 ocorrências na maior parte da região de estudo, exceto por pequenas áreas isoladas que se deslocam ao longo das décadas, dessa forma, não são observados núcleos com valores significativos de frequência.

A Figura 5.27 apresenta as frequências decenais de eventos severos e extremos de secas pelo SPI-6 derivadas dos dados de precipitação do modelo ECHAM5 no experimento 20C, de 1901 a 2000. Para o SPI negativo, valores significativos são encontrados apenas nas décadas de 20 (porção leste do litoral do Brasil), de 50 (divisa do nordeste do estado do Amazonas com o noroeste do Pará e um pequeno núcleo no Acre) e de 70, onde o núcleo abrange toda a porção central da região de estudo, com valores entre 15 e 25 ocorrências. Para as demais décadas os valores de frequência são bem baixos, com menos de 10 casos na grande maioria do mapa, apresentando apenas pequenos núcleos com mais de 15 ocorrências em algumas regiões.

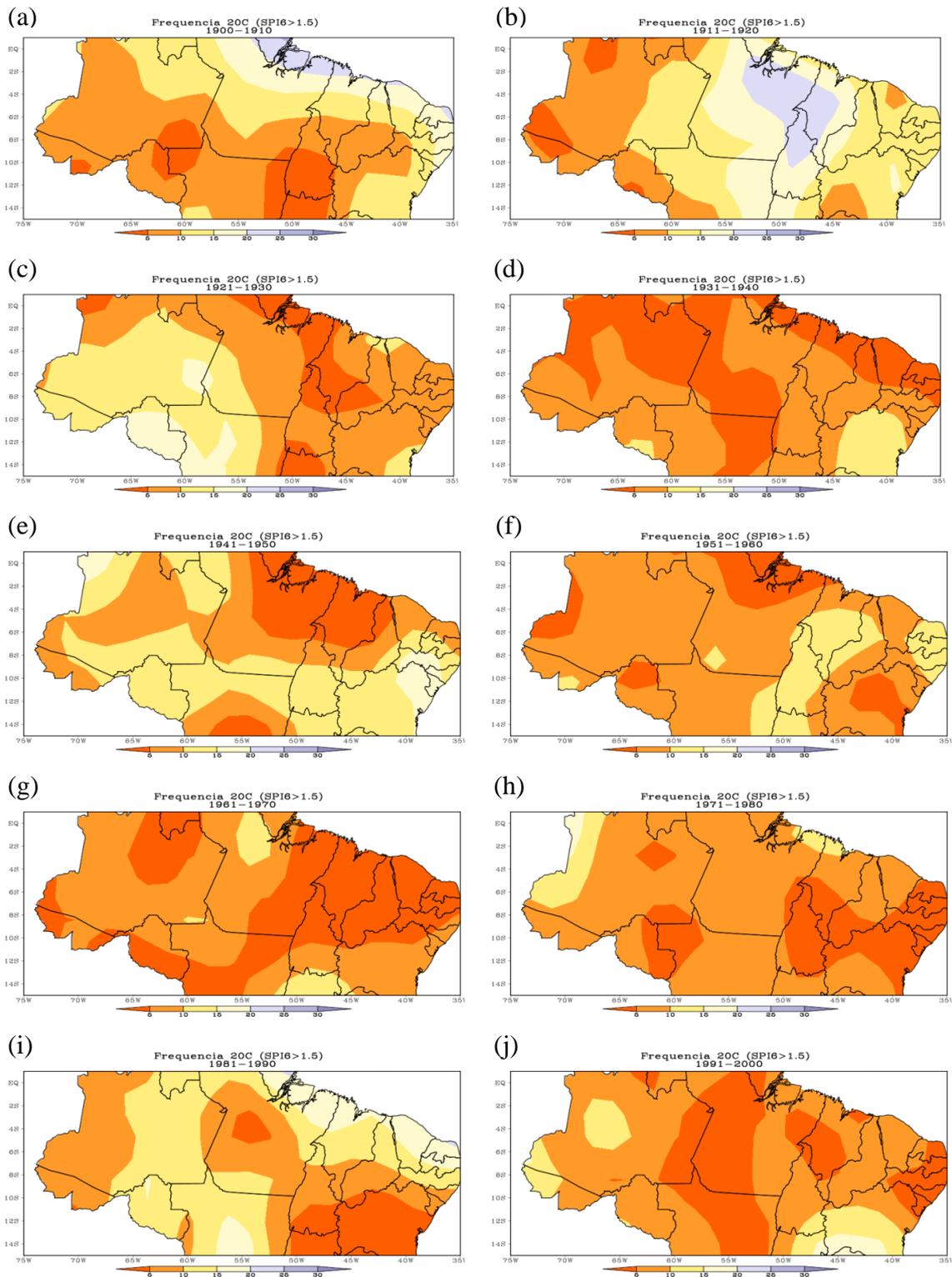


Figura 5.26 - Frequências decenais dos eventos severos e extremos de chuva, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no experimento 20C, no período de 1901 a 2000.

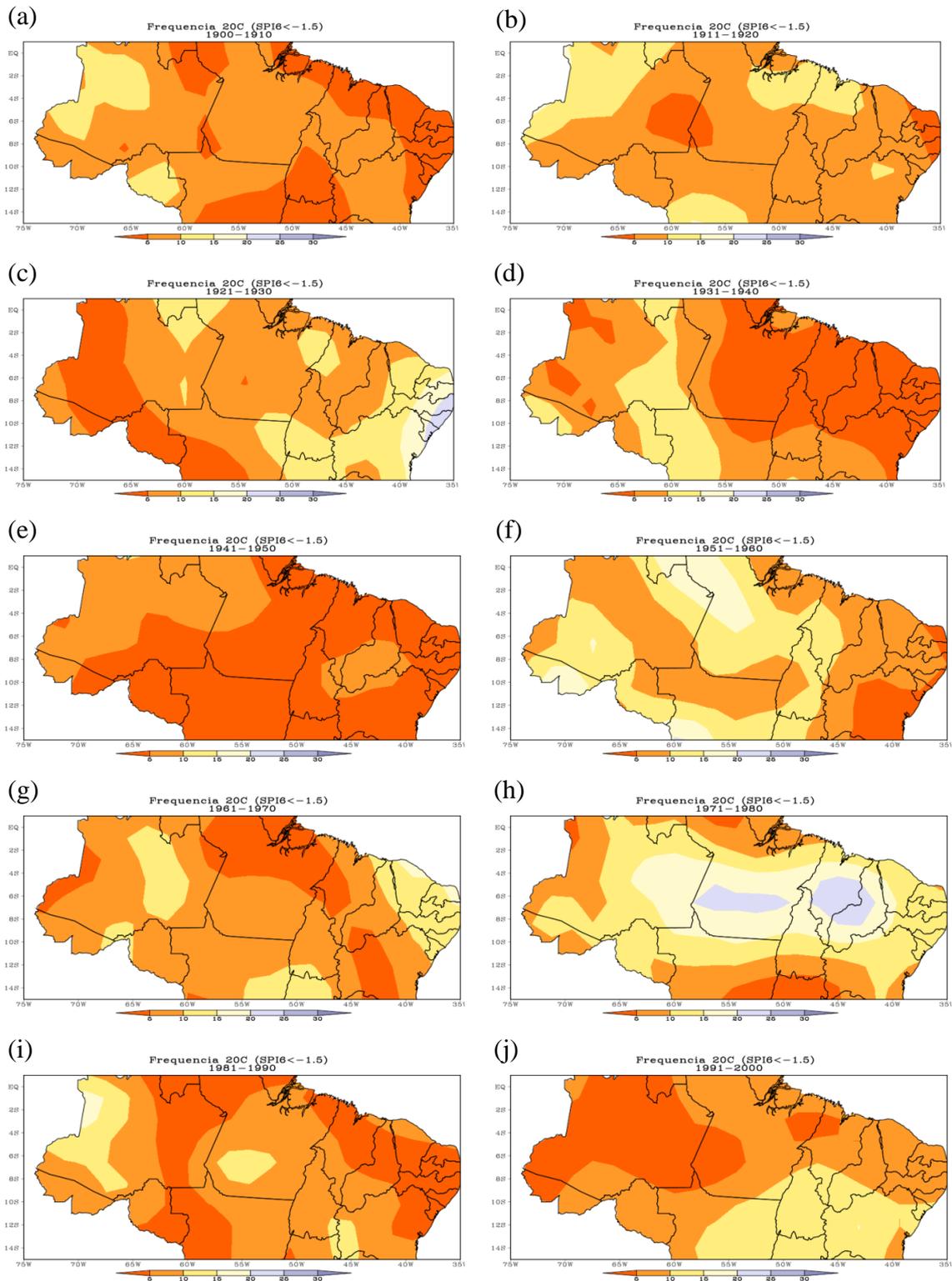


Figura 5.27 - Frequência decenais dos eventos severos e extremos de seca, pelo SPI-6, obtidos com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no experimento 20C, no período de 1901 a 2000.

De maneira geral, os SPIs baseados nos dados de precipitação do GPCC indicam que as frequências dos eventos severos e extremos de seca mostraram um padrão mais homogêneo quando comparado aos eventos de chuva. Nota-se ainda que as maiores frequências de eventos secos são maiores na primeira (1901-1010) e na última década (1990-1999), bem distintas das outras décadas.

Com relação aos SPIs derivados das precipitações do modelo ECHAM5 no experimento 20C, é possível verificar que as regiões com maiores frequência de eventos severos e extremos de chuva estão, em geral, associadas com menores frequências de eventos secos. Tanto os eventos chuvosos e secos resultantes do modelo subestimam estas frequências quando comparados as reanálises do GPCC e não reproduzem a variabilidade decenal.

Nota-se ainda que em todas as décadas as altas frequências de eventos chuvosos pelo SPI-6 com dados de precipitação do GPCC estão associados com altas frequências de eventos secos pelo SPI-6 com dados de precipitação do ECHAM5 (20C), coerentes com o coeficiente de correlação de anomalias negativo entre os dois campos de precipitação.

5.2. Projeções para o Século XXI – Cenários A1B e A2

5.2.1. Frequências e intensidades anuais dos SPIs

A variabilidade espacial anual das frequências e intensidades dos SPIs 3, 6 e 12 obtidos com dados do modelo ECHAM5 nos cenários A1B e A2 para eventos severos e extremos de chuva e de seca, no período de 2001 a 2100, são respectivamente apresentadas na Figura 5.28.

Segundo o SPI-3, o cenário A1B (intermediário) mostra elevadas ocorrências de eventos de chuva em toda região (Figura 5.28-a), em especial na Bahia, Tocantins e oeste do Pará, atingindo mais de 90 casos em 100 anos. Já os eventos de seca possuem um maior gradiente (Figura 5.28 - b), com mínimos entre 30 e 40 ocorrências na região que abrange desde a Bahia até Tocantins (onde foram observados os máximos de eventos chuvosos). As máximas de ocorrências de eventos secos são observadas desde o norte de Pernambuco até o leste o Ceará, coincidindo com os mínimos de eventos chuvosos.

Em relação às intensidades médias do SPI-3 nota-se que para os eventos de seca (Figura 30 - d) cresce de oeste para leste, apresentando seu núcleo de máximo no Nordeste do Brasil. Para os eventos secos pode-se destacar que as valores máximos de SPI negativo estão localizadas na mesma região onde as frequências desses eventos foram máximas, ou seja, as grandes quantidades de eventos no nordeste da região de estudo apresentam intensidades elevadas. As intensidades médias do SPI-6 e 12 (Figura 5.29 e 5.30) não apresentam variações relevantes tanto para os eventos de chuva quanto de seca, dessa forma, não se observam núcleos destacados.

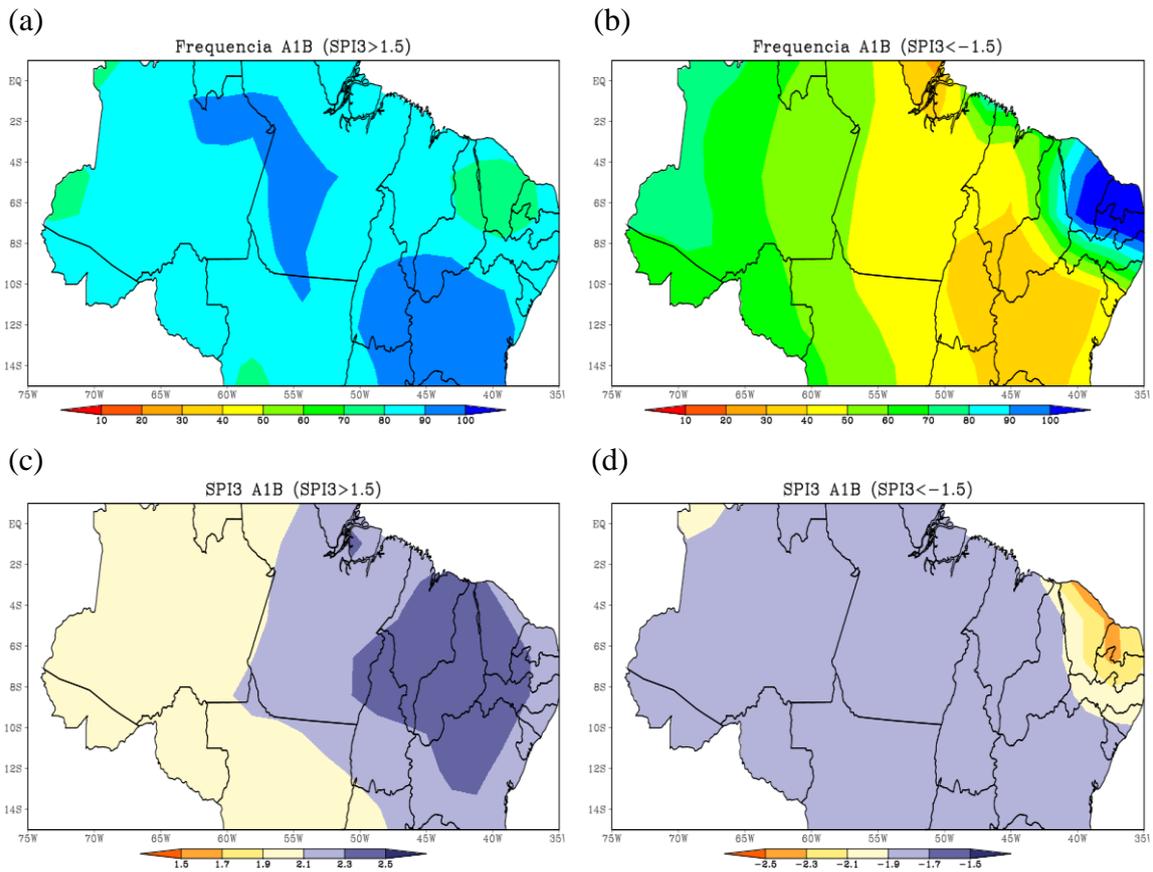


Figura 5.28– Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, no período de 2001-2100.

Para os eventos apresentados pelo SPI-6 os gradientes de frequência tanto para os eventos de chuva (Figura 5.29-a) como de seca (Figura 5.29-b) diminuem, permanecendo entre 80 a 100 e 50 a 70 ocorrências, respectivamente. As regiões onde foram encontradas as máximas ocorrência de eventos de chuva no SPI-3 se mantém para os eventos de média duração (SPI-6), da mesma maneira que os mínimos de seca.

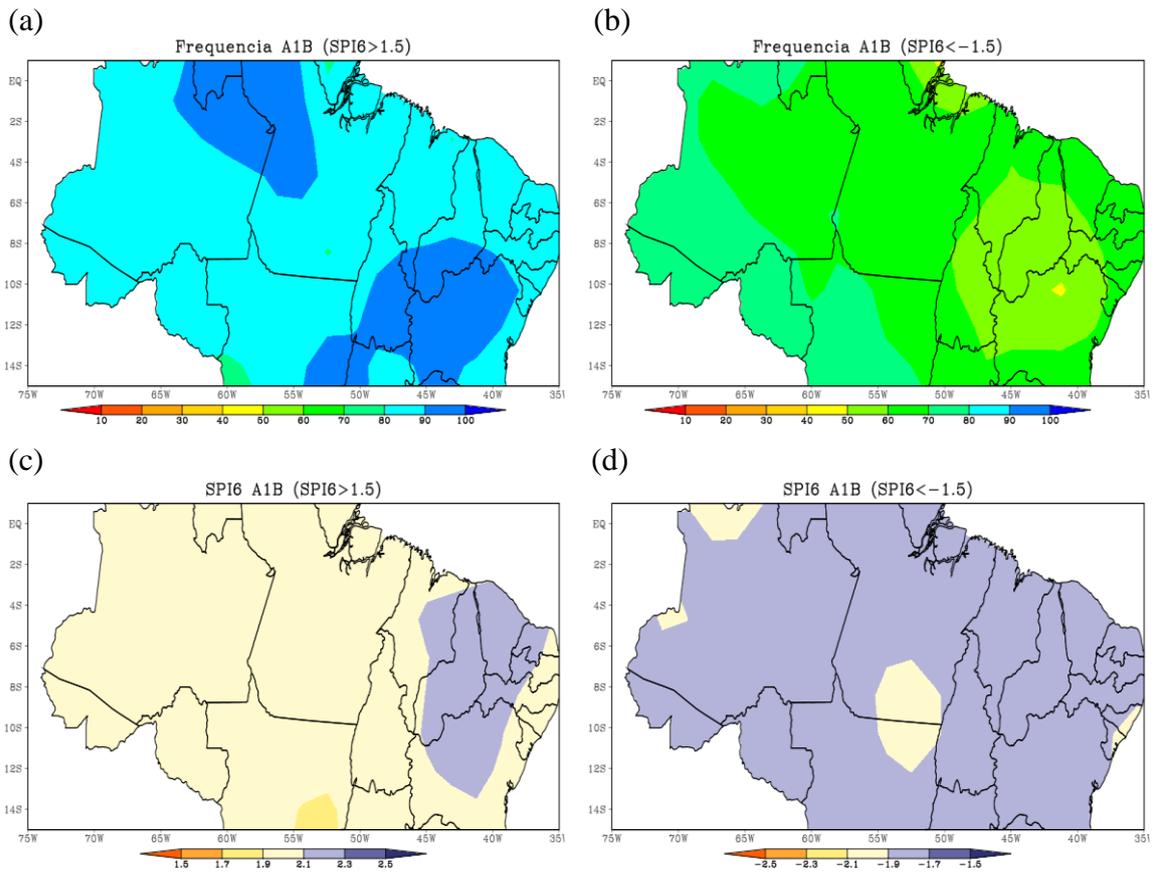


Figura 5.29 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, no período de 2001-2100.

A terceira escala temporal do SPI analisada (SPI-12) indica que o gradiente dos eventos observados aumentam em relação ao SPI-6 tanto para os eventos de chuva (Figura 5.30-a) com de seca (Figura 5.30-b). Em relação aos eventos severos e extremos de chuva vê-se as menores frequências se encontram na região conhecida como "arco do desmatamento", cujos limites se estendem do sudeste do estado do Maranhão, ao norte do Tocantins, sul do Pará, norte de Mato Grosso, Rondônia, sul do Amazonas e sudeste do estado do Acre (Ferreira *et al.*, 2005) e no sudoeste da Amazônia. Enquanto, os núcleos de máximas ocorrências se mantêm na mesma região do SPI-6, porém, abrangendo uma área menor (norte da Bahia e centro-sul do Maranhão) e na região de Roraima e nordeste do Amazonas. Em relação à ocorrência das secas, os máximos são observados do centro do Mato Grosso até o sudoeste do Amazonas, coincidindo com as

regiões de mínimos de eventos chuvosos. Da mesma maneira, a menor ocorrência de eventos de seca se encontra na região de divisa entre Bahia e Tocantins, região de maiores ocorrência de chuva.

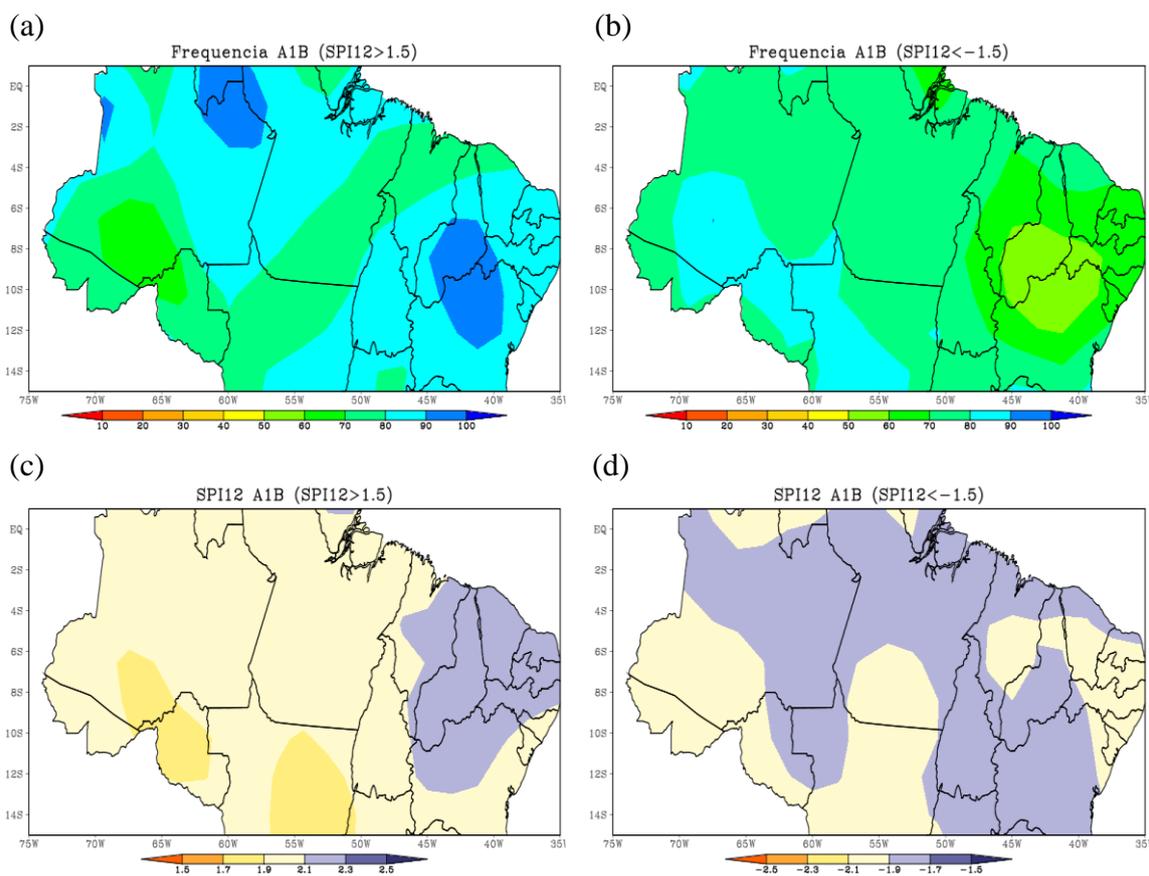


Figura 5.30 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, no período de 2001-2100.

No cenário A2 o SPI-3 apresenta um menor número de eventos de chuva severa e extrema para o centro-oeste da área de estudo (Figura 5.31-a). Como no cenário A1B observado anteriormente, a região da Bahia apresenta o máximos de ocorrência de chuvas severas e extremas, e os mínimos de seca. Enquanto a região norte do Nordeste (do Ceará até o estado da Paraíba) tem-se a mínima frequência de chuva e a máxima frequência de seca. Em relação às ocorrências de secas (Figura 5.31-b) apresenta-se um comportamento bastante similar aos resultados apresentados pelo cenário A1B.

As intensidades médias do SPI do cenário A2 comporta-se de maneira parecida ao A1B. Às intensidades médias do SPI-3 para os eventos de chuva (Figura 5.31-c) é menor na parte oeste da região de estudo e maior na parte leste. Para os eventos secos (Figura 5.31-d) pode-se destacar que as intensidades máximas estão localizadas na mesma região onde as frequências desses eventos foram máximas e na região Amazônica. As intensidades médias do SPI-6 e 12 (Figura 5.32 e 5.33) não apresentam variações relevantes tanto para os eventos de chuva quanto de seca, dessa forma, não se observam núcleos destacados.

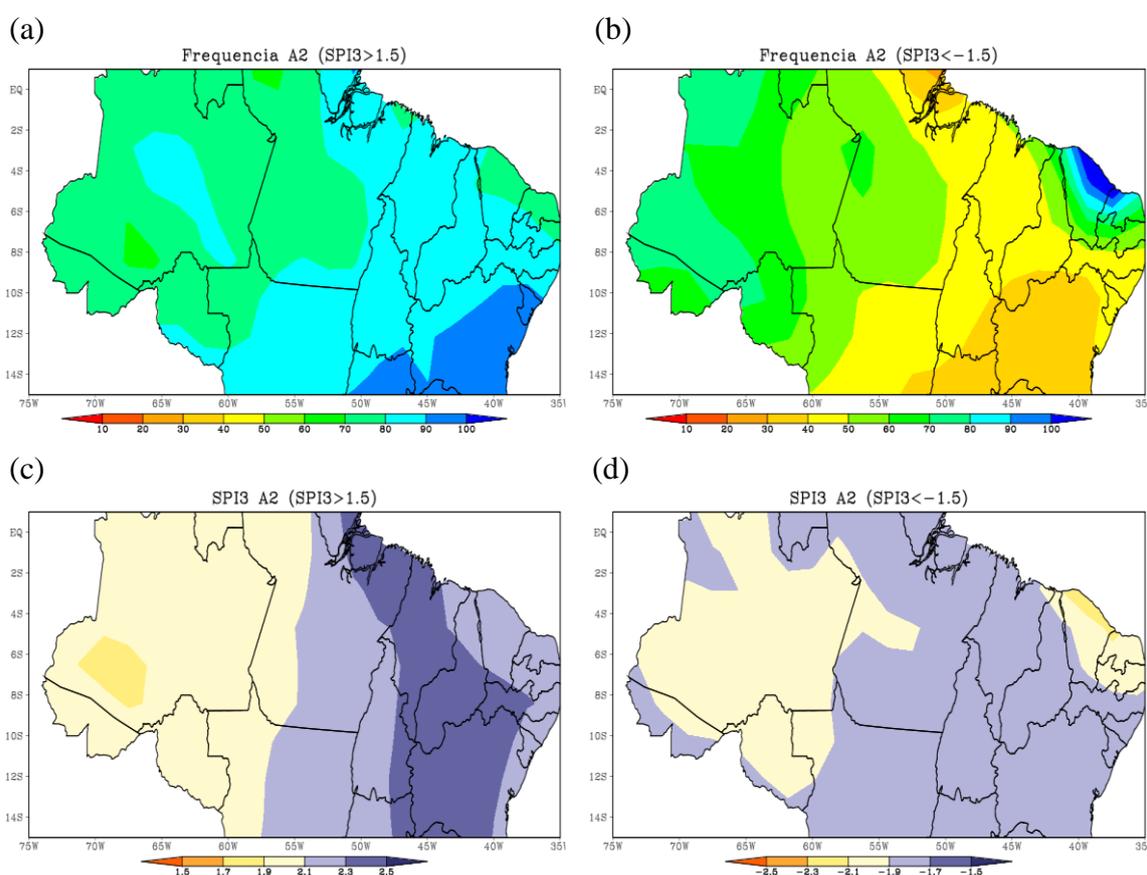


Figura 5.31 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-3 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A2, no período de 2001-2100.

O SPI-6 tem um padrão bem parecido ao SPI-3 (Figura 5.31), inclusive em relação aos núcleos de máxima e mínima frequência dos eventos severos e extremos de

chuva (Figura 5.32-a). Da mesma maneira ocorre para os eventos de seca (Figura 5.32-b), exceto para o centro oeste do Pará e sul da Bahia, onde vê-se as máximas e mínimas ocorrências, respectivamente. Os eventos severos e extremos de chuva são mais frequentes em toda a região no cenário A1B que no A2.

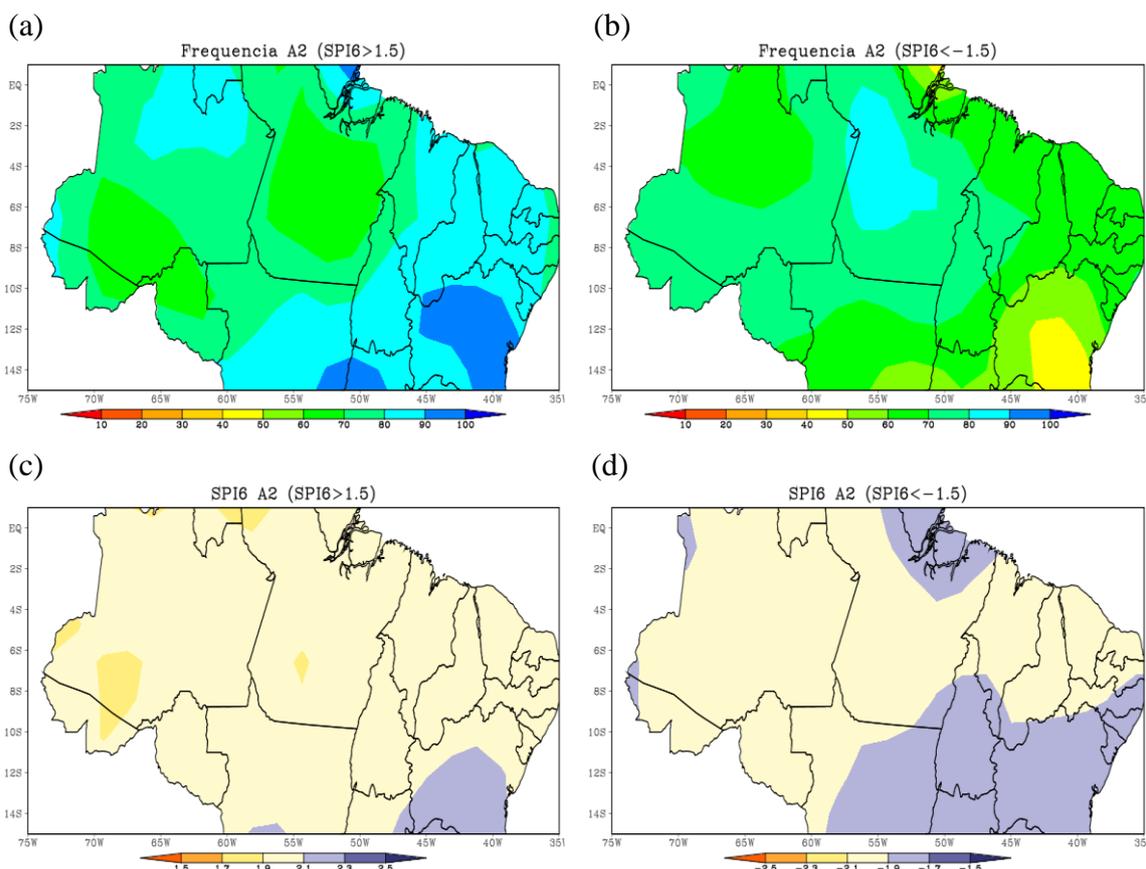


Figura 5.32 - Frequências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-6 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A2, no período de 2001-2100.

As frequências pelo SPI-12 no cenário A2 apresentam o comportamento mais heterogêneo em relação ao cenário A1B. Observa-se que os eventos de chuva (Figura 5.33-a) possuem máxima frequência na porção sudeste da região de estudo, atingindo mais de 100 casos no período analisado. Já o núcleo de mínimo pode ser visto no estado do Pará, mesma região que é observada a máxima frequência de seca (Figura 5.33-b).

Analogamente, os mínimos de seca se encontram na mesma região do máximo de chuva.

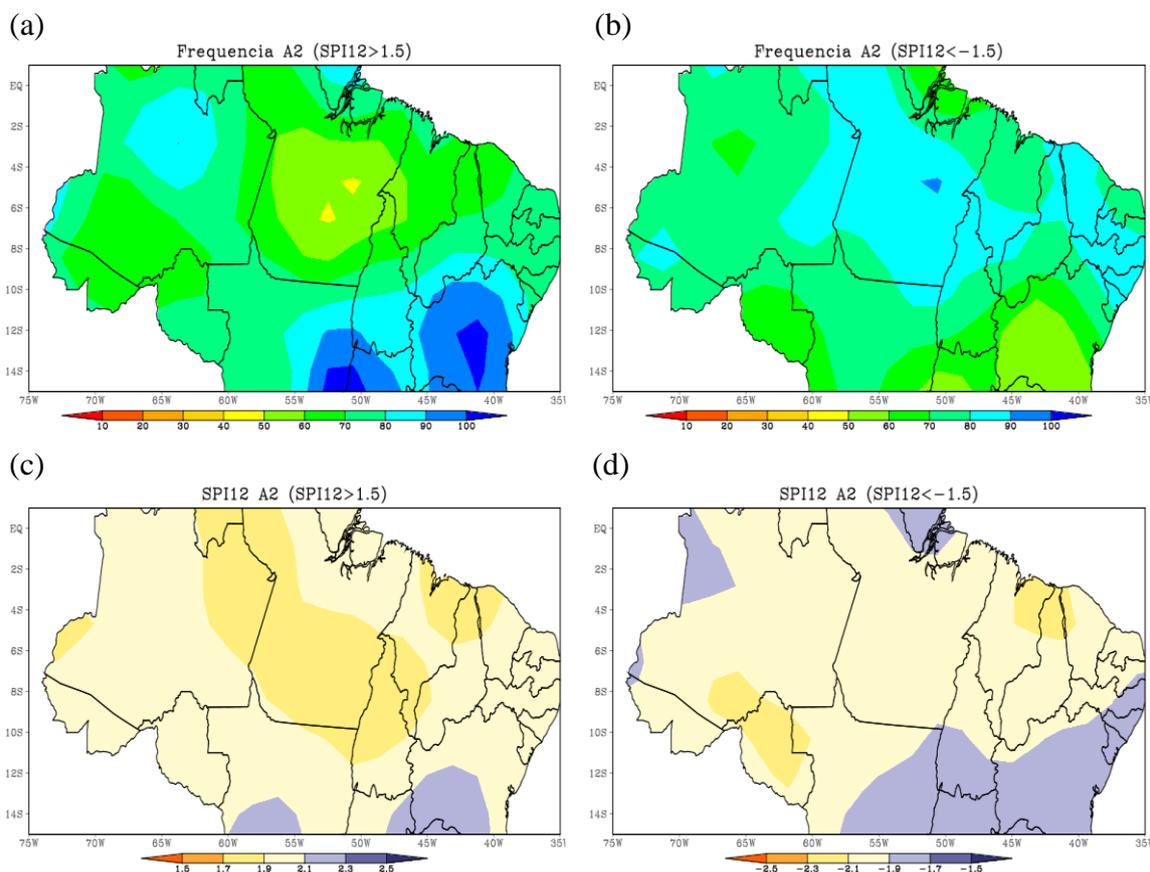


Figura 5.33 - Freqüências de eventos chuvosos (a) e secos (b) severos e extremos e suas intensidades médias (c- eventos chuvosos, d- eventos secos) pelo SPI-12 com dados de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A2, no período de 2001-2100.

Um padrão interessante é que apesar de o cenário A2 ser mais pessimista em relação ao A1B, ele apresenta um menor número casos de eventos severos e extremos de chuva quando comparado ao A1B.

5.2.2. Frequências e intensidades sazonais dos SPIs

A variabilidade sazonal das frequências e intensidades médias dos SPIs 3, 6 e 12 dos eventos severos e extremos de chuva com as projeções de precipitação do modelo ECHAM5 no cenário A1B, é mostrada nas Figura 5.34, 5.35 e 5.36.

Os eventos severos e extremos de chuva mostram que os máximos ocorrem no inverno e na primavera (Figura 5.34- e, g, respectivamente). Nota-se ainda um no verão (Figura 5.34-a) e outono (Figura 5.34-c) que, apesar de terem valores inferiores aos semestres seguintes (inverno e primavera).

No que se refere às intensidades médias, destaca-se o inverno (Figura 5.34-f) onde observam-se valores médios acima de 2,3 para toda a região Nordeste e parte do Norte (Pará e Amapá). Essa intensidade permanece na costa leste do Nordeste na primavera, mas ainda mantém valores associados a eventos extremos no restante da região destacada, explicando desta forma a intensidade anual (Figura 5.28-a).

Para os SPIs-6 observam-se frequências bastante similares à dos SPI-3, porém com uma maior área de abrangência para os máximos na região da Amazônia no verão (Figura 5.35-a) e no outono (Figura 5.35-c). Nas demais estações (inverno e primavera, Figura 5.35-e, g) observa-se uma redução nos casos de eventos severos e extremos de chuva em relação aos de curta duração. A intensidade desses eventos para o SPI-6 apresenta valores elevados durante todo o ano, exceto na primavera, que apresenta um núcleo menor.

Os mínimos observados na região do “arco de desmatamento” no SPI-12 anual (Figura 5.30-a) são vistos de maneira bem similar na em especial primavera (Figura 5.36-g), mas este padrão começa a ser observado já na estação de inverno (Figura 5.36-e). O verão e outono novamente não apresentam padrão de destaque, tendo apenas máximos relativos no norte da Amazônia e uma faixa que vai do centro ao sudeste da Região Nordeste, corroborando com o padrão anual (Figura 5.30-a).

Não foi observada uma variação sazonal marcante das intensidades médias do SPI-12, mantendo um padrão bem coerente com o comportamento anual (Figura 5.30-c). Destaca-se apenas núcleos de evento extremo no norte do Tocantins, na estação de inverno (Figura 5.36-f).

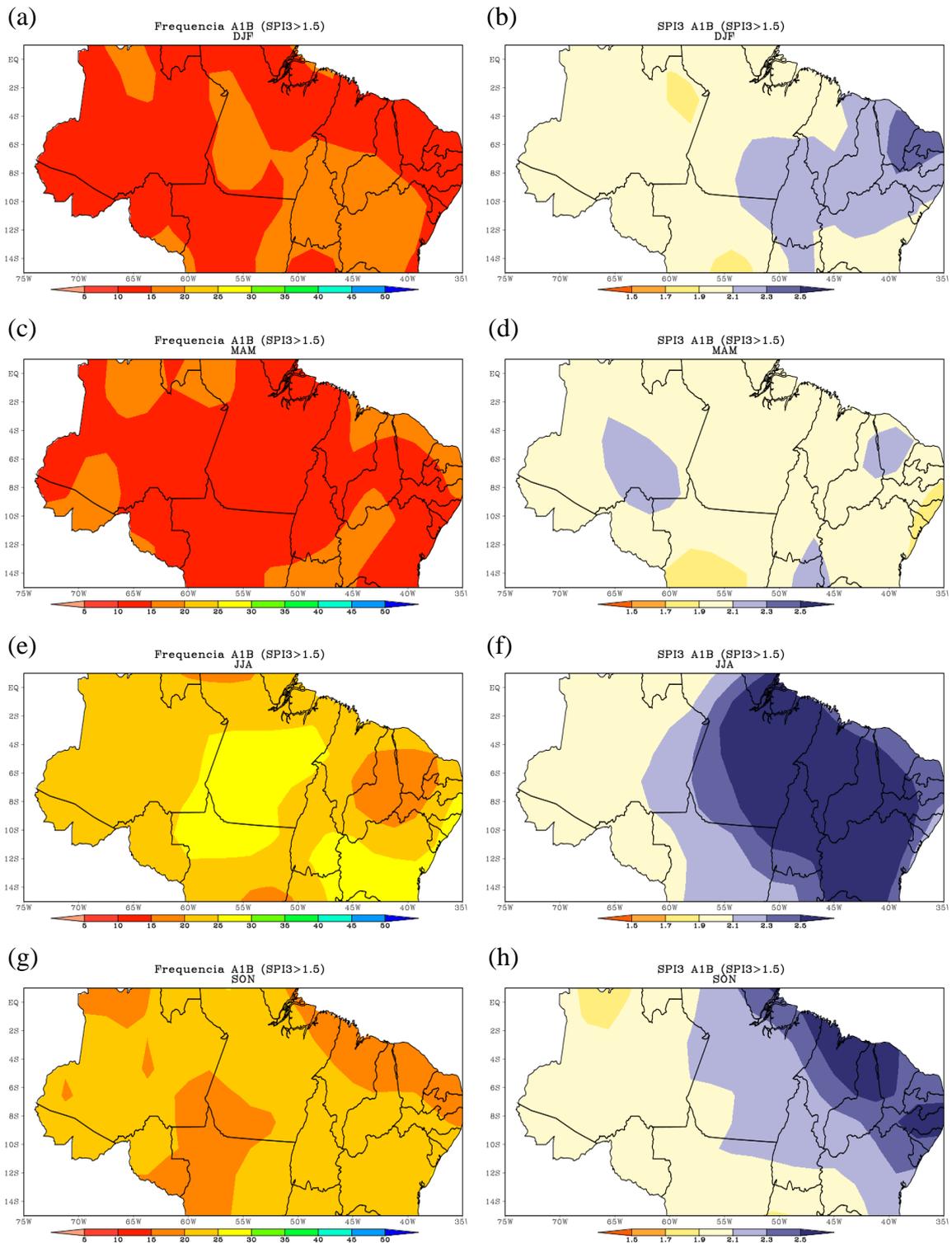


Figura 5.34 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.

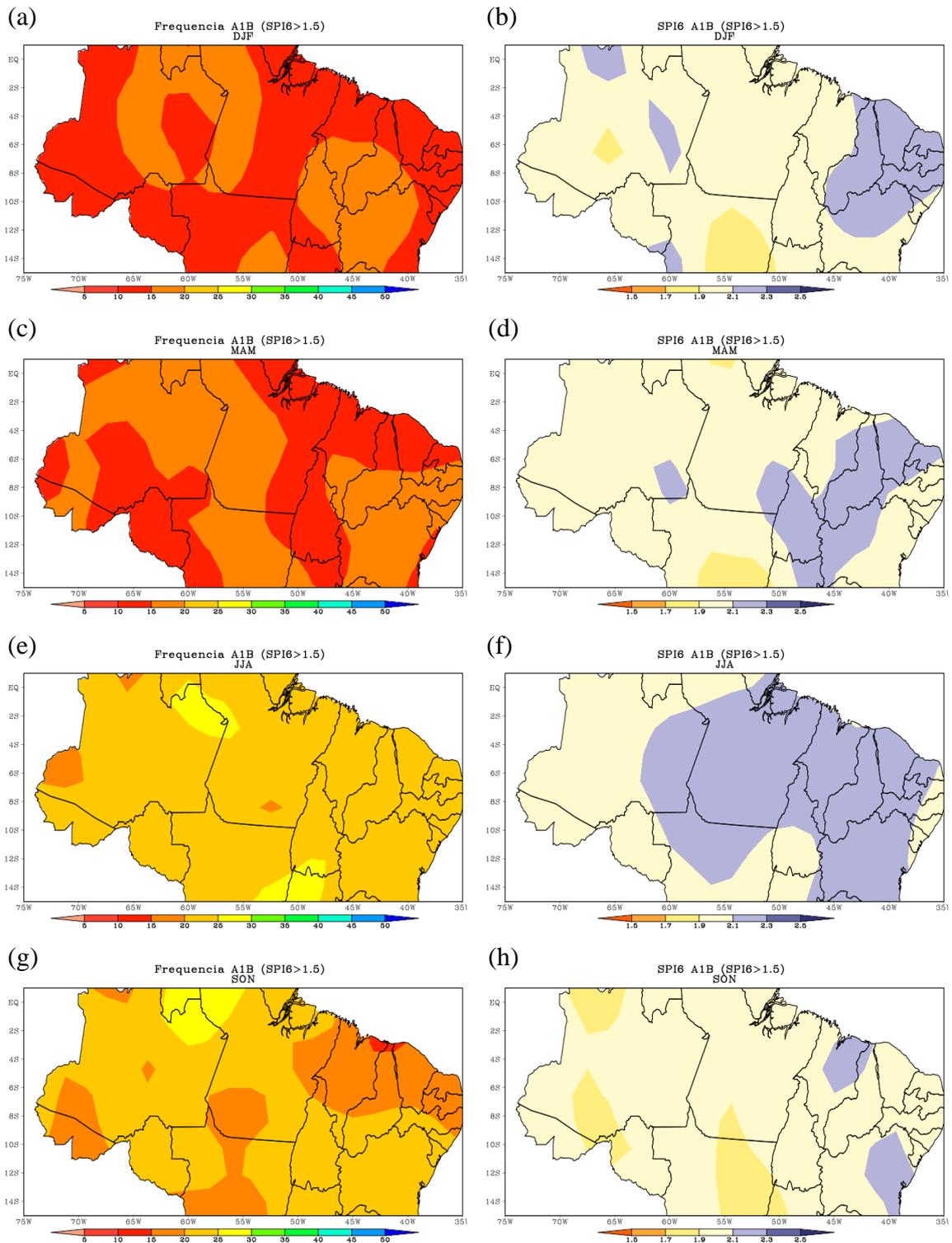


Figura 5.35 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.

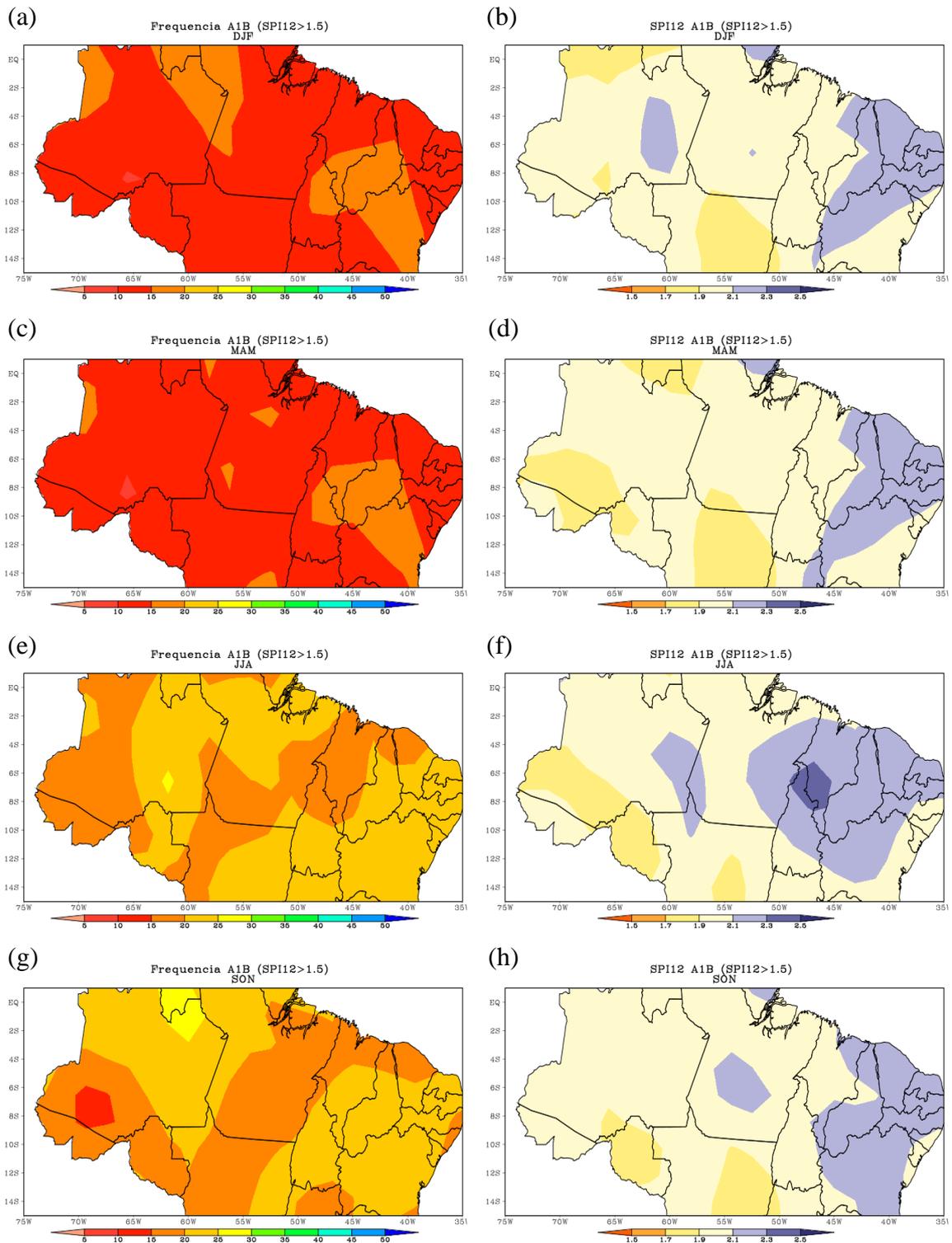


Figura 5.36 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.

A variabilidade sazonal dos eventos severos e extremos de seca de curta, média e longa duração SPI-3, 6 e 12, respectivamente derivados das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B é mostrada da Figura 5.37 a 5.39.

Assim como para os eventos de chuva, no SPI-3 de seca os eventos de maior destaque no comportamento anual (Figura 5.28-b), se apresentam na estação de inverno (Figura 5.37-e) e na primavera (Figura 5.37-g), onde é possível observar maiores frequências no norte do Nordeste Brasileiro. A porção de eventos mínimos anual é bem caracterizada no inverno, mas se mantém também na primavera e no verão, com menor magnitude. A intensidade desses eventos extremos é bem assinalada na primavera (Figura 5.37-g), mesma região dos máximos de frequência. Nas demais estações os eventos possuem intensidade bem homogênea e permanecem no intervalo de -2,1 a -1,7.

A frequência dos eventos severos e extremos de seca de média duração (SPI-6) apresentados na Figura 5.38 indica uma região de mínima ocorrência no Nordeste em todas as estações, região onde se observa as mínimas frequência também no padrão anual (Figura 5.29-b). Os eventos de seca observados variam entre -2,1 e -1,7, com comportamento bastante homogêneo nos 4 trimestres analisados.

Assim como no comportamento anual (Figura 5.30-b) os eventos severos e extremos de seca de acordo com o SPI-12 (Figura 5.39) ocorrem com menor frequência na porção central do Nordeste Brasileiro, para as quatro estações do ano, enquanto as máximas frequências encontram-se no sudoeste da Amazônia. Não houve uma variabilidade sazonal marcante na intensidade do SPI-12 em relação ao observado no comportamento anual.

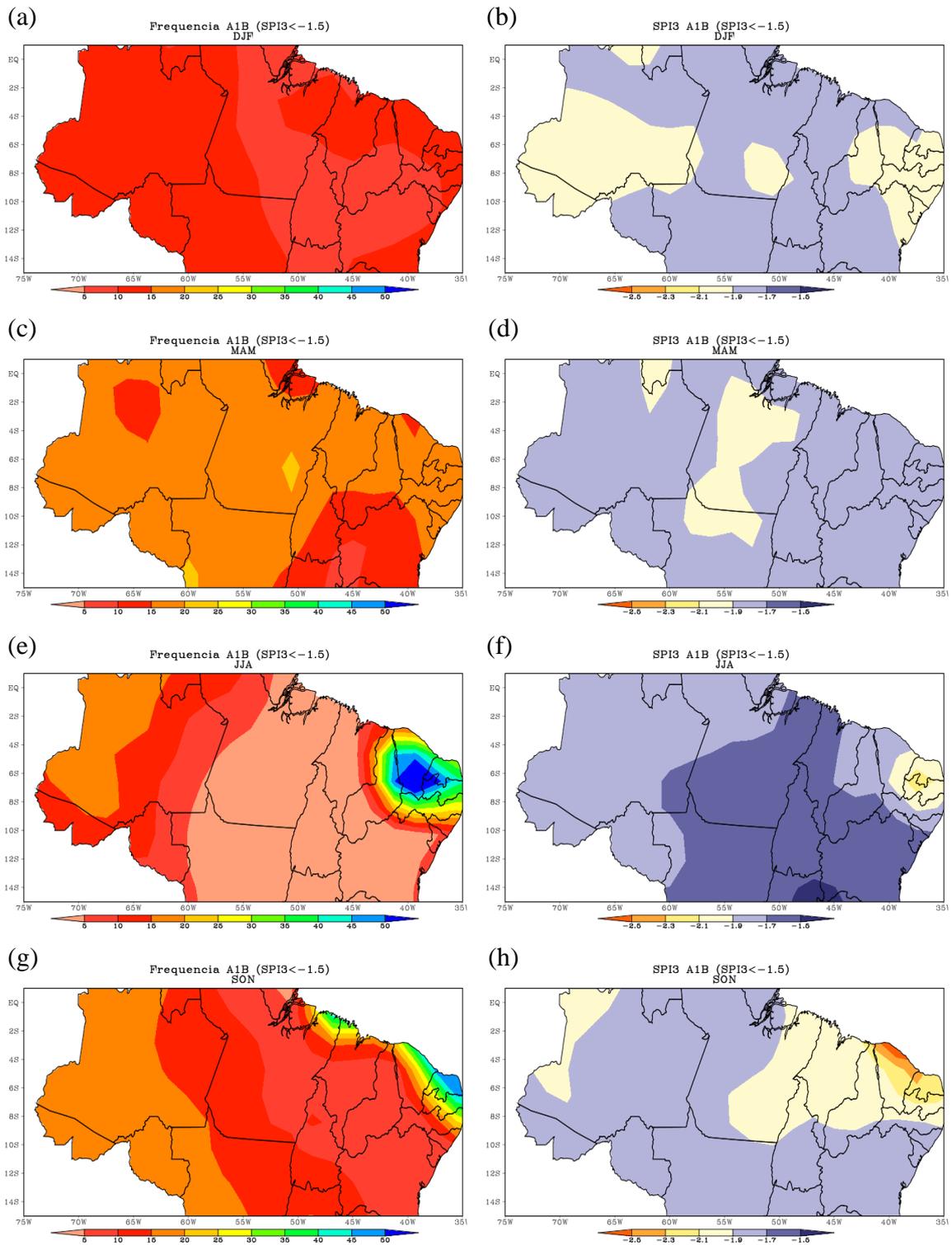


Figura 5.37 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.

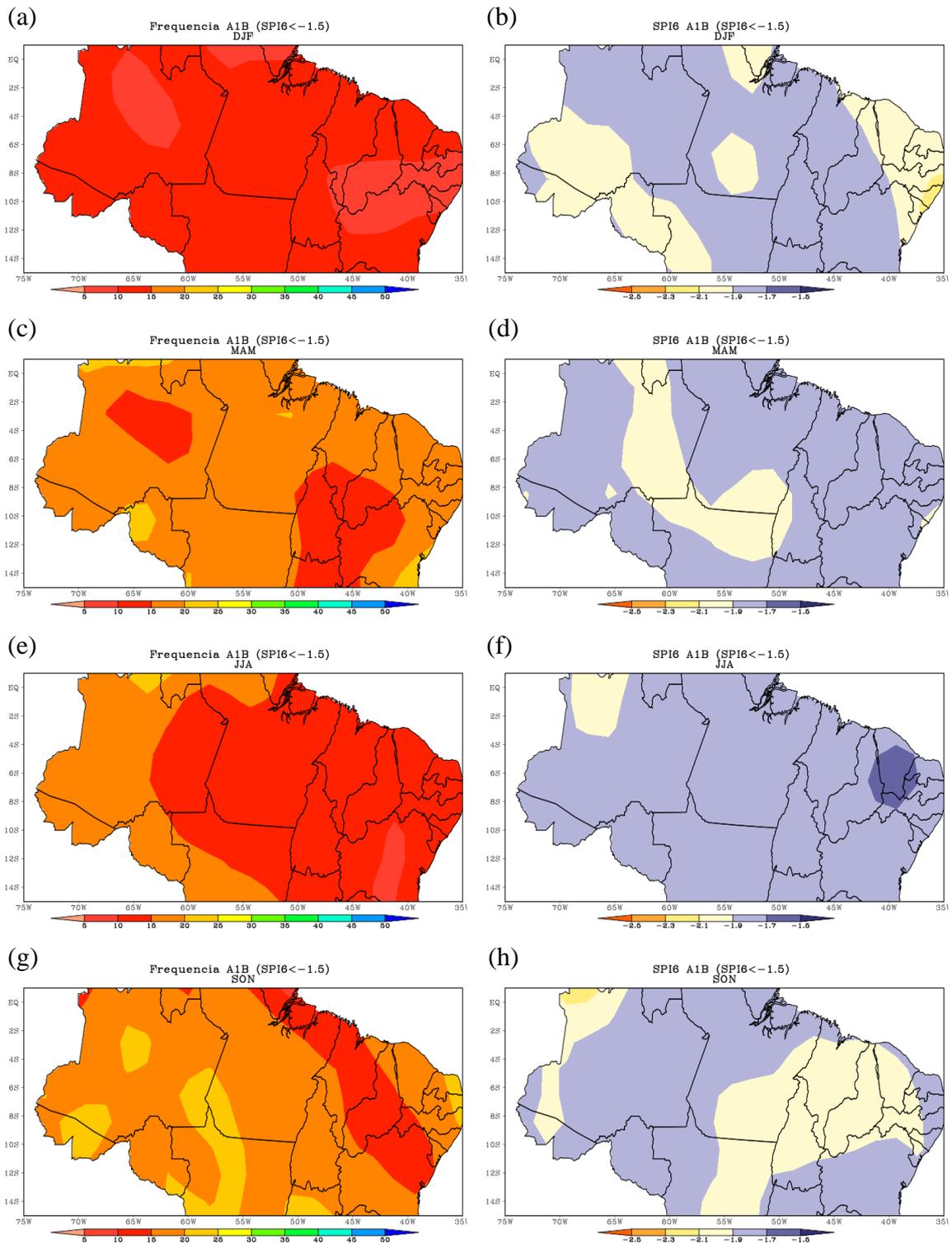


Figura 5.38 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.

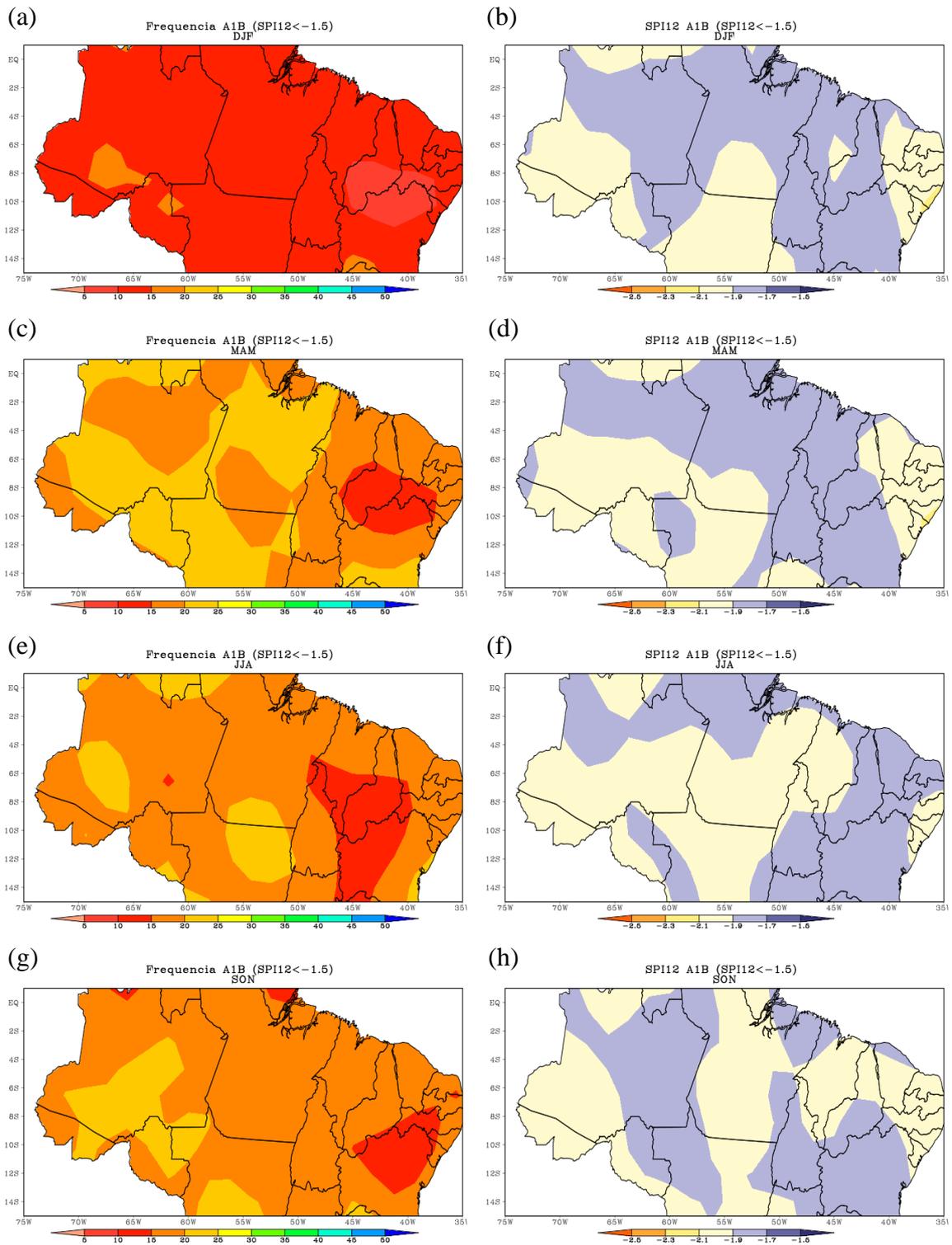


Figura 5.39 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A1B, no período de 2001-2100.

As Figuras 5.40, 5.40 e 5.41 mostram a análise sazonal dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3, 6 e 12 com dados do modelo ECHAM5 para o cenário A2 (pessimista).

É possível notar que em todas as estações ocorreu um núcleo de máxima frequência na região do Nordeste do Brasil, melhor caracterizado no inverno (Figura 5.40-e), corroborando com o padrão anual (Figura 5.31-a). De um modo geral, as menores ocorrências de eventos severos e extremos de chuva foram na Amazônia.

Assim como no cenário A1B a intensidade média anual (Figura 5.31-d) desses eventos é muito bem representada no inverno (Figura 5.40-f), onde em toda a Região do Nordeste o SPI médio de 2,5, caracterizando apenas eventos extremos nesta região, essa intensidade permanece alta na primavera com menor área de abrangência.

A frequência dos eventos severos e extremos pelo SPI-6 mostra que os eventos de maior ocorrência observados anualmente (Figura 5.32-a) ao longo do século XXI no sul do Nordeste, são bem assinalados no verão (Figura 5.41-a) e no outono (Figura 5.41-c), essas mesmas estações do ano possuem uma variabilidade espacial bem parecida. As intensidades médias dos eventos são bem distribuídas ao longo dos quatro trimestres analisados, apresentando na maior parte do ano, bem como no anual (Figura 5.32-c) ocorrência de eventos extremos no sul do Nordeste.

Os eventos severos e extremos de chuva de longa duração (SPI-12) indicam a ocorrência de um núcleo de maior frequência no sul do Nordeste em todas as estações do ano, assim como um núcleo de baixa frequência no leste da Amazônia, que só não se caracteriza no inverno, ambos coincidindo com o padrão anual (Figura 5.33-a). As intensidades médias do SPI-12 sazonal, assim como a anual (Figura 5.33-c), é também assinalada por eventos severos no leste da Amazônia e oeste do Nordeste, e eventos extremos no sul do Nordeste.

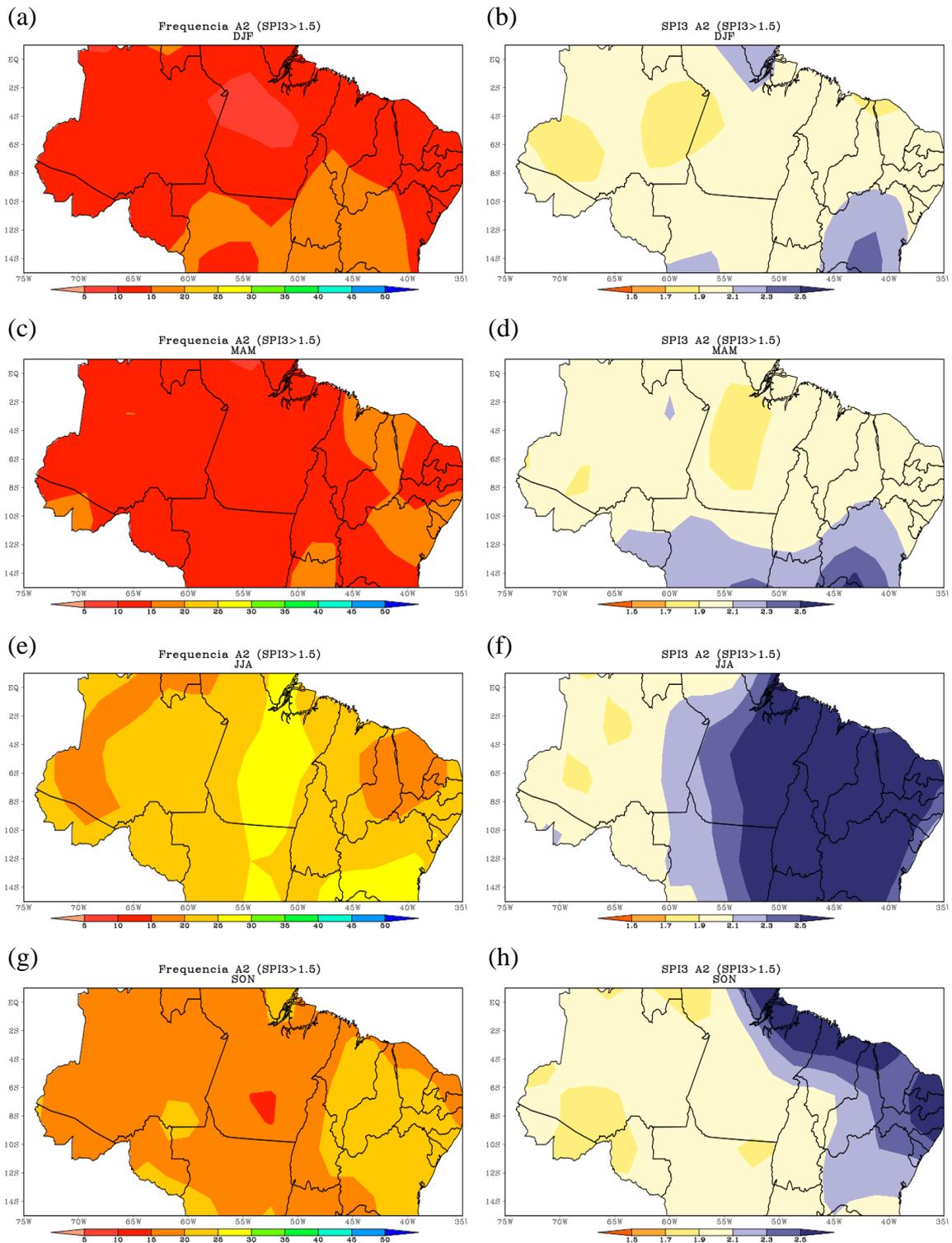


Figura 5.40 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.

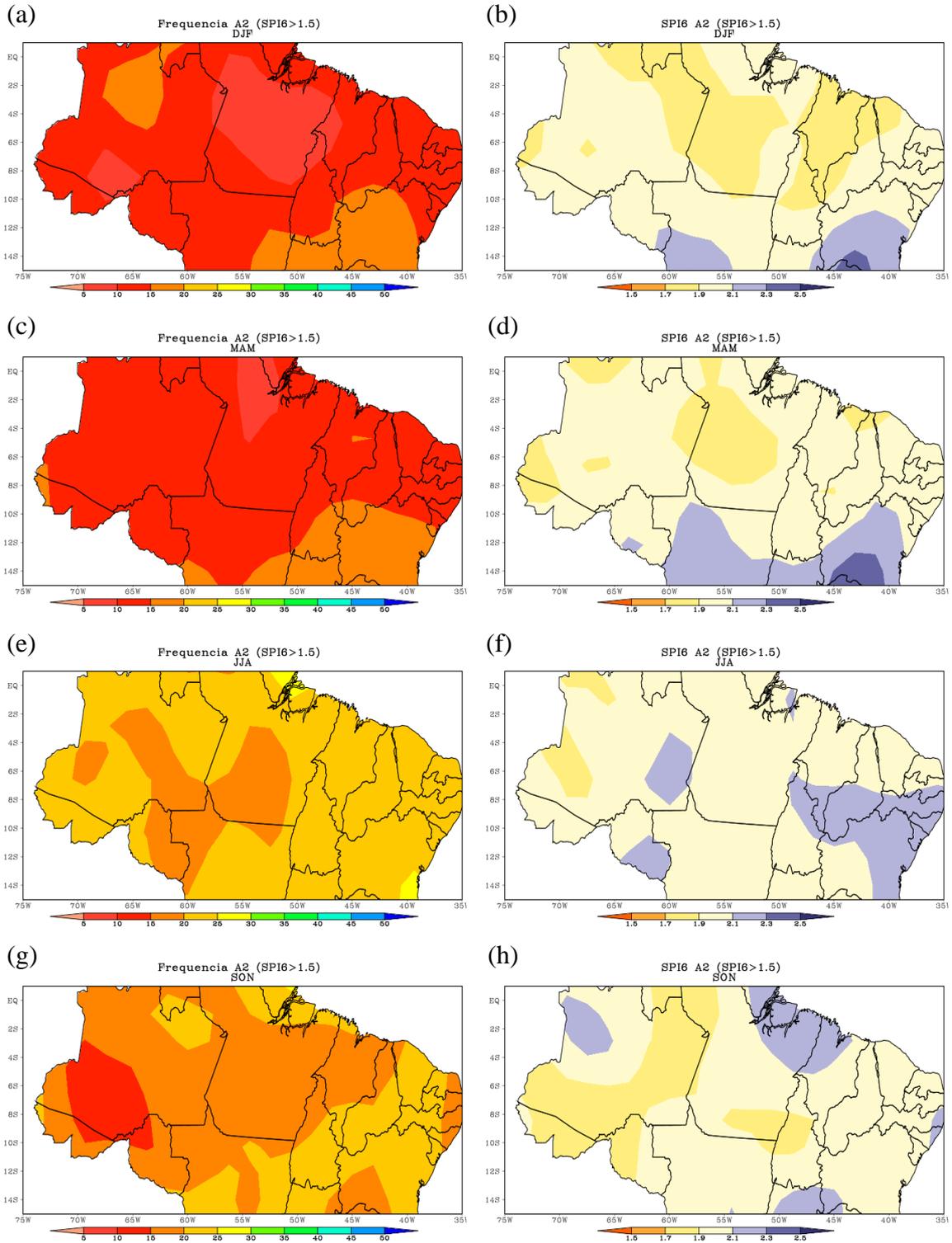


Figura 5.41 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.

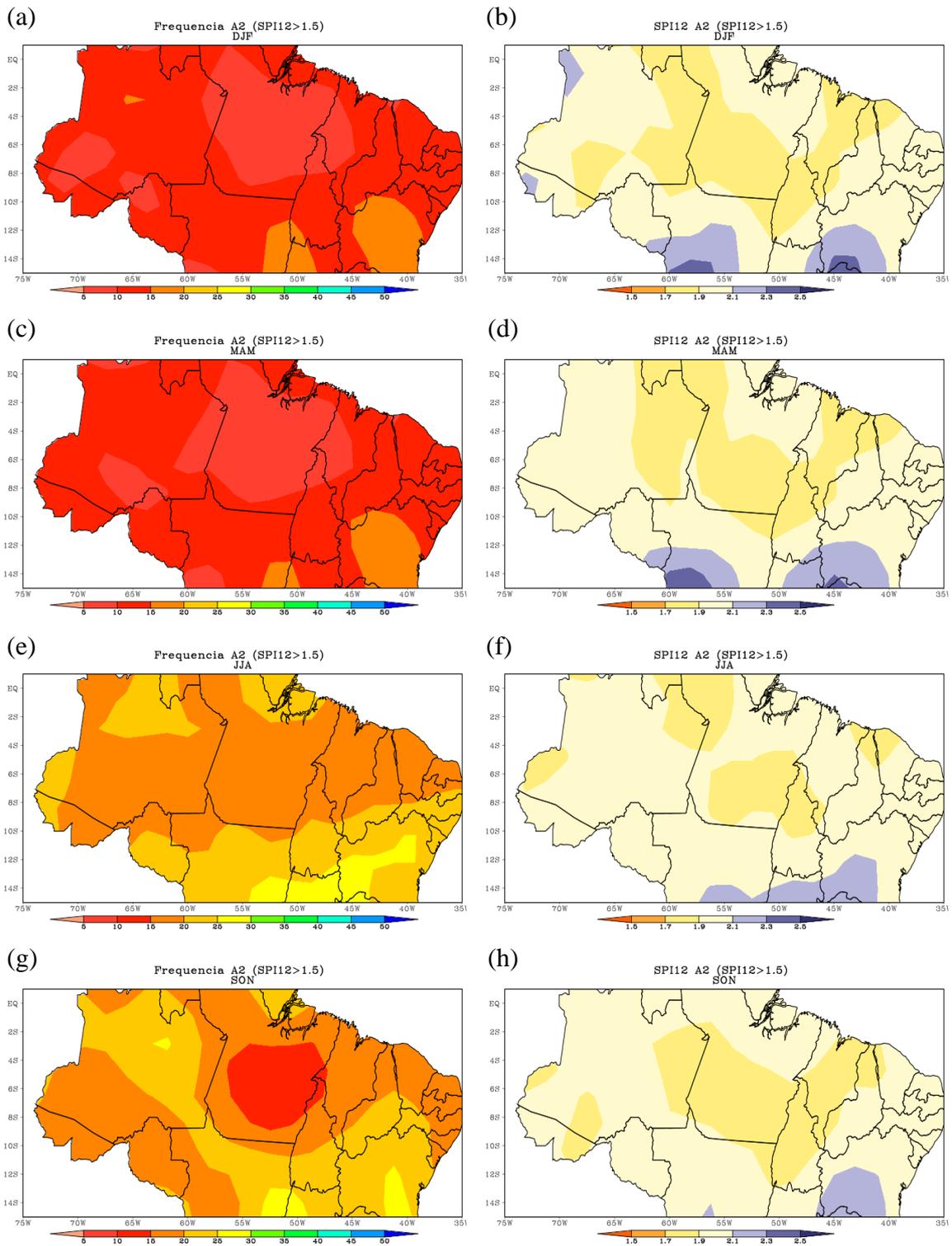


Figura 5.42 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de chuva pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.

As frequências e intensidades sazonais dos eventos severos e extremos de seca pelos SPI-3, 6 e 12, respectivamente derivados das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2 é mostrada da Figura 5.43, 5.44 e 5.45.

Assim como para os eventos severos e extremos de chuva, as frequências anuais (Figura 5.31-b) dos eventos de seca pelo SPI-3 são bem caracterizadas no inverno e primavera (Figura 5.43- e, g, respectivamente), com máximos no noroeste do Nordeste e mínimos no restante da região Nordeste e leste da Amazônia. As intensidades médias desses eventos no inverno (Figura 5.43-f) e primavera (Figura 5.43-h) apresentam o mesmo comportamento do padrão anual (Figura 5.31-d), indicando que as maiores frequências correspondem a eventos extremos.

Os eventos severos e extremos secos pelo SPI-6, apresentam núcleo de máxima frequência na região central da Amazônia e mínima no sul do Nordeste, bem caracterizado no verão (Figura 5.44-a) e outono (Figura 5.44-c), coincidindo com o padrão anual (Figura 5.32-b). As intensidades médias máximas observadas na primavera (Figura 5.44-h) e verão (Figura 5.44-b) são balanceadas com o outono (Figura 5.44-c) e inverno (Figura 5.44-e) apresentando o comportamento homogêneo apresentado pelo padrão anual (Figura 5.32-d).

O SPI-12 negativo, que representa eventos de seca, apresenta um núcleo de menores frequências no sul do Nordeste, que pode ser notado em todas as estações do ano, regiões que coincidem com as mínimas frequências do comportamento anual (Figura 5.33-b), e um região de máximas no outono, inverno e primavera que vai do centro da Amazônia ao litoral nordestino. Em relação às intensidades médias verifica-se que em todas as estações o comportamento foi bem parecido ao anual (Figura 5.33-d), com mínimos no sul do Nordeste, noroeste da Amazônia e Amapá, e núcleos de maiores intensidade isolados no norte do Nordeste e sudoeste da Amazônia na primavera e no verão.

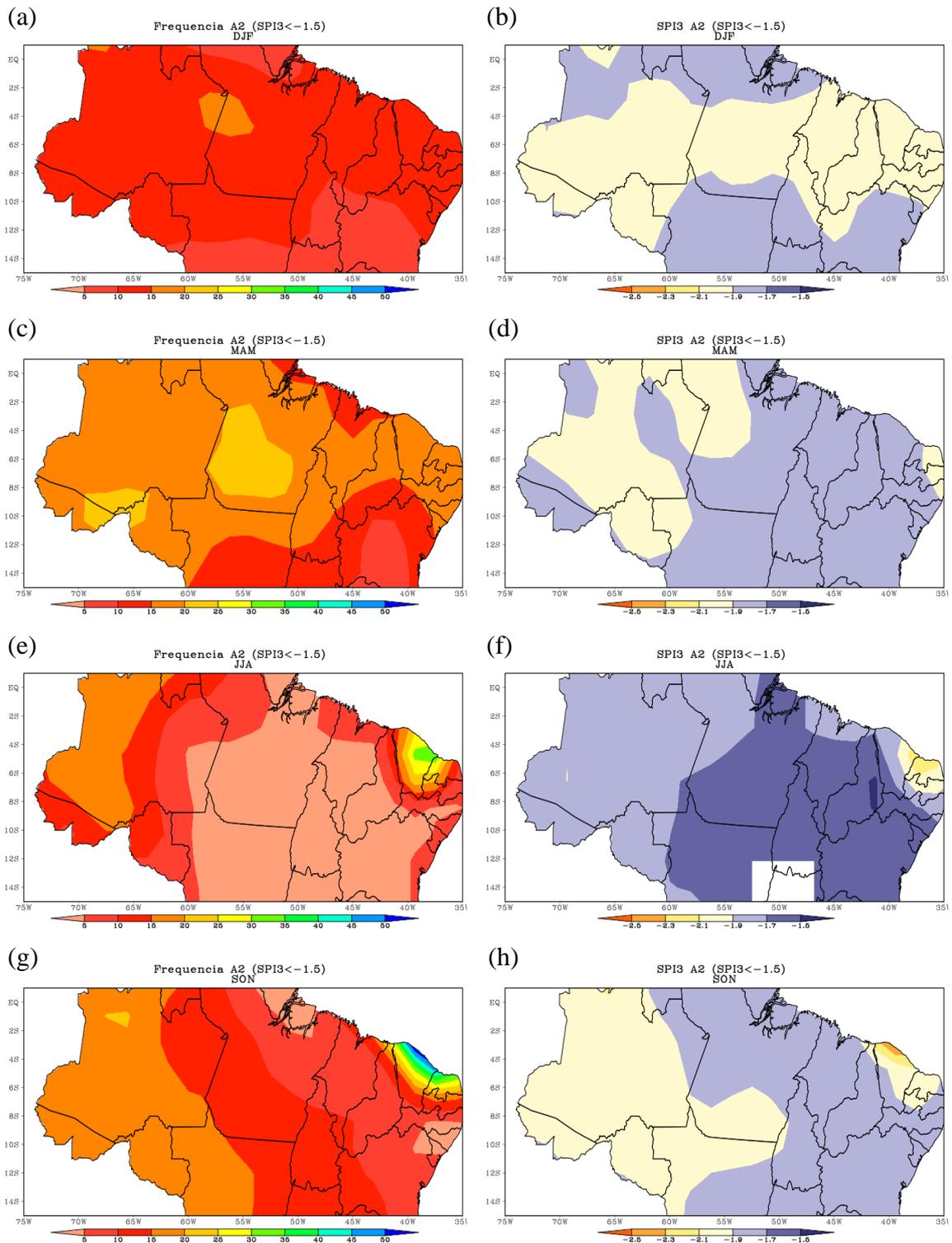


Figura 5.43 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-3 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.

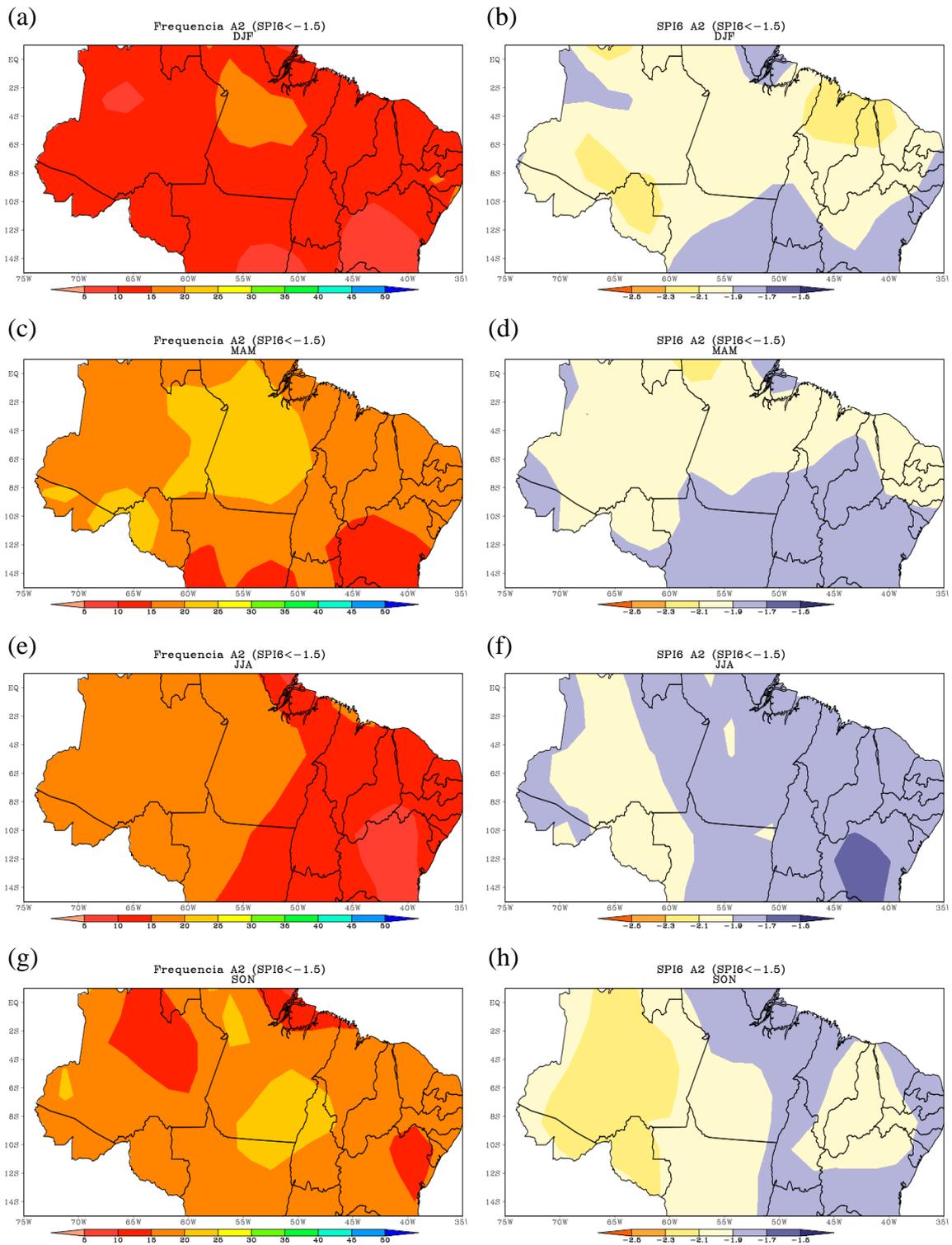


Figura 5.44 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-6 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.

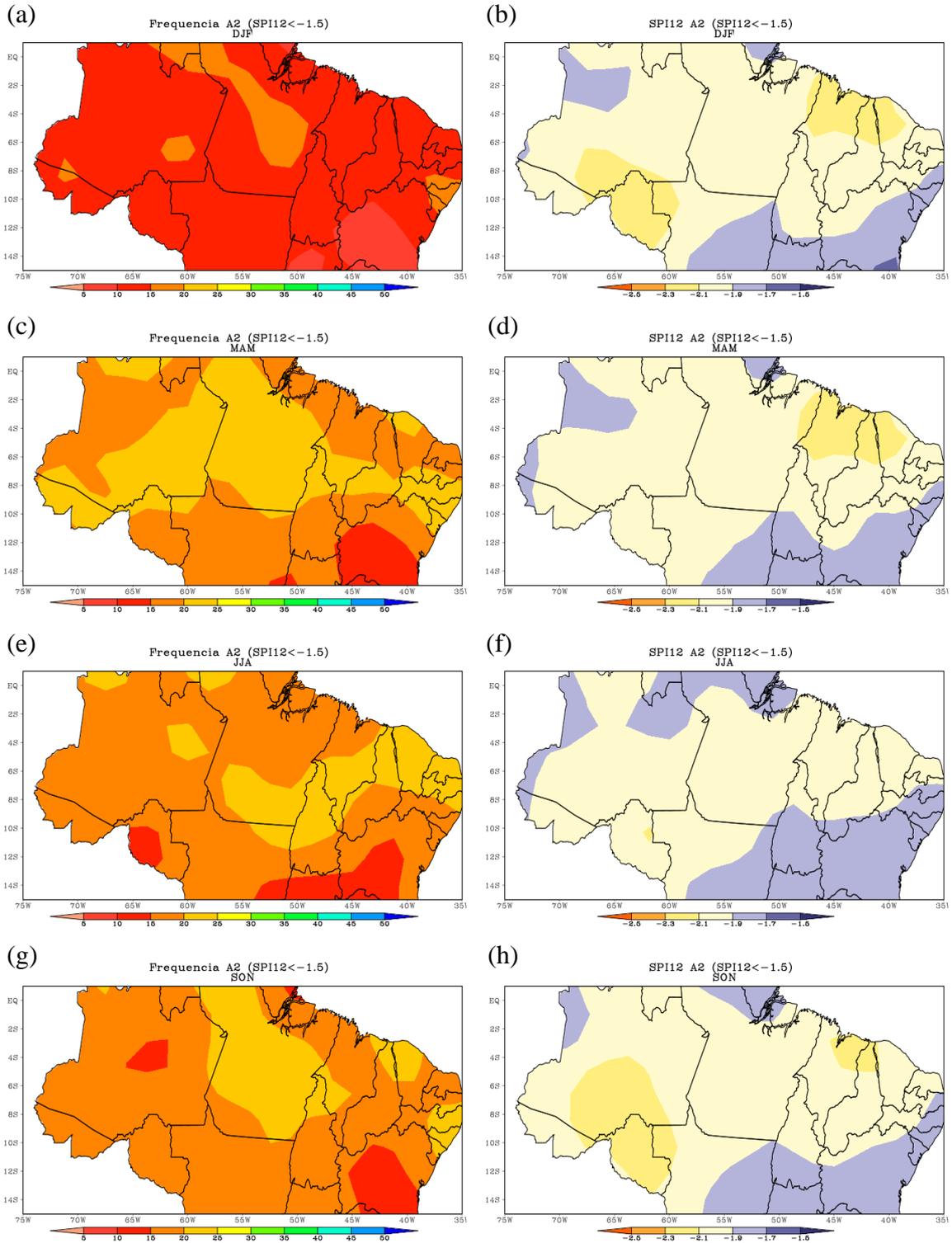


Figura 5.45 - Frequências (coluna esquerda) e intensidades médias (coluna direita) sazonais (a-b- DJF; c-d- MAM; e-f- JJA; g-h- SON) dos eventos severos e extremos de seca pelo SPI-12 derivadas das projeções de precipitação do modelo ECHAM5 para o cenário A2, no período de 2001-2100.

De maneira geral, os eventos severos e extremos de seca e chuva pelos cenários A1B e A2 derivados do modelo ECHAM5 se comportaram de maneira bastante similar tanto para as frequências como para as intensidades dos três SPIs considerados.

As frequências dos eventos severos e extremos de chuva para o cenário A1B e A2, assim como os conjuntos de dados analisados no século XX mostram-se maiores no inverno e na primavera, e menores frequências no verão e outono em todas as três escalas de SPI analisadas. Os eventos severos e extremos de seca não apresentaram grande variabilidade espacial no verão (dezembro-janeiro-fevereiro) e no outono (março-abril-maio).

Assim como o apresentado no século XX, nos dois cenários analisados no século XXI, a frequência dos eventos severos e extremos de seca indicaram uma maior variabilidade sazonal no SPI-3. Uma grande variação é também observada nas intensidades que apresentaram altos valores para os eventos de seca e de chuva.

5.2.3. Tendências futuras nas frequências de eventos secos e chuvosos dos SPIs 3, 6 e 12

As tendências no número de eventos severos e extremos de chuva e seca pelo SPI 3, 6 e 12, no século XXI foram analisadas para os cenários A1B e A2, usando o teste de Mann-Kendall, e os resultados encontram-se na Figura 5.46.

É possível notar um comportamento bastante similar entre os dois cenários analisados. Em ambos cenários o SPI-3 (Figura 5.46- a, b) apresenta tendências negativas em grande parte da região Amazônica e no litoral nordestino, indicando um decréscimo na ocorrência de eventos severos e extremos de seca e de chuva. Observam-se tendências positivas apenas no noroeste e sudoeste da Amazônia. Em relação ao SPI-6 (Figura 5.46- c, d) nota-se uma faixa com tendências positivas na região central do Nordeste, na qual a tendência e a área de abrangência, no cenário A1B, é relativamente maior. A tendência de eventos severos e extremos de longa duração, vista no SPI-12 (Figura 5.46- e, f), é bem mais intensa em relação às outras escalas, nota-se uma diferença apenas na região Nordeste, já que ocorre uma tendência de acréscimo desses eventos na maior parte desta região.

De um modo geral, tanto o cenário intermediário (A1B) como o cenário mais pessimista (A2), apresentam uma tendência de aumento na ocorrência de eventos severos e extremos de média (SPI-6) e longa duração (SPI-12) na região Nordeste, no Acre e noroeste da Amazônia. Enquanto, tais eventos apresentam a tendência de decréscimo na região Amazônica.

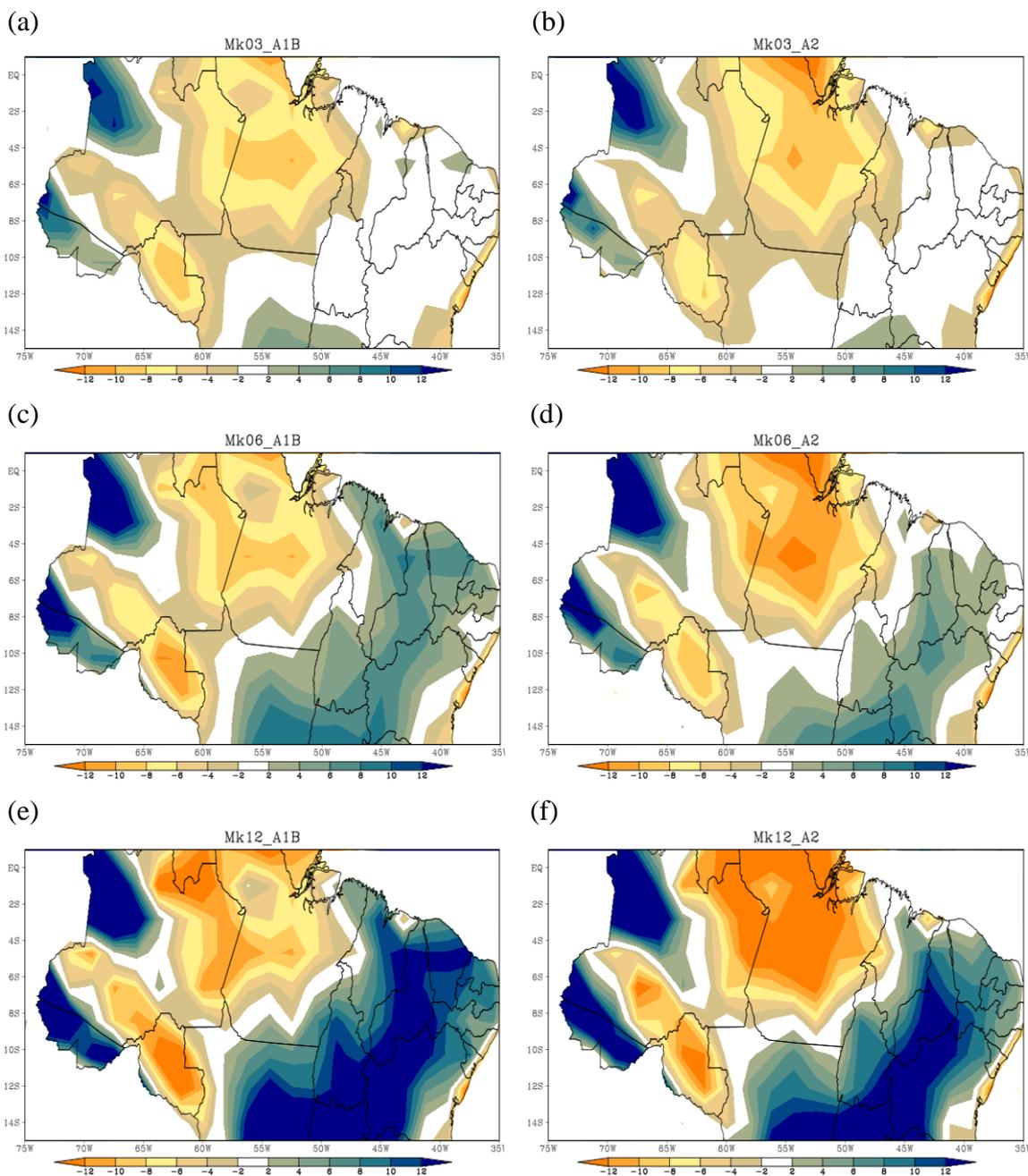


Figura 5.46– Tendências futuras na frequência de eventos secos/chuvosos, avaliados pelo teste de Mann-Kendall, pelos SPIs 3 (a, b), 6 (c, d) e 12 (e, f), derivados das projeções de precipitação para o modelo ECHAM5 para o século XXI nos cenários A1B (esquerda) e A2 (direita). Valores superiores a 2 indicam tendências significativas a 5% de aumento e inferiores a -2 de decréscimo.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise anual e sazonal regional das frequências e intensidades de eventos severos e extremos de seca e de chuva usando os SPIs de 3, 6 e 12 meses para o século XX e XXI assim como suas tendências.

Conclui-se que o SPI é uma ferramenta muito útil para avaliar a variabilidade espacial das frequências e intensidades dos diferentes eventos de seca e chuva em diversas escalas de tempo, além de suas principais características.

Os resultados obtidos para século XX permitiram concluir que:

A rodada 20C do modelo climático global acoplado (oceano-atmosfera) ECHAM5 não conseguiu reproduzir bem os padrões precipitação média anual quando comparado a climatologia observacional (GPCC). O viés das precipitações foi de -1 no norte da região, +1 no sudoeste e chegam a 4 no semi-árido do Nordeste. As anomalias médias anuais de precipitação do GPCC e do ECHAM5 apresentaram diferenças significativas pelo teste t de Student, no nordeste e sul da Amazônia. O coeficiente de correlação de anomalias foi de -0,24, que apesar de significativamente diferente de zero é muito baixo e, além disso, negativo, indicando uma diferença de fase entre os campos.

As frequências dos SPIs para eventos severos e extremos de chuva variaram de 5% a 8%, enquanto os de seca de 0,8% e a 8%, mostrando uma maior variação espacial quando comparado aos casos de chuva.

A intensidade dos eventos severos e extremos de seca e de chuva foi inversamente proporcional à escala de tempo do SPI.

As maiores frequências, apesar de pequenas, dos eventos severos e extremos tanto de seca com de chuva ocorrem no inverno e na primavera (período seco na maior parte da região), sendo que a frequência dos eventos secos foram diretamente proporcionais a escala de SPI.

As estações do ano possuem um comportamento bastante parecido nas diferentes escalas de SPI.

A tendência dos eventos severos e extremos secos e chuvosos mostraram-se bastante similar para os SPIs 3, 6 e 12.

Os SPIs baseados nas precipitações do GPCC apresentaram uma tendência significativa de aumento desses eventos no litoral do Nordeste e no centro-oeste da região Norte, e uma redução em uma pequena parte do sul da região de estudo, enquanto os baseados nas precipitações do ECHAM5 indicaram apenas um aumento na frequência desses eventos em pequenas áreas no noroeste da Amazônia, e diminuição no Nordeste.

- Na última década (1991 a 2000) observaram-se elevadas frequências de eventos severos e extremos de seca nos SPIs baseados nos dados do GPCC, fato este que pode estar associado aos fortes eventos de El Niño que ocorreram na mesma década. Já os SPIs baseados nos dados do ECHAM5 não mostraram frequências tão elevadas.

As projeções para o século XXI permitiram concluir que:

Os eventos severos e extremos de seca e chuva apresentam comportamento similar ao século XX, tanto em relação à frequência quanto a intensidade. As ocorrências dos eventos de chuva variam de 5% a 7,5%, e os de seca de 2,5% a 8%.

As frequências dos eventos severos e extremos são menores no verão e no outono.

Os cenários A1B e A2 para a precipitação do ECHAM5 mostraram resultados similares tanto para as frequências como para as intensidades dos SPIs, e apesar do cenário A2 ser mais pessimista em relação ao A1B, ele apresenta um menor número de eventos severos e extremos de chuva.

Os cenários A1B e A2 indicam, para todas as escalas de tempo, indicam uma tendência significativa de decréscimo na ocorrência dos eventos severos e extremos de seca e de chuva em grande parte da região Amazônica e no litoral do Nordeste e tendências positivas no noroeste e sudeste da Amazônia. O SPI-6 e 12 apresentam ainda uma tendência de aumento desses eventos na região central do Nordeste.

- Tanto no século XX como no XXI, em todas as escalas de SPI estudadas, o comportamento dos eventos severos e extremos no verão são bastante parecidos com os do outono, enquanto os do inverno com os da primavera.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos, propõe-se:

- Avaliar as principais características dos eventos secos e chuvosos severos e extremos, definidos pelos diferentes SPIs como: início, fim, duração e intensidade, assim como suas abrangências espaciais.
- Utilizar a precipitação média de um conjunto de modelos climáticos para avaliar suas incertezas, assim como modelos climáticos regionais para melhor definição espacial dos eventos.
- Analisar as tendências das frequências dos eventos severos e extremos separadamente nas diferentes regiões
- Expandir estes trabalhos para outras regiões do Brasil com características climáticas distintas, como o Sudeste e Sul.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. M.; CUNNINGHAM-CASTRO, C. A.; CAMARGO JR., H.; SANCHES, M. B.; CALBETE, N. O.; MENDES, D. Análise subjetiva da previsão do SIMOC para ao Nordeste do Brasil no período de março - maio de 2000 - Estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., Fortaleza. **Anais...** Sete Lagoas: SBA, 2001. v. 2, p. 625-626. Papel. (INPE-10904-PRE/6360).

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; MARENGO J. A. I.; PISNITCHENKO, L. A. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais. In: _____. **Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade - caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI**. Brasília, MMA.SBF.DCBio, 2007.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 717-726, 2001.

BARBOSA, H. M. J.; MARENGO, J. A. Análise preliminar da TSM dos modelos acoplados utilizados no IPCC-AR4. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2008. CD-ROM. (INPE-15490-PRE/10218). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/10.01.11.06>>. Acesso em: 28 fev. 2011.

BENGTSSON, L. K.; HODGES, I.; ROECKNER, E. Storm tracks and climate change. **J. Clim.**, v.19, p.3518-3543, 2006..

BLAIN, G. C. Tendências e variações climáticas em séries anuais de precipitação pluvial do Estado de São Paulo. **Bragantia** (São Paulo, SP. Impresso), v. 69, p. 765-770, 2010.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Avaliação e Adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às Condições Climáticas do Estado de São Paulo. **Bragantia** (São Paulo), Campinas-SP, v. 64, n. 4, p. 695-705, 2005.

BUSSAY, A. M.; SZINELL, C.; HAYES, M.; SVOBODA, M. Monitoring drought in Hungary using the standardized precipitation index. **Annales Geophysicae**, v. 16, 1998.

BRUNINI, O.; PINTO, H. S.; ZULLO Jr., J. Uso do SPI para Avaliação dos Períodos de Seca no Estado de São Paulo. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza-CE. **Anais...** Fortaleza-CE, v.1, p. 251-252, 2001.

CASTRO, R. **Distribuição probabilística de precipitação na região de Botucatu-SP**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 88 p., 1996.

CHU, P. S., YU, P., HASTENRATH, S. Detecting climate change concurrent with deforestation in the Amazon basin: which way has it gone?. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 75, n. 4, p. 579-583, 1995.

COX, P. *et al.* Increase risk of Amazonian Drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature** (London), v. 453, p. 212-16, 2008.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D.; PASSOS, J. R. S. O modelo gama de probabilidade aplicado ao estudo da distribuição da chuva mensal na região administrativa de Bauru-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1997, Campos do Jordão. **Anais...** Sete Lagoas: SBA, 1997. p. 107-110.

CUTRIM, E. M. C, MOLION, L. B.; NECHET, D. Chuvas na Amazônia Durante o Século XX. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 1999. **Anais...** Rio de Janeiro: SBA, 1999. p. 1327-1333.

EDWARDS, D. C, MCKEE, T. B. **Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple timescales**. Fort Collins: Colorado State University. 1997. Climatology Report No. 97-2.

FEARNSIDE, P. M. A vulnerabilidade da floresta Amazônica perante as mudanças climáticas. **Oecologia Brasiliensis**, v. 13, n. 4, p. 609-618, 2009.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, v.19, n. 53, São Paulo Jan./Apr., 2005. doi: 10.1590/S0103-40142005000100010. Print version ISSN 0103-4014. DOSSIÊ AMAZÔNIA BRASILEIRA.

GOMES, N. de V. **Estudo comparativo da distribuição espaço-temporal da precipitação na Amazônia Oriental**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Federal do Pará. Belém, 109 p., 2008.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.

GUTTMAN, N. B. Comparing the Palmer Drought Index and The Standardized Precipitation Index. **Journal Of The American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, 1998.

HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A.; VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought index using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 80, n. 3, 1999.

HASTENRATH, S.; LAMB, P. **Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans**. University of Wisconsin Press, 113 p., 1977.

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Further Work of Northeast Brazil Rainfall Anomalies. **Journal of Climate**, v. 6, 1993.

HASTENRATH, S. Interannual and Longer-Term Variability of Upper Air Circulation in the Northeast Brazil-Tropical Atlantic Sector. **J Geophysical Research**, 105, 2001.

HEIM JUNIOR, R. R. A review of twentieth - century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 83, n.8, p.1149-1163, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007 a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Impacts, adaptation and vulnerability summary for policymakers**. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change. 2007 b.

JUNGCLAUS, J. H; KEENLYSIDE, N.; BOTZET, M.; HAAK, H.; LUO, J. J.; LATIF, M.; MAROTZKE, J.; MIKOLAJEWICZ, U.; ROECKNER, E. Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, **Journal of Climate**, v. 19, pp. 3952-3972, 2006.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: I. F. A. Cavalcanti, N. J. Ferreira, M. G. A. J. Silva, A. F. da Silva Dias. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 213-233, 2009.

KENDALL, M.A.; STUART, A. **The advanced theory of statistics**. Londres: Charles Griffin, 1967. 690p.

KEYANTASH, J; DRACUP, J. A. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 83 n.8, p.1167-1180, 2002.

KOGAN, F. N. Global Drought Watch from Space. **Bulletin of American Meteorology Society**, v. 78, n. 4, p. 621-636, 1997.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, n. 4, p. 488-498. 1980.

LANA, X.; SERRA, C.; BURGUEÑO, A. Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index. **International Journal of Climatology**, n. 21, p. 1669–1691. 2001.

LI, W.; FU, R.; NEGRÓN JUÁREZ, R. I.; FERNANDES, K. Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. *Philosophical Transactions Of the Royal Society, Biological Sciences*; v. 363; n. 1498, 2008.

LIEBMANN, B.; VERA, C. S.; CARVALHO, L. M. V.; CAMILLONI, I. A.; HOERLING, M. P.; ALLURED, D.; BARROS, V. R.; BÁEZ, J.; BIDEGAIN, M. An observed trend in Central South American Precipitation. **J Climate**, v. 17, p. 4357–4367, 2004.

LIN, J. L.; KILADIS, G. N.; MAPES, B. E.; WEICKMANN, K. M.; SPERBER, K. R.; LIN, W.; WHEELER, M. C.; SCHUBERT, S. D.; DEL GENIO, A.; DONNER, L. J.; EMORI, S.; GUEREMY, J. F.; HOURDIN, F.; RASCH, P. J.; ROECKNER, E.; SCINOCCHA, J. F. Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: convective signals. **J Climate**., 2006.

LLOYD-HUGHES, B.; SAUNDERS, M. A. A drought climatology for Europe. **Journal of Climatology**, v. 22, p. 1571-1592, 2002.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; UVO, C. Long-Term Streamflow and Rainfall Fluctuations in Tropical South America: Amazonia, Eastern Brazil and Northwest Peru. **Journal of Geophysical Research**, n. 103, 1998.

MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, n.78, p.79-96, 2004.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007, v. 1, p. 214.

MARENGO, J. A. Cenários de mudanças climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência & Ambiente**, v. 34, p. 100-125, 2007a.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007b, v. 1, p. 214.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G. DE OLIVEIRA R.; CAMARGO, H.; OYAMA, M.; ALVES, L.; BROWN F. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516, 2007c.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: I. F. A. Cavalcanti, N. J. Ferreira, M. G. A. J. Silva, A. F. da Silva Dias. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p. 213-233, 2009.

MAY, W. Simulation of the variability and extremes of daily rainfall during the Indian summer monsoon for present and future times in a global time-slice experiment. **Clim. Dyn.**, v. 22, p. 183–204, 2004.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 8, 1993, Boston. **Anais...** Boston, p.179–184, 1993.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales. 9th Conference on Applied Climatology, **Preprints**, American Meteorological Society, Boston, p. 233-236, 1995.

MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A.T.; GREGORY, J. M.; KITO, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S.C. B.; WATTERSON, G.; WEAVER, J.; ZHAO, Z-C. Global Climate Projections. In: SOLOMON, S. D. *et al.* (Ed.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

MENEZES, H. E. A.; SILVA, R. M.; ALVES, L. M.; CAMARGO JÚNIOR, H. Análise Subjetiva da Simulação de Precipitação do Modelo ETA Climático para o Nordeste do Brasil no Período entre Janeiro e Março de 2003. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2003, Santa Maria - RS. Situação Atual e Perspectivas da Agrometeorologia. **Anais...** Santa Maria – RS, v. 2., p. 811-812, 2003.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 17, n-1, p. 1-10, 2002.

MORAES, J. M.; PELLEGRINO, G.; BALLESTER, M. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Estudo preliminar da evolução temporal dos componentes do ciclo hidrológico da bacia do Rio Piracicaba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11.; SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2., 1995, Recife. **Anais...** Recife: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 27-32., 1995.

MORAES, M. C. S.; **Distribuição de gotas e a relação Z-R para radar na costa leste do Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, p.10-36, 2003.

MORAES, B. S.; LINS, R. O. C.; SILVA, G. B. L. Previsão de seca usando redes neurais artificiais. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2008. v. 1. p. 1-10.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; de VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GRUBLER, A. **Special Reports on Emission Scenarios (SRES)**. Working Group III of the International Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 595 p., 2000.

NARASIMHAN, B.; SRINIVASAN, R. Development and Evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) an Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for Agricultural Drought Monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, p. 69-88, 2005.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. IBGE-SUPREN, Rio de Janeiro. 421 p., 1979.

NOBRE, C. A. The Amazon and climate. NOBRE, C. A. The Amazon and climate. In: WMO TECHNICAL CONFERENCE ON CLIMATE CONFERENCE FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, 1983, Paipa, Co. **Proceedings...** 1983. p. 409-416. (INPE-2999-PRE/451).

OLSON, D. A.; JUNKER, N.; KORTY, B. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC. **Weather and Forecasting**, v. 10, n. 3, p. 498-511, 1995.

PAULO, A. A.; FERREIRA, E.; COELHO, C.; PEREIRA, L. S. Drought Class Transition Analysis throught Markov and Loglinear Models. An Approach to Early Warning. **Agricultural Water Managemente**, n. 77, p. 59-81, 2005.

PEREIRA, L. S.; PAULO, A. A. Indicadores de escassez de água: índices de secas. In: CONF. CONV. WORKSHOP INDICADORES Y TECNOLOGIAS DE USO DEL AGUA EN LAS TIERRAS SECAS DE IBEROAMÉRICA CYTED (Proyeto CYTED XVII-1), 2004.Mendoza, Argentina. **Proceedings...** Mendoza: Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Árida, 2004. P. 189-206.

RAO. V. B.; LIMA, M.; FRANCHITO, S. H. Seazonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, n. 6, p. 1754-1763, 1993.

ROECKNER, E.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U.; TOMPKINS, A. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Hamburg, Germany: Max Planck Institute for Meteorology, 2003. 127 p. (Tech. Rep. 349).

ROSOLEM, R. **O impacto do desmatamento no ciclo hidrológico: um estudo de caso para a rodovia Cuiabá-Santarém**. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas), Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 81 p., 2005.

RUDOLF, B.; HAUSCHILD, H.; RUETH, W.; SCHNEIDER, U. **Terrestrial Precipitation analysis: operational method and required density of point measurements**. NATO ASI I/26, Global Precipitations and Climate Change (Ed. M. Desbois and F. Desalmand), Springer Verlag Berlin, 173 – 186, 1994.

SANSIGOLO, C. A. Características Espectrais dos Índices de Seca de Palmer (PDSI) e da Precipitação Normalizada (SPI) em Piracicaba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2002, Foz do Iguaçu (PR). **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2002. p. 618-624. Comitê Temático 1 - Climatologia Geral. (INPE-9373-PRE/5033).

SANSIGOLO, C. A. Análise comparativa do desempenho dos índices de seca de Palmer (PDSI) e da precipitação normalizada (SPI) em Piracicaba, SP (1917-2001). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 237-242, 2004.

SANTOS, F. A. S.; ANJOS, R. J. Utilização do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) no monitoramento da seca no Estado de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Fortaleza. **Anais...** Sete Lagoas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p.121-122.

SCHNEIDER, U.; FUCHS, T.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; RUDOLF, B. **Global Precipitation Analysis Products of the GPCC**. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publikation, p.1-12, 2008. Disponível em ftp://ftpanon.dwd.de/pub/data/gpcc/PDF/GPCC_intro_products_2008.pdf acesso em 16 de agosto de 2010.

SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. **Climate Dynamics**, 13 (1), 79-105, 2008.

SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Genève : Organisation Météorologique Mondiale, 1975. 192 p.

SZALAI, S.; SZINELL, C. Comparison of two drought indices for drought monitoring in Hungary—a case study. In: VOGT, J. V.; SOMMA, F. (eds). **Drought and drought mitigation in Europe**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p.161-166.

TRENBERTH, K.E.; JONES, P.D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN TANK, A.; PARK, D.; RAHIMZADEH, F.; RENWICK, J. A.; RUSTICUCCI, M.; SODEN, B.; ZHAI, P. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S. D. *et al.* (Ed.) **Climate Change 2007: The physical science basis**. contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 2007.

THOM, H. C. S. A note on the gama distribution. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 86, p. 117-22, 1958.

UNIÃO NACIONAL DE ESTUDIOSOS EM METEOROLOGIA (UNEMET). Satélites meteorológicos: como ajudam na previsão do tempo. **Revista Cirrus**. Ano I - Número 5 - Novembro - Dezembro 2005.

VALVERDE, M. C. ; Marengo, J. . Mudanças na Circulação Atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 125-145, 2010.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Editora Ufv, 449 p., 1991.

VIAU, A. A.; VOGT, J. V.; BEAUDIN, I. Comparison of a Satellite-Based and Precipitation-Based Drought Index. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 6, p. 580-583, 2000.

VIRJI, H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud wins. **Monthly Weather Review**, n. 109, p. 549-610, 1981.

WILKS, D S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. London: Academic Press: London. 1990.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: The role definitions. **Water International**, p. 194-1707, v. 10, n. 3, p. 111 – 120, 1985.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: conceptions and definitions. In: WILHITE, D. (ed.). **A Drought: a global assessment**. London: Routledge, v.1 ,p. 3-18, 2000.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Review of requirements for area-averaged precipitation data, surface based and space based estimation techniques, space and time sampling, accuracy and error, data exchange**. WCP-100, WMO/TD-No. 115, 1985.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought and agriculture**. Geneva, Switzerland, 1975, 127. (WMO Tech. Note 138, Publ. WMO-392).

WU, H.; HAYES, M. J.; WILHITE, D. A.; SVOBODA, M. D. The effect of the length of record on the standardized precipitation index Calculation. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 505-520, 2005.