

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

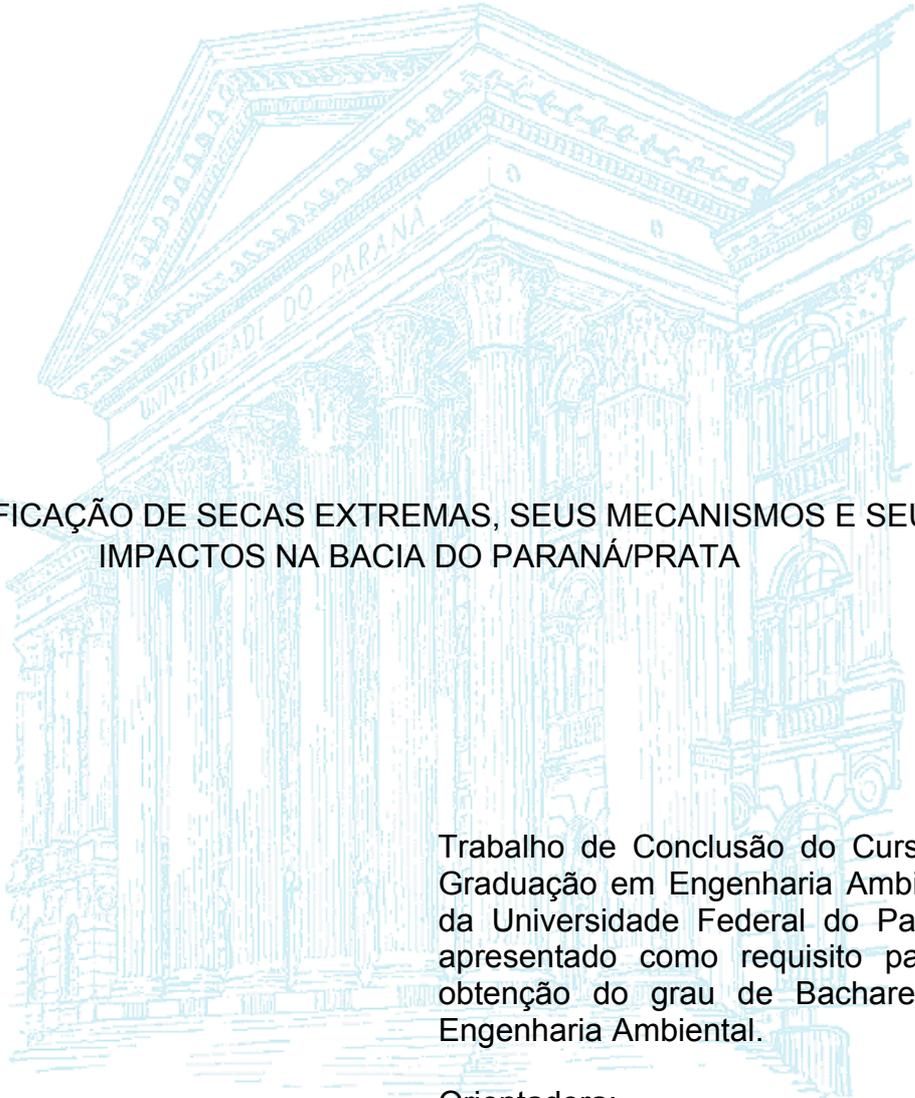
**PAOLA FERNANDA ALMEIDA COSTA**

IDENTIFICAÇÃO DE SECAS EXTREMAS, SEUS MECANISMOS E SEUS  
IMPACTOS NA BACIA DO PARANÁ/PRATA

CURITIBA

2016

**PAOLA FERNANDA ALMEIDA COSTA**



**IDENTIFICAÇÃO DE SECAS EXTREMAS, SEUS MECANISMOS E SEUS  
IMPACTOS NA BACIA DO PARANÁ/PRATA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná, apresentado como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora:  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alice Marlene Grimm

**CURITIBA  
2016**

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof. Alice Marlene Grimm, pela orientação, dedicação e confiança.

Aos técnicos Gisele e Eduardo, pela ajuda no laboratório.

À minha família, em especial minha mãe, meu pai e meu irmão, pelo amor, apoio e incentivo.

Aos meus amigos e colegas de curso.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

## RESUMO

A bacia do Paraná/Prata é importante por conter a maior usina hidrelétrica da América do Sul, além de várias outras, e por ser uma região de grande produção agrícola. Portanto, por ser uma região onde a economia depende fortemente de fatores climáticos, é importante o estudo de eventos climáticos que podem vir a afetá-la negativamente. O objetivo do presente estudo é caracterizar aspectos climatológicos dos episódios de seca na Bacia do Paraná/Prata, incluindo distribuição espacial, frequência e persistência, assim como sua relação com padrões de variabilidade de temperatura da superfície do mar global. Para isto, foram utilizados dados de precipitação da Agência Nacional de Águas (ANA) e de serviços meteorológicos de outros países, para o período 1950-2009, interpolados em quadrículas de 2,5° por 2,5° (latitude e longitude). Também foram utilizados dados de TSM provenientes do conjunto HadISST1, do *Hadley Centre*, Reino Unido e também dados de campos atmosféricos provenientes do conjunto de dados de Reanálise do *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Foi calculado o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) para 3, 6, 12, 24, 48 e 60 meses. Com essas séries de SPI foram feitas as Análises de Componentes Principais (ACP), que geraram modos de variabilidade rotacionados, obtendo-se a distribuição temporal e espacial da variabilidade. Também foi calculado o tempo característico ( $T_0$ ) para SPI de cada quadrícula. Foram feitas estatísticas de eventos extremos de seca, correlações entre modos de SPI e séries de TSM (e o reverso também), e composição de anomalias de parâmetros atmosféricos e oceânicos associadas com uma seca persistente. Os resultados indicam que as secas interanuais na Bacia do Paraná/Prata tem relação principalmente com os eventos *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), mas também com os padrões oceânicos Oscilação Interdecadal do Pacífico (IPO), Oscilação Multidecenal do Atlântico (AMO) e Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Também foi verificado que há coerência entre a seca analisada e as anomalias oceânicas e atmosféricas existentes durante sua ocorrência.

**Palavras-chave:** secas, eventos extremos de seca, Índice de Precipitação Padronizada.

## ABSTRACT

The Paraná/La Plata basin is important because it contains the largest hydroelectric plant in South America, besides several others, and for being a region of great agricultural production. Therefore, since it is a region where the economy heavily relies on climatic factors, it is important to study the climatic events that may affect it negatively. The aim of this study is to characterize the climatology of drought episodes in the Paraná/La Plata basin, including spatial distribution, frequency and persistence, as well as its relationship with climate variability patterns of global sea surface temperature. The analysis used precipitation data from the Brazilian *Agência Nacional de Águas* (ANA) and from meteorological services of other countries, in the period 1959-2009, gridded to 2.5° (longitude and latitude). SST data from the HadISST1 set from Hadley Centre, UK, were also used, as well as data from the atmospheric Reanalysis data set of the National Oceanic and Atmospheric Administration. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated for 3, 6, 12, 24, 48 and 60 months. Principal Components Analysis (PCA) was carried out on these SPI series, generating rotated modes of variability, obtaining the temporal and spatial distribution of the variability. The characteristic time ( $T_0$ ) was also calculated for the SPI series in each grid box, obtaining the drought persistence time of a given region. Extreme drought events statistics was characterized. Also correlations between modes of SPI and sea surface temperature series (SST) (and the reverse as well), and composite anomalies of atmospheric and oceanic parameters associated with a persistent drought were calculated. The results indicate that the interannual droughts in the Parana/La Plata Basin are mainly related to the *El Niño* Southern Oscillation (ENSO) events, but also to the oceanic patterns Interdecadal Pacific Oscillation (IPO), Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and North Atlantic Oscillation (NAO). It was also found that there is consistency between the analyzed drought and the oceanic and atmospheric anomalies existing during its occurrence.

**Key words:** droughts, extreme drought events, Standardized Precipitation Index

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 Objetivos Gerais.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1 CLIMATOLOGIA DA BACIA DO PARANÁ/PRATA .....	5
2.2 ESTUDOS DE SECAS COM DIVERSOS ÍNDICES .....	11
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	16
3.1 DADOS.....	16
3.2 CLIMATOLOGIA.....	19
3.3 SPI.....	19
3.3.1 Distribuição Gama.....	20
3.3.2 Cálculo do SPI .....	21
3.4 TEMPO CARACTERÍSTICO .....	24
3.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	24
3.6 ESTATÍSTICA DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA .....	27
3.7 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS .....	27
3.8 CORRELAÇÃO .....	30
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	32
4.1 SPI E SUA VARIABILIDADE .....	32
4.2 TEMPO CARACTERÍSTICO .....	34
4.3 ESTATÍSTICA DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA .....	35
4.3.1 Contagem dos episódios de seca .....	35
4.3.2 Duração média dos episódios de seca .....	37
4.3.3 Duração máxima dos episódios de seca .....	37
4.4 CORRELAÇÃO .....	38
4.4.1 Modos de SPI e séries de TSM .....	38
4.4.2 Modos de TSM e séries de SPI .....	43
4.5 ESTUDO DE CASO E COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS .....	44
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	47
<b>FIGURAS DOS RESULTADOS</b> .....	49

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>78</b>
--------------------------	-----------

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- A BACIA DO PARANÁ/PRATA E SUAS SUB-BACIAS: PARANÁ, PARAGUAI, URUGUAI E A PRÓPRIA DO RIO DA PRATA. ....	2
FIGURA 2 – MAPA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	3
FIGURA 3 - CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1950 A 2005. A ÁREA DENTRO DO QUADRADO AZUL É A REGIÃO ESTUDADA NO PRESENTE TRABALHO (BACIA DO PARANÁ/PRATA). ....	6
FIGURA 4 - CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 (VALORES EM MM/MÊS NA ESTAÇÃO INDICADA). ....	7
FIGURA 5 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE TSM NO PERÍODO DE 1950 A 2009 (VALORES EM °C/MÊS NA ESTAÇÃO INDICADA).....	9
FIGURA 6 – MAPAS DAS SETE ZONAS CLIMÁTICAS DA BACIA DO PARANÁ/PRATA. ....	11
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA EXPLICANDO O PASSO A PASSO DA METODOLOGIA. COMEÇA COM A OBTENÇÃO DOS DADOS E SEGUE A ORDEM DAS SETAS. ONDE PPT SIGNIFICA PRECIPITAÇÃO E ACP, ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS. ....	16
FIGURA 8 – EXEMPLO DE TRANSFORMAÇÃO DE EQUIPROBABILIDADE DE UMA FUNÇÃO GAMA AJUSTADA PARA UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA. OS DADOS SÃO DE UM MESMO TRIMESTRE PARA TODOS OS ANOS DO PERÍODO USADO. ....	22
FIGURA 9 – FACTOR LOADINGS (A) E FACTOR SCORES (B) DO PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DA ACP DO SPI 3 MÉDIO ANUAL BASEADA NA MATRIZ DE CORRELAÇÃO. ....	26
FIGURA 10 - DIFERENÇAS ENTRE FUNÇÃO CORRENTE EM 200 HPA (PSI) PARA O PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DA MÉDIA ANUAL DE SPI DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	29
FIGURA 11 – EXEMPLO DE CORRELAÇÃO ENTRE O PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI3 MÉDIO ANUAL E SÉRIES DE TSM. A BARRA DE CORES INDICA NÍVEIS DE CONFIANÇA. AS CORES VERMELHAS (AZUIS) INDICAM CORRELAÇÃO POSITIVA (NEGATIVA) SIGNIFICATIVA COM NÍVEL MELHOR QUE 0,10. ....	31
FIGURA 12 – PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DO SPI DE 3 MESES DE MESES CORRIDOS. (A) FACTOR LOADINGS; (B) FACTOR SCORES...	49
FIGURA 13 – ACP’S PARA SPI DE 12 MESES: (A) PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE MESES CORRIDOS; (B) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DA PRIMAVERA; (C) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DO VERÃO. ....	50

FIGURA 14 - ACP'S PARA SPI DE 24 MESES: (A) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DE MESES CORRIDOS; (B) PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DA PRIMAVERA; (C) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DO VERÃO. ....	51
FIGURA 15 – ACP'S PARA SPI DE 48 MESES: (A) TERCEIRO MODO ROTACIONADO DE MESES CORRIDOS; (B) TERCEIRO MODO ROTACIONADO DA PRIMAVERA; (C) TERCEIRO MODO ROTACIONADO DO VERÃO.....	52
FIGURA 16 – TRÊS PRIMEIROS MODOS DA ACP ROTACIONADA PARA OS SPI'S 3 (ACIMA), 6 (MEIO) E 12 (ABAIXO) PARA MESES CORRIDOS. ...	53
FIGURA 17 - TRÊS PRIMEIROS MODOS DA ACP ROTACIONADA PARA OS SPI'S 24 (ACIMA), 48 (MEIO) E 60 (ABAIXO) PARA MESES CORRIDOS. ....	54
FIGURA 18 – TEMPO CARACTERÍSTICO PARA SPI'S DE 3, 6, 12, 24, 48 E 60 MESES, DADO EM MESES.....	55
FIGURA 19 – NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES. ....	55
FIGURA 20 – NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2,0) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES. ....	56
FIGURA 21 - NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA O SPI3 NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO. ....	56
FIGURA 22 - NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA O SPI6 NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO. ....	57
FIGURA 23 - NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA O SPI12 NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO.....	58
FIGURA 24 – DURAÇÃO MÉDIA DOS EPISÓDIOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES...	58
FIGURA 25 – DURAÇÃO MÉDIA DOS EPISÓDIOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2,0) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.....	59
FIGURA 26 – DURAÇÃO MÁXIMA DOS EPISÓDIOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.....	59
FIGURA 27 – DURAÇÃO MÁXIMA DOS EPISÓDIOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2,0) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A	

2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.....	59
FIGURA 28 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 3 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	60
FIGURA 29 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 3 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	61
FIGURA 30 - (A) QUINTO E (B) SEXTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 3 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	62
FIGURA 31 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 6 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	63
FIGURA 32- (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 6 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	64
FIGURA 33 - (A) QUINTO E (B) SEXTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 6 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	65
FIGURA 34 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 12 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 12 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	66

FIGURA 35 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 12 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 12 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	67
FIGURA 36 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 3. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	68
FIGURA 37 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 3. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	69
FIGURA 38 (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 6. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	70
FIGURA 39 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 6. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	71
FIGURA 40 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 12. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	72
FIGURA 41 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 12. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	73
FIGURA 42 – REGIÃO ESCOLHIDA PARA O ESTUDO DE CASO (AS QUATRO QUADRÍCULAS COM VALORES MAIORES DENTRO DO CÍRCULO). ...	74

FIGURA 43 – SÉRIE TEMPORAL DO SPI DE 3 MESES DA QUADRÍCULA X=8, Y=9.....	74
FIGURA 44 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A BACIA DO PARANÁ/PRATA PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963- JAN1964) EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	75
FIGURA 45 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE TSM PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	75
FIGURA 46 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PRESSÃO AO NÍVEL DO MAR PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	76
FIGURA 47 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE POTENCIAL DE VELOCIDADE E COMPONENTE DIVERGENTE DO VENTO EM 200 HPA PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	76
FIGURA 48 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE (A) FUNÇÃO CORRENTE E (B) FUNÇÃO CORRENTE ZONALMENTE ASSIMÉTRICA EM 200HPA PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10. ....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS SETE ZONAS CLIMÁTICAS DA BACIA DO PARANÁ/PRATA. ....	10
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS VALORES DE SPI.....	23
TABELA 3 – PROBABILIDADE DE RECORRÊNCIA.....	23

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACP – Análise De Componentes Principais
- AMO – *Atlantic Multidecadal Oscillation*
- ANA - Agência Nacional Das Águas
- BNOA – Baixa do Noroeste da Argentina
- CP – Componentes Principais
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- DHI - Índice de Risco de Seca
- EN - *El Niño*
- ENOS - *El Niño* – Oscilação Sul
- EOF – Funções Empíricas Ortogonais
- FL – *Factor Loading*
- FS – *Factor Score*
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPO – *Interdecadal Pacific Oscillation*
- JBN – Jatos de Baixos Níveis
- LN - *La Niña*
- NAO – *North Atlantic Oscillation*
- PDSI - *Palmer Drought Severity Index*
- PNM – Pressão ao Nível do Mar
- PPT – Precipitação
- PSI – Função Corrente
- PSIZA - Função Corrente Zonalmente Assimétrica
- REOF - Funções Empíricas Ortogonais Rotacionadas
- RT – Rotacionado
- SCM – Sistemas Convectivos de Mesoescala

SPI – *Standardized Precipitation Index*

SST- *Sea Surface Temperature*

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

UFPR - Universidade Federal do Paraná

UR - Não Rotacionado

VPOT- Potencial de Velocidade

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

ZACS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

## 1 INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos extremos se manifestam de diversas formas no planeta Terra. Algumas dessas formas são através de ondas de calor, tornados, chuvas e secas prolongadas. Esses fenômenos meteorológicos ocorrem e sempre ocorreram naturalmente. Entretanto, os eventos climáticos extremos vêm ocorrendo com maior frequência nos últimos anos devido a mudanças climáticas (MARENGO, 2015). Como os eventos extremos têm ocorrido com maior frequência, cresce a importância do seu estudo e a necessidade de preparo para enfrentá-los.

Os eventos extremos de seca causam diversos problemas para a economia, o meio ambiente e a população em geral. Alguns dos principais problemas ocorrem na agricultura e silvicultura, na produção hidrelétrica e nos ecossistemas alagados (MO e BERBERY, 2011; MARENGO, 2015).

Historicamente, uma das maiores secas no Brasil, especificamente no Nordeste, iniciou-se em 1877 e perdurou até 1879, associada com um evento *El Niño*. Esta estiagem produziu devastadores impactos no Nordeste do Brasil, onde milhares de pessoas morreram de fome e doenças (GRIMM, 2015). Um evento extremo de seca que ocorreu no Brasil e que chamou bastante a atenção da população ocorreu durante o verão e o outono de 2001, ocasionando a diminuição da vazão dos rios do Nordeste, do Centro-Oeste e do Sudeste do país. Como aquele verão foi muito quente, o uso de sistemas refrigeradores foi maior. Isto, associado com os baixos níveis dos reservatórios das hidrelétricas (por causa da seca), causou uma grande crise hidrelétrica/energética no país, que durou de 2001 a 2002 (CAVALCANTI e KOUSKY, 2002).

Outro exemplo de evento extremo de seca e suas consequências é o que começou em 2008 e afetou o Sul do Brasil e o Nordeste da Argentina, causando perdas na produção de milho, soja e feijão, além de danos aos pastos e ao fornecimento de água (MARENGO, 2015).

O local escolhido para o presente estudo, a Bacia do Paraná/Prata, fica situado no sudeste da América do Sul, e engloba cinco países: Brasil, Paraguai, Uruguai, Bolívia e Argentina. A Bacia do Rio Paraná está inserida na Bacia do Prata e é a mais importante do sistema, devido à sua extensão e vazão (CIC, 2012).

A FIGURA 1 abaixo ilustra as quatro principais sub-bacias que formam a Bacia do Paraná/Prata: Paraná, Paraguai, Uruguai e a própria do Rio da Prata.



FIGURA 1- A BACIA DO PARANÁ/PRATA E SUAS SUB-BACIAS: PARANÁ, PARAGUAI, URUGUAI E A PRÓPRIA DO RIO DA PRATA.

FONTE: CIC (2012).

A Bacia do Paraná/Prata é importante por conter Itaipu, a maior usina hidrelétrica da América do Sul e também o maior parque gerador do Brasil, como ilustrado pela FIGURA 2, que mostra o mapa da geração de energia no país. A Bacia do Paraná/Prata também contém a maior densidade populacional do continente e é responsável por produzir soja, algodão, café, açúcar, arroz, trigo, feijão, e laranja (CAVALCANTI *et al.*, 2015). Portanto, por ser uma região onde a economia e o abastecimento humano (agricultura e geração hidrelétrica) dependem fortemente de fatores ambientais e climáticos, é importante o estudo de eventos climáticos que podem vir a afetá-la negativamente. Neste estudo, será feita uma análise dos eventos extremos de seca na região, para que seja possível identificar quais os possíveis mecanismos causadores, e para que no futuro, utilizando-se dessas informações, possam ser criadas iniciativas de prevenção e mitigação dos problemas que a seca extrema pode causar.

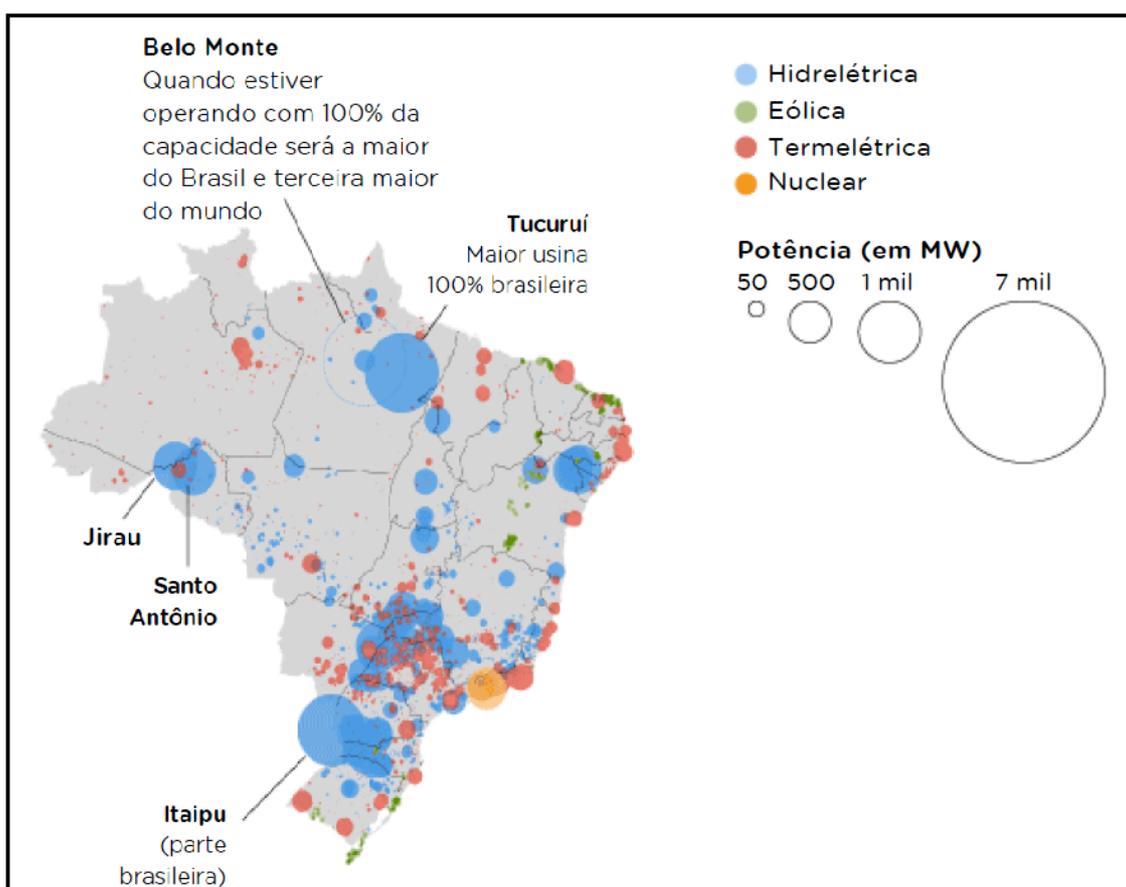


FIGURA 2 – MAPA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.

FONTE: NEXOJORNAL (2016)

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Caracterizar aspectos climatológicos dos episódios de seca na Bacia do Paraná / Prata, incluindo distribuição espacial, frequência e persistência, assim como sua relação com padrões de variabilidade de temperatura da superfície do mar global.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Identificação de padrões de distribuição espacial e variabilidade temporal de episódios de secas, através da Análise de Componentes Principais do Índice Padronizado de Precipitação (em inglês, *Standardized Precipitation Index*, SPI), que é dado em números de desvios padrões;
- II. Identificação de áreas com maior número de ocorrência de episódios de secas, através da contagem do número de episódios em cada local;
- III. Determinação do tempo de persistência das secas, através do cálculo da duração média dos episódios de secas contados em cada local, além do cálculo do tempo característico das séries de SPI com diferentes períodos de acumulação em cada local;
- IV. Determinação da duração máxima de episódios de seca observada em cada local;
- V. Identificação de relações entre as variabilidades oceânica e atmosférica, e os episódios de secas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CLIMATOLOGIA DA BACIA DO PARANÁ/PRATA

A região da Bacia do Paraná/Prata é influenciada por diversos fatores climáticos, em várias escalas temporais, ou seja, o seu clima é influenciado nas escalas intrassazonais, interanuais e interdecadais (NOGUÉS-PAEGLE e MO, 1997; ROBERTSON e MECHOSO, 1998; GRIMM *et al.*, 2000; CAVALCANTI *et al.*, 2015). A Alta do Atlântico Sul, por exemplo, que favorece o fluxo de umidade atmosférica para o sul na parte central do continente, é uma das principais configurações atmosféricas que influencia o ciclo hidrológico da Bacia do Prata, atingindo maior intensidade no inverno (BARROS *et al.*, 2006). Outras configurações que influenciam a Bacia do Prata são a Alta da Bolívia, a Baixa do Chaco, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Jatos de Baixos Níveis, os Sistemas Convectivos de Mesoescala e a circulação do Oeste.

O regime de chuvas da Bacia do Paraná/Prata pode ser dividido em dois comportamentos distintos: o da região ao norte de 20°S e o da região ao sul de 20°S (BARROS *et al.*, 2006; RODRIGUEZ e CAVALCANTI, 2006). No primeiro caso, os verões são mais chuvosos, característica típica do regime tropical da América do Sul, associada com a ZCAS e o sistema de monção (RODRIGUEZ e CAVALCANTI, 2006), já o inverno é seco nessa região (BERBERY e BARROS, 2002). No segundo, a quantidade de precipitação é bastante uniforme durante todo o ano, porém a quantidade mensal é menor do que a observada na estação chuvosa da região ao norte de 20°S. O que afeta o clima da região sul da bacia são os sistemas transientes associados com as frentes frias (CAVALCANTI *et al.*, 2015). O mapa da FIGURA 3 apresenta os ciclos anuais de precipitação na América do Sul, ilustrando o que foi descrito acima.

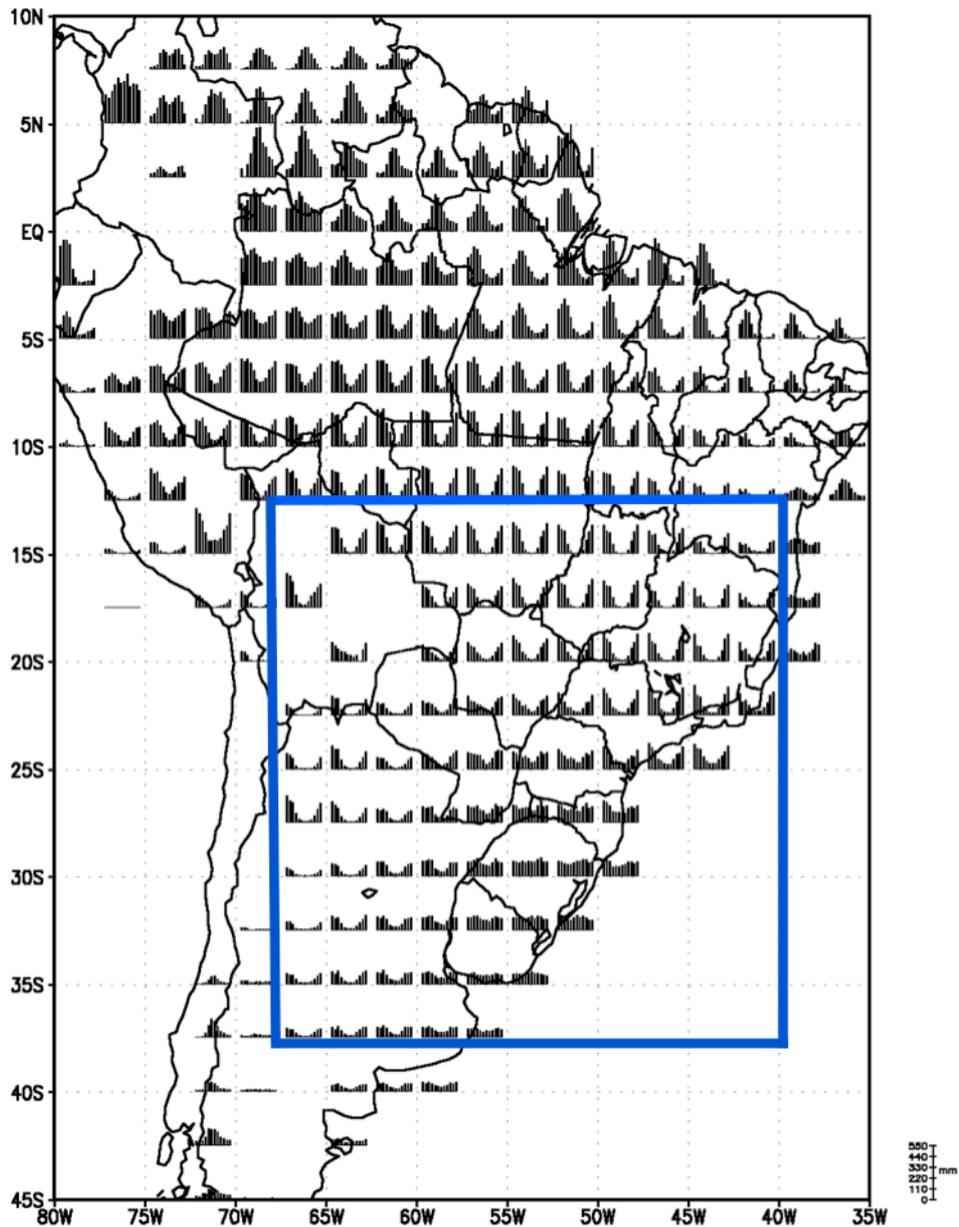


FIGURA 3 - CICLOS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL NO PERÍODO DE 1950 A 2005. A ÁREA DENTRO DO QUADRADO AZUL É A REGIÃO ESTUDADA NO PRESENTE TRABALHO (BACIA DO PARANÁ/PRATA).

FONTE: GRIMM (2011)

Os mapas a seguir mostram a climatologia sazonal de precipitação observada na Bacia do Paraná/Prata no período de 1950 a 2009. É possível perceber que na região ao sul da bacia (como no Estado do Rio Grande do Sul) a variação da precipitação é muito pequena com relação à mudança das

estações (em torno de 50 mm), enquanto que ao norte da bacia essa variação é maior (em torno de 200 mm), confirmando o que foi dito no parágrafo anterior.

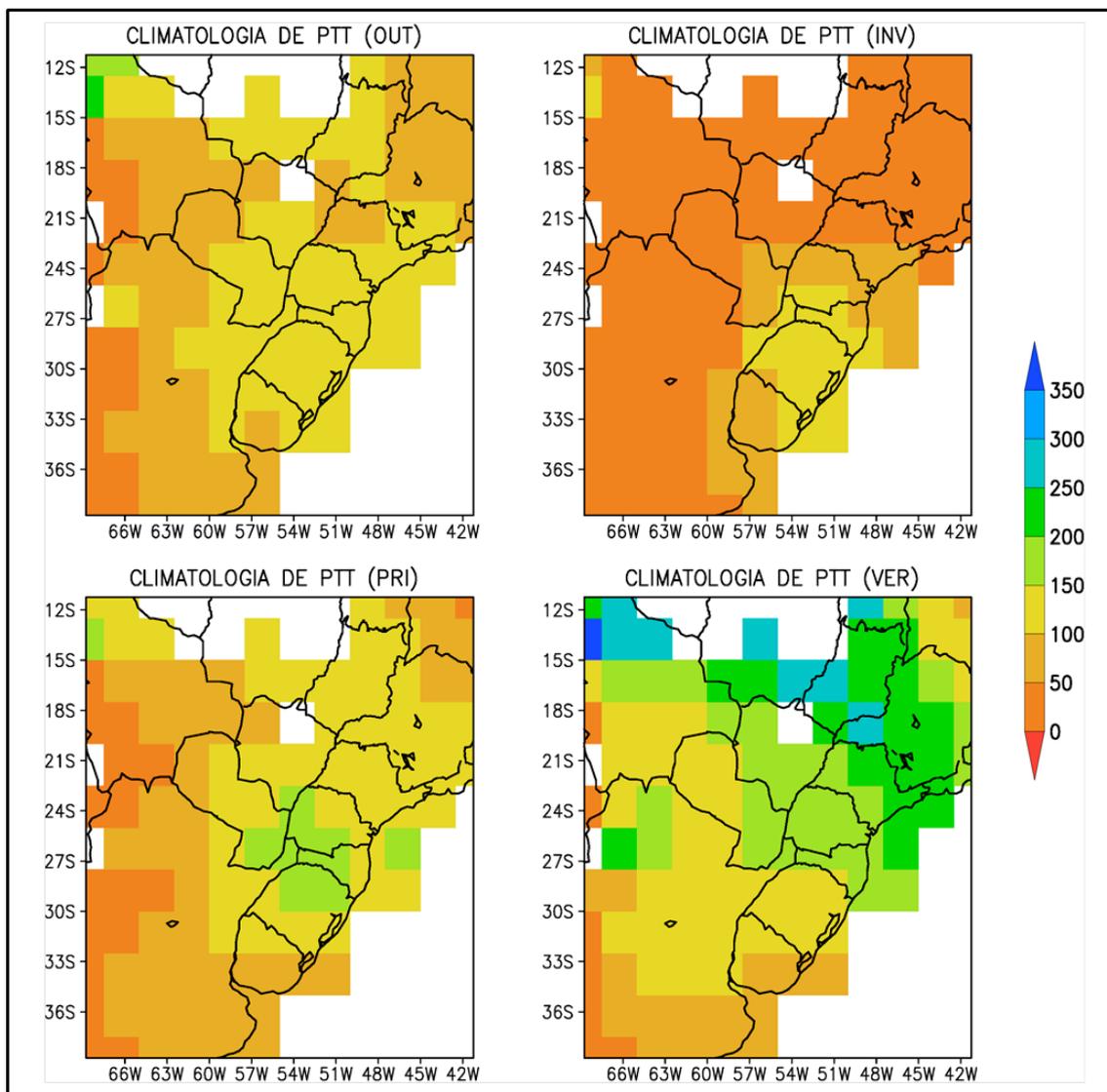


FIGURA 4 - CLIMATOLOGIA SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 (VALORES EM MM/MÊS NA ESTAÇÃO INDICADA).

A principal oscilação climática que afeta as chuvas na região da Bacia do Paraná/Prata é o El Niño Oscilação Sul (ENOS), que pode ocasionar cheias ou secas, começando na primavera e terminando no inverno do ano seguinte (GRIMM *et al.*, 1998; GRIMM *et al.*, 2000; CAVALCANTI *et al.*, 2015). O sul da

América do Sul é uma das regiões extratropicais mais afetadas pelos eventos *El Niño* (EN) e *La Niña* (LN) (GRIMM *et al.*, 1998), sendo o Sul do Brasil a região com o sinal mais forte nos extratropicais (GRIMM *et al.*, 2000). Grimm *et al.* (1998) ainda observaram que existem fortes anomalias positivas de precipitação na primavera de anos EN no Sul do Brasil (mais forte do que no verão) e no inverno do ano seguinte. Na primavera de anos LN existem anomalias negativas ainda mais fortes. Posteriormente, Grimm *et al.* (2000) verificaram que existe uma tendência geral para um período chuvoso durante um ano de EN, assim como ao longo do ano antes de eventos LN. Também foi verificada tendência para precipitação abaixo do normal durante o ano de LN no Sudeste da América do Sul.

Os eventos EN também podem impactar o sistema de monção, responsável pela estação chuvosa em uma parte da Bacia do Paraná/Prata, como foi citado anteriormente (o sistema de monção influencia a parte ao norte da bacia). Grimm (2003) estudou a influência dos eventos EN no sistema de monção de verão no Brasil. Foi verificado que no começo da estação de monção de verão (na primavera) existem anomalias positivas de precipitação no Sul do Brasil. Em janeiro, existe circulação ciclônica sobre o sudeste do Brasil, com mais chuva na ZCAS, e em fevereiro, tende a haver anomalia negativa de precipitação na ZCAS e anomalia positiva no Sul do Brasil.

Além do ENOS, outras anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) também influenciam o regime de chuva da Bacia do Paraná/Prata. Diaz *et al.* (1998) afirmam que na primavera e no verão, as anomalias de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico estão positivamente correlacionadas com as anomalias de chuva no Uruguai e na Região Sul do Brasil. Já nas cabeceiras do Paraná, a precipitação está correlacionada negativamente com a TSM no Atlântico sudoeste (BARROS *et al.*, 2000). A FIGURA 5 mostra as climatologias sazonais de TSM observada no globo, no período de 1950 a 2009. A mancha roxa (TSM de 30 °C) oscila no sentido norte-sul pela costa leste da América do Sul.

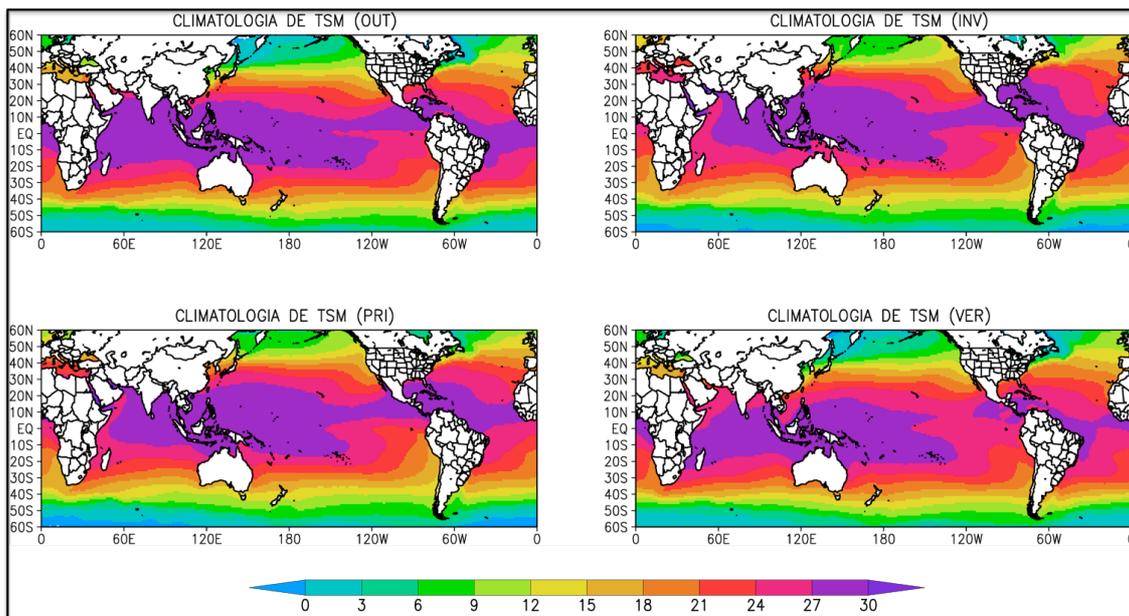


FIGURA 5 – CLIMATOLOGIA SAZONAL DE TSM NO PERÍODO DE 1950 A 2009 (VALORES EM °C/MÊS NA ESTAÇÃO INDICADA).

Barros *et al.* (2006) dividiram a Bacia do Paraná/Prata em sete zonas climáticas: a região de Monção no Pantanal e no norte da Bacia do Paraná, o Grande Chaco, no leste do Paraguai, o planalto meridional e as serras do Rio Grande do Sul, o litoral argentino, a parte oriental do Uruguai e sul do Rio Grande do Sul, e a margem sul e oeste da Bacia do Paraná/Prata. Para cada uma delas são descritas as principais características climáticas na TABELA 1 a seguir. As regiões também estão indicadas nos mapas da FIGURA 6.

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS SETE ZONAS CLIMÁTICAS DA BACIA DO PARANÁ/PRATA.

Região	Principais causas do regime climático	Características	
		Precipitação	Regime Térmico
<p>Monção</p> <p>a) Pantanal</p> <p>b) Alto Paraná</p>	<p>a) Monção e Alta da Bolívia</p> <p>b) Monção e ZCAS</p>	Máxima no verão, e mínima no inverno, ambas bem marcadas.	Baixa variação sazonal.
Chaco	Monção, JBN, SCM, posição do jato, posição da BNOA	Máxima no verão, e frequentemente nula no inverno.	Muito quente no verão.
Leste do Paraguai e áreas arredores	JBN, SCM, ZCAS, atividade frontal no inverno.	Máxima no verão, e mínima no inverno.	Muito quente no verão.
Planalto meridional e serras do Rio Grande	ZCAS, SCM, atividade frontal (indiretamente JBN).	Abundante o ano inteiro. Variável entre os meses.	Quente no verão, relativamente frio no inverno em regiões altas.
Litoral argentino e áreas arredores	JBN, SCM, atividade frontal, posição da BNOA, (ZCAS indiretamente).	Máxima nas estações intermediárias, com um mínimo marcado no inverno.	Quente no verão e geadas no inverno.
Uruguai oriental e sul do Rio Grande do Sul	Atividade frontal, SCM, (indiretamente ZCAS e JBN).	Máxima nas estações intermediárias, abundante no verão, com exceção do extremo sul.	Quente no verão e geadas no inverno.
<p>Fronteiras a oeste e sul da Bacia do Paraná/Prata</p> <p>a) Ao norte de 32°S</p> <p>b) Ao sul de 32°S</p>	<p>a) Posição das correntes em jato, do Chaco e da BNOA;</p> <p>b) Atividade frontal, posição das correntes em jato e da BNOA.</p>	<p>a) Escarça, maior no verão;</p> <p>b) Menos escarça, embora menor do que no leste e norte, mais distribuída através do ano, mínima no inverno.</p>	<p>a) Similar ao Chaco;</p> <p>b) Muitos dias com geadas quase todo inverno.</p>

FONTES: BARROS ET AL. (2006)

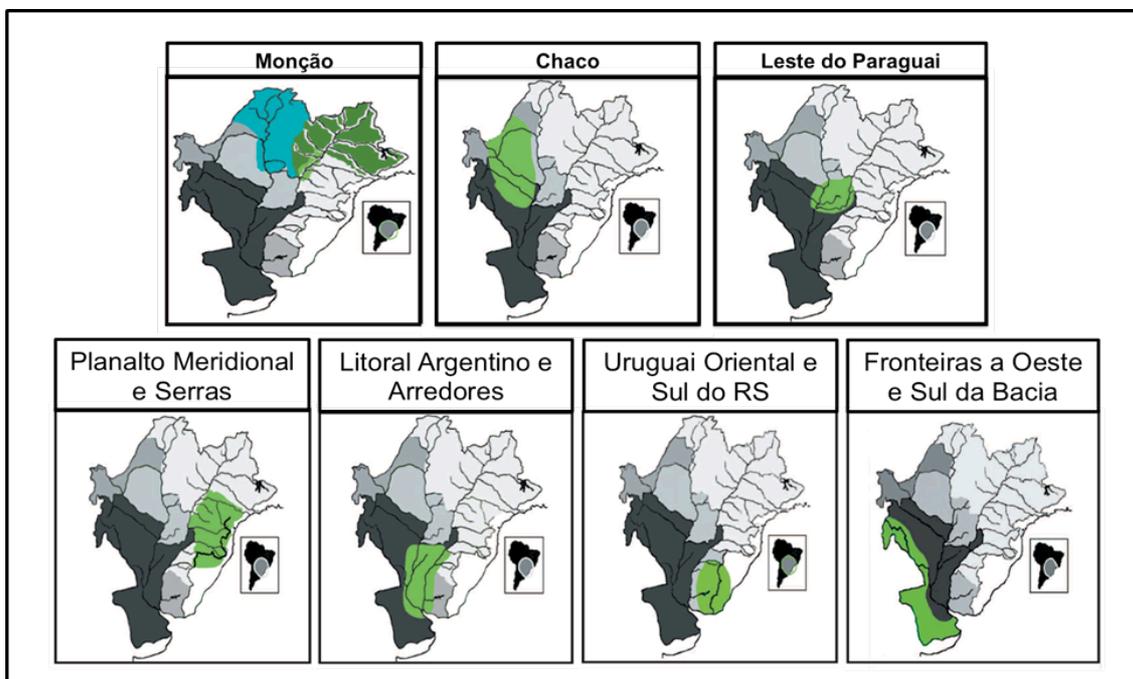


FIGURA 6 – MAPAS DAS SETE ZONAS CLIMÁTICAS DA BACIA DO PARANÁ/PRATA.

FONTE: BARROS *ET AL.* (2006)

## 2.2 ESTUDOS DE SECAS COM DIVERSOS ÍNDICES

As secas extremas podem ser analisadas e caracterizadas de diversas formas, como através do SPI, do PDSI (Índice de Severidade de Seca de Palmer ou *Palmer Drought Severity Index*, em Inglês) e de outras análises estatísticas. No presente trabalho o índice utilizado será o SPI, mas a explicação do que é este índice e de como ele é calculado será dada na próxima seção (na metodologia).

A seguir, serão apresentados alguns trabalhos que utilizaram o SPI e outros índices para analisar as secas em diversas regiões do mundo.

Hayes *et al.* (1999) descreveram o monitoramento da seca de 1996, que ocorreu nas planícies do sul e no sudoeste dos Estados Unidos, utilizando

o SPI, proposto por McKee *et al.* (1993). Nesse estudo, a seca em questão também foi monitorada utilizando-se o PDSI que, além dos dados de precipitação (que são os únicos dados utilizados no cálculo do SPI), também utiliza dados de umidade do solo. O PDSI é um índice mais antigo e nos Estados Unidos é mais utilizado do que o SPI (HAYES *et al.*, 1999).

O desenvolvimento da seca começou no final de 1995 e permaneceu até o final de 1996 em muitas áreas. Esse estudo mostrou que o SPI identificou o início e a severidade da seca de 1996 com pelo menos um mês de antecedência em relação ao PDSI, (HAYES *et al.*, 1999), indicando que o SPI é um bom índice, visto que ele teve uma resposta mais rápida do que a de um índice que já é conhecido e considerado satisfatório.

Mo e Schemm (2008) publicaram um estudo no qual as regiões de secas e períodos chuvosos persistentes nos Estados Unidos e no México foram identificadas. No mesmo estudo também foram analisadas as relações entre as anomalias de baixa frequência de TSM e eventos ENOS com as condições de seca ou períodos chuvosos persistentes.

Nesse estudo foram utilizados os índices PDSI e SPI. Para o cálculo do PDSI os dados obtidos pelo Centro Nacional de Dados Climáticos tinham um período total de 105 anos (1900-2004), porém esses dados se limitavam aos Estados Unidos. Já para o cálculo do SPI, o período dos dados era de 57 anos (1948-2004), cobrindo os Estados Unidos e o México.

Com relação aos resultados do estudo, as regiões mais propensas a períodos de seca ou períodos chuvosos por mais de um ano foram o noroeste do México e a região montanhosa ocidental, sudoeste dos EUA, e as planícies do sul. No México e na região montanhosa ocidental, as anomalias de TSM fria (quente) sobre os oceanos Índico e Atlântico, e o ENOS de resfriamento (aquecimento) no Pacífico tropical estão associados com o aumento de períodos da seca (chuvosos) nessa região. Já no sudoeste dos EUA a influência acumulativa do ENOS e das anomalias de TSM de baixa frequência é que estão associadas com o aumento de períodos chuvosos ou de seca. Nas planícies da região sul novamente, a combinação dos eventos ENOS com as

anomalias de TSM influenciam a persistência de períodos chuvosos ou de seca (MO e SCHEMM, 2008).

Na conclusão do estudo é ressaltado que a influência das anomalias de TSM nas secas pode variar com as décadas, logo, esse estudo se aplica apenas ao período estudado, de 1948 a 2004 (MO e SCHEMM, 2008).

Lloyd-Hughes e Saunders (2002) realizaram um estudo para entender a climatologia da seca de toda a Europa. O período dos dados analisados foi de 1901 a 1998 (um total de 98 anos). No estudo, a caracterização da seca na região é feita utilizando-se dois índices estatísticos, o SPI e o PDSI. Com relação ao cálculo do SPI, algumas formas de distribuição foram estudadas, para que fosse possível escolher a que melhor descrevia a precipitação mensal na Europa. A que obteve o melhor resultado foi a distribuição gama, que também é a distribuição que será utilizada no presente trabalho. Ainda com relação ao SPI, os cálculos foram realizados para os intervalos de 3, 6, 9, 12, 18 e 24 meses (SPI3, SPI6, SPI9, SPI12, SPI18 e SPI24).

Nos resultados do estudo foi mostrado que a persistência de períodos de seca que, segundo os cálculos duram uma média de 2 a 3 anos, desde 1900, é mais forte na Europa Central Oriental, e na Rússia Ocidental. Também nos resultados foi mostrada a relação entre o SPI e o PDSI. O SPI12 foi o que apresentou os resultados mais próximos aos do PDSI. Apesar de parecidos, o SPI foi mais homogêneo quando representava a distribuição espacial de secas extremas na Europa e, segundo os autores do artigo, o SPI pode ser visto como superior ao PDSI na classificação de secas (LLOYD-HUGHES e SAUNDERS, 2002).

Com relação aos eventos de secas persistentes sobre toda a América do Sul, Mo e Berbery (2011) identificaram as regiões mais propensas a secas extremas e suas forçantes oceânicas associadas. Essas identificações foram feitas através do índice PDSI.

O PDSI mostrou que as regiões mais propensas a eventos extremos de secas e de períodos chuvosos na América do Sul são o nordeste do Brasil, as Guianas, a costa oeste da Colômbia, o Equador e o norte do Peru. Mostrou

ainda que em regiões como o sudeste do Brasil, o Uruguai e o nordeste da Argentina esses eventos são menos propensos a ocorrer na escala de tempo interanual.

Com relação à sazonalidade das chuvas, Mo e Berbery (2011) mostraram que as secas ocorrem no inverno austral, quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se move do Hemisfério Sul para o norte do equador. Analisando a influência do evento ENOS, ambos os índices (SPI e PDSI) concordaram que durante a fase fria do ENOS, com a TSM sobre o Pacífico também fria, há uma maior propensão à seca sobre a região sul da América do Sul e sobre o sul da Argentina. Esse resultado foi consistente com o trabalho de outros autores, como Grimm *et al.* (2000).

Os autores inferiram ainda, que os eventos de secas extremas ou de períodos chuvosos persistentes tendem a ocorrer na escala interanual, em locais como o Nordeste do Brasil e o oeste da Colômbia, no entanto, na região sul da América do Sul os eventos se mostraram pouco propensos a ocorrer nessa escala temporal.

Ainda sobre a América do Sul, Cavalcanti *et al.* (2015) investigaram as forçantes que influenciam os extremos de precipitação (tanto os extremos de seca quanto os extremos de períodos chuvosos) na Bacia do Paraná/Prata, através de análises estatísticas. Além disso, modelos climáticos foram utilizados para análise das simulações e previsões para a região.

Através de análises dos dados observados, Cavalcanti *et al.* (2015) constataram que abril é o mês mais arriscado com relação à agricultura, pois este é um mês em que naturalmente chove pouco e, além disso, o solo está menos úmido com relação aos outros meses. Portanto, estas condições podem vir a afetar a produção agrícola nessa época.

Na análise dos extremos de seca da região, foram utilizados os índices SPI e DHI (*Drought Hazard Index*; em português, Índice de Risco de Seca). Ambas as análises foram realizadas para o período de 1962 a 2008. Primeiramente, foi utilizado o SPI 12 (que utiliza a escala de tempo de 12 meses), com a finalidade de caracterizar as secas com maior escala de tempo.

Após as análises, foi constatado que as regiões com o maior número de eventos de secas no período estudado foram as regiões central e leste da Argentina, e o Paraguai. O DHI indicou que as regiões com os maiores índices de risco de seca estão no oeste e no sul da Bacia do Paraná/Prata. As regiões nordeste da Argentina, sul do Brasil e central do Paraguai tem esse índice mais baixo (CAVALCANTI *et al.*, 2015).

Nas análises das simulações e previsões, foram utilizados os modelos HadCM3 e o AGCM (CPTEC/INPE). As projeções do futuro indicam diferenças pequenas nos eventos de seca com relação ao clima presente, porém, mostram que a duração dos eventos poderá ser maior, o que mostra que a população deve se preocupar e se preparar para os possíveis futuros eventos extremos de seca.

### 3 METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na FIGURA 7 mostra a lógica seguida na metodologia do presente trabalho. Na sequência, cada passo será explicado com mais detalhes.

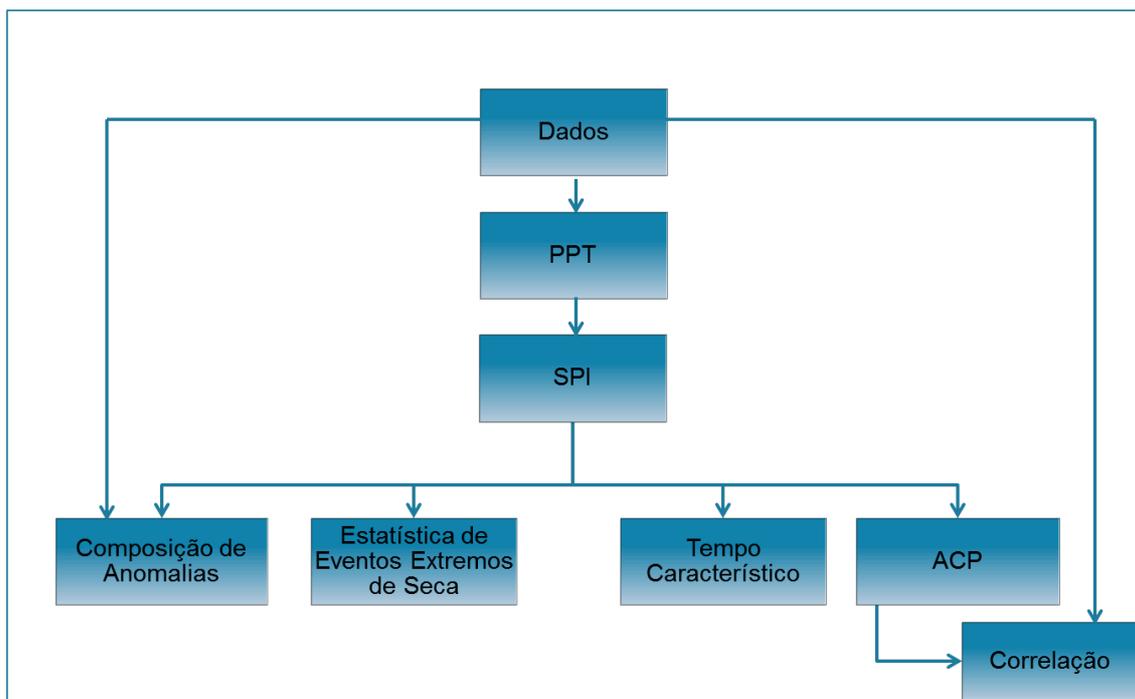


FIGURA 7 - FLUXOGRAMA EXPLICANDO O PASSO A PASSO DA METODOLOGIA. COMEÇA COM A OBTENÇÃO DOS DADOS E SEGUE A ORDEM DAS SETAS. ONDE PPT SIGNIFICA PRECIPITAÇÃO E ACP, ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.

#### 3.1 DADOS

Foram utilizados dados mensais de precipitação na região da Bacia do Paraná/Prata no período de 1950-2009. A escolha do período baseou-se no critério de se obter simultaneamente uma maior cobertura espacial e temporal com dados existentes, a fim de aumentar a confiabilidade do estudo. Esses dados são provenientes do banco de dados do Laboratório de Meteorologia da UFPR, que obtém dados da Agência Nacional de Águas (ANA), para o Brasil,

de institutos hidrometeorológicos da Argentina, Bolívia, Paraguai e Uruguai, do conjunto de dados preparado por Liebmann e Allured (2005), que possui dados na Venezuela, Colômbia e Guianas.

Estes dados foram interpolados para uma grade com quadrículas de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (latitude e longitude), a fim de se obter uma série mais homogênea. Essa interpolação foi feita da seguinte maneira: todos os dados das estações contidas em cada uma das quadrículas foram somados e divididos pelo número de estações que possuíam os dados, gerando desta forma uma série média, que foi atribuída ao centro daquela quadrícula.

Além das fontes já mencionadas, foi feito o preenchimento de dados faltantes utilizando o método de Tabony (1983). Segundo o autor, este método evita erros que podem surgir quando outros métodos são utilizados, como os que dependem de uma matriz de correlação de toda a amostra, ou os que se baseiam principalmente na média climatológica da série. O método de Tabony (1983) é baseado nas estações vizinhas a uma estação considerada. Os dados faltantes são estimados através de análise de regressão linear aplicada às estações vizinhas selecionadas por critério de proximidade, período mínimo dos dados e correlação com os dados da estação considerada. Feito isto, é obtida uma média ponderada dos valores regredidos. Os seguintes passos ilustram a realização da estimativa:

- I. As estações vizinhas são separadas de acordo com o valor da correlação com a estação a ser preenchida;
- II. O segundo critério para as estações vizinhas é a distância delas em relação à estação a ser preenchida, permanecendo apenas as mais próximas e com séries mais longas;
- III. Diferentes pesos são atribuídos às estações vizinhas dependendo do coeficiente de correlação entre elas e a estação a ser preenchida;
- IV. Apenas as estações cujo coeficiente de correlação tem nível de confiança igual ou maior que 95% são mantidas;
- V. É realizado um processo de suavização que leva em conta os parâmetros de regressão para outros meses (os dois vizinhos) na estimativa de um mês particular.

VI. Através da regressão com cada vizinha selecionada são calculados os valores do dado faltante e então sua média ponderada;

O preenchimento de dados faltantes em uma quadrícula foi feito a partir de dados de pelo menos quatro quadrículas vizinhas, para maior confiabilidade do processo. Foi realizado dentro do período de 1950 a 2009, e dentro dos limites espaciais da Bacia do Paraná/Prata (latitude 10°S – 40°S, longitude 40°W – 70°W). O critério utilizado para o preenchimento dessas quadrículas foi a existência de pelo menos 85% de dados existentes na quadrícula. Caso isso acontecesse, até 15% faltantes eram preenchidos, desde que não fossem muitos dados faltantes consecutivos, como, por exemplo, um ano inteiro ou mais de dados faltantes. Com a utilização deste critério, 13 quadrículas foram preenchidas, juntando-se às 93 quadrículas completas já existentes, totalizando 106 quadrículas completas em toda a área a ser estudada.

Além dos dados de precipitação também foram utilizados dados de TSM e de campos atmosféricos. Os dados de TSM são provenientes do conjunto HadISST1, do Hadley Centre, Reino Unido, em grade 1,0° latitude x 1,0° longitude (RAYNER *et al.* 2003). Como o esforço computacional para realizar os cálculos destes dados com essa grade é muito grande, foi feita a interpolação para uma grade 5,0° x 5,0° (latitude e longitude), a fim de reduzi-lo. Além disso, os dados foram cortados para o período do estudo (1950-2009). Os dados de campos atmosféricos são provenientes do conjunto de dados de Reanálise do *National Oceanic and Atmospheric Administration – National Centers for Environmental Prediction/ National Center of Atmospheric Research* (NOAA – NCEP/NCAR) (KALNAY *et al.*, 1996). Estes também foram cortados para o período do estudo.

## 3.2 CLIMATOLOGIA

Foi calculada a climatologia sazonal das séries de precipitação e de TSM no período de 1950 a 2009. O cálculo foi feito para cada quadrícula, através da média da série em questão em cada estação do ano, no período citado.

## 3.3 SPI

O SPI é um índice de seca que foi desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado por McKee, Doesken e Kleist em 1993 (MCKEE *et al.*, 1993, 1995; HAYES *et al.*, 1999). Através desse índice é possível monitorar condições que são muito importantes para a agricultura e para a hidrologia. Existe também a possibilidade de prover um alarme prévio sobre possíveis secas que venham a acontecer e avaliar sua severidade (HAYES *et al.*, 1999; WMO, 2012).

O SPI é baseado em um cálculo probabilístico, no qual a precipitação é o único parâmetro utilizado. O ideal é que no cálculo sejam utilizados pelo menos 30 anos de dados mensais de precipitação, para que o índice seja mais representativo. Esses dados devem ter boa qualidade, pois como o único parâmetro utilizado são os dados de precipitação, a qualidade do resultado final dos cálculos será proporcional à qualidade dos dados (HAYES *et al.*, 1999).

Para calcular o SPI, as séries de dados mensais de precipitação devem ser modeladas através de uma função densidade de probabilidade. Foi escolhida a distribuição gama, com base em diversas experiências, como Thom (1958) e Lloyd-Hughes e Saunders (2002).

### 3.3.1 Distribuição Gama

A função densidade de probabilidade da distribuição gama é definida por:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{\left(\frac{-x}{\beta}\right)}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (1)$$

onde  $\alpha > 0$  é o parâmetro de forma,  $\beta > 0$  é o parâmetro de escala, e  $x > 0$  é a quantidade de precipitação.

A função gama é definida como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{\alpha-1} dy \quad (2)$$

$\alpha$  e  $\beta$  podem ser estimados a partir da aproximação de Thom (1958), com o método do da máxima verossimilhança:

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

onde, para n observações

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum \ln(x) \quad (5)$$

### 3.3.2 Cálculo do SPI

O SPI pode ser calculado para diferentes escalas de tempo (MCKEE *et al.*, 1993). Nesse trabalho ele será calculado para 3, 6, 12, 24, 48 e 60 meses. SPI's de 1 a 6 meses normalmente são úteis para descrever secas meteorológicas e agrícolas (umidade do solo), já SPI's maiores são mais adequados para verificar secas hidrológicas, com impactos em vazões, níveis de lagos e reservatórios, aquíferos subterrâneos (HAYES *et al.*, 1999; WMO, 2012).

Para calcular o SPI, inicialmente é calculada a precipitação acumulada durante a escala de tempo escolhida e o valor é atribuído ao último mês do período. Por exemplo, para SPI3 (para três meses), são calculados os totais trimestrais móveis (JFM, FMA, ...), que são atribuídos ao último mês de cada trimestre: JFM é atribuído a março, FMA é atribuído a abril, etc. Então é ajustada uma função densidade de probabilidade (geralmente distribuição gama) ao conjunto de valores de cada trimestre separadamente, tomados em todos os anos. Por exemplo, uma distribuição é ajustada a todos os valores para JFM, outra é ajustada a todos os valores para FMA, etc., totalizando doze funções. Cada função densidade de probabilidade é então transformada numa distribuição normal padronizada (média zero e desvio padrão 1) para obter o SPI. Desta forma, os valores do SPI são dados em desvios padrões. O processo é ilustrado na FIGURA 8 a seguir.

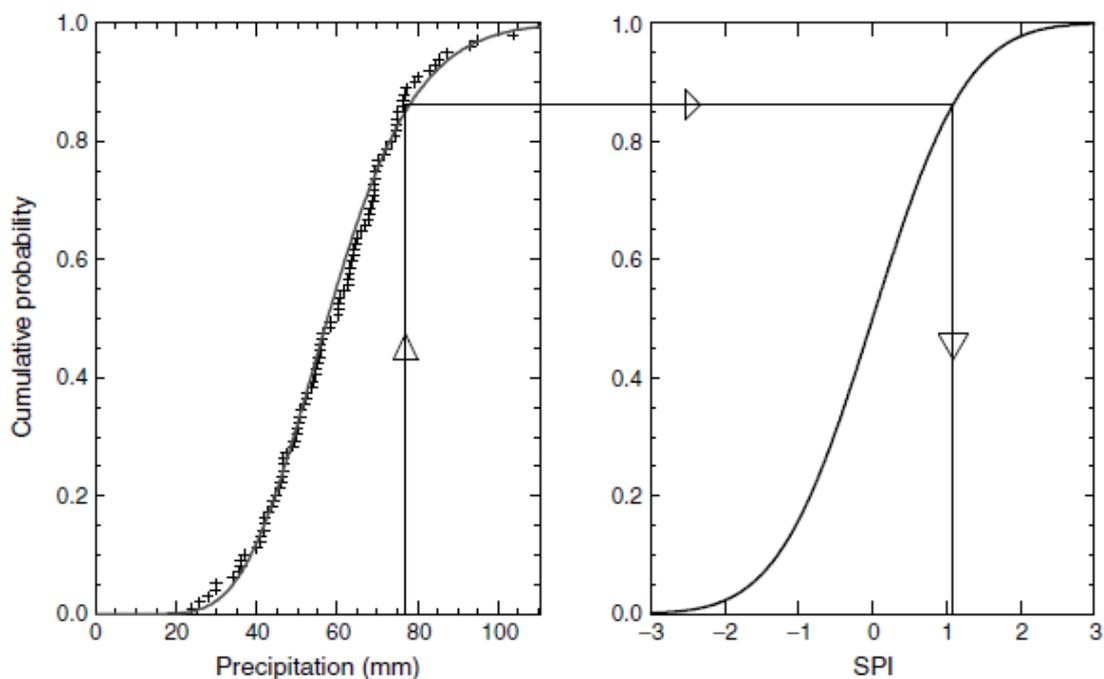


FIGURA 8 – EXEMPLO DE TRANSFORMAÇÃO DE EQUIPROBABILIDADE DE UMA FUNÇÃO GAMA AJUSTADA PARA UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL PADRONIZADA. OS DADOS SÃO DE UM MESMO TRIMESTRE PARA TODOS OS ANOS DO PERÍODO USADO.

FONTE: LLOYD-HUGHES E SAUNDERS (2002).

O SPI permite a comparação da precipitação sobre qualquer intervalo especificado (no nosso exemplo, três meses) com o mesmo intervalo de todos os outros anos incluídos na série de dados. Por exemplo, o SPI3 para março compara a precipitação de JFM em um ano particular com a precipitação deste trimestre em todos os anos da série.

O processo de cálculo acima descrito é similar para qualquer outra escala de tempo (período de acumulação de precipitação).

Os valores de SPI acima de zero indicam chuva acima da média, já os valores abaixo de zero indicam chuvas abaixo da média, ou seja, seca (HAYES *et al.*, 1999). Portanto, como este estudo está interessado na seca, a preocupação é com os valores negativos do SPI. Uma seca é determinada quando atinge qualquer valor de SPI negativo, e acaba quando o SPI se torna positivo. (WMO, 2012)

McKee *et al.* (1993) sugeriram uma forma de classificar os episódios secos e chuvosos de acordo com os valores gerados de SPI, como consta na TABELA 2 abaixo:

TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DOS VALORES DE SPI.

VALORES DE SPI	INTERPRETAÇÃO
2,0 ou maior	Extremamente chuvoso
1,5 a 1,99	Muito chuvoso
1,0 a 1,49	Moderadamente chuvoso
-0,99 a 0,99	Próximo ao normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2,0 ou menor	Extremamente seco

FONTE: HAYES *et al.* (1999).

A padronização pela distribuição normal permite que o SPI indique a raridade de um episódio de seca (TABELA 3), assim como a probabilidade da precipitação necessária para terminá-la (MCKEE *et al.*, 1993). Também permite a comparação de secas em diferentes locais e épocas.

TABELA 3 – PROBABILIDADE DE RECORRÊNCIA.

SPI	Categorias	Número de vezes em 100 anos	Severidade do evento
0 a -0,99	Levemente seco	33	1 em 3 anos
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco	10	1 em 10 anos
-1,5 a -1,99	Severamente seco	5	1 em 20 anos
< -2,0	Extremamente seco	2,5	1 em 50 anos

FONTE: WMO (2012)

### 3.4 TEMPO CARACTERÍSTICO

A persistência de episódios de seca ou de chuva acima do normal num determinado local pode ser indicada pelo tempo característico ( $T_o$ ). Ele foi calculado a partir das séries de SPI para diferentes escalas de tempo, da seguinte maneira (TRENBERTH, 1984; MO e SCHEMM, 2008):

$$T_o = 1 + 2 \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{i}{N}\right) R(i) \quad (6)$$

Na equação (6),  $R(i)$  é a função de autocorrelação do SPI, cuja defasagem (*lag*)  $i$  varia com  $i=1-30$  meses,  $N=30$ , e  $T_o$  é dado em meses.

### 3.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma análise estatística multivariada e, como em Lorenz (1956), também pode ser chamada de Função Empírica Ortogonal (EOF).

A ACP reduz uma série de dados contendo um grande número de variáveis para uma série contendo muito menos variáveis que são combinações lineares das originais. Essas combinações lineares representam a maior fração possível da variabilidade contida nos dados originais (WILKS, 2006).

O conjunto de dados produzidos pela ACP explica 100% da variância de todo o conjunto, mas pode-se usar apenas os componentes gerados que descrevam a maior parte da variância para representar os dados originais. Portanto, a ACP pode produzir uma representação muito mais compacta destes dados.

A obtenção dos componentes principais inicia-se pela obtenção de uma matriz de correlação ou de covariância entre os dados (por exemplo, de SPI ou de TSM). A correlação é a covariância entre duas variáveis divididas pelo desvio padrão, onde cada ponto de grade do conjunto de dados corresponde a uma variável. Portanto, as duas análises geram resultados diferentes, pois a matriz de correlação evidencia variações em unidades de desvios padrões, já a matriz de covariância evidencia variações em valores absolutos dos dados.

Em seguida, são obtidos os autovalores e os respectivos autovetores da matriz de correlação ou de covariância. Os autovetores da matriz de correlação ou de covariância representam a distribuição espacial dos modos de variabilidade, que são representados na forma de mapas e são chamados de *factor loadings* (FL). Os componentes principais (CP) são a projeção do vetor de anomalias padronizadas sobre cada autovetor. Eles fornecem a distribuição temporal dos modos e são chamados de *factor scores* (FS), podendo ser representados em um gráfico. Os autovalores representam a variância explicada por cada modo e são ordenados pela fração da variância que explicam, ou seja, o primeiro modo representa a maior parte da variância, o segundo modo representa a maior parte da variância remanescente, e assim por diante.

O primeiro autovetor aponta na direção de máxima variação dos dados, e os demais são ortogonais a ele. A FIGURA 9 a seguir ilustra o primeiro modo rotacionado da média anual do SPI de 3 meses. O mapa representa o FL e o gráfico o FS.

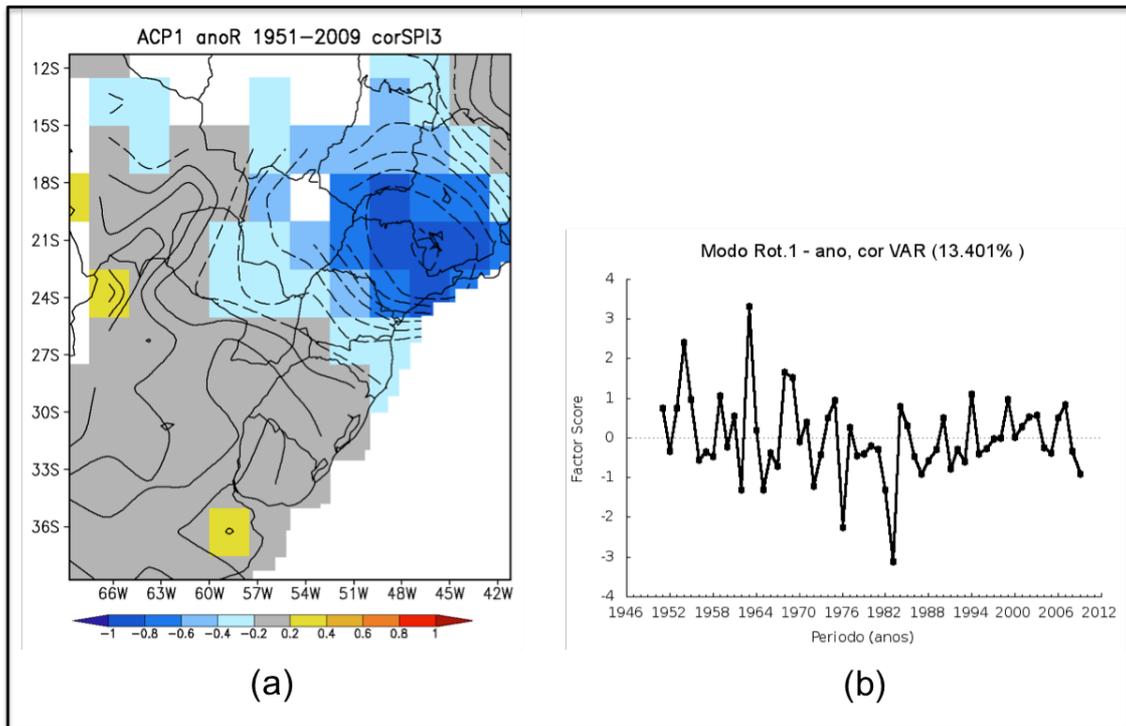


FIGURA 9 – FACTOR LOADINGS (A) E FACTOR SCORES (B) DO PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DA ACP DO SPI 3 MÉDIO ANUAL BASEADA NA MATRIZ DE CORRELAÇÃO.

Os anos das fases consideradas positivas de certo modo têm componentes principais (ou FS) que superam + 0,7 desvio padrão, já os anos das fases consideradas negativas tem FS abaixo de -0,7 desvio padrão. Os anos de fase neutra são os com valores entre -0,7 e 0,7.

Se um modo possui forte FL em certa região, ele representa bem a variabilidade daquela região. Se o FL for positivo, os anos de fase positiva são considerados anos com chuva acima da média naquela região, enquanto os anos de fase negativa são considerados secos. Por outro lado, se o FL for negativo, os anos de fase positiva são considerados anos de chuva abaixo da média, ou de seca, enquanto os anos de fase negativa são considerados chuvosos.

Na ACP é possível rotacionar os autovetores, isolando assim padrões de mesma origem física que podem aparecer misturados nos modos sem rotação. Isto facilita a interpretação física dos modos (RICHMAN, 1986).

A rotação utilizada neste trabalho é a Varimax, que maximiza a

variância explicada através de um critério que pode ser encontrado em Richman (1986).

A ACP foi aplicada nas séries de SPI, para identificar as regiões onde a sua variabilidade é mais forte.

A ACP de TSM também foi efetuada, para relacionar a variabilidade oceânica com a ocorrência de episódios de seca.

### 3.6 ESTATÍSTICA DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA

As estatísticas de eventos extremos de seca serão mostradas na forma de mapas de número de eventos de seca para  $SPI < -1,5$  e para  $SPI < -2,0$  e mapas de duração média e máxima destes eventos. Cada evento é definido pelos cruzamentos por  $SPI = 0$  que limitam os valores  $SPI < -1,5$  ou  $SPI < -2$  (LLOYD-HUGHES E SAUNDERS, 2002).

### 3.7 COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS

Foram realizadas composições de anomalias para caracterizar alterações de campos atmosféricos e oceânicos associadas com secas persistentes. Desta forma, é possível obter informações de como as variáveis atmosféricas e oceânicas se comportam nessas fases. Este método produz resultados muito importantes quando se quer fazer investigação de causa e efeito.

As variáveis analisadas por esse método são precipitação, TSM e variáveis atmosféricas (pressão ao nível do mar (PNM), potencial de velocidade associado ao vento divergente (VPOT) e função corrente (PSI).

O procedimento do método ocorre como em Saboia e Grimm (2010), e a explicação se dará no contexto do estudo, partindo de um modo de SPI

obtido pela ACP ou de um episódio extremo de seca e realizando as composições de anomalias de um campo atmosférico, como PSI, para fases positivas ou negativas deste modo, em relação à média climatológica.

- I. Identificação dos anos em que ocorreram fases extremas positivas ou negativas do modo. A definição destas fases fica a critério do pesquisador. Neste trabalho será utilizado FS com módulo maior que 0,7 desvio padrão, acima ou abaixo de zero, como limiar de fase extrema positiva ou negativa;
- II. Formação de séries de valores anômalos de PSI para as fases positiva e negativa do modo, para cada ponto de grade;
- III. Cálculo da média de cada uma das séries de PSI formadas e também da série original de PSI;
- IV. Aplicação de testes de significância para verificar se as médias das séries de valores para as fases positiva e negativa do modo são estatisticamente diferentes da média da série original ou se são estatisticamente diferentes entre si.

O teste de significância utilizado é o t – Student, para o qual a estatística  $z$  é calculada pela equação:

$$z = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y}}} \quad (7)$$

onde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias,  $s_x$  e  $s_y$  os desvios padrões e  $n_x$  e  $n_y$  o número de termos das séries.

O número de graus de liberdade é dado por  $\mathbf{v}$ :

$$v = \frac{\left\{ \frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y} \right\}^2}{\frac{\left( \frac{s_x^2}{n_x} \right)^2}{n_x - 1} + \frac{\left( \frac{s_y^2}{n_y} \right)^2}{n_y - 1}} \quad (8)$$

A FIGURA 10 mostra o campo de diferenças entre fases positivas e negativas do primeiro modo rotacionado da média anual do SPI de 3 meses para PSI em 200 hPa, com a avaliação da significância desta diferença.

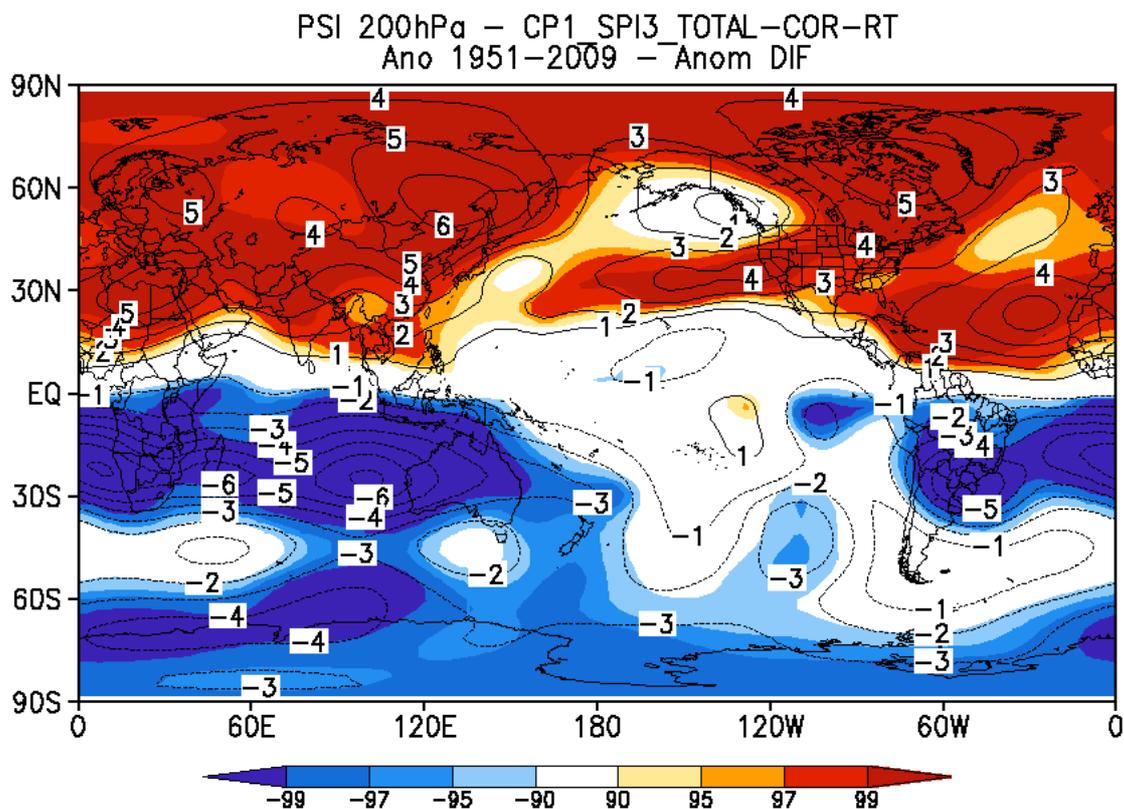


FIGURA 10 - DIFERENÇAS ENTRE FUNÇÃO CORRENTE EM 200 HPA (PSI) PARA O PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DA MÉDIA ANUAL DE SPI DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

### 3.8 CORRELAÇÃO

As séries de componentes principais de SPI foram correlacionadas com séries de TSM, para conectar a variabilidade deste índice com a variabilidade oceânica. Também as séries de componentes principais dos modos de TSM foram correlacionadas com as séries de SPI sobre a Bacia do Paraná/Prata para fazer uma verificação cruzada das conexões entre modos de variabilidade oceânica e de variabilidade das secas. ,

Para se obter uma correlação correta entre os modos de SPI e as séries de TSM, estas passaram por um filtro de médias móveis de 3, 6 e 12 meses. Por exemplo, para a correlação dos modos de SPI de 3 meses com TSM, cada mês  $n$  da série de TSM recebe uma média dos meses  $n-2$ ,  $n-1$  e  $n$ . Para os outros meses o mesmo procedimento foi seguido .

Esta correlação (que descreve a relação linear entre as duas séries) pode ser obtida através do cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson. O cálculo se dá pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

O coeficiente de correlação  $r$  é um índice adimensional com valores que variam entre -1,0 e 1,0. Os valores próximos a 1,0 indicam que as duas séries variam da mesma forma, já os valores próximos a -1,0 indicam que as duas séries variam inversamente, ou seja, se uma aumenta, a outra diminui. Valores de  $r$  iguais a zero não necessariamente significam que não existe relação entre as duas séries, pois é possível que exista uma relação não linear entre as mesmas.

A FIGURA 11 abaixo exemplifica um campo de correlação entre séries de TSM em todo o globo e o primeiro modo rotacionado de SPI 3 médio anual.

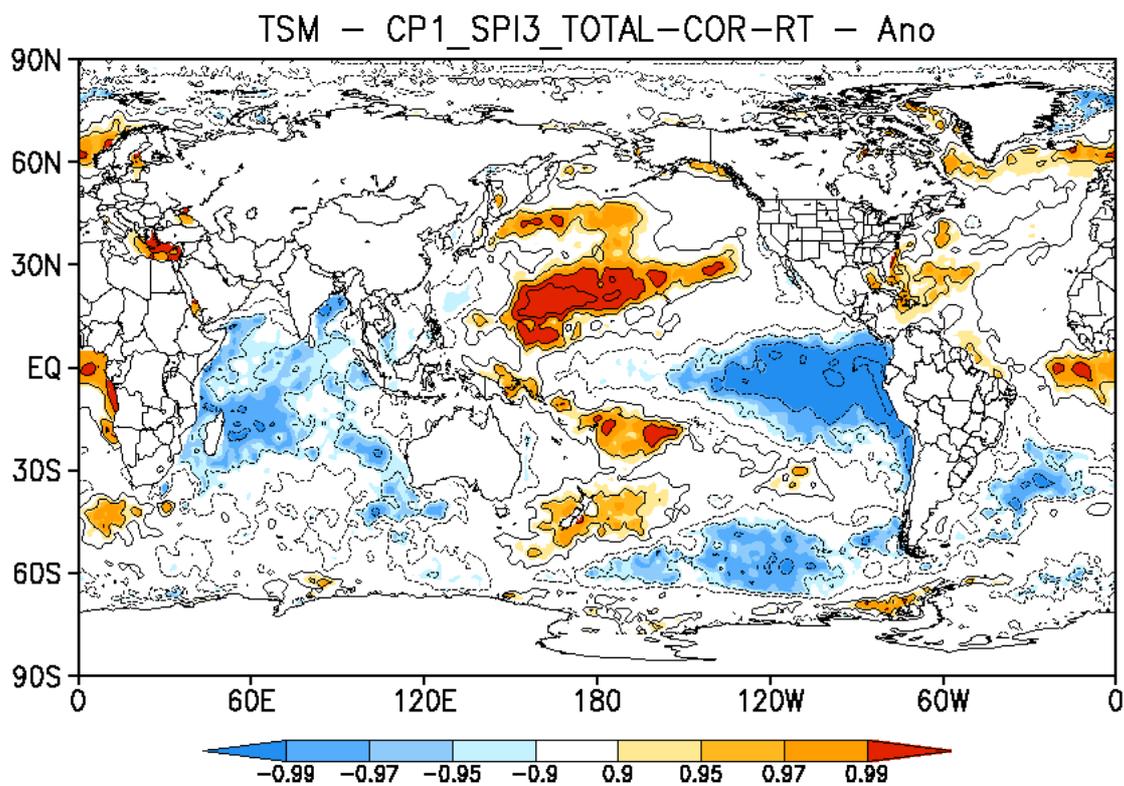


FIGURA 11 – EXEMPLO DE CORRELAÇÃO ENTRE O PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE SPI3 MÉDIO ANUAL E SÉRIES DE TSM. A BARRA DE CORES INDICA NÍVEIS DE CONFIANÇA. AS CORES VERMELHAS (AZUIS) INDICAM CORRELAÇÃO POSITIVA (NEGATIVA) SIGNIFICATIVA COM NÍVEL MELHOR QUE 0,10.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 SPI E SUA VARIABILIDADE

Foi realizado o cálculo do SPI para 3, 6, 12, 24 e 48 meses e, após este cálculo, foi realizada a ACP para as séries de SPI. Como no cálculo do SPI-n os primeiros n-1 dados são nulos, pois são atribuídos a n, o período para o cálculo da ACP mudou, ou seja, para os SPI's 3, 6 e 12 o período analisado foi de 1951 a 2009, para o SPI 24, de 1952 a 2009 e para o SPI 48, de 1954 a 2009.

A seguir, serão apresentados alguns dos resultados destas ACP's na variabilidade interanual, que contém também a variabilidade interdecadal.

A FIGURA 12 traz o primeiro modo da ACP rotacionada da série de SPI de 3 meses para meses corridos (11,89% da variância). Neste modo, há um forte componente de variabilidade sobre o Estado de São Paulo, indicando secas de menor duração em suas fases positivas.

A FIGURA 13 apresenta o primeiro modo da ACP das séries de SPI de 12 meses para meses corridos (FIGURA 13(a); 12,83% da variância) e os segundos modos de primavera (FIGURA 13(b); 13,11% da variância) e de verão (FIGURA 13(c); 11,14% da variância), pois são modos correspondentes. Este modo apresenta forte anomalia sobre os estados do Paraná e de Santa Catarina, especialmente na parte oeste, indicando secas nesta região quando os FL são positivos e os FS são negativos (ou quando os FL são negativos e os FS são positivos).

Os eventos *El Niño* e *La Niña* geralmente estão associados, respectivamente, a chuvas excessivas ou a secas nesta região. Nos anos de 1950-51, 1967-68 e 1988 ocorreram episódios *La Niña*, que produziram SPI12 negativos em 1951, 1968 e 1988, principalmente na primavera (FIGURA 13(b)). Por outro lado, nos anos de 1953-54, 1982-83, 1997-98 houve fortes episódios *El Niño*, que produziram SPI12 positivos em 1954, 1983 e 1998 (FIGURA 13(b)). Contudo, há também outros anos sem estes episódios com secas e

chuvas excessivas, pois eles não são os únicos geradores de variabilidade interdecadal, embora sejam os mais importantes.

Na análise da ACP da série de SPI de 24 meses o modo utilizado como exemplo não foi o primeiro modo rotacionado dos meses corridos (que apresenta a maior variância), pois este é similar ao modo da série de SPI 12. Optou-se, então, pelo segundo modo rotacionado. A FIGURA 14 apresenta o segundo modo rotacionado (FIGURA 14(a)) para meses corridos (14,13% da variância) e seus correspondentes modos na primavera (FIGURA 14(b)) e no verão (FIGURA 14(c)), primeiro modo rotacionado (15,27% da variância) e segundo modo rotacionado (14,36% da variância), respectivamente. O componente mais forte está situado no sul da Bacia do Paraná/Prata, na região sul do Uruguai e leste da Argentina. As secas nesta região nesta escala de tempo podem estar associadas a episódios de *La Niña* (como nos anos 1975-76 e 1988-89), assim como condições úmidas podem estar associadas a episódios de *El Niño* (como nos anos 2003-04, 2004-05) (FIGURA 14(b)). Contudo, com tempo de acumulação de 24 meses, a variabilidade mais lenta começa a influir nos valores de SPI. Por exemplo, em 1997-1998 houve um forte episódio *El Niño*, com chuvas acima do normal no Sul do Brasil na primavera de 1997. Entretanto, o SPI24 de 1997 é negativo na FIGURA 14(b), porque em 1995-96 houve um episódio *La Niña*, de forma que no tempo de acumulação de 24 meses se juntaram um episódio *La Niña* e um *El Niño*.

A FIGURA 15 apresenta os resultados da ACP das séries de SPI de 48 meses para o terceiro modo rotacionado de meses corridos (FIGURA 15(a); 12,65% da variância), primavera (FIGURA 15(b); 11,95% da variância) e verão (FIGURA 15(c); 11,97% da variância). Este modo apresenta fortes componentes positivos sobre a região centro-oeste da bacia (oeste do Paraná e Santa Catarina, sul do Mato Grosso do Sul e leste do Paraguai). Para SPI48 já não é mais possível associar máximos de seca e de chuva com episódios *La Niña* ou *El Niño* isolados, pois o tempo de acumulação é de quatro anos.

Para ilustrar de modo abrangente as diferentes regiões mais afetadas pela variabilidade do SPI com diferentes períodos de acumulação e permitir sua comparação, nas FIGURAS 16 e 17 são mostrados os mapas de FL dos

três primeiros modos rotacionados de variabilidade dos SPI's de 3, 6, 12, 24, 48 e 60 meses para meses corridos. Para períodos de acumulação de até 24 meses, a variabilidade descrita pelos primeiros modos afeta regiões mais limitadas, cuja variabilidade se deve à influência de uma forçante mais específica de variabilidade interanual (por exemplo, ENOS) (FIGURA 16). Para períodos de acumulação maiores, nos quais os efeitos desta forçante podem até se cancelar pela ocorrência de fases opostas nestes períodos, as regiões afetadas pelos primeiros modos são mais extensas, podendo incluir influências mais espalhadas de diferentes forçantes ou de forçantes de variabilidade mais lenta (FIGURA 17).

Em geral, há repetição da distribuição espacial de certos modos para diferentes períodos de acumulação, embora eles possam aparecer em ordem diferente de importância. Contudo, os principais modos apresentam mudanças na sua distribuição espacial entre períodos de acumulação menores ou iguais a 24 meses e maiores que 24 meses, como já mencionado acima.

#### 4.2 TEMPO CARACTERÍSTICO

A FIGURA 18 apresenta o resultado do cálculo do tempo característico para os SPI's 3, 6, 12, 24, 48 e 60.

Para SPI de 3 meses, a persistência de seca é de poucos meses em quase toda a região, com exceção de alguns pontos da região oeste e norte da bacia, onde o tempo de persistência de seca chega a ser de um ano.

Para SPI de 6 meses, as regiões com maior persistência de seca são as mesmas do SPI 3. No entanto, o tempo característico aumenta para quase 2 anos nessas regiões.

Para SPI de 12 meses, o lado leste da bacia apresenta tempo característico entre 10 e 20 meses, já no lado oeste a persistência é maior, em torno de 25 a 30 meses, chegando a mais de 35 meses no noroeste da Argentina e centro e sul da Bolívia.

Para SPI de 24 meses, as regiões com o tempo característico maior ou menor são as mesmas do SPI12, porém, neste caso os máximos chegam a mais de 48 meses.

Para os SPI's de 48 e 60 meses, o tempo característico se torna mais homogêneo, variando entre 36 e 48 meses. Ainda assim, as regiões com os máximos valores continuam a ser na Argentina e na Bolívia (máximos chegando a 60 meses).

Com esta análise, pode-se concluir que a persistência de um evento de seca ou um evento chuvoso é em média maior no lado oeste (principalmente na Argentina e na Bolívia) do que no lado leste da Bacia do Paraná/Prata.

#### 4.3 ESTATÍSTICA DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA

Nesta sessão todos os resultados apresentados são para os SPI's de 3, 6 e 12 meses, no período estudado (1950-2009).

##### 4.3.1 Contagem dos episódios de seca

A FIGURA 19 mostra o número dos episódios de seca severa (limiar - 1,5) para cada quadrícula da bacia. O SPI3 tem maior número de eventos de seca severa do que o SPI6, assim como o SPI6 tem maior número de eventos de seca do que o SPI12 no mesmo período (é importante observar que os valores das legendas mudam de um mapa para o outro). Quanto maior (menor) a escala de tempo do SPI, menos (mais) frequentes são as secas e maior (menor) é a duração delas. O número de eventos de seca severa foi mais alto principalmente no sul e no nordeste da bacia, para os três casos apresentados.

Esse maior número de eventos de seca na região centro-leste da Argentina também foi observado em Cavalcanti *et al.* (2015).

A FIGURA 20 mostra o número de episódios de seca extrema (limiar - 2,0) para cada quadrícula da bacia. Neste caso os episódios aconteceram em

menor número e em regiões menos extensas do que no caso anterior. Um dos aspectos que se pode observar é o relativamente alto número de episódios de secas para os três SPI's em quadrículas no sul do Mato Grosso do Sul, o que poderia indicar possibilidade de impactos em ecossistemas do Pantanal se o tempo característico destas secas fosse alto. Contudo, na FIGURA 18 os painéis correspondentes não indicam valores altos de tempos característicos de secas nestas escalas de tempo naquela região, embora haja grande tempo característico para SPI 48 e SPI 60. Isto significa que pode ter havido secas prolongadas, embora não numerosas, nesta região, o que é consistente com o fato de que ela sofre impacto de variabilidade interdecadal da precipitação de verão, já tendo passado por longo período de precipitação deficiente (GRIMM e SABOIA, 2015).

Também foram gerados mapas sazonais com o número de eventos de seca severa e extrema. A FIGURA 21 mostra a contagem dos eventos secos severos obtidos com o SPI3. Minas Gerais, que aparece com valores altos na contagem dos eventos de seca nos meses corridos, também aparece com valores altos na contagem sazonal, principalmente no outono, inverno e primavera, que são as estações mais secas na região. No verão, o número de eventos secos é relativamente baixo. Este resultado reflete a sazonalidade das chuvas do local, ou seja, no inverno é mais seco em Minas Gerais, já no verão é mais chuvoso. Comentários similares aplicam-se a Mato Grosso do Sul. Essa constatação das secas ocorrerem mais no inverno nestas regiões de regime de monções de verão também foi feita em Mo e Berbery (2011). Como o cálculo do SPI utiliza dados dos meses anteriores, o SPI3 de inverno acaba refletindo um pouco as condições do outono, o SPI3 de outono reflete um pouco as condições do verão, e assim por diante.

Mapas sazonais com o número de eventos de seca severa e extrema para SPI's de maior tempo de acumulação também foram gerados. Na contagem dos eventos secos severos para SPI 6 (FIGURA 22), Minas Gerais e Mato Grosso do Sul apresentam valores mais altos especialmente no inverno. Para SPI12, com tempo de acumulação anual, a ocorrência de áreas com maior número de eventos torna-se diferente e mais distribuída em todas as estações (FIGURA 23).

#### 4.3.2 Duração média dos episódios de seca

A FIGURA 24 traz a duração média, em meses, dos episódios de seca severa em cada quadrícula da bacia estudada. Da mesma forma, é apresentada a duração média dos episódios de seca extrema na FIGURA 25. Tanto para os mapas com limiares -1,5, quanto para os mapas com limiares -2,0, é observado que, em média, o lado oeste da bacia tem secas que duram mais do que no restante da mesma. Esse resultado é consistente com os resultados obtidos no cálculo do tempo característico (FIGURA 18), ou seja, as regiões onde o tempo característico (ou a persistência) de eventos de seca é mais alto são as mesmas regiões com durações médias de secas mais elevadas.

No Brasil, apesar da duração média de um evento de seca severa ou extrema não ser tão alta ou estender-se por áreas mais extensas, como no oeste da bacia, existem alguns locais que merecem ser destacados, pois obtiveram altos valores de duração média de eventos secos severos e extremos nas três escalas de tempo. São eles o norte e o sul de Goiás, o norte de São Paulo e o sul de Minas Gerais. Estes estados são os mesmos que tiveram alta duração média de eventos severos de seca em Altamirano e Sansigolo (2010), porém, os valores das durações médias são cerca de 3 vezes menores dos que os apresentados aqui. Vale ressaltar que os dados de precipitação usados em Altamirano e Sansigolo (2010) são oriundos de reanálises realizadas por modelos, enquanto neste estudo, os dados de precipitação são observados, o que pode ser o motivo da diferença nos resultados.

#### 4.3.3 Duração máxima dos episódios de seca

As FIGURAS 26 e 27 apresentam mapas com a duração máxima dos eventos de seca severa e extrema, respectivamente, em cada quadrícula da bacia. Para SPI 6, a Região Sul do Brasil tem valores altos de duração máxima

de eventos de seca severa e extrema. Estas secas podem estar relacionadas com eventos *La Niña*, que normalmente causam secas nesta região. Secas relativamente longas também tem afetado parte do Sudeste do Brasil, uma região com várias usinas hidroelétricas. Ademais, as regiões com as mais altas durações máxima dos eventos de seca são em sua maioria as mesmas regiões com as mais altas durações médias (FIGURAS 24 e 25). Isto também ocorreu no estudo de Lloyd-Hughes e Saunders (2002) para a Europa, sugerindo que as durações médias das secas podem ser dominadas por poucos eventos especialmente longos.

#### 4.4 CORRELAÇÃO

##### 4.4.1 Modos de SPI e séries de TSM

Nesta seção serão apresentados os resultados das correlações entre os modos de meses corridos dos SPI's de 3, 6 e 12 meses e as séries de TSM global que foram filtradas por uma média móvel de 3, 6 e 12 meses, respectivamente, de tal modo que esta média corresponda ao período de acumulação de cada SPI .

Tais correlações destinam-se a indicar prováveis fontes da variabilidade observada do SPI, a partir de anomalias de TSM associadas com esta variabilidade, pois é sabido que variabilidades oceânica e atmosférica são associadas.

#### 5.4.1.1. SPI de 3 meses

O primeiro modo rotacionado de SPI 3 para meses corridos (11,891% da variância), já apresentado anteriormente, possui forte componente sobre o Estado de São Paulo. Sua correlação com a série de TSM com média móvel de 3 meses (FIGURA 28 (a)) é forte sobre Pacífico leste equatorial, lembrando o modo ENOS leste, e nos extratropicos do Pacífico Norte (mas com sinal oposto), lembrando o modo IPO de Power *et al.* (1999). Também existe correlação no Atlântico Norte e equatorial (correlação positiva) e no Atlântico Sul (correlação negativa). Este padrão lembra o segundo modo interdecadal de primavera de Grimm e Saboia (2015) e sua relação com TSM, apresentando na fase positiva relação com *La Niña* e com TSM positiva (negativa) no Atlântico Norte (Sul).

O segundo modo rotacionado de SPI 3 (11,807% da variância, FIGURA 28 (b)) possui forte componente negativo no extremo nordeste da bacia e fraco componente de sinal oposto no sudeste da mesma. A correlação deste modo com a TSM é fortemente positiva nos subtropicos e latitudes médias no Atlântico Norte, indicando possível efeito da Oscilação do Atlântico Norte (NAO - *North Atlantic Oscillation*, em inglês). Este resultado está coerente com Grimm e Saboia (2015), que indicam uma conexão dessa oscilação no verão com anomalias de precipitação de sinais contrários no nordeste e no sul da bacia. Existe também forte correlação negativa nos Oceanos Atlântico e Pacífico extratropicais (Hemisfério Sul), no Índico equatorial leste, e um dipolo no Pacífico Norte.

O terceiro modo rotacionado de SPI 3 (8,684% da variância, FIGURA 29 (a)) apresenta forte componente negativo sobre o Uruguai e leste da Argentina. Existe forte correlação negativa com o Atlântico subtropical oeste, indicando que o resfriamento das águas nesta região causa a diminuição da precipitação no sul da bacia. Esse resultado é coerente com Diaz *et al.* (1998), que afirmam que existe esta correlação na primavera e no verão. No Oceano Pacífico existe um forte tripolo, que novamente lembra o modo IPO, mas com

mais fortes componentes subtropicais no Pacífico Sul. Há ainda forte correlação negativa no Índico equatorial.

O quarto modo rotacionado de SPI 3 (7,096% da variância, FIGURA 29 (b)) possui forte sinal positivo sobre o extremo sul da bacia (região central-leste da Argentina). Sua correlação com TSM é muito parecida com a correlação apresentada no modo 3, porém os sinais estão invertidos, a correlação com o Oceano Índico é mais fraca e com o Atlântico Norte é mais forte. Além disto, neste caso o sinal mais forte no Pacífico está na região equatorial central, enquanto para o terceiro modo está na região subtropical leste, ao norte do equador.

O quinto modo rotacionado de SPI 3 (6,914% da variância, FIGURA 30(a)) apresenta forte sinal positivo sobre o leste do Sul do Brasil. Sua correlação com a TSM é fortemente positiva sobre toda a costa leste do Brasil, sobre o Pacífico equatorial e extratropical leste (Hemisfério Sul), e sobre o Índico equatorial e subtropical.

O sexto modo rotacionado de SPI 3 (5,974% da variância, FIGURA 30(b)) apresenta forte componente positivo sobre a região central da bacia e possui forte correlação com o Pacífico tropical e extratropical leste, indicando o aumento de chuva quando aumenta a TSM nestas regiões. Esta correlação entre estas regiões está associada ao evento ENOS. Também existe correlação negativa no Pacífico extratropical norte.

É interessante notar que quase todos os modos de variabilidade mais intensa na bacia estão relacionados com ENOS. Contudo, eles afetam regiões diferentes porque há diferentes distribuições de anomalias em diferentes eventos ENOS e há diferentes combinações de ENOS com anomalias de TSM de outra natureza.

#### 4.4.1.2. SPI de 6 meses

O primeiro modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (11,737% da variância, FIGURA 31 (a)) apresenta forte componente negativo no extremo nordeste da bacia, sendo este modo correspondente ao segundo modo rotacionado de SPI 3 (FIGURA 28 (b)). Sua correlação com a série de TSM também apresenta os mesmos padrões apresentados na correlação do modo correspondente para SPI 3.

O segundo modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (10,761% da variância, FIGURA 31 (b)) apresenta forte sinal positivo sobre o Sudeste do Brasil. Corresponde ao primeiro modo rotacionado de SPI 3 (FIGURA 28 (a)). Sua correlação com a TSM também segue os mesmos padrões apresentados na correlação daquele modo.

O terceiro modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (9,453% da variância, FIGURA 32 (a)) apresenta forte componente negativo sobre a região central da bacia, sendo semelhante ao modo 6 de SPI 3 (FIGURA 30 (b)), embora um pouco deslocado para sudeste. Contudo, em termos gerais, sua correlação com TSM apresenta padrões semelhantes (com sinais contrários, pois os FL e FS tem sinais contrários).

O quarto modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (8,755% da variância, FIGURA 32 (b)) apresenta padrão espacial semelhante ao terceiro modo de SPI 3 (FIGURA 29 (a)). Sua correlação com TSM apresenta sinais semelhantes, porém com um sinal oposto mais forte no Pacífico oeste subtropical.

O quinto modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (7,138% da variância, FIGURA 33 (a)) apresenta forte componente positivo sobre o Rio Grande do Sul e o nordeste da Argentina. Não tem correspondência direta com nenhum dos 6 primeiros modos rotacionados de SPI 3. Sua correlação com a TSM é negativa sobre o Atlântico Norte, o que pode representar a influência da NAO ou da Oscilação do Atlântico Norte, (*Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO). No Atlântico Sul existe um dipolo na região subtropical e no Pacífico existe um tripolo, representando o padrão IPO. Por toda a faixa extratropical do Hemisfério Sul existe correlação positiva.

O sexto modo rotacionado de SPI 6 para meses corridos (7,056% da variância, FIGURA 33 (b)) corresponde ao quarto modo de SPI 3 (FIGURA 29 (b)) e seus padrões de correlação com TSM também são semelhantes.

#### 4.4.1.3. SPI de 12 meses

Nesta seção serão apresentados apenas os quatro primeiros modos rotacionados de SPI 12, pois são os mais relevantes.

O primeiro modo rotacionado de SPI 12 para meses corridos (12,838% da variância, FIGURA 34 (a)) corresponde ao modo 6 de SPI 3 (FIGURA 28 (b)) e ao modo 3 de SPI 6 (FIGURA 30 (a)), apresentado na seção anterior, com sinal invertido. Sua correlação com a série de TSM apresenta os mesmos padrões apresentados na correlação entre esses modos e a TSM.

O segundo modo rotacionado de SPI 12 para meses corridos (12,650% da variância, FIGURA 34 (b)) é semelhante ao modo 3 de SPI 3 (FIGURA 29 (a)) e ao modo 4 de SPI 6 FIGURA 32 (b)). Sua correlação com a TSM apresenta padrões similares aos apresentados pelas correlações de seus modos correspondentes com a TSM.

O terceiro modo rotacionado de SPI 12 para meses corridos (10,265% da variância, FIGURA 35 (a)) apresenta forte componente sobre o Sudeste do Brasil e corresponde ao modo 1 de SPI3 (FIGURA 28 (a)) e ao modo 2 de SPI 6 (FIGURA 31 (b)). Sua correlação com a série de TSM apresenta os mesmos padrões apresentados na correlação entre os modos correspondentes e a TSM, mas com sinal mais fraco.

O quarto modo rotacionado de SPI 12 para meses corridos (10,232% da variância, FIGURA 35 (b)) apresenta forte componente positivo sobre o extremo nordeste da bacia. Corresponde ao modo 2 de SPI 3 (FIGURA 28 (b)) e ao modo 1 de SPI 6 (FIGURA 31 (a)). Sua correlação com TSM apresenta padrões parecidos com os apresentados pelas correlações entre os modos correspondentes e a TSM, mas com sinal mais fraco no Hemisfério Norte.

#### 4.4.2 Modos de TSM e séries de SPI

Nesta seção, a fim de se obter uma verificação cruzada, serão apresentados os resultados das correlações entre os modos de meses corridos das séries de TSM global que foram filtradas por médias móveis de 3, 6 e 12 meses e as séries de SPI 3, 6 e 12, respectivamente.

Tais correlações destinam-se a indicar regiões na Bacia Paraná/Prata nas quais o SPI pode ter variabilidade produzida por modos de variabilidade oceânica, pois é sabido que variabilidades oceânica e atmosférica são associadas. Esta análise é complementar à realizada na seção anterior.

Apesar de terem sido filtradas por médias móveis diferentes, as três séries de TSM apresentaram modos muito parecidos e, portanto, os resultados serão analisados por conjunto de modos correspondentes correlacionados com SPI's de diferentes períodos de acumulação. Serão apenas analisados os quatro primeiros modos, pois são os que representam a maior parte da variância.

O primeiro modo rotacionado de TSM com média móvel de três meses, em meses corridos (11,830% da variância, FIGURA 36 (a)) corresponde ao primeiro modo rotacionado de TSM com média móvel de seis (14,698% da variância, FIGURA 38 (a)) e de doze (19,275% da variância, FIGURA 40 (a)) meses. A fase positiva apresenta componentes negativos por todos os oceanos, e através do FS (com tendência negativa) é possível ver que há tendência ao aquecimento quase global dos oceanos, com exceções junto à Antártica e no Pacífico Norte. Este modo apresenta correlação negativa com as séries SPI's na parte leste da bacia, indicando tendência de crescimento de SPI nesta região no período estudado e correlação positiva no norte da bacia, indicando tendência de decréscimo de SPI nesta região.

O segundo modo rotacionado de TSM com média móvel de três meses (9,803% da variância, FIGURA 36 (b)) corresponde ao segundo modo

rotacionado de TSM com média móvel de seis (10,899% da variância, FIGURA 38 (b)) e de doze (13,024% da variância, FIGURA 40 (b)) meses. Este modo representa o ENOS e tem forte correlação positiva com os SPI's nas regiões centro e sul da bacia, principalmente na parte leste. Esta correlação está coerente com as obtidas entre os modos de SPI e séries de TSM, em que o padrão ENOS apareceu associado com vários modos de variabilidade de SPI, com fortes componentes nas regiões centro e sul da bacia.

O terceiro modo rotacionado de TSM com média móvel de três meses (4,944% da variância, FIGURA 37 (a)) corresponde ao terceiro modo rotacionado de TSM com média móvel de seis (5,607% da variância, FIGURA 39 (a)) e de doze (6,536% da variância, FIGURA 41 (a)) meses. Este modo representa o padrão IPO e sua correlação com SPI é positiva sobre o centro-leste da bacia e negativa no nordeste e sudeste da bacia, formando um tripolo. Na seção anterior, o modo IPO estava associado principalmente com o sul da bacia (por exemplo, FIGURAS 29 (a) e (b) e modos correspondentes para outros períodos de acumulação do SPI).

O quarto modo rotacionado de TSM com média móvel de três meses (4,369% da variância, FIGURA 37 (b)) corresponde ao quarto modo rotacionado de TSM com média móvel de seis (4,967% da variância, FIGURA 39 (b)) e de doze (6,387% da variância, FIGURA 41 (b)) meses. Existe forte componente sobre o Atlântico Norte, sendo este provavelmente o modo AMO. Sua correlação com SPI é forte sobre o sudoeste e norte da bacia. Correlação significativa deste tipo também aparece, por exemplo, nas FIGURAS 31(b), 32(a) e 32(b) e modos correspondentes para outros períodos de acumulação do SPI.

#### 4.5 ESTUDO DE CASO E COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS

A partir dos resultados obtidos das análises anteriores foi escolhida uma região dentro do Brasil com seca persistente para um estudo de caso. A região escolhida fica no nordeste da bacia e abrange o norte do Estado de São

Paulo e o sul dos estados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso, como é mostrado na FIGURA 42. O local apresentou valores de duração média e máxima de seca mais altos do que outras regiões do Brasil, além de o episódio de seca escolhido persistir no local nos três SPI's analisados: de 3, 6 e 12 meses. Estes foram alguns dos motivos que levaram à escolha deste local para o estudo de caso. Também foi levado em consideração que esta região tem usinas hidrelétricas importantes como a usina de São Simão (divisa MG-GO), de Água Vermelha (divisa SP-MG), de Jaguara (divisa SP-MG) e de Itumbiara (divisa MG-GO). A produção destas usinas pode sofrer com secas persistentes, além dos problemas que podem ser causados para a população local.

A FIGURA 43 mostra a série temporal do SPI de 3 meses de uma das quadrículas da região do estudo de caso, a mais central da região escolhida. O período destacado foi aquele em que ocorreu a seca mais longa e mais severa no local, na qual o SPI ultrapassou o valor de -3,5, podendo-se concluir que uma seca muito severa atingiu esta região entre 1963 e 1964.

Para entender quais foram os diferentes mecanismos que causaram esta seca, foi feita a composição de anomalias para diversas variáveis durante o período da seca (04/1963 a 01/1964) em relação ao período total do estudo (1950-2009).

A composição de anomalias de precipitação na Bacia do Paraná/Prata (FIGURA 44) apresenta anomalias negativas significativas no Estado de São Paulo e no sul de Minas Gerais, indicando chuva abaixo da média nestas regiões no período do estudo de caso, confirmando a afirmação de que houve uma forte seca nesta região no período de abril de 1963 a janeiro de 1964. As fortes anomalias negativas também se estendem sobre parte do Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina, Bolívia, Paraguai e sobre o norte da Argentina. Ao sul da bacia (centro-leste da Argentina) existe anomalia positiva significativa, indicando excesso de chuva nessa região no período da seca no Sudeste do Brasil.

Na FIGURA 45 é apresentada a composição de anomalias de TSM global. Elas são generalizadamente positivas sobre o equador e o Hemisfério Sul no Pacífico central e leste e no Atlântico leste, além do sudeste do Oceano Índico. Também nos subtropicais do Atlântico Norte as anomalias são positivas.

A estas anomalias positivas de TSM correspondem, em geral, anomalias negativas de PNM, o que pode ser visto na composição de anomalias de PNM, apresentada na FIGURA 46. Sobre a metade norte da América do Sul, estendendo-se até a região de estudo, predominam anomalias positivas de PNM, assim como sobre a Indonésia/Filipinas. Esta distribuição de anomalias de pressão gera convergência de ar em baixos níveis (e divergência em altos níveis) sobre o Pacífico central e a África e divergência sobre a América do Sul e Indonésia/Filipinas (e convergência em altos níveis), onde divergência em baixos níveis dificulta a formação de precipitação. Estes aspectos concordam com a circulação divergente mostrada na FIGURA 47, na qual aparece a convergência em altos níveis sobre a região central da América do Sul, incluindo a região da seca analisada no Sudeste do Brasil. A esta convergência em altos níveis corresponde subsidência e, portanto, ausência ou diminuição de precipitação.

A FIGURA 48 (a) apresenta a composição de anomalias de circulação rotacional, representada pela função corrente (PSI), em altos níveis (200 hPa). Estas anomalias estão associadas às anomalias de circulação divergente descritas anteriormente. Próximo à América do Sul existe circulação ciclônica no Pacífico Equatorial Leste e no Atlântico Sudoeste, e circulação anticiclônica no nordeste da América do Sul, estendendo-se para o Atlântico Sul equatorial. Este padrão configura uma crista de pressão sobre a América do Sul, ladeada por dois cavados, em altos níveis. A região de estudo, no Sudeste do Brasil, está a leste do eixo da crista, onde é favorecido movimento subsidente e, portanto, ausência de precipitação. A FIGURA 48 (b) mostra a função corrente sem sua média zonal, para realçar a propagação de ondas a partir das anomalias divergente tropicais. Fica clara uma onda propagada a partir do noroeste da América do Sul para o sudeste, em direção ao Atlântico Sul, produzindo uma crista de alta pressão sobre a América do Sul.

Portanto, a análise realizada mostra coerência entre a seca observada e as anomalias oceânicas e atmosféricas existentes durante sua ocorrência.

## 5 CONCLUSÃO

Eventos extremos de seca podem causar diversos problemas para a economia, meio ambiente, e a população da região atingida. Como a região da Bacia do Paraná/Prata tem boa parte de sua economia baseada nos recursos naturais (hidroelétrica e agricultura) que depende de fatores climáticos, foi feita uma análise da climatologia da seca na região, para identificar seu comportamento e possíveis mecanismos causadores, e para que tais informações possam auxiliar na prevenção e mitigação dos problemas que a seca extrema pode causar.

Foram feitas análises utilizando o SPI, a ACP, o tempo característico, a correlação entre modos e a composição de anomalias atmosféricas e oceânicas para uma seca persistente em uma região escolhida (estudo de caso).

Na análise dos modos de variabilidade de SPI para vários tempos de acumulação foi observada forte relação entre variabilidade no centro e sul da Bacia do Paraná/Prata e os eventos ENOS, até o período de acumulação de 12 meses. Para períodos de acumulação maiores esta relação é suavizada, pois podem ocorrer eventos de sinais opostos dentro do próprio período de acumulação, e a variabilidade mais lenta tem influência mais visível.

Através da análise do tempo característico foi obtida a persistência de seca ou de cheia em diversas escalas de tempo. Em geral, o lado oeste da bacia teve maior persistência do que o lado leste. Esse resultado pode ser devido à climatologia da região, que tem menor variação sazonal de chuva do que o restante da bacia.

Na contagem do número de eventos de seca severa a região nordeste da bacia obteve altos valores em todas as escalas de SPI analisadas, principalmente no Estado de Minas Gerais, o que também é refletido na contagem sazonal. Já para o caso da seca extrema, os valores altos em todas as escalas de tempo foram no Mato Grosso do Sul.

A duração média dos episódios de seca teve seus resultados consistentes com os obtidos através do cálculo do tempo característico. Além disso, no Brasil, as regiões com maiores valores de duração média foram Goiás, São Paulo e Minas Gerais. A duração máxima de episódios de seca teve resultado muito parecido com a duração média e isso pode ser porque as durações médias das secas são dominadas por poucos eventos especialmente longos (LLOYD-HUGHES e SAUNDERS, 2002).

As correlações entre os modos de SPI e as séries de TSM apresentam a influência de modos conhecidos de variabilidade climática, como IPO, ENOS, AMO e NAO. Na verificação cruzada, os resultados foram coerentes. A maioria dos modos de variabilidade mais intensa de SPI na bacia está relacionada com ENOS. Contudo, estes modos afetam regiões diferentes porque há diferentes tipos de ENOS e em cada modo há diferentes combinações de ENOS com anomalias de TSM de outra natureza.

A partir dos resultados obtidos das análises anteriores foi escolhida uma região que teve uma seca persistente, para um estudo de caso. A região escolhida fica no nordeste da bacia, e a seca durou de abril de 1963 a janeiro de 1964. Foram obtidas composições de anomalias de diferentes variáveis durante o período da seca em relação ao período total estudado neste trabalho (1950-2009). As anomalias de precipitação foram significativamente negativas na região nordeste e também no centro-oeste da bacia. As anomalias positivas de TSM correspondem às anomalias negativas de PNM. Sobre a metade norte da América do Sul, onde também está localizada a região de estudo, as anomalias de PNM são positivas, indicando divergência sobre a América do Sul. Estes aspectos concordam com a circulação divergente, que indica ausência ou diminuição de precipitação. A composição de anomalias de PSI apresenta crista de pressão sobre a América do Sul, ladeada por dois cavados em altos níveis. Como a região de estudo está localizada a leste do eixo da crista, o movimento subsidente é favorecido, caracterizando ausência de precipitação. Portanto, esta análise mostrou coerência entre a seca analisada e as anomalias oceânicas e atmosféricas existentes durante sua ocorrência.

## FIGURAS DOS RESULTADOS

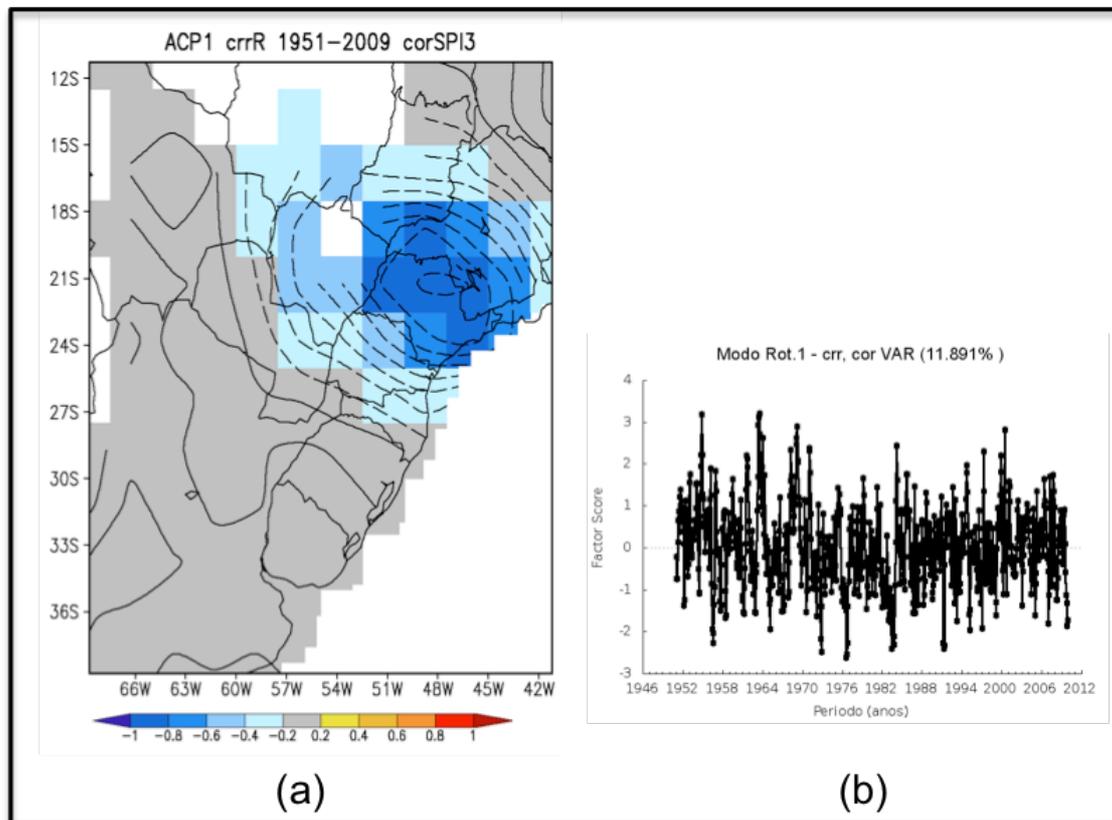


FIGURA 12 – PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DO SPI DE 3 MESES DE MESES CORRIDOS. (A) FACTOR LOADINGS; (B) FACTOR SCORES.

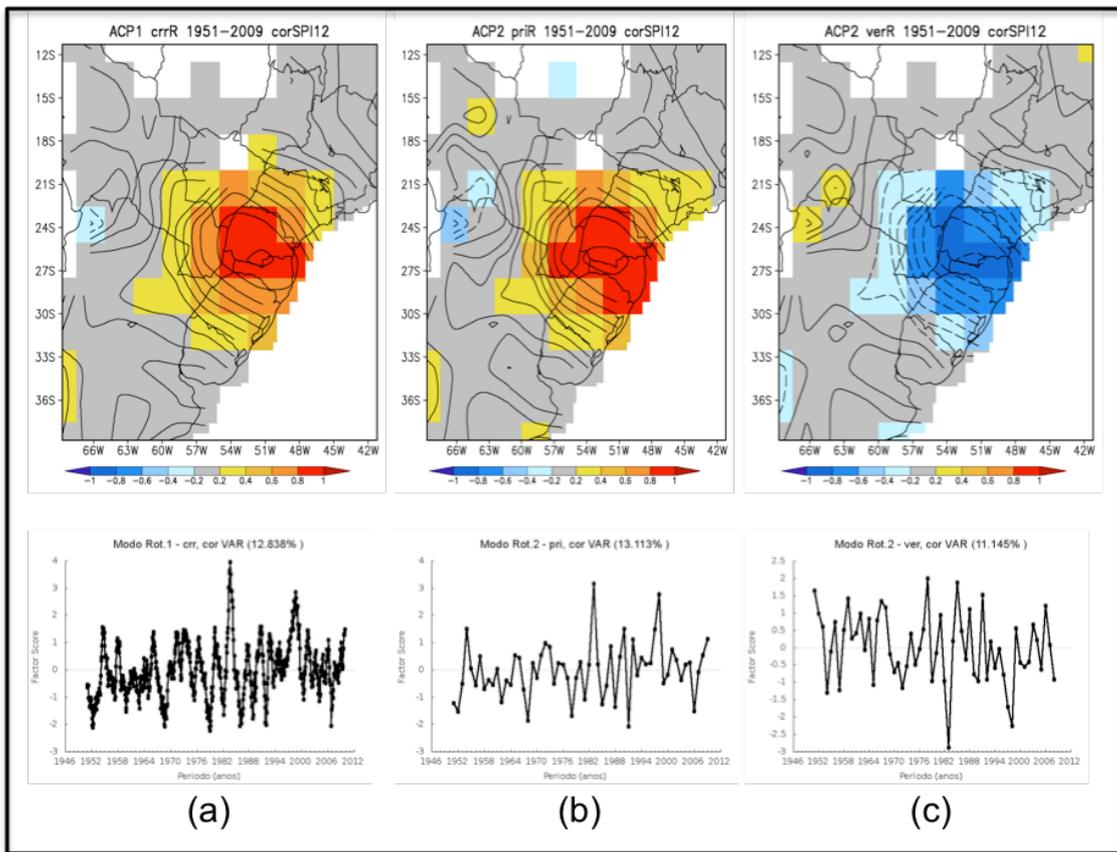


FIGURA 13 – ACP’S PARA SPI DE 12 MESES: (A) PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DE MESES CORRIDOS; (B) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DA PRIMAVERA; (C) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DO VERÃO.

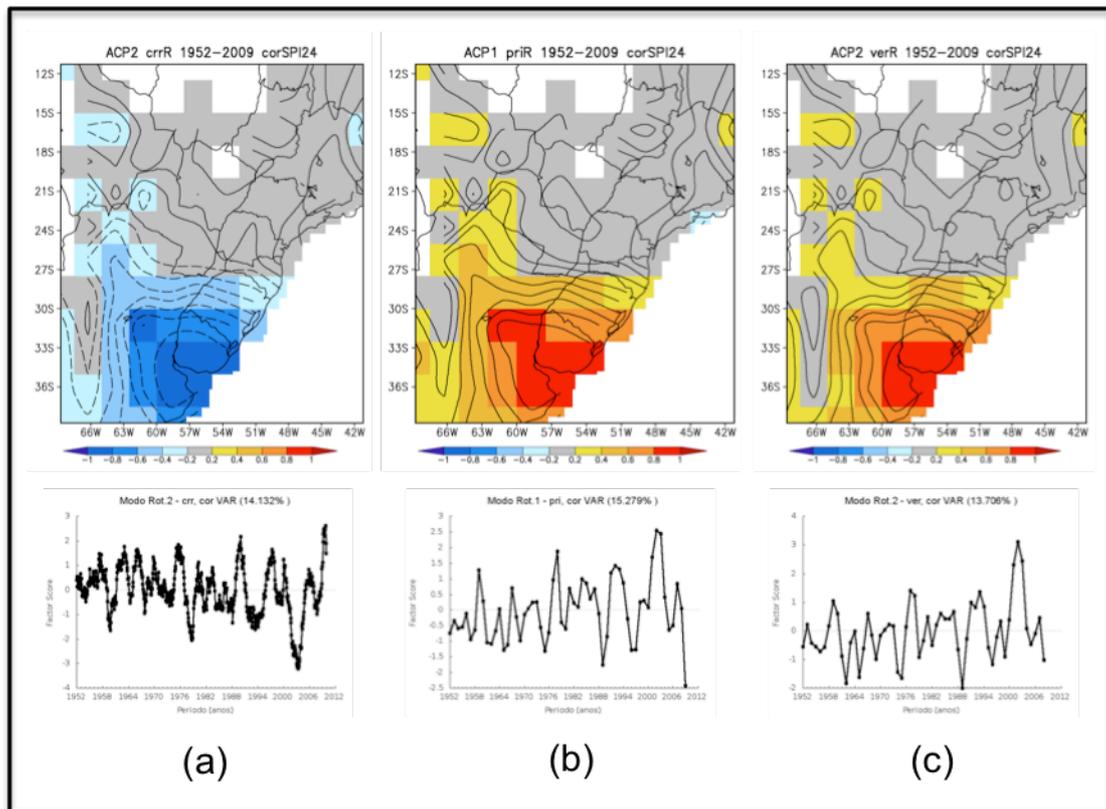


FIGURA 14 - ACP'S PARA SPI DE 24 MESES: (A) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DE MESES CORRIDOS; (B) PRIMEIRO MODO ROTACIONADO DA PRIMAVERA; (C) SEGUNDO MODO ROTACIONADO DO VERÃO.

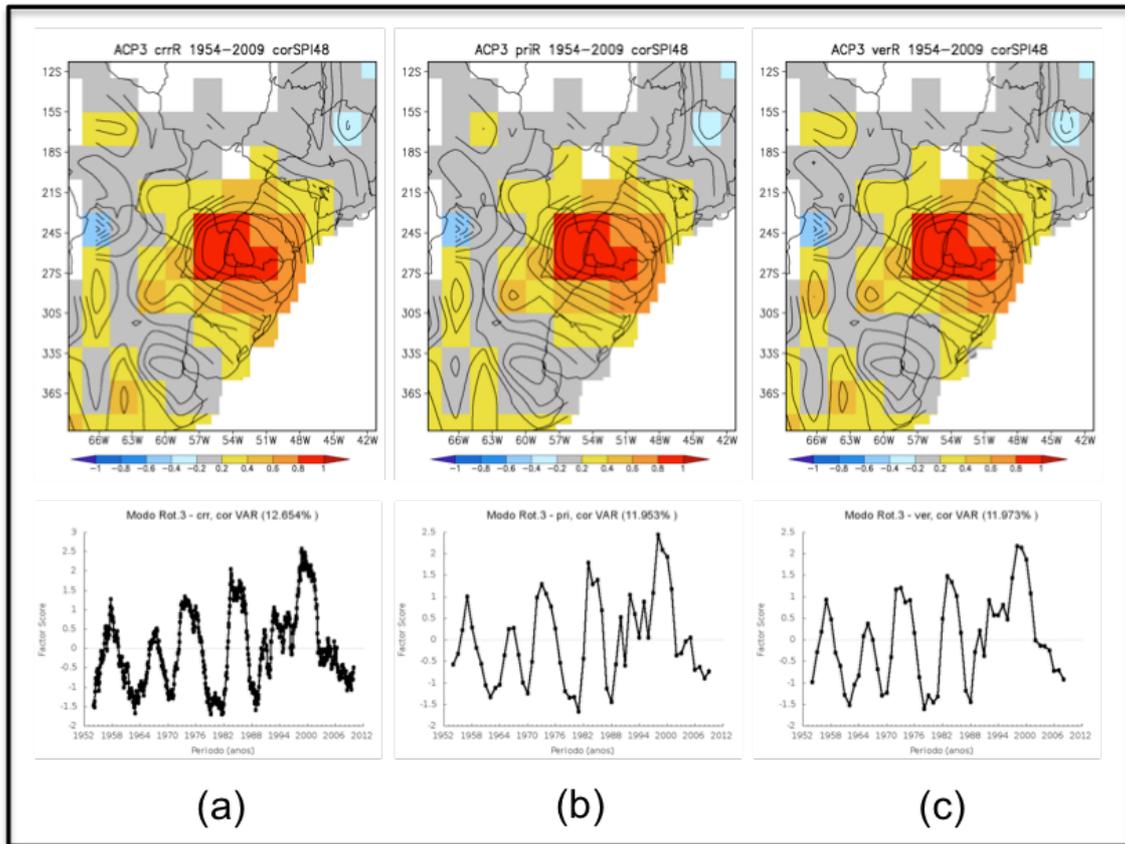


FIGURA 15 – ACP'S PARA SPI DE 48 MESES: (A) TERCEIRO MODO ROTACIONADO DE MESES CORRIDOS; (B) TERCEIRO MODO ROTACIONADO DA PRIMAVERA; (C) TERCEIRO MODO ROTACIONADO DO VERÃO.

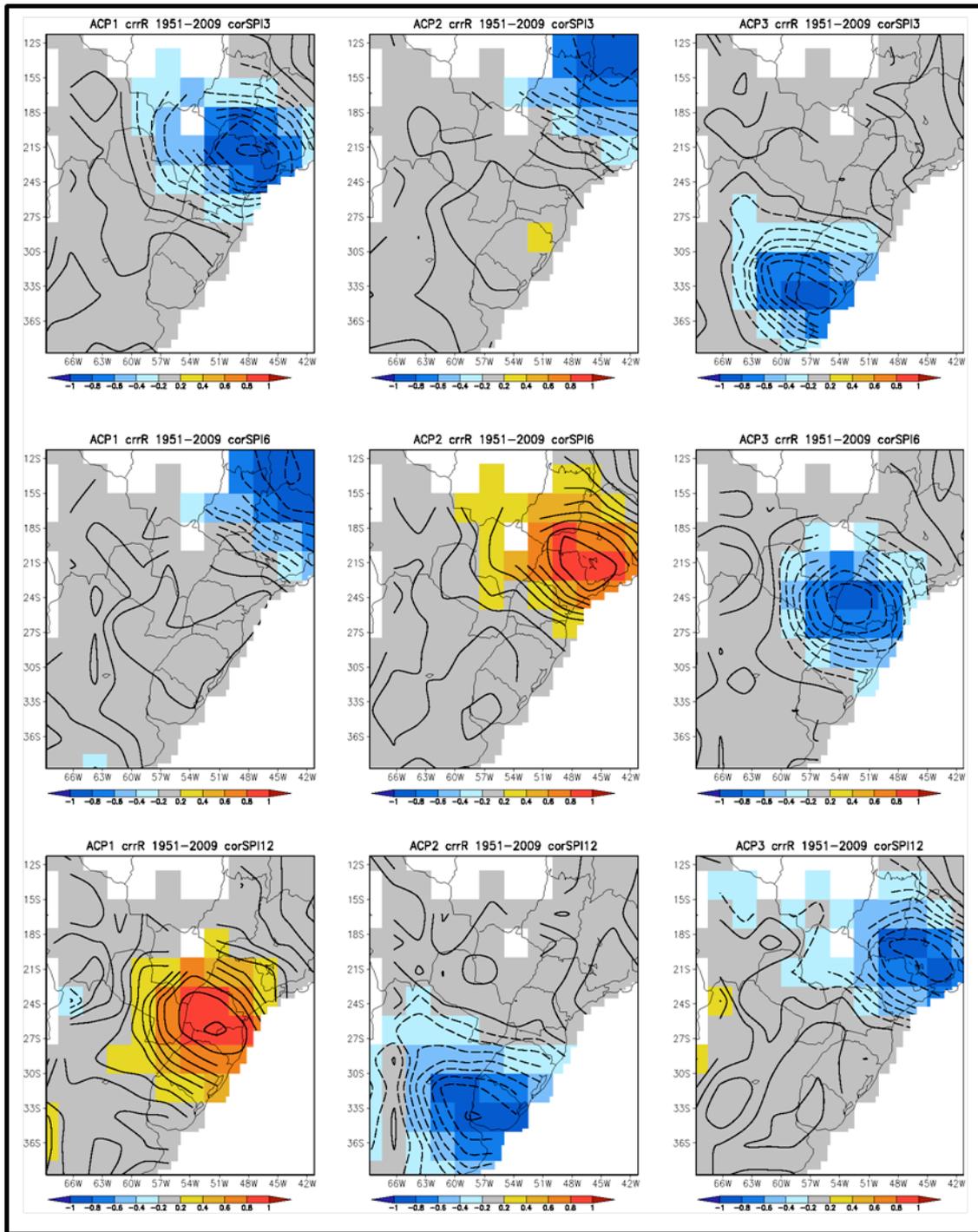


FIGURA 16 – TRÊS PRIMEIROS MODOS DA ACP ROTACIONADA PARA OS SPI'S 3 (ACIMA), 6 (MEIO) E 12 (ABAIXO) PARA MESES CORRIDOS.

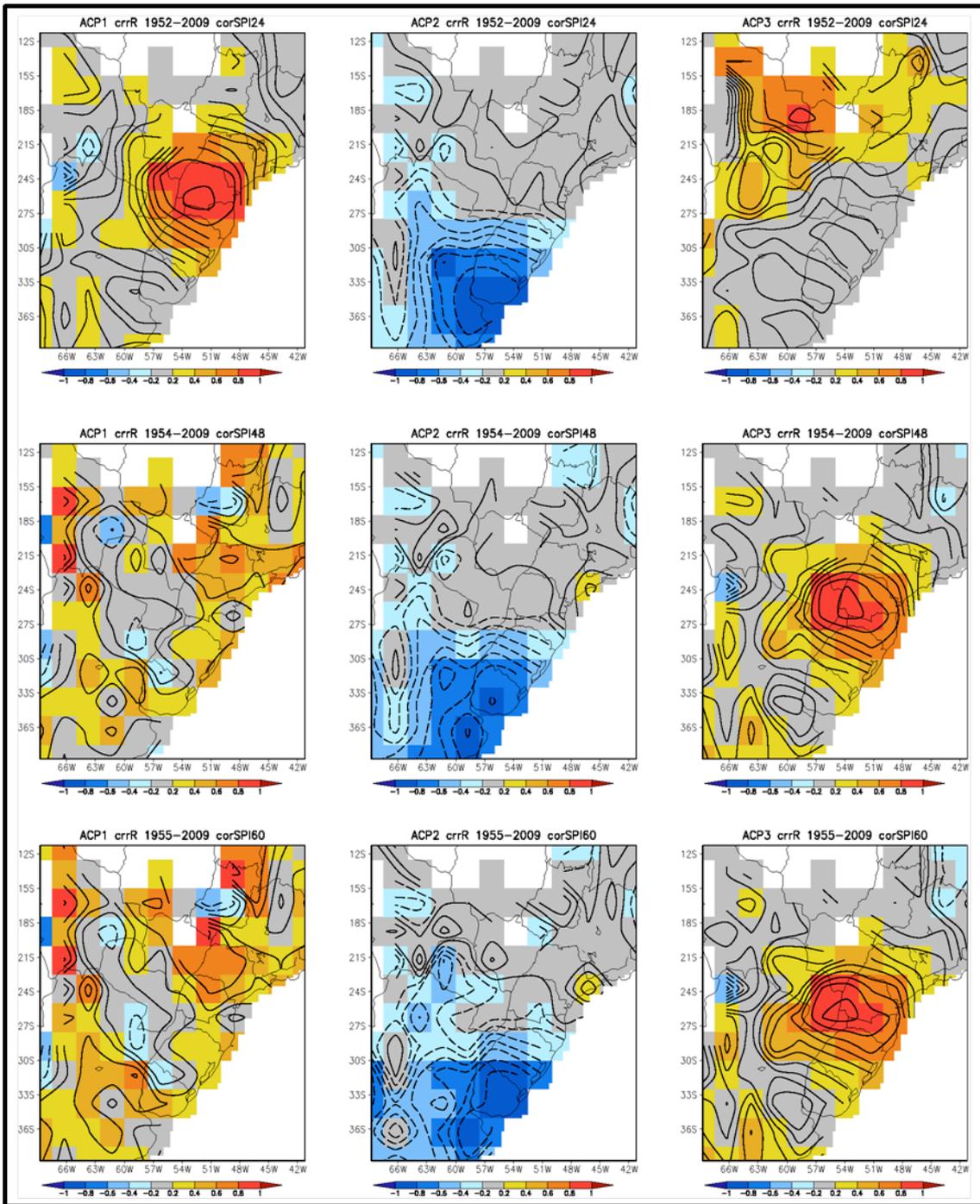


FIGURA 17 - TRÊS PRIMEIROS MODOS DA ACP ROTACIONADA PARA OS SPI'S 24 (ACIMA), 48 (MEIO) E 60 (ABAIXO) PARA MESES CORRIDOS.

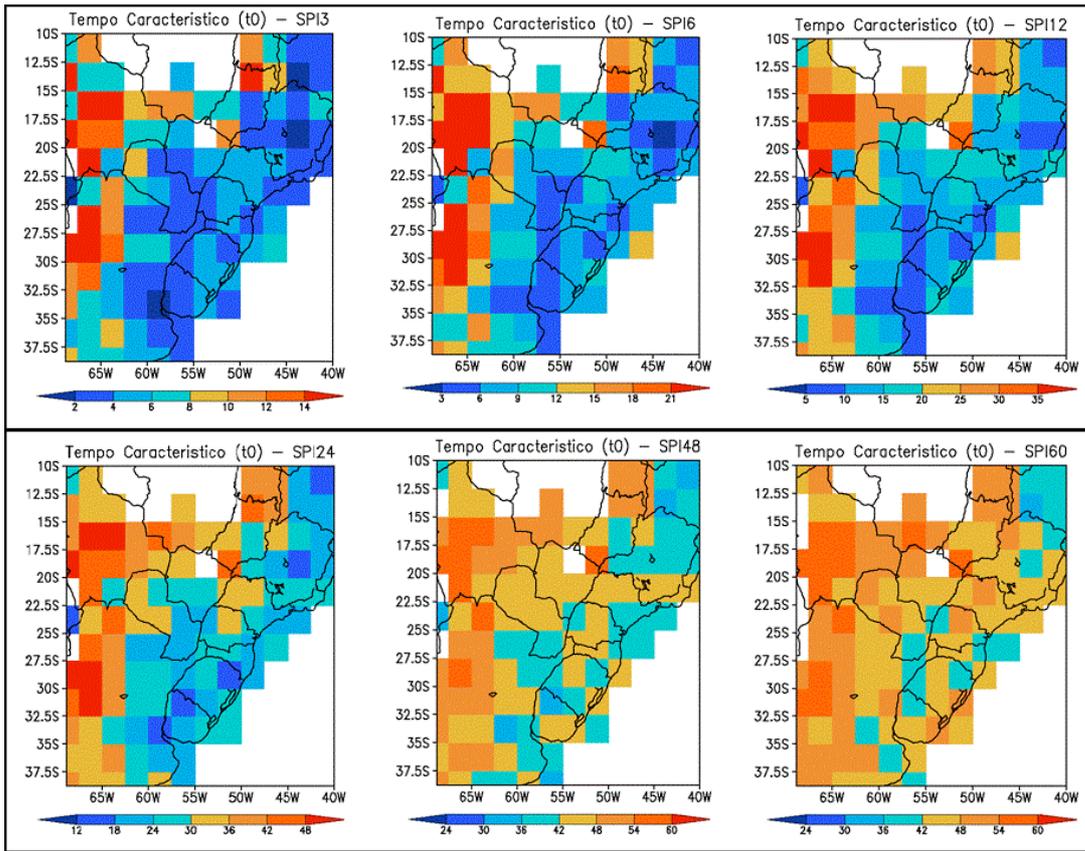


FIGURA 18 – TEMPO CARACTERÍSTICO PARA SPI'S DE 3, 6, 12, 24, 48 E 60 MESES, DADO EM MESES.

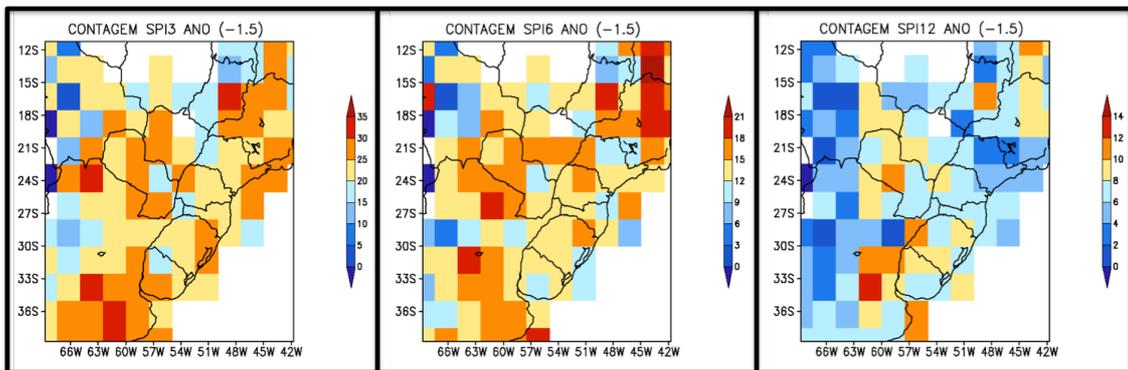


FIGURA 19 – NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.

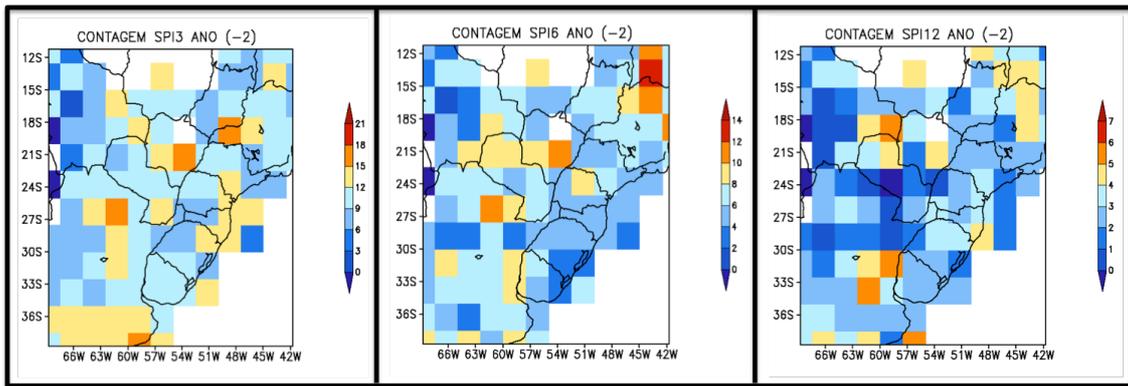


FIGURA 20 – NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR -2,0) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.

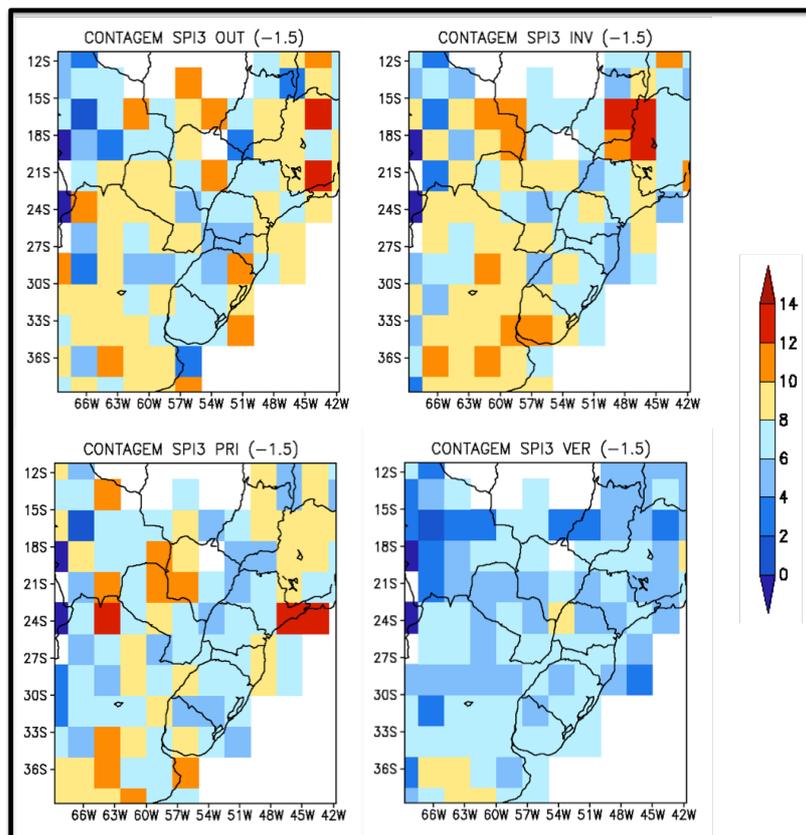


FIGURA 21 - NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA O SPI3 NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO.

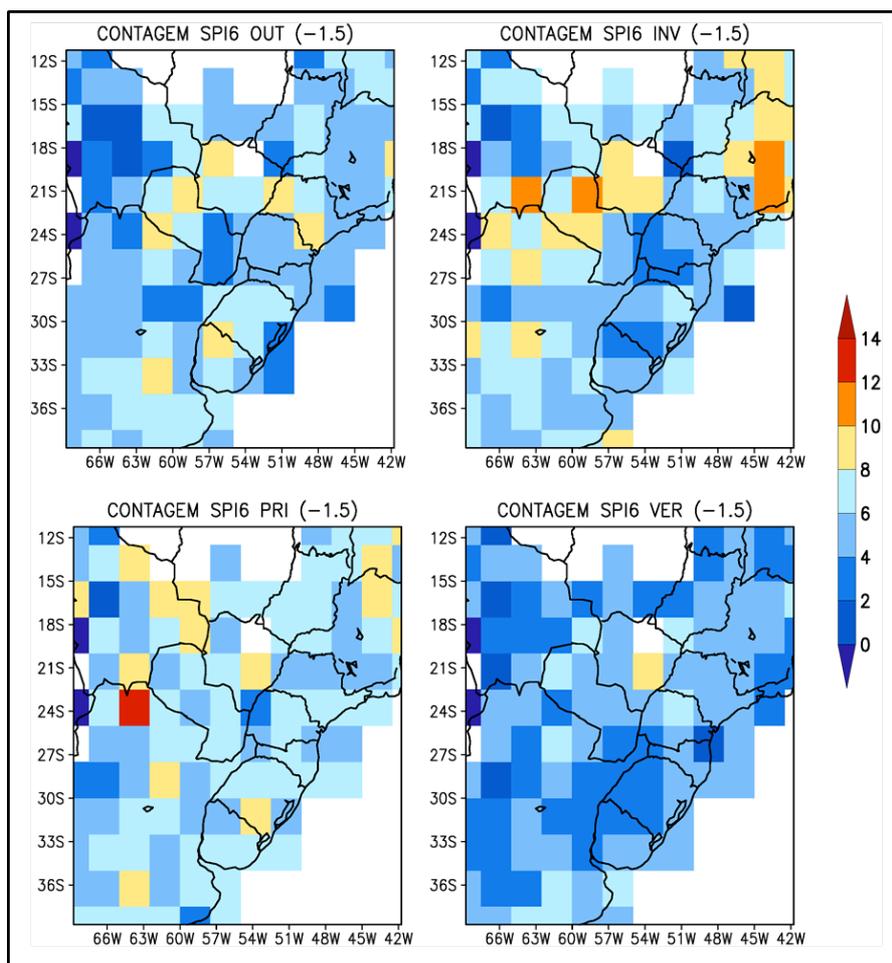


FIGURA 22 - NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA O SPI6 NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO.

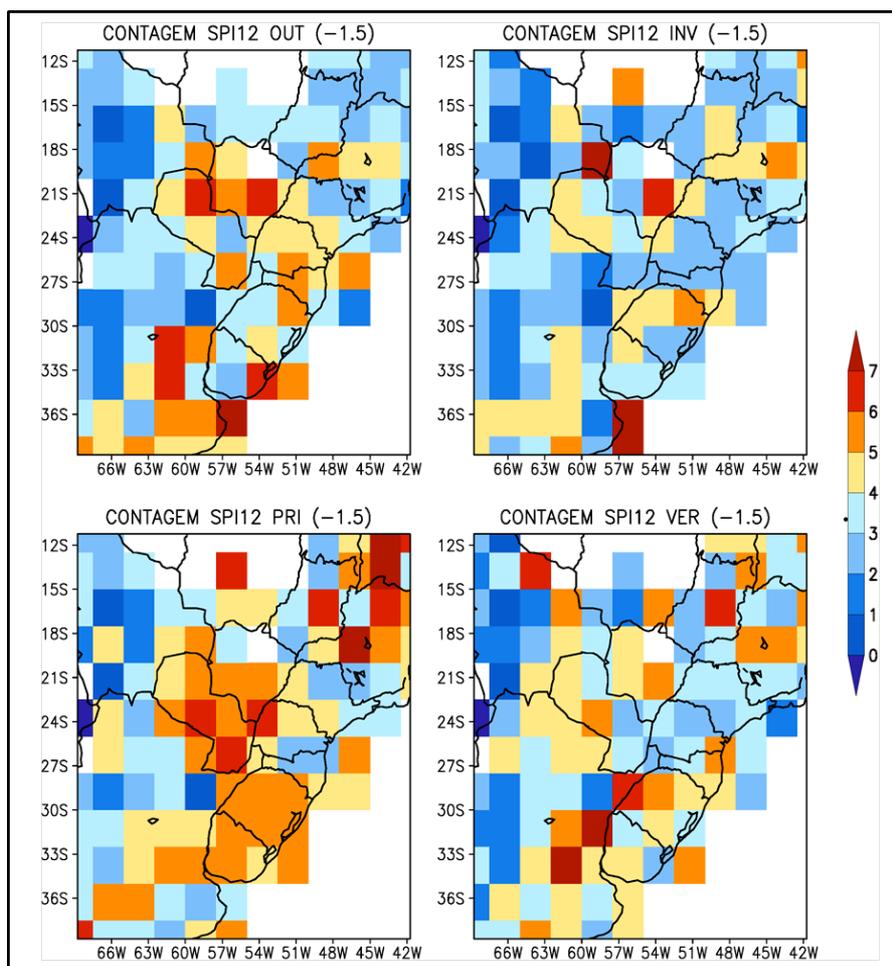


FIGURA 23 - NÚMERO DOS EVENTOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA O SPI12 NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO.

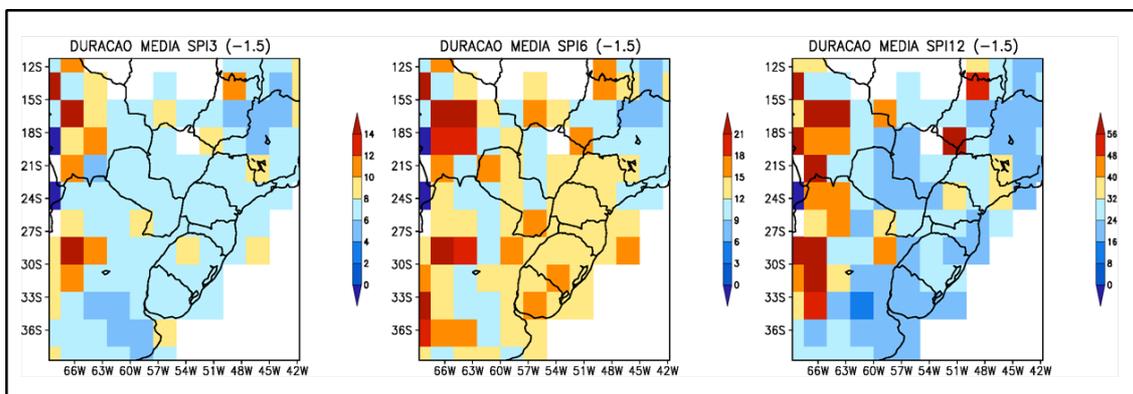


FIGURA 24 - DURAÇÃO MÉDIA DOS EPISÓDIOS DE SECA SEVERA (LIMIAR -1,5) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.

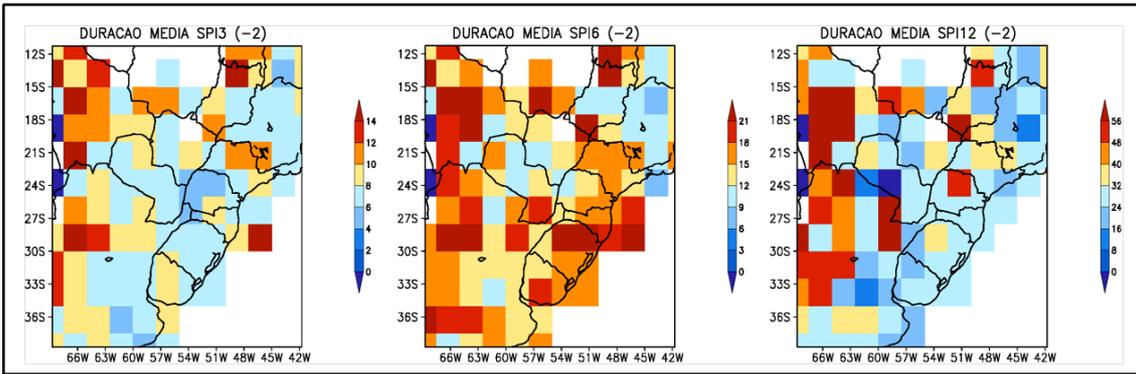


FIGURA 25 – DURAÇÃO MÉDIA DOS EPISÓDIOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR  $-2,0$ ) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.

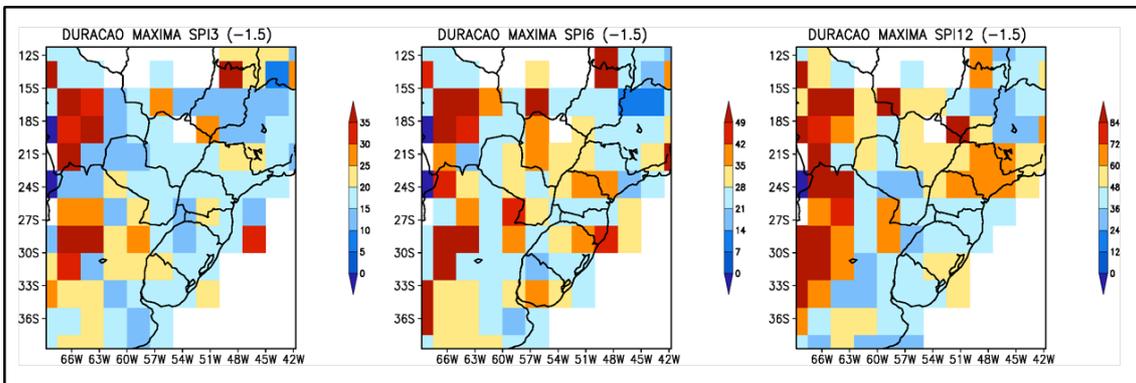


FIGURA 26 – DURAÇÃO MÁXIMA DOS EPISÓDIOS DE SECA SEVERA (LIMIAR  $-1,5$ ) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.

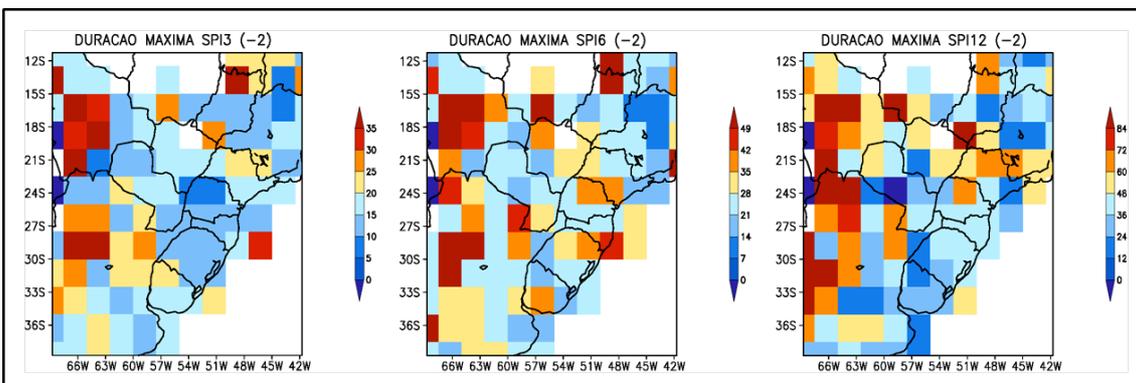


FIGURA 27 – DURAÇÃO MÁXIMA DOS EPISÓDIOS DE SECA EXTREMA (LIMIAR  $-2,0$ ) NA BACIA DO PARANÁ/PRATA NO PERÍODO DE 1950 A 2009 PARA OS SPI'S DE 3 (ESQUERDA), 6 (MEIO) E 12 (DIREITA) MESES.

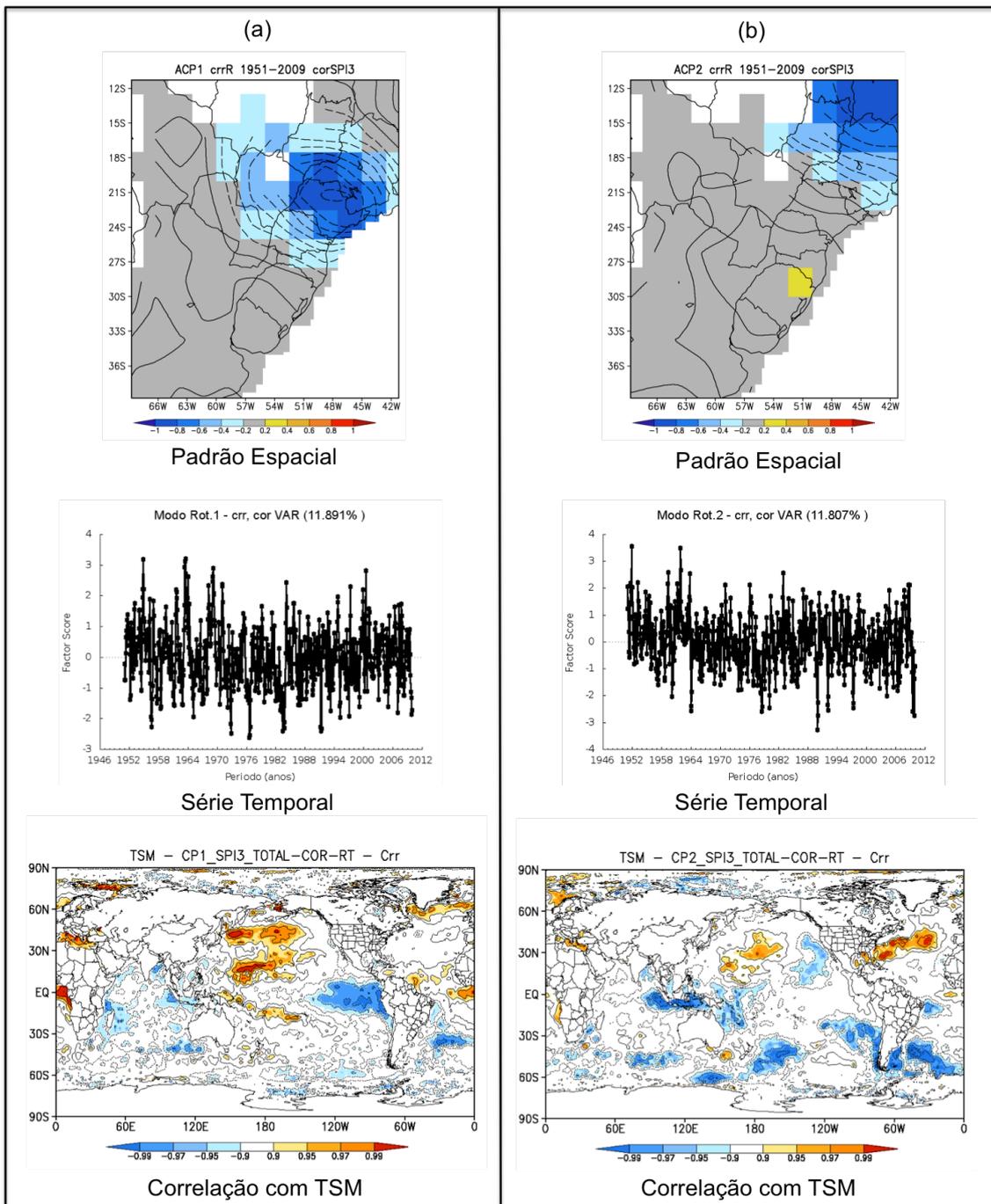


FIGURA 28 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 3 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

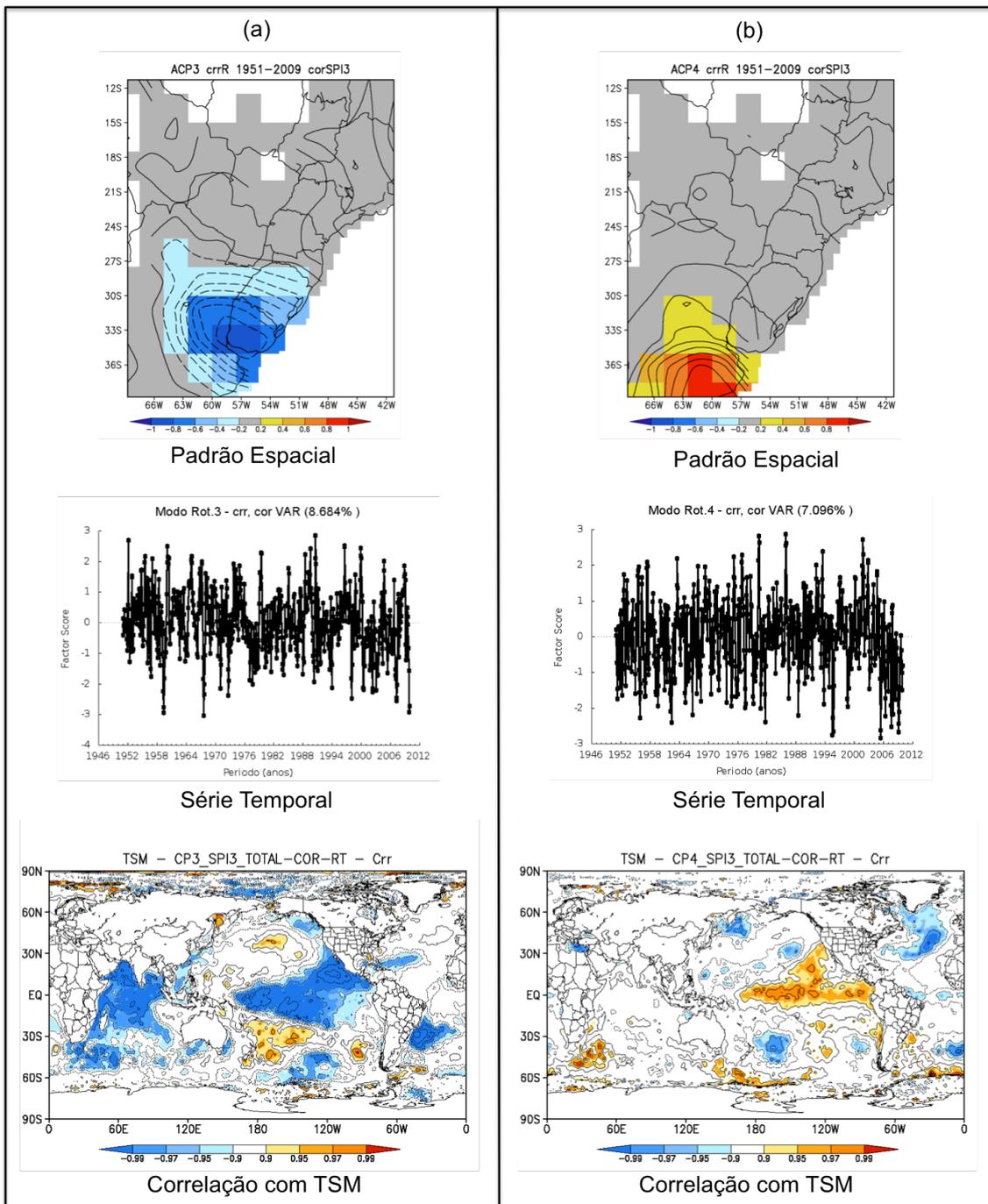


FIGURA 29 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 3 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

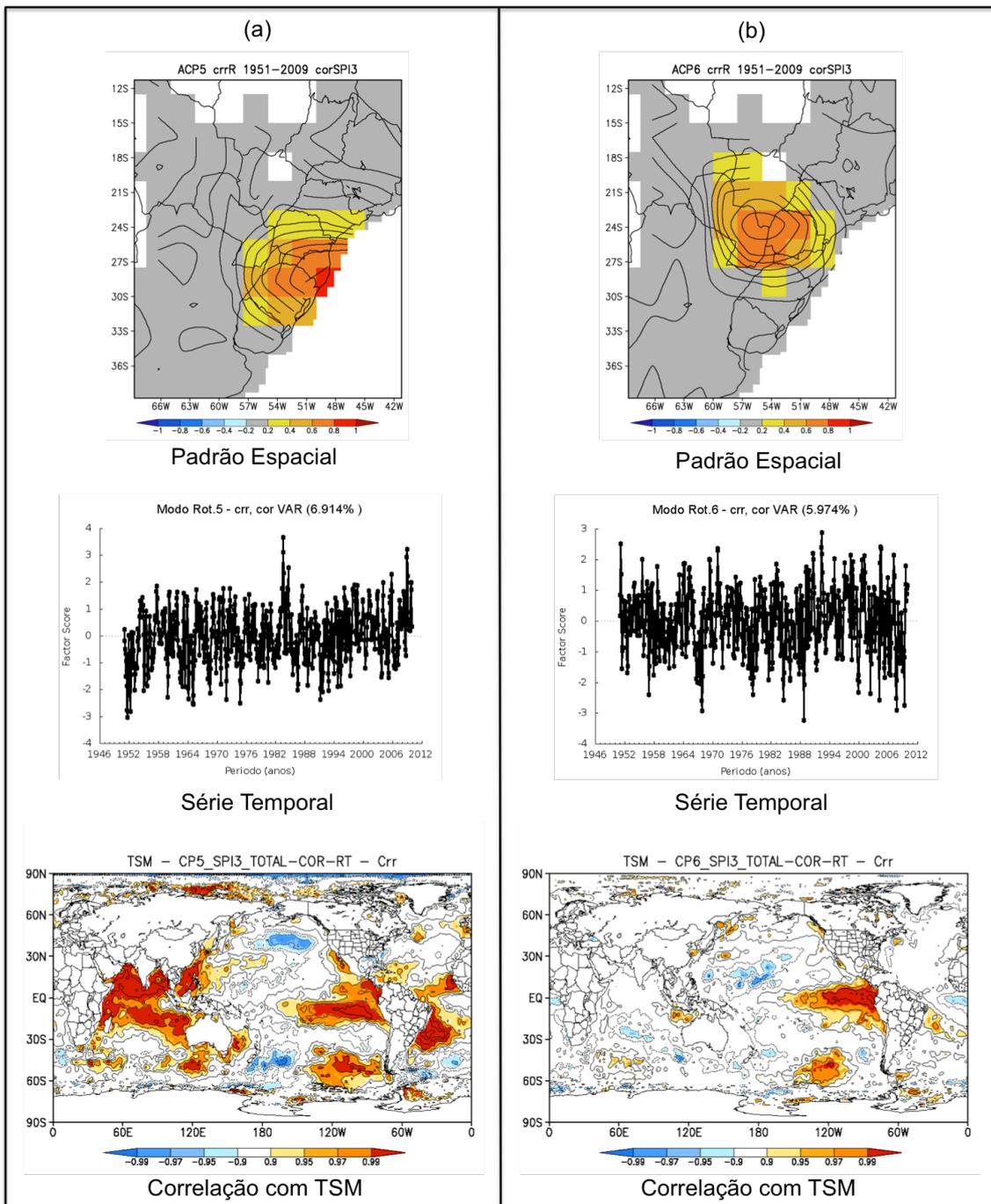


FIGURA 30 - (A) QUINTO E (B) SEXTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 3 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 3 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

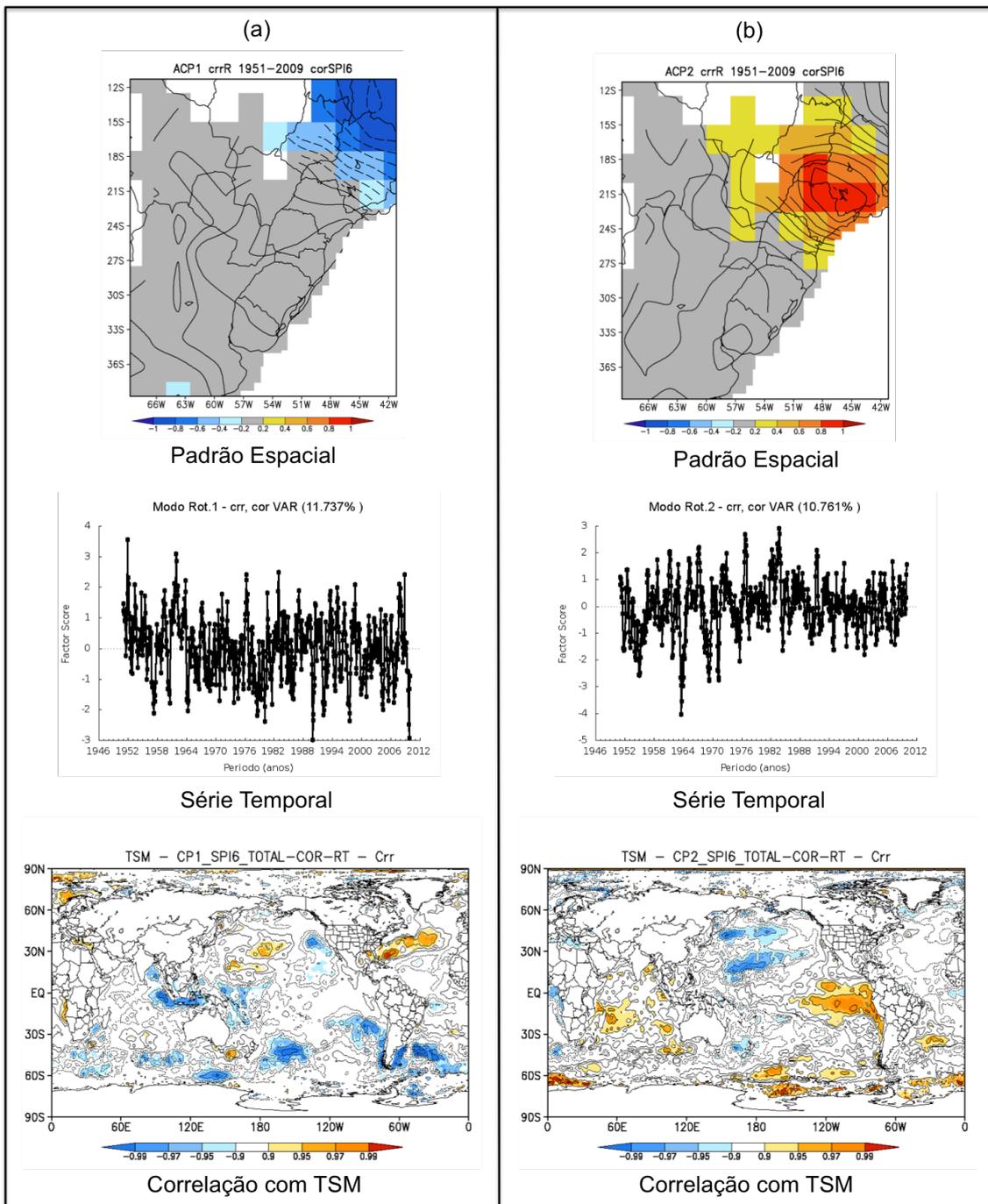


FIGURA 31 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 6 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

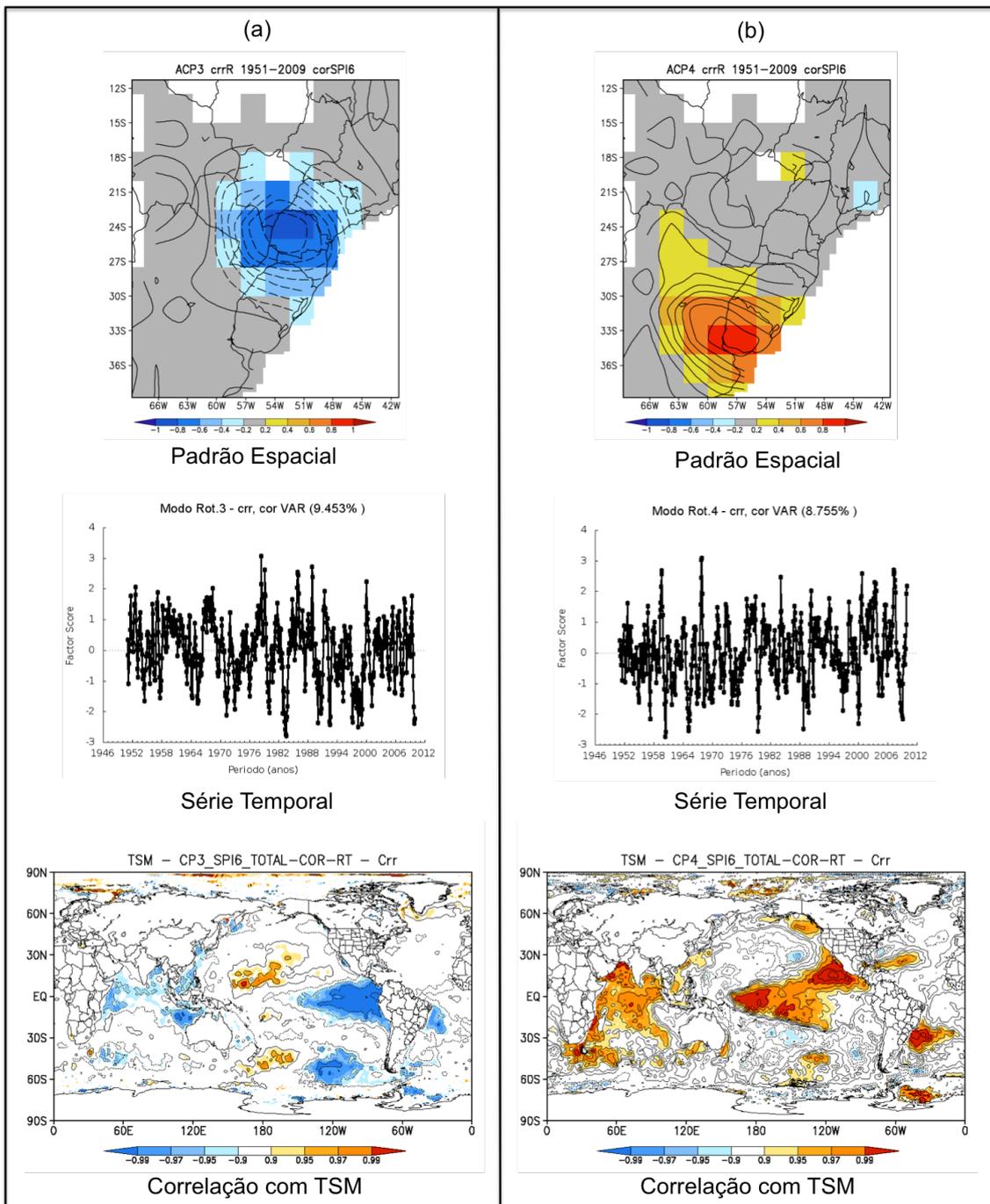


FIGURA 32- (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 6 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

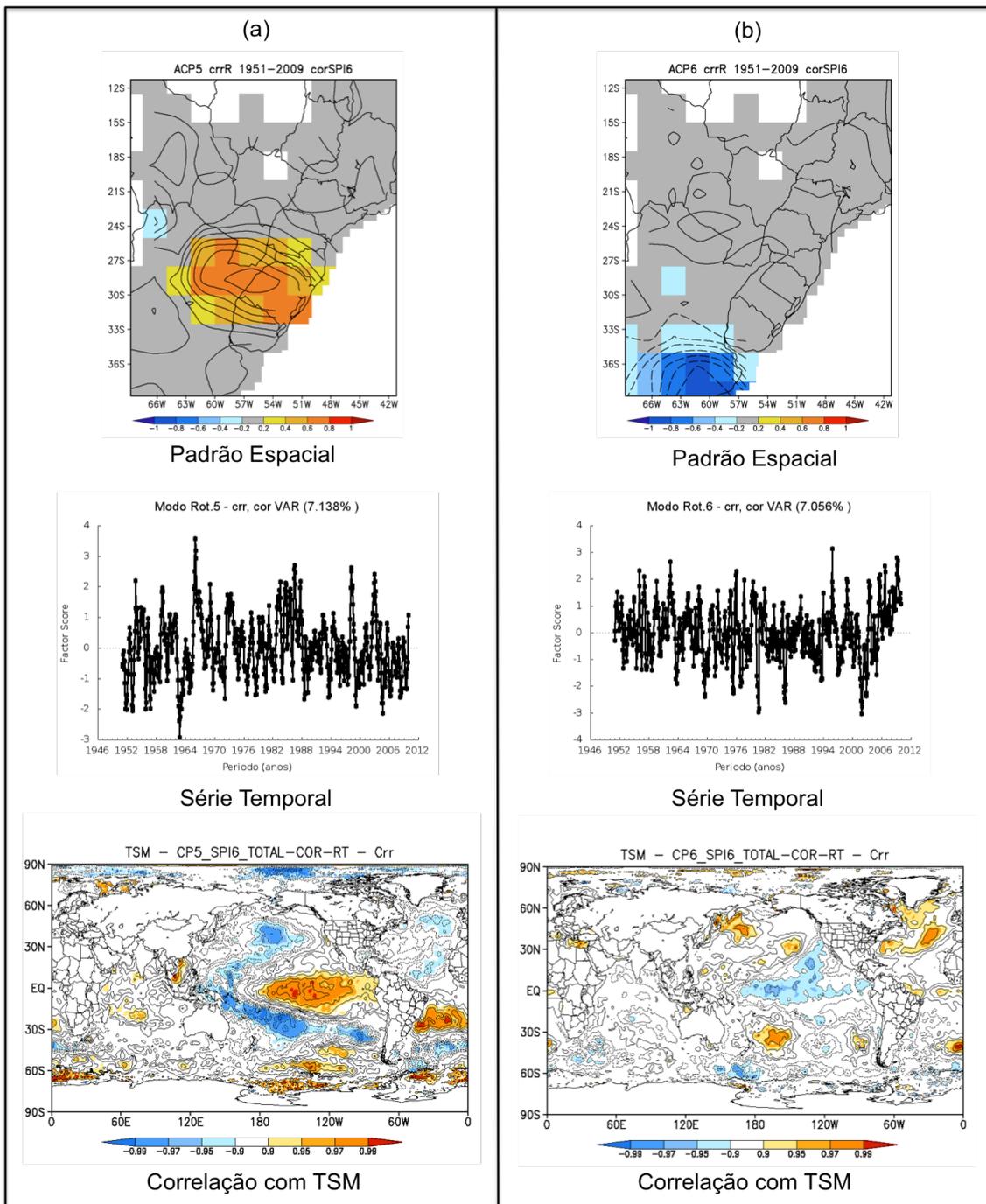


FIGURA 33 - (A) QUINTO E (B) SEXTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 6 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 6 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

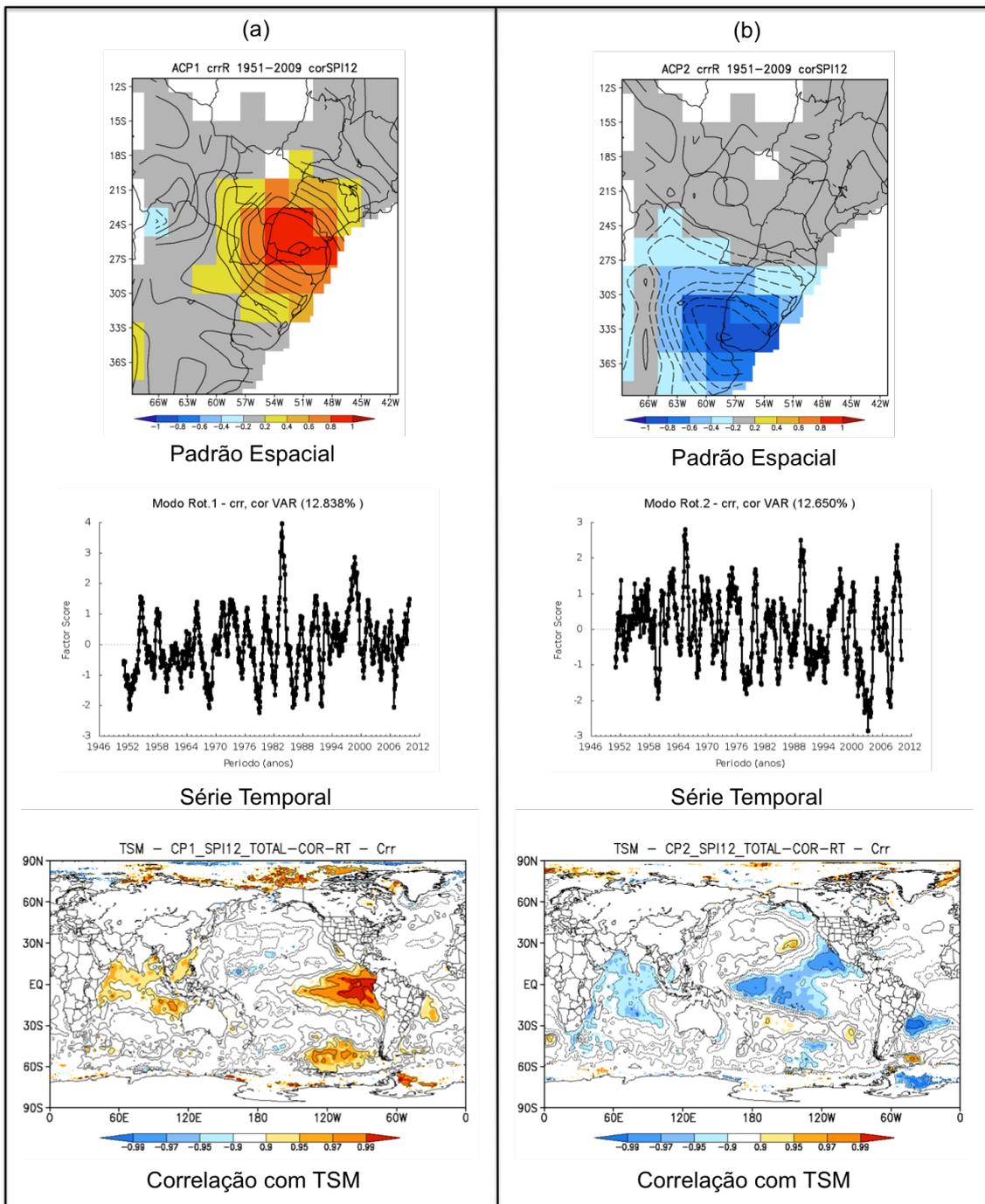


FIGURA 34 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 12 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 12 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

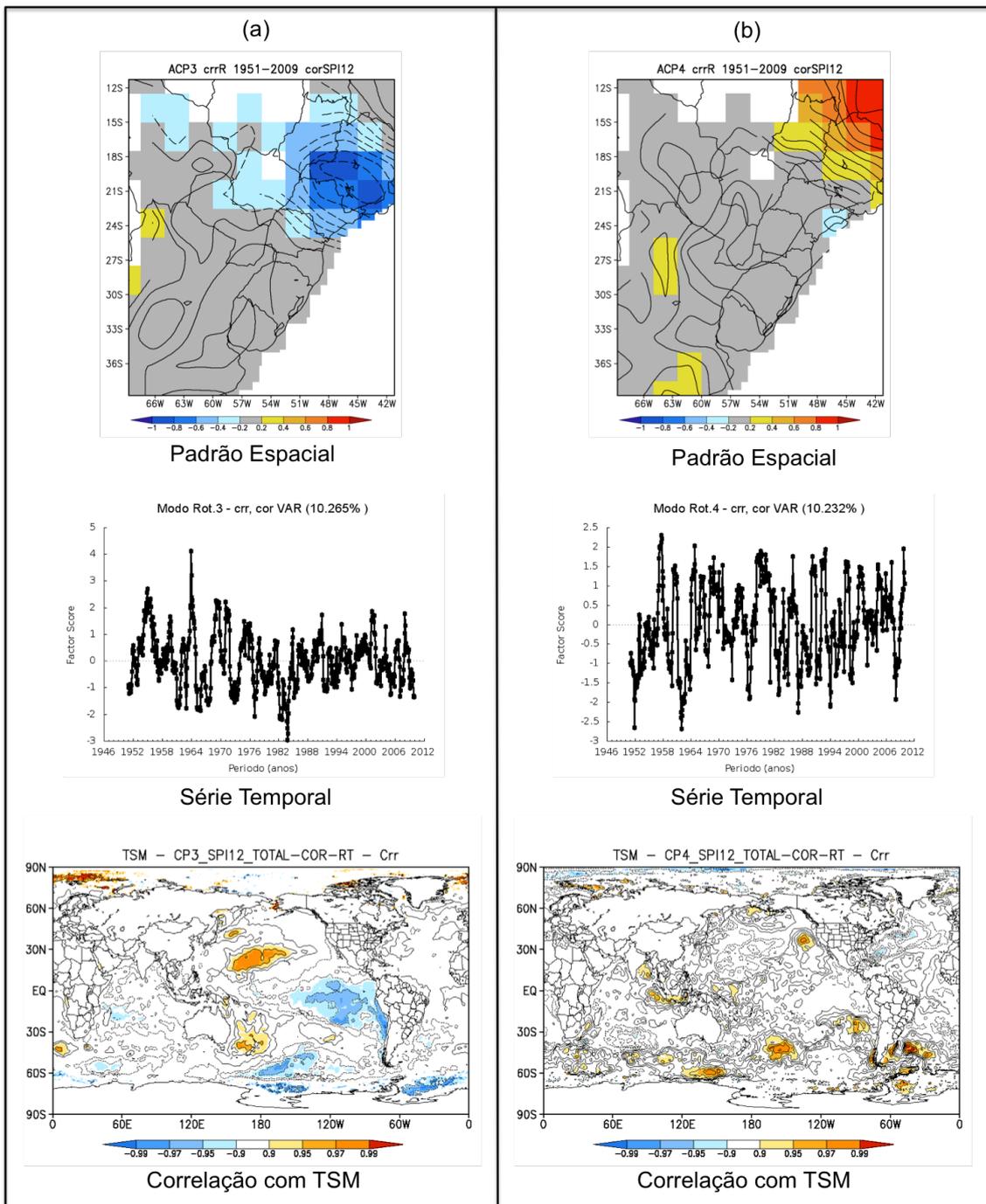


FIGURA 35 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE SPI 12 PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE SPI 12 E A TSM GLOBAL FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

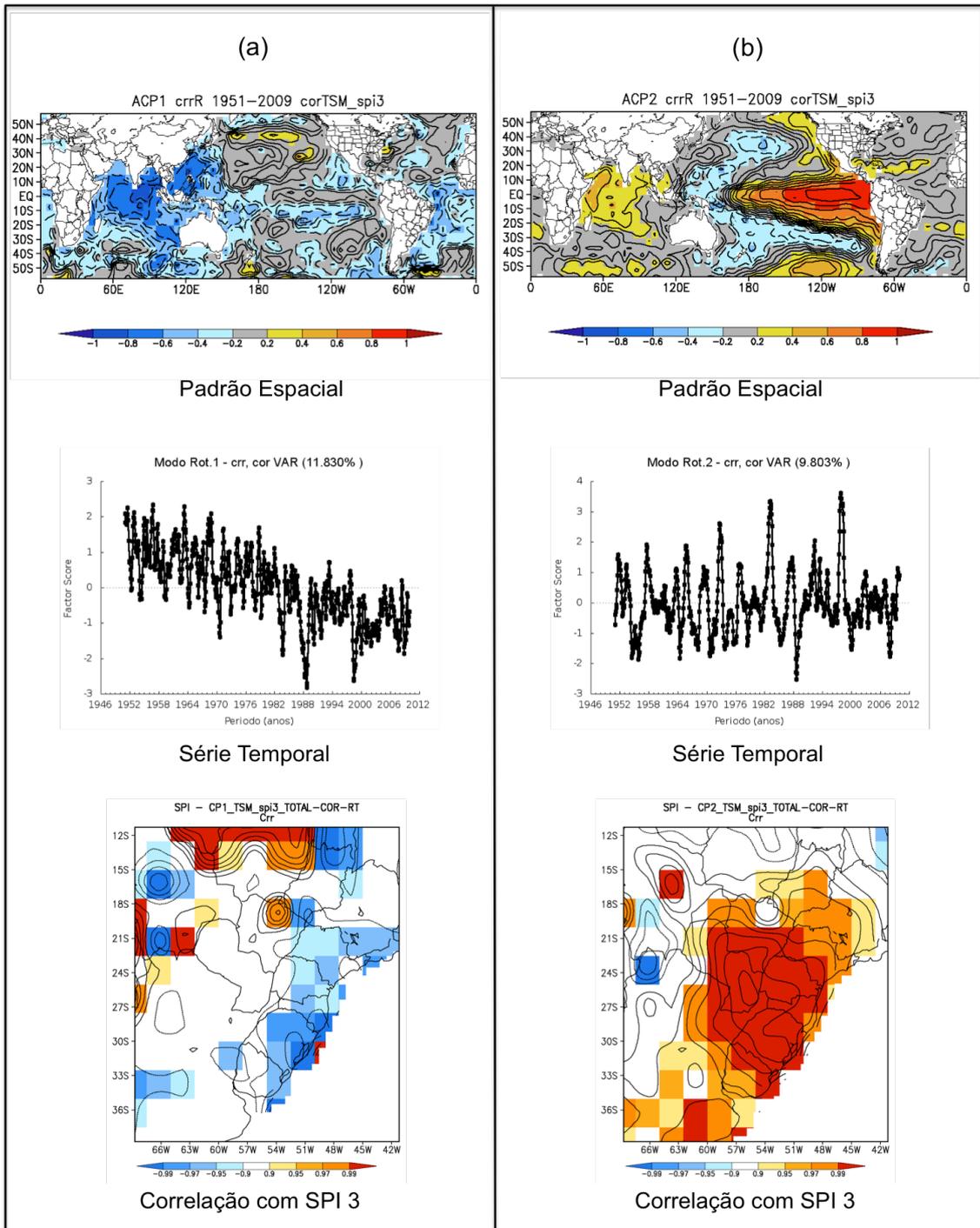


FIGURA 36 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 3. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

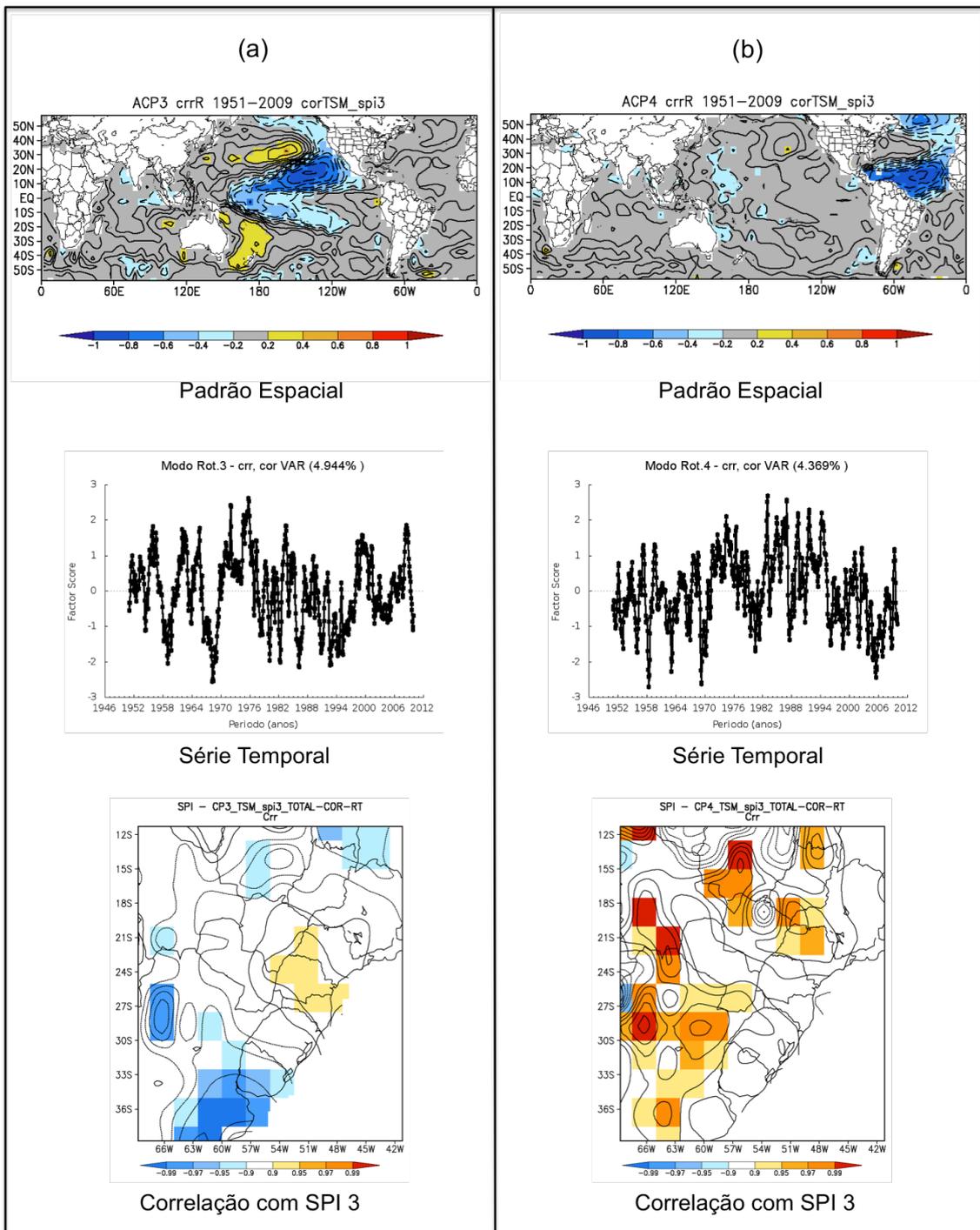


FIGURA 37 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 3 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 3. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

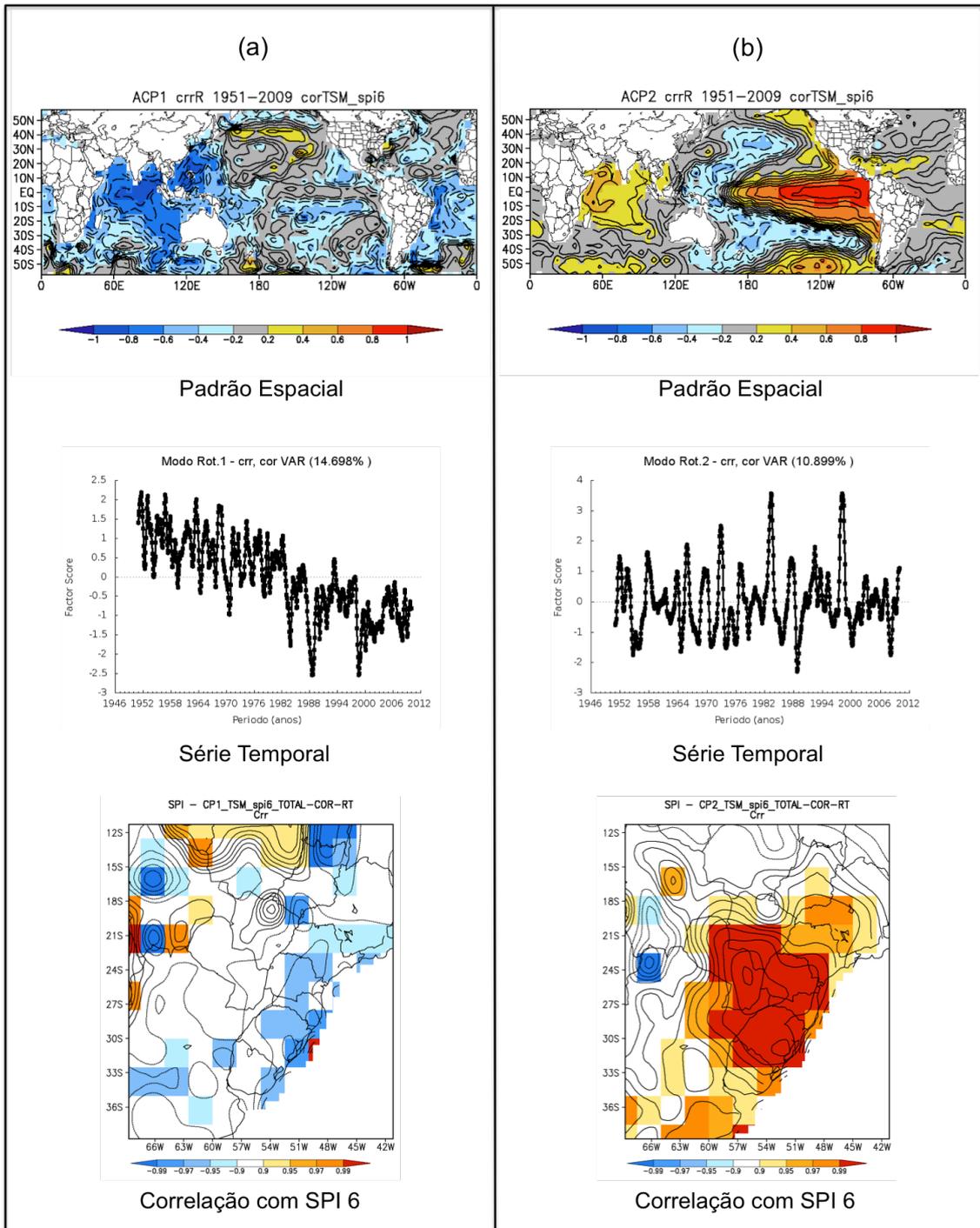


FIGURA 38 (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 6. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

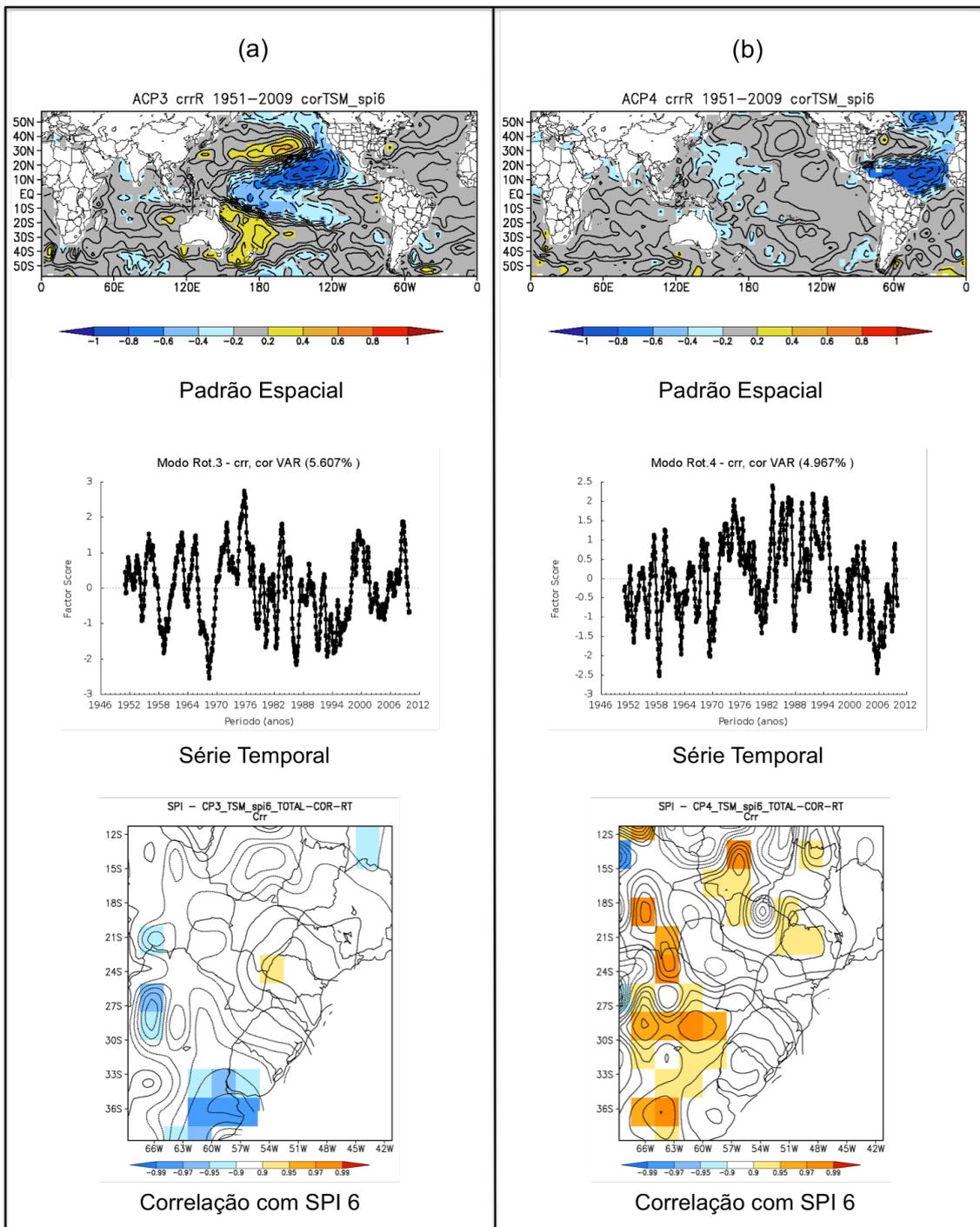


FIGURA 39 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 6 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 6. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10

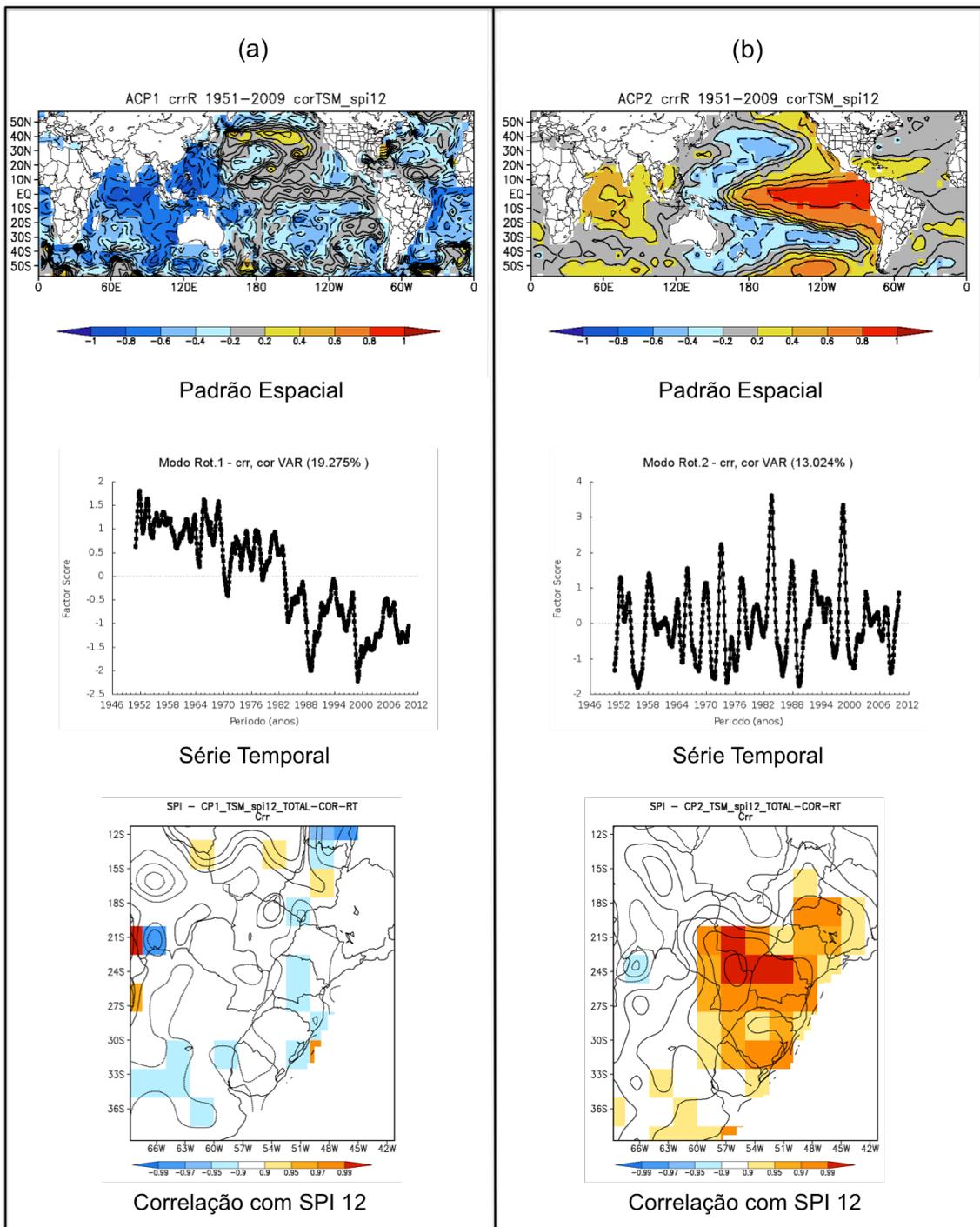


FIGURA 40 - (A) PRIMEIRO E (B) SEGUNDO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 12. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

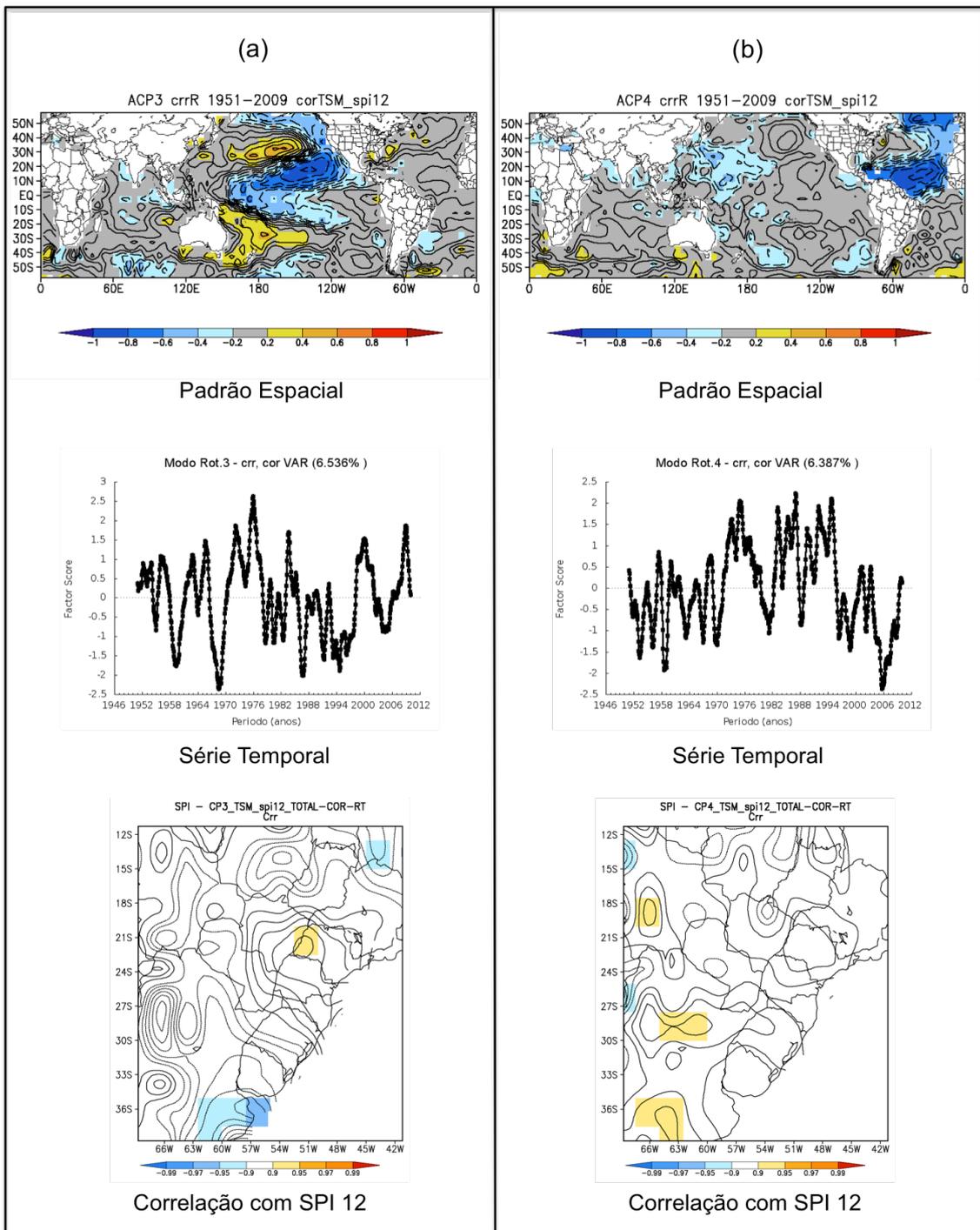


FIGURA 41 - (A) TERCEIRO E (B) QUARTO MODOS ROTACIONADOS DE TSM FILTRADA COM MÉDIA MÓVEL DE 12 MESES PARA MESES CORRIDOS. SÃO APRESENTADOS PADRÃO ESPACIAL (FL), SÉRIE TEMPORAL (FS) E CORRELAÇÃO ENTRE OS MODOS DE TSM E A SÉRIE DE SPI 12. REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

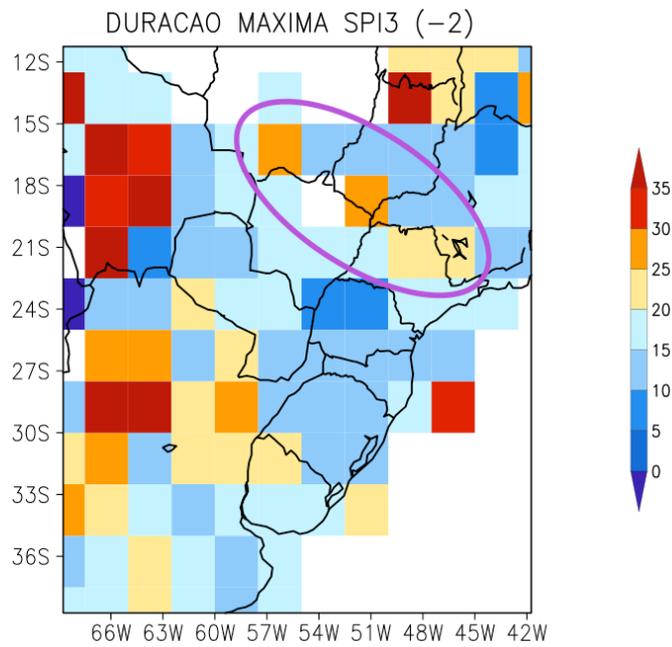


FIGURA 42 – REGIÃO ESCOLHIDA PARA O ESTUDO DE CASO (AS QUATRO QUADRÍCULAS COM VALORES MAIORES DENTRO DO CÍRCULO).

### Série Temporal do SPI3 na região do estudo de caso (quad. x=8, y=9)

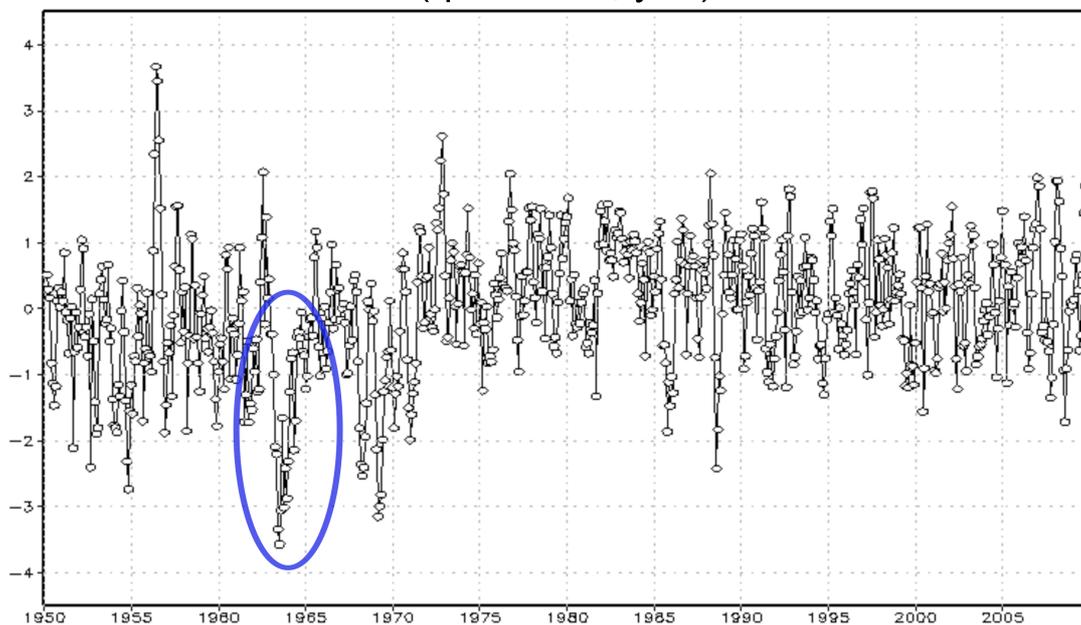


FIGURA 43 – SÉRIE TEMPORAL DO SPI DE 3 MESES DA QUADRÍCULA X=8, Y=9.

Comp. Anom. PPT 1950–2009/Período da Seca

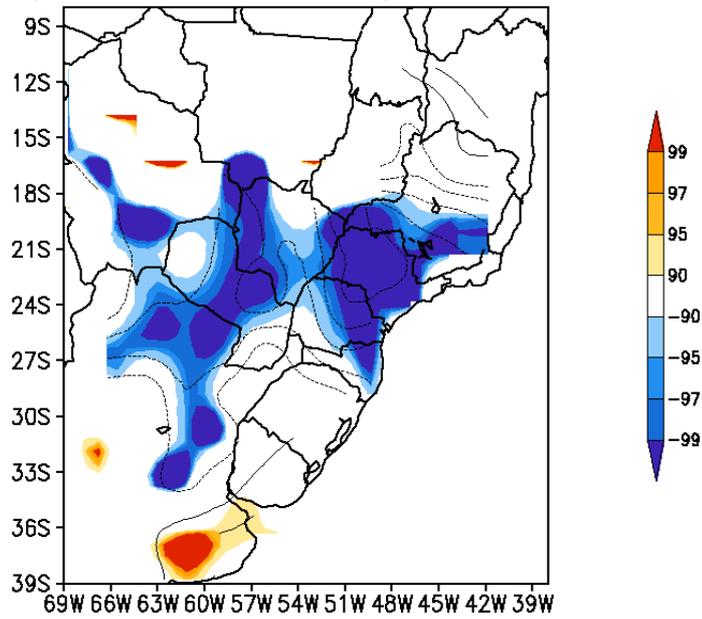


FIGURA 44 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A BACIA DO PARANÁ/PRATA PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO A SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

Comp. Anom. TSM 1950–2009/Período da Seca

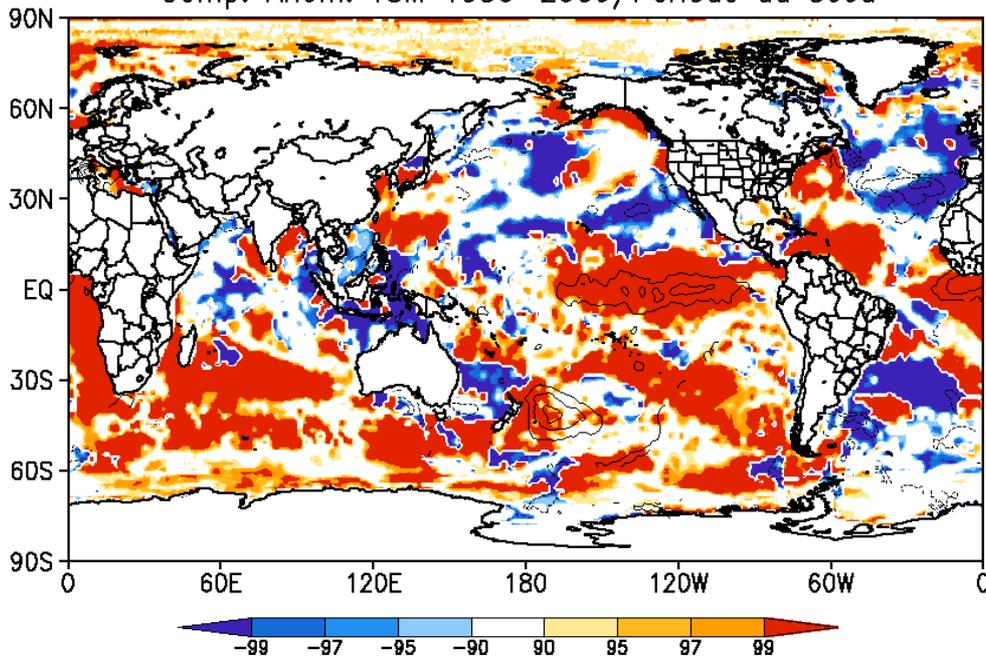


FIGURA 45 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE TSM PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

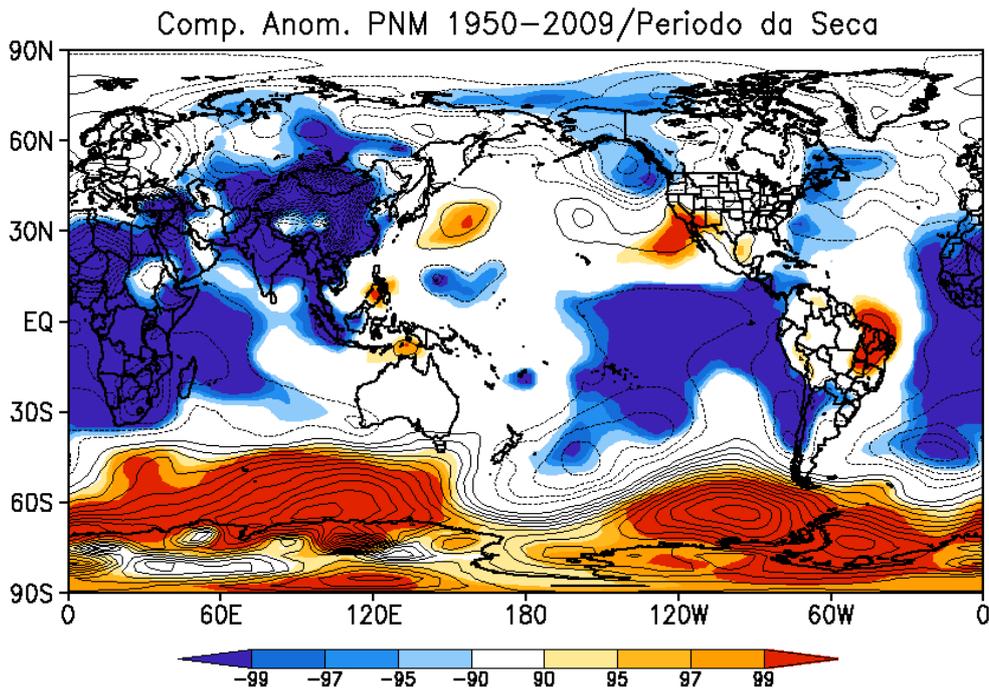


FIGURA 46 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE PRESSÃO AO NÍVEL DO MAR PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

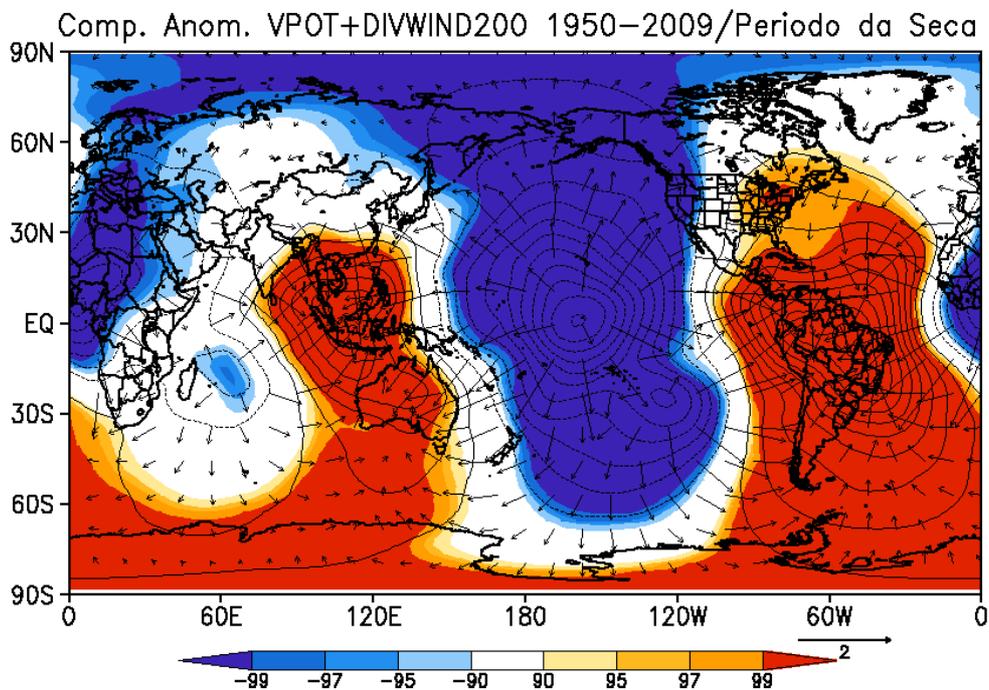


FIGURA 47 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE POTENCIAL DE VELOCIDADE E COMPONENTE DIVERGENTE DO VENTO EM 200 HPA PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

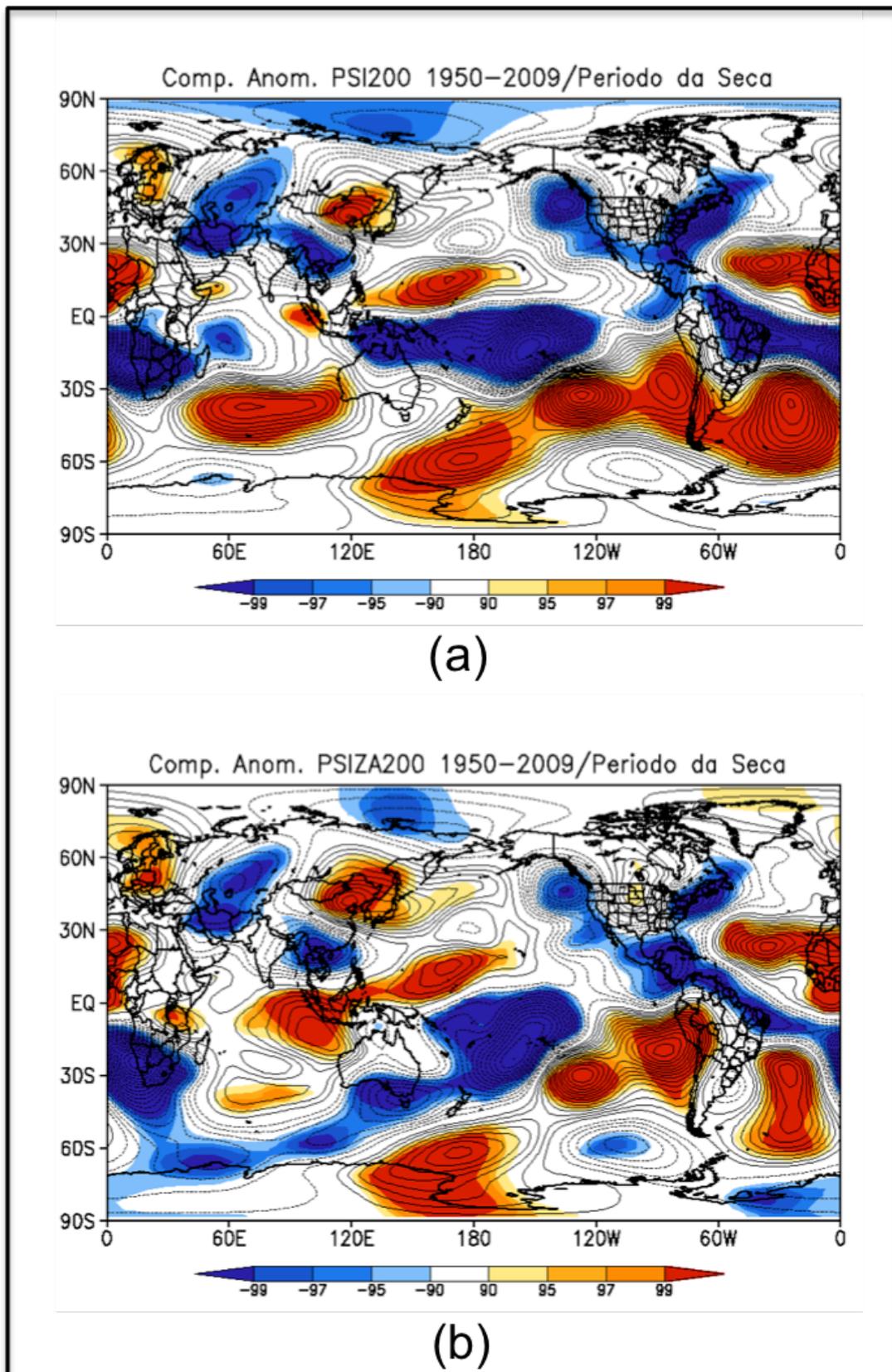


FIGURA 48 - COMPOSIÇÃO DE ANOMALIAS DE (A) FUNÇÃO CORRENTE E (B) FUNÇÃO CORRENTE ZONALMENTE ASSIMÉTRICA EM 200HPA PARA O PERÍODO DA SECA (ABR1963-JAN1964) EM RELAÇÃO À SÉRIE TOTAL (1950-2009). REGIÕES EM AZUL OU VERMELHO APRESENTAM SIGNIFICÂNCIA MELHOR QUE 0,10.

## REFERÊNCIAS

- ALTAMIRANO, R. J. A. e SANSIGOLO C. A. **Climatologia dos eventos chuvoso e secos severos, extremos e muito extremos usando o índice de precipitação normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.
- ARAÚJO, R. G. *et al.* A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4, p. 469–480, 2013.
- BARROS, V. *et al.* Climate change in the La Plata basin. **Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas**, p. 16- 40, 2006.
- BERBERY, E. H. e BARROS, V. R. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 3, p. 630–645, 2002.
- BLAIN, G. C. e 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**, v. 64, n. 4, p. 695-705, 2005.
- CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 211–230, abr. 2015.
- CAVALCANTI, I. F. A. e KOUSKY, V. E. Drought in Brazil during summer and fall 2001 and associated atmospheric features. **Revista Climanálise**, v. Ano 2, núm, p. 1–10, 2002.
- CIC - **Comitê Intergovernamental Coordenador dos Países da Bacia do Prata. 2012**. Acessado em 25/10/2015. Disponível em < <http://projetoscic.org> >
- DIAZ *et al.* Relationship between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, p. 251-271, 1998.
- GRIMM, A. M. El Niño, novamente! **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 351-357, 2015.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 2007, p. 537–554, 2011.
- GRIMM, A. M. *et al.* Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35–58, jan. 2000.
- GRIMM, A. M. *et al.*, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated

with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, nov. 1998.

GRIMM, A. M. e SABOIA, J. P. J. Interdecadal Variability of the South American Precipitation in the Monsoon Season. **Journal of Climate**, v. 28, n. 2, p. 755–775, jan. 2015.

HAYES, M. J. *et al.* Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 3, p. 429–438, mar. 1999.

KALNAY, E. *et al.* The NCEP/NCAR 40-years reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437–471, 1996.

LIEBMANN, B. e ALLURED, D. Daily precipitation grids for South America. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v. 86, p.1567-1570, 2005.

LLOYD-HUGHES, B. e SAUNDERS, M. A. A drought climatology for Europe. **International Journal of Climatology**, v. 22, n. 13, p. 1571–1592, 15 nov. 2002.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil.** Disponível em: <[http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS\\_MudancasClimaticas.pdf](http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2015.

MCKEE, T. B. *et al.* The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society**, p.179-186, 1993.

MCKEE, T. B. *et al.* Drought Monitoring With Multiple Time Scales. **Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society**, p.233-236,1995.

MINUZZI, R. B. *et al.* Climatologia do comportamento do período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 338-344, 2007.

MO, K. C. e BERBERY, E. H. Drought and Persistent Wet Spells over South America Based on Observations and the U.S. CLIVAR Drought Experiments. **Journal of Climate**, v. 24, n. 6, p. 1801–1820, mar. 2011.

MO, K. C. e SCHEMM, J. E. Droughts and Persistent Wet Spells over the United States and Mexico. **Journal of Climate**, v. 21, n. 5, p. 980–994, mar. 2008.

NEXOJORNAL. **Onde é gerada a energia elétrica no Brasil**, 2016. Disponível em: <<http://nexojornal.com.br/grafico/2016/06/08/Onde-é-gerada-a-energia-elétrica-no-Brasil>>.

NOGUÉS-PAEGLE, J. e MO, K. C. Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279–291, fev. 1997.

POWER, S. *et al.* Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. **Climate Dynamics**, v. 15, n. 5, p. 319-324, 1999.

RAYNER, N. A. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, no. D14, p. DOI10.1029/2002JD002670, 2003.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, v. 6, n. 3, p. 293–335, 1986.

ROBERTSON, A. W. e MECHOSO, C. R. Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America. **Journal of Climate**, v. 11, p. 2570–2581, 1998.

RODRIGUEZ, D. A. e CAVALCANTI, I. F. A. Simulations of the Hydrological Cycle over Southern South America Using the CPTEC/COLA AGCM. **Journal of Hydrometeorology**, v. 7, n. 5, p. 916–936, out. 2006.

SABOIA, J. P. J. e GRIMM, A. M. **Variabilidade interdecadal de precipitação na América do Sul: características, impactos e mecanismos**. Universidade Federal do Paraná, 2010.

SELUCHI, M. E. e GARREAUD, R. D. Campos medios e processos físicos associados ao ciclo de vida da Baixa do Chaco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, 2012.

SANTOS, M. S. *et al.* Definição de limiares de secas e cálculo do índice de precipitação padronizada por meio de análise regional de frequências na bacia do alto São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos–RBRH**, p. v. 8, 2013.

TEIXEIRA, C. F. A. *et al.* Intensidade da seca utilizando índices de precipitação/Severity of drought using rainfall indices. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 3, p. 203, 2013.

THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, v. 86, n. 4, p. 117-122, 1958.

TRENBERTH, K. E. Some Effects of Finite Sample Size and Persistence on Meteorological Statistics. Part I: Autocorrelations. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 12, p. 2359–2368, dez. 1984.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*, 2. Ed. San Diego, CA: **Academic Press**, 2006; p. 463 – 507.

WMO. **Standardized Precipitation Index User Guide**, World Meteorological Organization, 2012. Disponível em: <[http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice\\_display&id=13682](http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=13682)>