



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL
- MESTRADO -

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO DO ALTO SÃO FRANCISCO (SUB-40) UTILIZANDO DADOS DO SENSOR PR/TRMM

por

Jacqueline Sobral de Araújo Passos

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Mestre*



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL
- MESTRADO -

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO DO ALTO SÃO
FRANCISCO (SUB-40) UTILIZANDO DADOS DO SENSOR PR/TRMM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Jacqueline Sobral de Araújo Passos

Orientador: Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

P289v Passos, Jacqueline Sobral de Araújo.
 Variabilidade espaço-temporal da precipitação do Alto São
 Francisco (sub-40) utilizando dados do sensor PR/TRMM /
 Jacqueline Sobral de Araújo Passos.- João Pessoa, 2015.
 106f. : il.
 Orientador: Celso Augusto Guimarães Santos
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
 1. Engenharia civil e ambiental. 2. Chuva - precipitação.
 2. Espacialização. 3. SPI. 4. Três Marias - reservatório - vazão.
 5. Cluster.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

JACQUELINE SOBRAL DE ARAÚJO PASSOS

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO DO ALTO SÃO FRANCISCO (SUB-40) UTILIZANDO DADOS DO SENSOR PR/TRMM

Dissertação aprovada em ____/____/____ como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Prof. Dr. Richarde Marques da Silva (UFPB – PPGECAM)

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva (UFPE)

*A meus pais, Arionaldo e Célia,
com muito amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, ser onipotente e onipresente, pelo dom da vida e por ter me dado força e coragem ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, que sempre acreditaram na minha capacidade e me apoiaram, incondicionalmente, mostrando-me que o caminho não é fácil, mas é possível. A minha mãe, Maria Célia S. de Araújo, exemplo de carinho e doação para com a família. Ao meu pai, Arionaldo A. de Araújo, homem que nunca mediu esforços para vê os filhos felizes e colocou a educação e o amor em primeiro lugar na vida dos filhos, conseguindo proporcionar-lhes não só escolarização, mas formar cidadãos íntegros para a sociedade.

Ao meu esposo, Edilson Junio Salustiano dos Passos, por toda a compreensão nos momentos de ausência e estímulo para conclusão deste estudo, apoiando-me nos momentos mais críticos.

Aos professores do PPGECA, pelos conhecimentos transmitidos durante a minha formação.

Ao meu orientador, Professor Dr. Celso A. G. Santos, por todo incentivo e dedicação para comigo. Como um verdadeiro educador, dispondo de muita paciência, conseguiu transmitir seus ensinamentos de forma plausível.

Ao Professor Dr. Richarde Marques da Silva, pela disponibilidade e atenção sempre que se fizeram necessários.

Aos membros da banca examinadora, Professor Dr. Richarde Marques da Silva e Professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pelas contribuições para a melhoria deste trabalho e por aceitarem o convite para participar deste momento.

A todos os meus colegas do PPGECA, pelo companheirismo durante nossa jornada em comum.

Ao Laboratório de Ensino, Pesquisa e Projetos em Análise Espacial – LEPPAN, por disponibilizar sua estrutura física para desenvolvimento deste estudo.

Aos bolsistas Reginaldo Moura Brasil Neto e Vanessa Wortmann Paulino, participante do Programa Institucional de Iniciação Científica – PIBIC, que sempre se mostraram prontos a ajudar e pelas contribuições dadas para enriquecimento do trabalho.

Enfim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a conclusão deste trabalho, o meu **Muito Obrigado!**

RESUMO

A precipitação, pela sua importância, é considerada uma das principais variáveis do ciclo hidrológico. Uma alternativa para coletar dados de chuva é utilizar precipitações obtidas por sensores/satélites. Dentre estes, a *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) permite a coleta com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Com isso, o objetivo do estudo é compreender, de forma mais detalhada, o comportamento e a distribuição da precipitação ao longo da bacia do Alto São Francisco (Sub-40), em período recente (1998–2013). A pesquisa foi realizada nas seguintes etapas: coleta de dados do TRMM para o período de 1998 a 2013 organizando-os em acumulados mensais e anuais; coleta dos dados de vazão do reservatório Três Marias; coleta de dados de altimetria SRTM; correlação diária entre os elementos de precipitação TRMM; analisar o comportamento da precipitação anual da Sub-40 frente aos dados altimétricos; identificar a quantidade de dias secos e úmidos consecutivos de cada ponto da grade utilizado; extração do Índice Padronizado de Precipitação - SPI para cada ponto (169 pontos); espacialização dos dados de precipitação acumulada anual e mensal, da correlação de chuva e vazão, dos dias secos e úmidos consecutivos, do Índice SPI e da análise de *cluster*. De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que os anos de maior e menor valor de precipitações acumuladas anuais foram respectivamente os anos de 2009 e 2012. Os meses mais secos foram os de junho a agosto, sendo julho o mês mais seco. Em contrapartida, os meses mais úmidos foram de novembro a janeiro, com maior precipitação ocorrendo em dezembro. Os dados de precipitação acumuladas anuais e mensais mostraram que a região nordeste da bacia chove menos e que o oeste e sul da bacia são mais úmidos. O tempo de resposta da precipitação frente à vazão afluente ao reservatório Três Marias é de quatro dias após a ocorrência de chuvas. A relação entre a precipitação e altimetria mostra que a maioria dos dados de precipitações acumuladas anuais é diretamente proporcional à altimetria, mas que em alguns casos ela apresenta pouca variabilidade em relação ao terreno. Com relação ao SPI, a partir dos mapas, produziram-se informações de SPI de maneira espacializada identificando a cada período as regiões de maiores e menores valores. Observando os mapas de *clusters* e dendrograma identificaram-se as regiões com maior e menor similaridade entre os dados de precipitação acumulada mensal. Por fim, o sensor TRMM se mostrou hábil na análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação sobre a bacia, representando de forma satisfatória os períodos secos e chuvosos. Com fácil aquisição e manuseio, os dados do satélite são uma alternativa viável para se coletar informações

pluviométricas com qualidade espacial e temporal, principalmente em regiões de difícil acesso ou em países em desenvolvimento.

PALAVRAS-CHAVE: chuva, espacialização, SPI, Três Marias, *cluster*.

ABSTRACT

The precipitation, due to its importance, is considered one of the main variables of the hydrological cycle. An alternative to collect rainfall data is using rainfall measurements by sensors/satellites. Among these kinds of alternative, the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) allows the collection with a spatial resolution $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Thus, the objective of the study is to understand, in more detail, the behavior and distribution of rainfall throughout the Upper São Francisco basin (Sub-40), in a recent period (1998-2013). The survey was conducted in the following steps: collection of TRMM rainfall data from 1998 to 2013 organizing them monthly and yearly; getting Três Marias reservoir in flow data; getting altimetry SRTM data; analyzing the correlation between the TRMM precipitation and the inflows to Três Marias reservoir; generating surface profiles to compare with the precipitation data, analyzing the number of consecutive dry days and consecutive wet days; computing the Standardized Precipitation Index - SPI for each point (169 points); spatial distribution of annual and monthly accumulated rainfall data, the correlation of rainfall and flow, of consecutive wet and dry days, the SPI index and cluster analysis. According to the results, it can be concluded that the years of highest and lowest value of annual rainfall depth was respectively 2009 and 2012. The driest months are June to August, and July is the driest one. In contrast, the wettest months are from November to January, and most rainy month is December. The annual and monthly precipitation depth showed that the northeast region of the basin rains less and the western and southern basin are wetter. The precipitation response to the inflow to the Três Marias reservoir is four days after the rainfall occurs. The relation between precipitation and altimetry shows that most of the annual rainfall depth is directly proportional to altimetry, but in some cases it shows little variability in the ground. Regarding the SPI, it was possible to calculate the beginning, end, intensity and magnitude of each dry and wet season. From the maps, SPI spatial information was produced in order to identify for each period the regions with highest and lowest values. By means of the map and dendrogram clusters, regions with higher and lower similarity between the monthly accumulated rainfall data were identified. Finally, the TRMM sensor proved useful in the analysis of spatial and temporal variability of precipitation over the studied basin, accounting satisfactorily dry and rainy periods. With easy acquisition and handling, satellite data is a viable alternative to collect precipitation data with spatial and temporal quality, especially in areas of difficult access or in developing countries.

KEYWORDS: rainfall, spatialization, SPI, Três Marias, cluster.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparação entre a captação de dados de precipitação de satélites e postos pluviométricos	4
Figura 2.2: Representação esquemática de satélite TRMM e os sensores a bordo	8
Figura 3.1: Localização da Sub-40 no Brasil	24
Figura 3.2: Sub Bacias do Rio São Francisco	24
Figura 3.3: Grade de pontos TRMM na Sub-40.....	25
Figura 3.4: Classificação SPI e sua relação com a curva normal	28
Figura 4.1: Mapa da Precipitação Média Anual do período de 1998 a 2013	31
Figura 4.2: Precipitação Anual de (A) 2009 e (B) 2012	32
Figura 4.3: Precipitação média mensal e precipitação acumulada anual	33
Figura 4.4: Distribuição da precipitação média do mês de julho	34
Figura 4.5: Distribuição da precipitação média do mês de dezembro	34
Figura 4.6: Precipitação Mensal de Dezembro de 2011	34
Figura 4.7: Precipitação Mensal de Junho de 2002	34
Figura 4.8: Gráfico do comportamento das correlações médias	35
Figura 4.9: Correlação usando lag-0	36
Figura 4.10: Correlação usando lag-1	36
Figura 4.11: Correlação usando lag-2	36
Figura 4.12: Correlação usando lag-3	36
Figura 4.13: Correlação usando lag-4	36
Figura 4.14: Correlação usando lag-5	36
Figura 4.15: Correlação usando lag-6	36
Figura 4.16: Correlação usando lag-7	36
Figura 4.17: Correlação usando lag-8	37
Figura 4.18: Correlação usando lag-9	37
Figura 4.19: Correlação usando lag-18	37
Figura 4.20: Correlação usando lag-23	37
Figura 4.21: Diferença entre as correlações com três e quatro dias de disparidade	37
Figura 4.22: Diferença entre as correlações com cinco e quatro dias de disparidade	37
Figura 4.23: (A) Mapa de Altimetria da Sub-40 e de (B) Média de Precipitação Acumulada Anual	38

Figura 4.24: Mapa de altimetria com cortes dos perfis AA' e BB'	39
Figura 4.25: Perfis AA' e BB' (vermelho) com suas respectivas precipitações acumuladas (azul) do ano de 1998	39
Figura 4.26: CDD do ano de 2009	40
Figura 4.27: CDD do ano de 2011	40
Figura 4.28: CDD do ano de 1999	41
Figura 4.29: CDD do ano de 2012	41
Figura 4.30: Séries temporais dos CDD para os 169 pontos (1998–2013)	42
Figura 4.31: Dendrograma do CDD	42
Figura 4.32: Séries temporais dos valores de CDD divididas em 10 clusters (1998–2013) ...	42
Figura 4.33: Espacialização dos <i>clusters</i> de CDD	43
Figura 4.34: Espacialização do CWD nos anos de 1999, 2007 e 2012	43
Figura 4.35: Espacialização do CWD no ano de 2008	44
Figura 4.36: Séries temporais dos CWDs para os 169 pontos (1998–2013)	44
Figura 4.37: Dendrograma de 10 clusters do CWD	45
Figura 4.38: Séries temporais dos valores de CWD divididas em 10 clusters (1998-2013) ...	45
Figura 4.39: Espacialização dos <i>clusters</i> de CWD	46
Figura 4.40: Variação ao longo das longitudes da declividade da linha de tendência dos CDD..	46
Figura 4.41: Variação ao longo das longitudes da declividade da linha de tendência dos CWD.	47
Figura 4.42: Espacialização da declividade da linha de tendência do (A) CDD e (B) CWD ..	47
Figura 4.43: Diferença entre os valores de declividade da linha de tendência CDD e CWD ..	48
Figura 4.44: SPI-1 em março de 2007	49
Figura 4.45: SPI-1 em dezembro de 2007	49
Figura 4.46: SPI-1 em fevereiro de 2007	49
Figura 4.47: SPI-1 em julho de 2007	49
Figura 4.48: (A) SPI-1 e (B) SPI-48 em abril de 2013	49
Figura 4.49: SPI-3 dos meses de fevereiro, março e abril do ano de 2001	50
Figura 4.50: SPI-3 dos meses de fevereiro, março e abril do ano de 2004	50
Figura 4.51: SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 do mês de maio do ano de 2007	50
Figura 4.52: SPI-6 dos meses de março, abril, maio, junho e julho do ano de 2001	51
Figura 4.53: SPI-6 do mês de dezembro do ano de 2012	51

Figura 4.54: Os SPI-9 referentes de janeiro a setembro do ano de 2001	52
Figura 4.55: Os SPI-9 referentes de janeiro a setembro do ano de 2007	52
Figura 4.56: Percentagem dos dados SPI-1 para classificação Extremamente Úmido	53
Figura 4.57: Percentagem dos dados SPI-24 para classificação Extremamente Úmido	53
Figura 4.58: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Severamente Úmido	54
Figura 4.59: Percentagem dos dados SPI-24 para classificação Severamente Úmido	54
Figura 4.60: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Moderadamente Úmido	55
Figura 4.61: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Moderadamente Úmido	55
Figura 4.62: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Moderadamente Seco	55
Figura 4.63: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Moderadamente Seco	55
Figura 4.64: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Suavemente Úmido	56
Figura 4.65: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Suavemente Seco.....	56
Figura 4.66: Percentagem dos dados SPI-9 para classificação Severamente Seco	57
Figura 4.67: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Severamente Seco	57
Figura 4.68: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Extremamente Seco	57
Figura 4.69: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Extremamente Seco	57
Figura 4.70: Dendrograma de 30 <i>clusters</i> dos dados de precipitação acumulada mensal TRMM	58
Figura 4.71: Mapas de dois a onze e 30 <i>clusters</i> considerando a distância de correlação entre as precipitações mensais de 1998 a 2013	59
Figura 4.72: Mapa de 30 <i>clusters</i> com pontos de coleta de dados TRMM	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:Algumas características dos principais satélites que captam estimativas de precipitação	6
Tabela 2.2: SPI e probabilidades acumulativas	16
Tabela 3.1: Definição de categorias de seca para valores SPI	28

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Objetivos Específicos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Estimativas de Precipitação	3
2.2. Métodos de Coleta de Dados de Chuva	3
2.3. Breve Histórico sobre Precipitação por Satélites	4
2.4. Dados TRMM	6
2.5. Alguns estudos realizados com dados TRMM	9
2.6. Índices de Seca	12
2.6.1. Índice Padronizado de Precipitação – SPI	14
2.6.2. SPI-1	17
2.6.3. SPI-3	18
2.6.4. SPI-6	19
2.6.5. SPI-9	19
2.6.6. SPI-12 ou mais	19
2.6.7. Vantagens do Uso do SPI	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1. Visão Geral da Metodologia	22
3.2. Área de Estudo	22
3.3. Dados de Precipitação do TRMM	24
3.4. Dados de Altimetria	25
3.5. Dados de Vazão	26

3.6. Correlação entre Chuva e Vazão	26
3.7. Dias Secos e Úmidos Consecutivos (CDD e CWD)	27
3.8. SPI	27
3.9. Análise de <i>Clusters</i>	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Precipitação Total Anual	31
4.2. Precipitação Média Mensal	32
4.3. Correlação entre Chuva e Vazão	35
4.4. Análise Comparativa entre Altimetria e Precipitação Anual	38
4.5. Dias Secos e Úmidos Consecutivos	40
4.6. Análise Espacial do SPI	48
4.7. Dendrograma e Mapas de <i>Clusters</i>	58
5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
5.1 Conclusões	61
5.2. Recomendações	62
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A	69

1. INTRODUÇÃO

A precipitação é constantemente utilizada em diversas áreas do conhecimento por ser considerada uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico. A distribuição espacial e temporal da mesma exerce influência direta sobre diversos setores da economia de uma região. Com isso, torna-se necessário a obtenção de uma rede densa de dados confiáveis de precipitação. Porém, em áreas com baixa densidade de dados de precipitação e onde as redes de observações não foram projetadas seguindo determinados critérios, avaliações sobre esses dados tornam-se necessárias (Muthuwattaet *et al.*, 2010). A distribuição regular de pluviômetros está apenas concentrada em alguns países desenvolvidos e ainda são bastante escassos em países em desenvolvimento ou em partes remotas do mundo (Adler *et al.*, 2003; Su *et al.*, 2008).

Uma alternativa para coletar dados de chuva é utilizar precipitações medidas por satélites. Estes têm o potencial de observar informações de forma sistemática sobre grandes domínios espaciais. Portanto, uma série temporal de precipitação obtida através de imagens de satélite proporciona a oportunidade coletar dados de chuva em áreas com poucos postos pluviométricos, ou que estejam mal calibrados e contendo falhas. Segundo Collischonn (2007), destacam-se para estes fins os satélites da série GOES (*Geostationary Operational Environmental System*) e o satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), este último com o objetivo específico de medição de precipitação nos trópicos.

O TRMM é uma missão conjunta entre a NASA e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), projetada para medir a precipitação para pesquisas de clima. TRMM é um satélite de investigação destinada a melhorar a nossa compreensão da distribuição e variabilidade da precipitação nos trópicos, como parte do ciclo da água no atual sistema climático (NASA, 2013). Este satélite tem instrumentos para observação de chuvas nas zonas tropicais e subtropicais, que representam aproximadamente dois terços do total de chuvas globais. Os dados de observação adquiridos com o TRMM têm um valor significativo para o estudo da mudança climática global e contribuem para a compreensão do mecanismo climático, explicação de tempo incomum, como El Niño, e previsão de inundações para prevenção de desastres (JAXA, 2013). Estes dados também podem ser utilizados em monitoramento de bacias hidrográficas. Neste estudo, os seus produtos serão aplicados à bacia do Alto São Francisco.

A bacia do rio São Francisco, uma das mais importantes do país, estende-se pelos Estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Goiás e o Distrito Federal, pertencentes às regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Esta bacia tem o curso principal do rio com extensões de 2.814 km, entre as cabeceiras, no município de São Roque de Minas (MG), e de 2.863 km pelo rio Samburá, no município de Medeiros (MG) e a foz, entre os estados de Alagoas e Sergipe, onde se observa uma vazão média anual de $2.980 \text{ m}^3/\text{s}$, o que corresponde a uma descarga média anual da ordem de 94 bilhões de m^3 (CODEVASF, 2013). A bacia se subdivide em quatro regiões: Alto São Francisco (das nascentes até Pirapoca-MG), Médio São Francisco (Pirapoca-MG até Sobradinho-BA), Sub-médio São Francisco (Sobradinho-BA até Paulo Afonso-BA) e Baixo São Francisco (Paulo Afonso-BA até o Oceano Atlântico). Na região do Alto São Francisco estão localizadas a Sub-40 e Sub-41, sendo a Sub-40 a área de estudo do presente trabalho.

Com isso, espera-se compreender, de forma mais detalhada, o comportamento e a distribuição da precipitação ao longo da bacia do Alto São Francisco (Sub-40), no período de 1998 e 2013, utilizando dados estimados pelo sensor PR/TRMM.

1.1. Objetivos

Analisar a distribuição espacial e temporal da precipitação estimada pelo satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM).

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar as regiões com maiores e menores índices pluviométricos;
- Analisar o comportamento da precipitação anual da Sub-40 frente aos dados altimétricos da bacia;
- Verificar a correlação entre a precipitação e vazão diárias, identificando o tempo de resposta da precipitação na vazão do Reservatório Três Marias;
- Analisar a quantidade de dias secos e úmidos consecutivos de cada ponto da grade utilizada;
- Realizar uma análise de seca na bacia para a resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ através do Índice de Precipitação Padronizada – SPI;
- Identificar regiões com maior similaridade entre os dados de precipitação acumulada mensal, através de análise de *cluster*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estimativas de Precipitação

Segundo Villela e Mattos (1975), para o hidrologista, a precipitação, em geral, é definida como todas as formas de umidade provenientes da atmosfera e depositadas na superfície terrestre como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. Neste trabalho, é dada ênfase a precipitação na forma de chuva.

Entender a variabilidade da precipitação auxilia no planejamento de ações de combate a degradação do meio ambiente, preservando-o e aplicando medidas para o desenvolvimento sustentável de uma região, sobretudo em episódios adversos (SILVA *et al.*, 2012). A chuva é uma das principais formas de suprimento hídrico para as atividades humanas e econômicas, principalmente na agricultura, setor em que a precipitação é usada, direta ou indiretamente, em processos de tomada de decisão, como segue: no manejo da irrigação, no risco de incêndios, na previsão de geadas, no zoneamento agroclimático, na ocorrência de pragas e doenças, na classificação climática, entre outros.

Dentre os parâmetros meteorológicos, a precipitação é a que apresenta a maior variabilidade espaço-temporal sendo, portanto, o de maior dificuldade de estimativa.

2.2. Métodos de Coleta de Dados de Chuva

Atualmente, os principais métodos de coleta de dados de precipitação são através de postos pluviométricos, radares e provenientes de dados de satélites meteorológicos. Todos os métodos estão sujeitos a erros.

Nos pluviômetros, as medições de chuva possuem baixa representatividade espacial, visto que são informações pontuais, e a ação do vento pode causar uma diminuição da coleta de gotas pelo pluviômetro (CALVETTI *et al.*, 2005). A precisão das informações dos pluviômetros é, também, influenciada por outros fatores, tais como: a elevação e a exposição do equipamento. Outro problema é que a chuva registrada depende da exposição do instrumento e da direção de queda das gotas de chuva, como também do vento. Alguns estudos revelam que as medições observadas em pluviômetros têm forte influência local e não capturam completamente a variabilidade espacial da chuva (COLLISCHONN, 2006; PEREIRA *et al.*, 2013; WAGNER *et al.*, 2012).

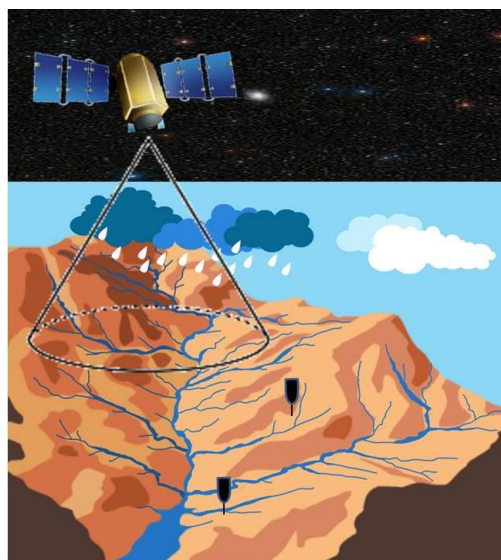


Figura 2.1: Comparação entre a captação de dados de precipitação de satélites e postos pluviométricos (FENSTERSEIFER, 2013, p. 30).

A heterogeneidade, tanto espacial quanto temporal, é peculiar à precipitação e, assim, o uso de pluviômetros e de radares requer uma rede extensa, bem mantida e calibrada, o que em geral está fora do alcance da maioria dos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Estes problemas são acentuados, especialmente em regiões montanhosas e/ou esparsamente ocupadas. Atualmente, apenas cerca de 2% do globo é monitorado por radares meteorológicos (VICENTE e FERREIRA, 2008). Além dos radares e pluviômetros, outra alternativa para obtenção de dados de precipitação são os satélites.

Os satélites utilizam sensores que são equipamentos capazes de coletar energia proveniente do objeto, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações (INPE, 2015). Dentre seus principais usos, está a captação de estimativas de chuvas, detectar os níveis de desmatamento, monitoramento da temperatura do oceano, classificação de tipos de nuvens, corpos d'água, neve e poluição (NOAA, 2014).

2.3. Breve Histórico sobre Precipitação por Satélites

Desde a década de 60, com o lançamento do primeiro satélite meteorológico, o TIROS I (*Television Infrared Observation Satellite*), metodologias e algoritmos para concepção de estimativas de precipitação estão sendo desenvolvidos. Estes satélites surgiram como uma

fonte alternativa para estimar precipitações devido à baixa densidade de medidores pluviométricos em diversas regiões do planeta.

Todos os satélites possuem resolução espacial ou amostragem espacial que é o nível de detalhes que se pode ver numa imagem. As resoluções espaciais diferenciam-se de acordo com a finalidade para o qual foram concebidos. Um problema recorrente das primeiras estimativas de chuva de satélite é que estes dados não tinham resolução espaço-temporal compatíveis com as escalas de trabalhos da hidrologia, e, apenas nos últimos anos, tais estimativas alcançaram níveis de precisão aceitáveis.

Atualmente, a diversidade de satélites tem proporcionado uma maior facilidade ao acesso a uma grande variedade de produtos de estimativas de chuva e, com a chegada da *Global Precipitation Mission* (GPM), missão internacional que compreende um consórcio de agências espaciais internacionais, incluindo o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), a Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO), a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), a Organização Européia para a Exploração de Satélites meteorológicos (EUMETSAT) e outros, esse número tende a aumentar.

A GPM vai dispor de um grande número de sensores micro-ondas passivos a bordo dos satélites, possibilitando o desenvolvimento de produtos que detectem até as precipitações mais leves de baixa intensidade ($<0,5$ mm/hora) (NASA, 2013).

Apesar das possíveis imprecisões da obtenção de dados de precipitação através de satélites, diversas pesquisas mostram fatores positivos do uso dos sensores na previsão e estimativas de chuvas. Embora os dados provenientes de sensores remotos estejam sujeitos a erros de magnitude variável, conforme o sensor, região e outros fatores, segundo Collischonn e Paz (2011), o uso dessas estimativas tem duas grandes vantagens em relação ao uso de medição via redes de pluviômetros e pluviógrafos, são elas: a maior velocidade de obtenção e facilidade de disponibilização da informação e; a produção da informação na forma de um campo espacial de precipitação que abrange grandes áreas.

De acordo com as pesquisas realizadas por Conti e Mendes (2003), Araújo e Guetter (2007), Collischonn *et al.* (2007) e Nobrega *et al.* (2008), entre outros, percebe-se que nas últimas três décadas foram realizados avanços consideráveis nas pesquisas relacionadas ao uso de satélites ambientais para estimativas de chuva. Esses avanços geram maior disponibilidade e a qualidade das estimativas de chuva por satélite que passaram de objeto de pesquisa para tornarem-se produtos operacionais disseminados por entidades de hidrologia e meteorologia. Esses produtos de estimativas de chuva por satélite possuem diversas

resoluções temporais e espaciais e são disponibilizados geralmente de forma gratuita pelas instituições desenvolvedoras.

Na Tabela 2.1 são descritos brevemente alguns dos principais tipos de satélites e sensores utilizados para estimativa da chuva com suas respectivas características. Posteriormente, são descritos em maior detalhe o TRMM.

Tabela 2.1: Algumas características dos principais satélites de estimativas de precipitação.

Satélite	Órbita	Principais Sensores	Altitude (km)	Resolução Espacial (km)	Operação	Abrangência
GOES	Geoest.	VISSR	35.800	1,0 4,0 8,0	NOAA	1/3 da superfície terrestre
METEOS AT	Geoest.	VISSR	35.800	2,5 5,0	EUMETSAT	42% da superfície terrestre
NOAA	Polar	AVHRR AMSU MHS	833	1,10	NOAA NASA	Global
TERRA/ AQUA	Polar	MODIS HSB	705	0,25 0,50 1,00	NASA	Global
GMS	Geoest.	VISSR	35.800	1,25 5,00	AMJ	Hemisfério Norte
TRMM	Polar	TMI VIRS PR	403	2,10 4,30 5,00	NASA	Global
DMSP	Polar	SSM/I	850	12,50 25,00	NASA	Global

Fonte: FENSTERSEIFER (2013).

2.4. Dados TRMM

Atualmente, estudos utilizando dados de satélites estão em constante desenvolvimento. Estes dados têm se mostrado uma alternativa prática e rápida em diversos campos das ciências geoambientais. Com isso, o desenvolvimento de satélites que coletam dados de precipitação se faz cada vez mais presente, visto que em muitas regiões do mundo, principalmente países em desenvolvimento, ainda sofrem com a falta e/ou má qualidade das informações coletadas em postos pluviométricos. Dentre os satélites de precipitação, o TRMM é visto como uma possibilidade para tal realidade.

Como já dito, o TRMM é uma missão, lançada em 28 de novembro de 1997, realizada entre a NASA e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), projetada para

medir a precipitação e desenvolver pesquisas climáticas. Este satélite foi destinado a melhorar a compreensão da distribuição e variabilidade da precipitação nos trópicos. Em regiões tropicais e subtropicais da Terra, o TRMM fornece grande número de informações sobre a associação de chuvas e sua liberação de calor, ajudando na compreensão da alimentação da circulação atmosférica global que se molda tanto com tempo quanto com o clima. Em coordenação com outros satélites do Sistema de Observação da Terra pertencente à NASA, fornece importantes informações de precipitação para aumentar a nossa compreensão das interações entre o vapor d'água, nuvens e precipitação, que são fundamentais para a regulação do clima da Terra (NASA, 2013).

O TRMM possui órbita polar com uma inclinação de 35° e com altitude de 403 km (a partir de 2001) com um período de 92,5 minutos, ou seja, gira ao redor do globo aproximadamente 16 vezes por dia (Figura 2.2). A baixa órbita do satélite TRMM (inicialmente 350 km, e após 2001 aproximadamente 403 km) permite que o período de translação seja curto permitindo resolução espacial e temporal relativamente alta (Nóbrega *et al.*, 2008).

Os principais sensores a bordo do TRMM referente à estimativa da precipitação são *Microwave Imager* (TMI), *Precipitation Radar* (PR) e *Visible and Infrared Radiometer System* (VIRS). Além destes há ainda os sensores para imageamento de relâmpagos (LIS) e sensor de energia radiante da superfície terrestre e de nuvens (CERES) (Nóbrega *et al.*, 2008). O PR, TMI e VIRS são sensores de medição da chuva, mas o princípio de observação e a largura da faixa de cada um dos sensores são diferentes uns dos outros. PR é um meio de recepção de sinais de retorno da chuva, mede três dimensões de distribuição de chuvas depois que transmite um sinal micro-ondas (JAXA, 2013). Os instrumentos TMI, PR e VIRS medem, respectivamente, as seguintes grandezas primárias: temperatura, potência e radiância. A partir de combinações sucessivas entre essas medidas e seu cruzamento com produtos de outros satélites, são obtidas as estimativas referentes à precipitação, cuja resolução temporal e espacial depende do refinamento da estimativa.

Dentre os sensores, o TMI é o principal instrumento na medição da precipitação, obtida através da lei inversa de Planck e da correlação com temperatura de topo de nuvem. O instrumento imagea com um ângulo NADIR de 49° , o que resulta em um ângulo de incidência na superfície terrestre de $52,8^\circ$. Para refinar as estimativas, afetadas pelas diferentes formações de nuvens, faz-se uso do PR, que é o primeiro radar meteorológico a ser lançado a bordo de um satélite, permitindo produzir mapas tridimensionais de estruturas precipitantes.

Esse radar é capaz de detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de menos de $0,7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (KAWANISHI *et al.*, 2000 apud COLLISCHONN, 2006).

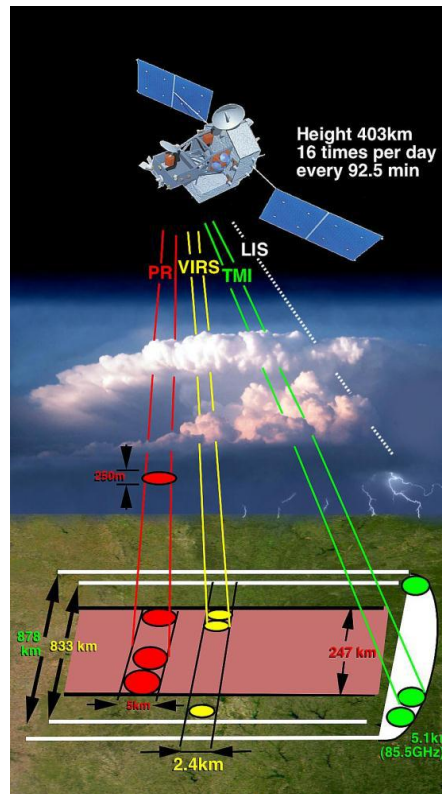


Figura 2.2: Representação esquemática de satélite TRMM e os sensores a bordo. Fonte: NASA (2013).

O projeto TRMM gera diversos produtos (estimativas) de acordo com a combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo. O produto utilizado neste trabalho será o 3B42, o qual usa estimativas de precipitação por micro-ondas do TMI, corrigidas através de informações sobre a estrutura vertical das nuvens, obtidas do PR. A melhor resolução espacial para estimativas geradas através do 3B42 é de $0,25^\circ$.

Dados TRMM proporcionam observações de precipitação na escala global, incluindo a região tropical do oceano onde os pontos de observação são raros. Espera-se que as informações armazenadas pela observação TRMM para a pesquisa sobre mudança climática contribuía para as investigações sobre variações climáticas e tempo anormal envolvendo El Nino, e a previsão de inundação para evitar desastres (JAXA, 2013).

2.5. Alguns estudos realizados com dados TRMM

Vários trabalhos comparativos entre dados de estimativas TRMM e informações coletadas em postos pluviométricos foram realizados, comprovando a viabilidade de utilização de dados TRMM para estimativas de chuvas (Collischonn, 2006; Collischonn *et al.*, 2007; Collischonn *et al.*, 2008; Condon *et al.*, 2010; Nóbrega *et al.* 2008; Souza *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013).

Collischonn (2006) avaliou em que medida as estimativas de precipitação obtidas a partir do satélite TRMM podem ser úteis quando usadas como dados de entrada do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, sozinhas ou associadas com os dados da rede pluviométrica. O mesmo fez comparações entre os dados gerados aplicados a duas bacias, uma com densa rede de postos pluviométricos (bacia do Rio São Francisco até UHE Três Marias) e outra com baixa rede de postos (bacia do rio Tapajós). Os resultados foram analisados em termos de vazão simulada, representando a integração de todos os fenômenos hidrológicos na bacia. O modelo alternativo, usado com estimativas de satélite, teve desempenho pouco inferior ou mesmo similar ao modelo convencional, usado com dados de pluviômetros. Os resultados obtidos pela rede e por satélites mostraram valores próximos.

Collischonn *et al.* (2007) analisaram os campos de precipitação e as precipitações médias obtidas do satélite TRMM, na bacia do Paraguai Superior, a qual sofre com alternância natural entre secas e cheias como também com incertezas quanto à precipitação devido ao baixo número de pluviômetros na bacia. Os dados TRMM foram comparados com os obtidos a partir de dados de pluviômetros no solo sobre a bacia do Alto Paraguai até a Fazenda Descalvados, apresentando resultados satisfatórios.

Collischonn *et al.* (2008) estudaram as estimativas de precipitação TRMM sobre a bacia fluvial do rio Tapajó, a maior afluente do Amazonas. Estimativas a cada três horas foram agregadas a valores diários de precipitação TRMM e comparados com dados de captura diária de precipitação de postos pluviométricos. Os dois tipos de dados foram interpolados para uma grade regular e usados como entrada para modelo hidrológico MGB para toda a bacia. Os hidrogramas calculados foram comparados com observações em vários medidores de fluxo ao longo do Tapajós e seus principais afluentes, mostrando também que os hidrogramas calculados baseados em TRMM são comparáveis com os obtidos usando dados pluviométricos.

Nóbrega *et al.* (2008) demonstraram que a utilização de estimativas de precipitação geradas pelo satélite TRMM como variável de entrada em um modelo hidrológico semidistribuído, Slurp, indica resultados satisfatórios comparados a dados de postos pluviométricos. Utilizaram, ainda, na pesquisa, dados diários de temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e umidade relativa do ar, oriundos de estações meteorológicas; dados de cobertura do solo, derivados de imagens Landsat 5; dados fluviométricos diários e; dados do produto 3B42 (TRMM). Os resultados indicaram que o modelo foi adequado ao simular a vazão na bacia do rio Jamari, com coeficiente de determinação igual a 0,82, apresentando vazões média, máxima e mínima coerentes com a de outros autores que utilizaram precipitação na superfície.

Souza *et al.* (2008), utilizando dados de quatro estações meteorológicas e seis pluviômetros localizados na bacia do rio Jamari, no estado de Rondônia e comparando com os dados do algoritmo 3B42 do TRMM, realizaram análise estatística com base no coeficiente de correlação entre as estações meteorológicas, postos pluviométricos e estimados pelo 3B42. Os resultados indicaram que o TRMM se correlaciona melhor com uma rede mais densa de pluviômetro, até mesmo do que as estações meteorológicas comparadas com os pluviômetros. Quando comparados com dados acumulados ao longo do período estudado, os valores do TRMM foram praticamente idênticos aos da rede de pluviômetros.

Para regiões montanhosas (acima de 3.000 m), Condom *et al.* (2010) realizaram, nos Andes peruanos, comparações entre dados de precipitação mensal *in situ* (1998–2007) e 3B43 (TRMM). Eles propuseram o uso de modelos de correção multiplicativos para os dados TRMM 3B43 para viabilizar seu uso, pois em regiões com grande altitude o TRMM tende a subestimar os dados de precipitação.

Pereira *et al.* (2013) desenvolveram uma análise com dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil, no período compreendido entre 1998 e 2010. Os resultados indicaram que os dados provenientes do TRMM e das estações meteorológicas apresentam uma concordância de aproximadamente 97% (significante a $p < 0,05$; teste t-student). Ainda, as análises mensais indicam que a raiz do erro quadrático médio (RMSE) possui valores médios entre 17 ± 10 mm. Além disso, os dados do TRMM apresentam a tendência média de superestimar a precipitação mensal em 15%. Contudo, as estimativas de precipitação apresentam variação sazonal muito similar à apresentada pelos dados observados nas estações meteorológicas.

Soares (2014) avaliou o potencial das estimativas de chuva do satélite TRMM (produto 3B42) para representar a variabilidade espaço-temporal da precipitação no Estado da Paraíba, no Nordeste do Brasil. No estudo consideraram-se séries temporais de dados diários para um período de 14 anos (1998 – 2011) referentes a 269 postos pluviométricos e dados estimados pelo satélite TRMM numa malha de 198 pontos que cobrem o Estado da Paraíba. As comparações foram realizadas considerando a chuva em diferentes períodos: diário, três dias, sete dias e mensal. Os resultados indicaram que o satélite TRMM apresenta melhores estimativas quando os dados estão acumulados em intervalos maiores de tempo, ou seja, os dados mensais foram os que tiveram melhor correlação entre os dados TRMM e de pluviômetros. As estimativas TRMM apresentaram bom desempenho para reproduzir as chuvas observadas em pluviômetros no Estado da Paraíba.

Quanto a análises comparativas entre diferentes métodos de coleta de dados de precipitação, Asadullah *et al.* (2008) estudaram o desempenho de diferentes produtos: TRMM 3B42, CMORPH, TAMSAT, RFE 2.0 e PERSIANN onde os dados TRMM 3B42 e os produtos TAMSAT mostraram maior similaridade para avaliar dados na maioria dos aspectos da estimativa de chuva.

Santos (2014) estudou o desempenho dos campos de chuva estimados pelo satélite TRMM na Paraíba, para fins de modelagem hidrológica distribuída. Compararam-se as informações de chuva do algoritmo 3B42 da Versão 7, do sensor orbital Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) com as informações históricas dos postos pluviométricos entre os anos de 1998 a 2011. Seguiram-se dois vieses analíticos. No primeiro momento, verificou-se a similaridade espaço-temporal ao nível do pixel (pixel a pixel) no que se denomina primeira abordagem (A1); e no segundo, verificou-se a similaridade dos resultados sob faixas quantitativas de chuva, no que se nomeia segunda abordagem (A2). Como resultados na abordagem analítica A1, o TRMM apresentou bons desempenhos às medidas de concordância para eventos de correto negativos. Segundo a abordagem A2 os desempenhos apresentados corroboraram para maiores erros da estimativa do sensor.

A partir do que foi exposto acima, é possível demonstrar a confiabilidade dos dados TRMM propondo-se a aplicação destes dados para gerar mapas espaço-temporais de precipitação para a Sub-40 e comparar diversos índices de seca e suas relações. É importante observar que, diferente de Collischonn *et al.* (2008), que tinham como objetivo usar dados do TRMM como entrada em modelos hidrológicos, o presente trabalho tem como objetivo

avaliar a distribuição espaço-temporal da pluviometria sobre uma área que inclui a Sub-40 em um período recente de 16 anos consecutivos, correspondente a 1998–2013.

2.6. Índices de Seca

A seca, fenômeno comumente estudado no mundo todo, ainda é difícil de ser explicado, visto que índices de precipitação considerados como seca em uma região podem não ser em outra, ou seja, para uma cidade que ocorre baixa precipitação certo período de estiagem pode não ser considerado como seca.

Segundo o *National Drought Mitigation Center* - NDMC (2013), de modo geral, a seca origina-se a partir de uma deficiência de precipitação durante um período prolongado de tempo - geralmente uma estação do ano ou mais - resultando numa falta de água para alguma atividade, grupo ou setor ambiental. Seus impactos resultam da interação entre o evento natural (menos precipitação do que o esperado) e a demanda de pessoas para o abastecimento de água e atividades humanas, que podem aumentar os impactos da seca. Devido à seca não ser encarada apenas como um fenômeno físico, geralmente é definida tanto conceitualmente quanto operacionalmente.

Definições conceituais e operacionais com relação à seca podem ser importantes no estabelecimento de políticas de seca. Tais definições ajudam a identificar o início, intensidade, duração e o fim das secas. A falta de definição de quando se inicia um período de seca interfere em todas as atividades produtivas, e isso é a principal razão pela qual os formuladores de políticas, planejadores de recursos e outros têm dificuldade para reconhecer e planejar para períodos de seca como eles fazem para outros desastres naturais. Na verdade, a maioria dos estudiosos sobre seca já confiou em índices matemáticos para decidir quando começar a implementar ações para conservação da água ou medidas atenuantes para seca. Medidas operacionais podem também ser usadas para analisar a frequência, intensidade e duração da seca de um determinado período histórico.

Tais definições, no entanto, exigem dados meteorológicos em escalas de tempo de hora em hora, diariamente, mensalmente, ou outros dados de impacto (por exemplo, o rendimento da cultura), dependendo da natureza da definição a ser aplicado. O desenvolvimento de mapeamento de períodos e regiões suscetíveis à ocorrência de seca proporciona uma maior compreensão de suas características e da probabilidade de recorrência em vários níveis de gravidade. Informação deste tipo é extremamente benéfica para o

desenvolvimento de estratégias de medidas mitigadoras e planos de preparação (NDMC, 1013).

Existem diversas maneiras de se definir os tipos de seca, dependendo principalmente da temática da abordagem. Essas abordagens podem ser relacionadas à precipitação, agricultura, hidrologia e a socioeconômica. Sendo assim, vários autores (WILHITE e GLANTZ, 1987; BYUN e WILHITE, 1999; MCKEE et al., 1993) definiram quatro tipos de secas: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica.

A seca meteorológica, segundo Fernandes (2009) é expressa apenas com base no grau de secura e na duração do período seco comparados a algum estado “normal”, ou seja, é caracterizada pelo déficit da precipitação em relação ao valor normal. Caracteriza-se pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação. Esse tipo de seca existe quando numa determinada região ocorre precipitações abaixo dos 70% a 75% do valor normal durante um período prolongado (BRITO e JULIAIA, 2006).

Já a seca hidrológica está relacionada com a redução dos níveis médios de água em reservatórios de superfície e subterrâneos por um determinado período de tempo, podendo ser de dias, semanas, meses ou anos sucessivos. A seca hidrológica traz consequências como a redução de abastecimento de água nos centros urbanos, industriais, nos sistemas de irrigação e na produção de energia elétrica.

A seca agrícola está basicamente associada à disponibilidade de água no solo para suportar o crescimento e desenvolvimento das plantas. A umidade deficiente no solo junto à cultura pode afetar a germinação, o crescimento e o desenvolvimento da planta, conduzindo à redução do rendimento final. A seca agrícola geralmente manifesta-se após a seca meteorológica, mas antes da seca hidrológica (PIRES, 2003).

Por último, ocorre a seca socioeconômica, que impacta os setores sociais, ambientais e econômicos. A dimensão e a gravidade do problema são basicamente dependentes da extensão e da duração da seca meteorológica.

Para auxiliar na definição de períodos de seca, índices de seca são os mais amplamente utilizados, porém é difícil estabelecer um índice único e universal (Heim, 2002). Dentre estes índices estão o Índice de Palmer (PDSI), SPI (*Standardized Precipitation Index*) e SPEI (*Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index*).

O Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) é um dos índices mais utilizados e mundialmente reconhecidos para quantificação da seca. Palmer (1965) considera que o total

de precipitação requerida para manter uma área em um determinado período sob condições de economia estável é dependente da média dos elementos meteorológicos, das condições meteorológicas dos meses precedentes e do mês atual para a área em questão. Basea-se nas médias históricas de evapotranspiração, recarga de água no solo, escoamento e perda de umidade do solo.

Já o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), da mesma forma que o PDSI, esse índice é negativo para a seca, e positivo para condições de chuva. Mas o SPI é um índice de probabilidade que considera apenas a precipitação, enquanto o índice de Palmer é um índice baseado no balanço hídrico que considera além do abastecimento de água (precipitação), outras variáveis citadas anteriormente.

Existe também o Índice de Precipitação-Evapotranspiração Padronizado (SPEI). Seu carácter multi-escalar permite ser utilizado por diferentes disciplinas científicas para detectar, monitorar e analisar períodos de seca. Assim como os índices PDSI e SPI, o SPEI pode avaliar gravidade da seca de acordo com a sua intensidade e duração, identifica o início e fim dos episódios de seca, permite a comparação de gravidade do período de seca ao longo do tempo e do espaço. No entanto, uma vantagem do SPEI sobre outros índices de seca amplamente utilizados é o fato de considerar o efeito da temperatura e a evapotranspiração potencial (PET) na severidade de seca. Suas características permitem a identificação de diferentes tipos de seca e impactos no contexto do aquecimento global.

De acordo com o *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* – CSIC (2013), o SPI não identifica o papel do aumento da temperatura em condições de seca futuras, e independentemente de cenários de aquecimento global não pode explicar a influência da variabilidade da temperatura e o papel das ondas de calor. A SPEI pode explicar os possíveis efeitos da variabilidade de temperatura e temperaturas extremas fora do contexto do aquecimento global. Entretanto, o SPI tem sido utilizado por diversos autores (Muthuwatta e Ahmad, 2015; McKee *et al.*, 1993 ; Santos *et al.*, 2009 ; Blain e Brunini, 2007 e Karavitis *et al.*, 2011) com a grande vantagem de não necessitar dados adicionais além das alturas pluviométricas totais mensais. Assim, no presente estudo, será utilizado o índice SPI.

2.6.1. Índice Padronizado de Precipitação – SPI

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) foi desenvolvido principalmente para definir e acompanhar períodos de seca. Ele permite que um analista determine a ocorrência de

seca em um determinado intervalo de tempo para qualquer período com os dados históricos. Além de períodos com déficit de precipitação, este índice pode determinar eventos anormalmente úmidos.

O SPI é baseado na probabilidade cumulativa de um determinado evento de precipitação ocorrer numa estação ou período. Os dados históricos de precipitação desse período são representados pela distribuição Gama, pois a distribuição Gama é a que melhor se ajusta a distribuição da precipitação. Isso é feito através de um processo de estimação de máxima verossimilhança dos parâmetros da distribuição Gama, α e β . Este processo permite que a distribuição das chuvas na estação seja eficazmente representada por uma função matemática de probabilidade cumulativa. Portanto, com base nos dados históricos de precipitação, um analista pode dizer qual é a probabilidade da precipitação ser menor ou igual a um determinado valor.

Assim, a probabilidade da precipitação ser inferior ou igual à média de chuva na área será de cerca de 0,5, ou seja, quando a probabilidade da precipitação é menor ou igual a um valor menor do que a média, o valor também será menor (0,2; 0,1; 0,01; etc.). Portanto, se certo evento de chuva tem baixa probabilidade sobre a função de probabilidade acumulada, então provavelmente este é um indicativo de um evento de seca. Em contrapartida, um evento de precipitação que apresenta uma elevada probabilidade na função de probabilidade cumulativa é um evento anormalmente úmido.

De acordo com o que foi dito anteriormente, a precipitação é a variante em uma função de distribuição Gama. A função terá um desvio padrão e uma média que depende das características da precipitação da área. Caso uma função de probabilidade para uma estação em uma área diferente seja calculada, ela provavelmente terá um desvio padrão e uma média diferente da área anterior. Sendo assim, será muito difícil comparar eventos de chuva para duas ou mais áreas diferentes em termos de seca, pois o que é “precipitação normal” em uma área pode ser de chuva excedente em outra área, tomando por base os dados de precipitação.

Em decorrência disso, transforma-se a sua função de probabilidade acumulada Gama em uma variável aleatória normal Z com média zero e desvio padrão de um. Uma nova variável aleatória é formada, e a transformação é feita de tal maneira que cada quantidade de precipitação em função do tempo (Gama) tem um valor correspondente, na nova função Z . A probabilidade de que a precipitação seja menor ou igual a qualquer valor de precipitação será a mesma que a probabilidade da nova variável aleatória ser inferior ou igual ao valor correspondente de precipitação. Todas as funções de probabilidade que tenham sido aplicadas

a diferentes dados de diferentes estações pluviométricas podem ser transformadas dessa forma, e a variável resultante transformada estará sempre nas mesmas unidades.

Da mesma forma, a probabilidade cumulativa de qualquer valor SPI pode ser encontrada, e este será igual à probabilidade cumulativa do evento de precipitação correspondente. A Tabela 2.2 apresenta algumas probabilidades cumulativas associadas a valores do SPI, os quais variam de -3 a 3, com as seguintes indicações: -3(provável seca), 0 (precipitação normal) e 3 (períodos úmidos).

Tabela 2.2: SPI e probabilidades acumulativas.

SPI	Probabilidade Acumulativa
-3,0	0,0014
-2,5	0,0062
-2,0	0,0228
-1,5	0,0668
-1,0	0,1587
-0,5	0,3085
0,0	0,5000
0,5	0,6915
1,0	0,8413
1,5	0,9332
2,0	0,9772
2,5	0,9938
3,0	0,9986

Fonte: *National Drought Mitigation Center* - NDMC, 2015.

Para calcular os parâmetros da distribuição, usa-se o maior período de tempo de dados disponíveis de precipitação (no caso, 16 anos) e, em seguida, extraem-se os valores SPI apenas para um determinado período de tempo, que no caso desse estudo, é de 1, 3, 6, 9, 12, 24 e 48 meses. Segundo o *National Center Atmospheric Research* – NCAR, em prazos curtos (1–6 meses), o SPI está intimamente relacionado com a umidade do solo, enquanto a prazos mais longos (6 meses ou mais), o SPI pode estar relacionado com as águas subterrâneas e de armazenamento de água em reservatório. De acordo com McKee *et al.* (1993), quando os períodos de tempo são pequenos (3 a 6 meses), o SPI tende a ter maior oscilação acima e abaixo de zero. Já como o período de tempo é alongado de 12, 24 e 48 meses, o SPI reage mais lentamente para mudanças na precipitação, ou seja, períodos com SPI negativo e positivo se tornar em menor número, porém de maior duração.

Com relação aos tipos de seca, um analista pode utilizar-se dos SPIs para 1 ou 2 meses nas análises de seca meteorológica. Já para seca agrícola seriam considerados os SPIs a partir de 1 mês a 6 meses. E SPI de 6 meses ou mais para análises de seca hidrológica e aplicações.

2.6.2. SPI-1

O SPI para 1 mês é um valor para curto prazo e durante o período de crescimento vegetal pode ser importante para a correlação da umidade do solo e do stress da cultura. Um mapa de SPI 1 é muito similar a um mapa que indica a percentagem de precipitação normal por um período de 30 dias. O SPI é uma representação mais precisa de precipitação mensal porque a distribuição foi normalizada (WMO, 2012; DNR, 2015).

Por exemplo, um SPI de 1 mês no final de novembro compara a 1 mês de precipitação total para novembro, nesse ano, com as precipitações totais de novembro de todos os anos no registro. Por SPI 1 refletir as condições de curto prazo, a sua aplicação pode ser relacionada intimamente com secas meteorológicas, juntamente com a de curto prazo, a umidade do solo e do estresse das culturas; especialmente durante a estação de crescimento. O SPI-1 pode aproximar as condições representadas pelo Índice de Umidade de Plantio, o que faz parte do conjunto de índices de Seca de Palmer (WMO, 2012).

É importante ressaltar que a interpretação do SPI-1 pode ser enganosa para compreensão da climatologia. Em regiões onde a precipitação é normalmente baixa durante um mês, pode resultar em grandes SPIs negativos ou positivos, embora os valores de precipitação comparada à média sejam relativamente pequenos. Este índice também pode ter interpretações equivocadas com valores de precipitação abaixo do normal em regiões com um pequeno total de precipitação normal para um mês (WMO, 2012).

De acordo com o Guia do Usuário do SPI elaborado pela *World Meteorological Organization* (2012), em teoria, o SPI pode ser calculado numa base de sub-mensal, mas, na prática, isto não é recomendado. É recomendável que o usuário utilize um período mínimo médio de quatro semanas. Pode-se calcular o SPI para uma semana, mas a realidade é que a pessoa provavelmente vai encontrar muitos eventos de dias secos (0,00 mm de chuvas, mesmo em climas não-áridos), o que faz com que o SPI apresente comportamento irregular (Wu *et al.*, 2006), portanto, esta abordagem não é recomendada. No entanto, a atualização do SPI para 1 mês até um prazo de 24 meses é aceitável.

2.6.3. SPI-3

O SPI-3 proporciona uma comparação da precipitação ao longo de um determinado período de três meses com os totais de precipitação a partir do mesmo período de três meses para todos os anos incluídos no registro histórico. Em outras palavras, um SPI-3, no final de fevereiro compara a dezembro-janeiro-fevereiro de precipitação total nesse ano com as dezembro-fevereiro de totais de precipitação de todos os anos no registro para essa localização (WMO, 2012).

O SPI-3 reflete as condições de umidade de curto e médio prazo e fornece uma estimativa sazonal de precipitação (WMO, 2012; DNR, 2015). Em regiões agrícolas, o SPI-3 pode ser mais eficaz em destacar as condições de umidade disponível do que o Índice Palmer ou outros índices hídricos disponíveis atualmente (WMO, 2012).

É necessário comparar o SPI-3 com prazos mais longos. Uma precipitação relativamente normal ou até mesmo de um período de três meses úmido poderia ocorrer no meio de uma seca em longo prazo que seria visível somente durante um longo período. Olhando para prazos mais longos pode evitar má interpretação acreditando que a seca pode ser mais curta, quando na verdade é apenas um período úmido temporário. Monitoramento da seca contínua e persistente, é essencial para determinar quando as secas começam e terminam, ajudando a evitar falsos alarmes falsos. Ter um conjunto de “gatilhos”, vinculados a ações dentro de um plano de seca, pode ajudar a garantir isso (WMO, 2012).

Tal como acontece com o SPI-1, o SPI-3 pode ser enganador em regiões em que é normalmente seco durante um determinado período de três meses. Grandes SPIs negativos ou positivos podem ser associados com os totais de precipitação próximos da normalidade. Este cuidado pode ser explicado, por exemplo, com o clima mediterrâneo da Califórnia e em todo o norte da África e no sul da Europa, onde chove muito pouco ou apenas ao longo de períodos distintos do ano. Estes períodos são caracterizados por pouca chuva, os totais correspondentes histórico serão pequenos, e relativamente pequenos desvios em ambos os lados da média pode resultar em grandes SPIs negativos ou positivos. Por outro lado, este período de tempo pode ser um bom indicador para algumas regiões de monção em todo o mundo (WMO, 2012).

2.6.4. SPI-6

O SPI para seis meses pode ser muito eficaz em relação à precipitação sobre estações distintas. O SPI-6 indica as tendências de médio prazo na precipitação sazonal e ainda é considerado mais sensível do que o Índice Palmer às condições a esta escala. O SPI-6 dá uma boa indicação da quantidade de precipitação que caiu durante a estação chuvosa que é muito importante para certas localidades. Estas informações podem também começar a ser associadas com vazões e níveis anômalos de reservatório, dependendo da região e época do ano (WMO, 2012; DNR, 2015).

2.6.5. SPI-9

O SPI para 9 meses fornece uma indicação dos padrões de precipitação ao longo de um intervalo de tempo médio. As secas costumam levar este período ou mais para se desenvolver. Valores SPI abaixo de -1.5 para estes prazos são geralmente uma boa indicação de que a seca terá um impacto significativo na agricultura e pode estar afetando outros setores também. O período de nove meses começa a indicar uma seca sazonal de curto prazo às quais podem se tornar secas hidrológicas de longo prazo, ou multi-anual. Os SPIs dessa escala de tempo, provavelmente, estão vinculados a vazões, níveis de reservatórios, e os níveis de águas subterrâneas, assim como os SPIs nas escalas de tempo mais longos.

2.6.6. SPI-12 ou mais

O SPI nesses prazos (no presente trabalho se trata exatamente do SPI-12, SPI-24 e SPI-48) reflete os padrões de precipitação de longo prazo. O SPI-12 é uma comparação da precipitação durante 12 meses consecutivos com o registrado nos mesmos 12 meses consecutivos em todos os anos anteriores de dados disponíveis. Estes prazos são o resultado acumulado de períodos mais curtos que podem estar acima ou abaixo do normal. Nos SPIs mais longos (SPI-24 e SPI-48), a oscilação dos valores SPI indicam que uma tendência úmida ou seca está ocorrendo. Estes prazos são geralmente vinculados a vazões, níveis de reservatórios, e níveis de águas subterrâneas.

2.6.7. Vantagens do Uso do SPI

Diante do que foi exposto, o SPI pode efetivamente representar a quantidade de precipitação numa determinada escala de tempo. A vantagem é que ele oferece não só informações sobre a quantidade de chuva, mas também é possível perceber como esta quantidade está em relação à precipitação normalizada para uma determinada área, indicando se essa estação está seca ou não.

Segundo o *National Drought Mitigation Center* (2015), quanto maior o período utilizado para calcular os parâmetros de distribuição, provavelmente irá obter melhores resultados. Por outro lado, deve-se ter em mente que quanto mais recentes forem as séries analisadas, menores serão as chances de se estar incorporando efeitos de tendências em longo prazo e efeitos da não-estacionaridade das mesmas, *i.e.*, pode haver mudanças na média, variância, etc ao longo das séries.

O SPI pode ser usado na análise espacial da precipitação em relação à seca por causa da possibilidade de comparar diferentes estações em diferentes regiões climáticas, independentemente do fato de que eles podem ter diferentes chuvas normais. Isto porque no SPI a precipitação já está normalizada e compara a precipitação atual com a média. Portanto, a precipitação de duas áreas com diferentes características de chuva pode ser comparada em relação ao grau de condições de seca que cada área apresenta, já que a comparação é em termos de sua precipitação normal. O conceito é um pouco semelhante a um mapa de “diferença de média da precipitação”. Porém, comparando o SPI e o mapa de diferença entre média e a estimativa da precipitação, o segundo só irá indicar a magnitude numérica de variação (por exemplo, 40 mm a menos ou 10 mm a mais), sem especificar o quanto menos aquele valor é (por exemplo, se são 40 milímetros a menos que 80 milímetros, ou 40 mm a menos que 200 mm), o SPI mostra a magnitude da estatística de desvio em relação à média, e, portanto, melhor retrata a gravidade da seca.

Abaixo segue alguns pontos fortes do SPI em relação a outros índices:

- Usa apenas precipitação;
- Pode caracterizar seca ou umidade anormal em escalas de tempo diferentes que correspondem com a disponibilidade de tempo de diferentes recursos hídricos, por exemplo, a umidade do solo, camada de neve, água subterrânea, descarga fluvial e armazenamento do reservatório.
- Comparação entre regiões com climas diferentes.

- Simples.

A um nível mais avançado de análise, pode ser gerado um mapa SPI e formar uma série de imagens de estimativas de precipitação, utilizando um SIG para análises avançadas, como apresentado neste estudo. Outra possibilidade em termos de uso de SPI seria o monitoramento por avaliar a variação SPI durante curtos períodos de tempo, por exemplo, séries temporais em escala mensal.

Outro possível uso para o qual a SPI poderá ser aplicado é o estudo histórico de seca em um lugar ou região, incluindo uma análise da frequência e duração para criação de um *ranking* de magnitude de secas. Segundo Blain e Brunini (2007), este índice é uma ferramenta versátil, espacialmente consistente (invariável) e de fácil interpretação devendo ser utilizada na análise dos riscos, mitigação e implicações do fenômeno da seca nos diversos segmentos da sociedade.

Segundo o NCAR (2015), existem algumas limitações quanto ao uso do SPI, são elas:

- Não leva em conta a evapotranspiração, o que limita a sua capacidade de captar o efeito do aumento das temperaturas (associadas às alterações climáticas ou não) sobre a demanda de umidade e disponibilidade hídrica, não sendo indicado para dimensionar sistemas de abastecimento de água.
- Não considera a intensidade da precipitação e seus potenciais impactos sobre o escoamento, vazão, e disponibilidade de água no interior do sistema de interesse.

Apesar de tais limitações do uso do SPI, este índice se mostra uma ferramenta valiosa para estudos de períodos secos e úmidos, principalmente para planejamento e tomada de decisões em bacias hidrográficas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Visão Geral da Metodologia

A pesquisa foi realizada nas seguintes etapas: aquisição dos dados de precipitação TRMM para o período de 1998 a 2013, aquisição dos dados de vazão natural ao reservatório Três Marias, aquisição dos dados de altimetria SRTM da área em questão, das precipitações acumuladas diária, mensais e anuais bem como a extração das médias mensais e anuais, interpolação dos dados de acumulados anuais e médias mensais, correlação entre as chuvas diárias TRMM e de vazão afluente à barragem Três Marias, espacialização da altimetria e geração de perfis comparando-os com dados de precipitação, construção de gráficos de dias secos consecutivos (para os 169 pontos) e extração do SPI também para cada ponto da região em questão. Ainda, foi realizada a espacialização dos dados de precipitação acumulada anual e mensal, da correlação de chuva e vazão, dos dias secos consecutivos, do Índice SPI e da análise de *cluster*.

3.2. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do São Francisco está localizada entre as latitudes 7°00' e 21°00' S e longitudes 35°00' e 47°40' W e, segundo dados da Agência Nacional de Águas (2015), abrange 521 municípios em seis Estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás, além do Distrito Federal. Possui área de drenagem de 638.576 km², o que equivale a 8% do território nacional.

Com extensão de 2.700 km, o rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e segue no sentido Sul-Norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para o Sudeste, chegando ao Oceano Atlântico na divisa entre Alagoas e Sergipe. A vazão natural média anual do rio São Francisco é de 2.846 m³/s, mas ao longo do ano pode variar entre 1.077 e 5.290 m³/s.

Devido a sua extensão e os diferentes ambientes que percorre, a região está dividida em Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. O Alto São Francisco, da nascente na Serra da Canastra (MG) até a cidade de Pirapora (MG); Médio São Francisco, de Pirapora (MG) até Remanso (BA); Submédio São Francisco, de Remanso (BA) até Paulo Afonso (BA)

e Baixo São Francisco, de Paulo Afonso (BA) até sua foz entre os estados de Sergipe e Alagoas.

Com relação à cobertura vegetal, possui fragmentos de Cerrado no Alto e Médio, Caatinga no Médio e Submédio e Mata Atlântica no Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras. A bacia também concentra a maior quantidade e diversidade de peixes de água doce da região Nordeste.

Dentre as atividades desenvolvidas na região, a agricultura é uma das mais importantes, mas a região possui fortes contrastes socioeconômicos, com áreas de acentuada riqueza e alta densidade demográfica e áreas de pobreza crítica e população bastante dispersa. Dos 456 municípios com sede na bacia, somente 93 tratam seus esgotos. Com isso, há necessidade de recuperação ambiental das áreas degradadas para mitigar os impactos sobre os recursos hídricos.

Considerando toda extensão da bacia do rio São Francisco, a região caracteriza-se por períodos extremos de secas e de cheias. O semiárido, que extrapola a bacia, é vulnerável e sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens, que têm sido responsáveis por êxodo de parte de sua população. Por outro lado, os moradores da região metropolitana de Belo Horizonte enfrentam enchentes frequentes.

Quanto ao potencial hidrelétrico aproveitado da bacia, esta abriga as usinas Três Marias, Queimado, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó, com uma produção média de energia de 10.473 MW. Os reservatórios Três Marias e Sobradinho têm papel fundamental na regularização das vazões São Francisco. Um dos maiores desafios é que a bacia registra todos os tipos de usos dos recursos hídricos (irrigação, geração de energia, navegação, saneamento, pesca e aquicultura, atividades turísticas e de lazer), o que exige uma análise do conjunto para que se possa planejar adequadamente sua gestão.

Ainda, em relação à divisão da bacia do rio São Francisco, a ANA, para melhor gerir a bacia, seccionou as quatro regiões (Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco) em sub-bacias, com a seguinte divisão: Alto (Sub-40 e Sub-41), Médio (Sub-42 até Sub-47), Submédio (Sub-48) e Baixo (Sub-49).

A região hidrográfica denominada de Alto São Francisco, em Minas Gerais, inicia-se a partir da Sub-40 e compreende as nascentes dos rios São Francisco, Pará, Paraopeba, Indaiá e Borrachudo, além de seus afluentes até o reservatório de Três Marias e a bacia do rio Abaeté localizada a jusante do reservatório. Sua área de drenagem corresponde a 57.097 km², aproximadamente, e representa 24% do total da bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais.

A Sub-40, área de estudo do presente trabalho, está localizada entre os paralelos 18° e 21° de latitude sul e os meridianos 43° 30" e 46° 40" de longitude oeste, na região central de Minas Gerais. A bacia possui área de drenagem de aproximadamente 49.000 km² e abrangem 106 municípios, compreendendo as nascentes dos rios São Francisco, Pará, Paraopeba, Indaiá, Borrachudo e seus afluentes até o reservatório de Três Marias.



Figura 3.1: Localização da Sub-40 no Brasil.

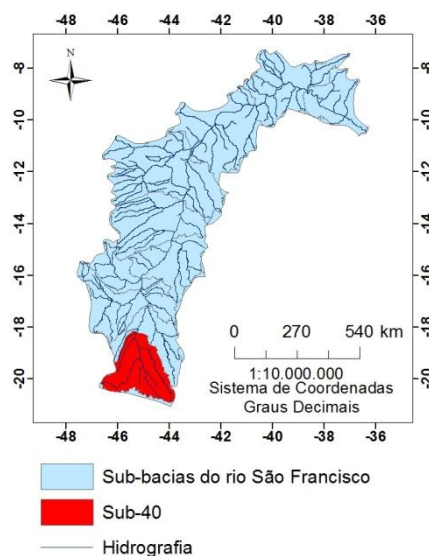


Figura 3.2: Sub Bacias do Rio São Francisco.

A altimetria da área varia em torno de 1.600 a 600 metros em relação ao nível do mar e os principais acidentes topográficos encontrados são as Serras da Canastra (aproximadamente 1.200 m de altitude) e do Espinhaço (aproximadamente 1.300 m de altitude). Com formação geológica representada em grande parte pelas rochas antigas do Pré-cambriano Indiviso e, em menor porção, pelas rochas calcárias do Grupo Bambuí. A sua formação sedimentar está inserida unicamente sobre a Bacia Sedimentar Sanfranciscana.

De maneira geral, os solos encontrados na região possuem aptidão para agricultura irrigada e requerem um uso intensivo de adubos devido a sua composição ácida, na maioria dos casos. Além disso, a maior parte da bacia é composta por solos de elevado teor de argila, variando de 35 a 75%, com alta permeabilidade de água e classificados entre drenados a bem drenados.

3.3. Dados de Precipitação do TRMM

Primeiramente, foram adquiridos os dados diários de precipitação provenientes do TRMM de 1998 a 2013. Estes dados foram baixados, gratuitamente, do site da NASA

(http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V7.3B42_daily.2.shtml#description).

Para melhores resultados referentes à continuidade dos dados de chuva e devido à área não ter grandes extensões (Sub-40), optou-se por usar uma grade de pontos de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, melhor resolução proporcionada para dados TRMM. Na determinação da localidade dos dados a serem baixados, foi definida uma grade de pontos a cada $0,25^\circ$ que contemple toda área da bacia, com longitude de $-46,75^\circ$ a $-43,75^\circ$ e latitude de -21° a -18° , em graus decimais, sistema de coordenadas utilizado pelo site para aquisição dos dados.

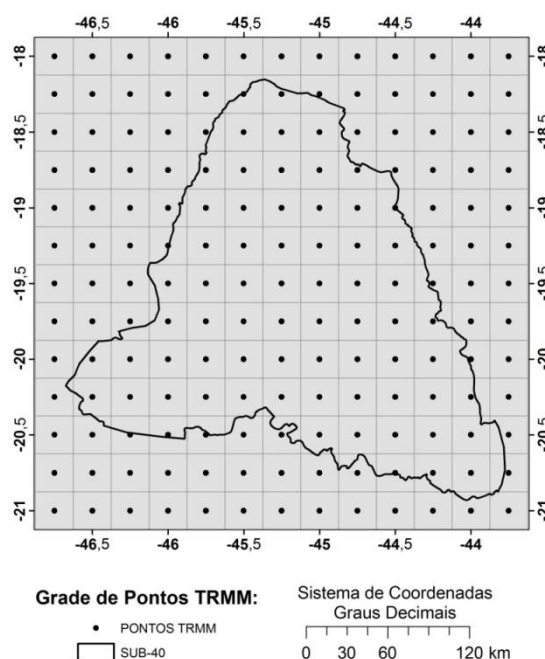


Figura 3.3: Grade de pontos TRMM na Sub-40.

A partir dos dados diários, foram calculadas as precipitações acumuladas anuais e mensais, como também as médias mensais do período que compreende 1998 até 2013. Estes dados foram interpolados pelo método *Spline* com resolução de $0,01^\circ \times 0,01^\circ$. Segundo Souza *et al.* (2011), em trabalho visando avaliar o desempenho de interpoladores na elaboração de carta de isoietas anual, concluíram que o *Spline* está entre os de melhor desempenho.

3.4. Dados de Altimetria

Para a construção dos perfis, foram utilizados dados de altimetria SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), adquiridos junto ao site TOPODATA - INPE (<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>). O Modelo Digital de Elevação - DEM foi construído a partir do mosaico das cartas que compreendem a área da sub-bacia.

3.5. Dados de Vazão

Já os dados diários de vazão foram coletados a partir do site do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx), disponibilizados gratuitamente.

Este site disponibiliza produtos relacionados com as séries históricas de vazões naturais. Segundo o ONS (2015), o setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio, se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte — tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consultivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial). A vazão natural é obtida por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia.

A partir dos dados de vazão e altimetria foram construídos gráficos e mapa para identificar possível relação.

3.6. Correlação entre Chuva e Vazão

Ainda, foi obtida a correlação entre os dados diários de precipitação e de vazão ao Reservatório Três Marias através do coeficiente de correlação Linear de Pearson, mostrada a partir da equação abaixo:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

A correlação foi aplicada sobre os dados obtidos nos mesmos dias e em seguida com as vazões obtidas de um a trinta dias depois das precipitações. Por fim, de posse dos resultados, uma nova tabela composta pelas 169 quadrículas da Sub-bacia 40 foi estruturada com os valores das 31 correlações efetuadas no processo.

Segundo CALLEGARI-JACQUES (2003), o coeficiente de correlação pode ser avaliado qualitativamente da seguinte forma:

se $0,00 < r < 0,30$, existe fraca correlação linear;

se $0,30 \leq r < 0,60$, existe moderada correlação linear;

se $0,60 \leq r < 0,90$, existe forte correlação linear;

se $0,90 \leq r < 1,00$, existe correlação linear muito forte.

A geração dos mapas da correlação chuva e vazão considerou a área de influência inicial dos dados de precipitação, ou seja, o *grid* de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, visto que a interpolação de tais dados mudaria os valores de correlação.

3.7. Dias Secos e Úmidos Consecutivos (CDD e CWD)

Utilizando os dados de precipitação diária, foram identificadas as quantidades de dias secos e úmidos consecutivos anuais (CDD – *Continuos Dry Days* e CWD – *Continuos Wet Days*) durante período de 1998 a 2013, considerando os 169 pontos da área em questão.

Para determinação dos dias secos consecutivos foram considerados os dias com precipitações abaixo de 1 mm enquanto que para os dias úmidos consecutivos, utilizaram-se precipitações iguais ou maiores que 1 mm. Posteriormente, para construção dos mapas os dados foram interpolados pelo método *Natural Neighbor*.

3.8. SPI

Os índices SPI foram gerados através do programa SPI, disponibilizado gratuitamente pelo site <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx>.

O SPI foi formulado por Tom Mckee, Nolan Doesken e John Kleist do Colorado Climate Center, em 1993.

O cálculo do SPI para a área de estudo baseou-se na precipitação dos anos de 1998 até 2013, compreendendo um período de 16 anos. Estes dados de precipitação foram organizados em uma distribuição de probabilidade gama, que em seguida, foi transformada em uma distribuição normal padrão. Os valores positivos do SPI indicam que a precipitação foi maior do que a precipitação média e vice-versa.

A Tabela 3.1 apresenta a classificação dos valores SPI, em que a classe próxima do normal é baseada na agregação de duas classes: $-1,0 < SPI \leq 0,0$ (suavemente seco) e $0,0 < SPI \leq 1,0$ (suavemente úmido).

Tabela 3.1: Definição de categorias de seca para valores SPI.

Classe SPI	Categoria de Seca
$SPI \leq -2,0$	Extremamente Seco
$-2,0 < SPI \leq -1,5$	Severamente Seco
$-1,5 < SPI \leq -1,0$	Moderadamente Seco
$-1,0 < SPI \leq 1,0$	Próximo a Normalidade
$1,0 < SPI \leq 1,5$	Moderadamente Úmido
$1,5 < SPI \leq 2,0$	Severamente Úmido
$SPI > 2,0$	Extremamente Úmido

Fonte: Vermes (1998).

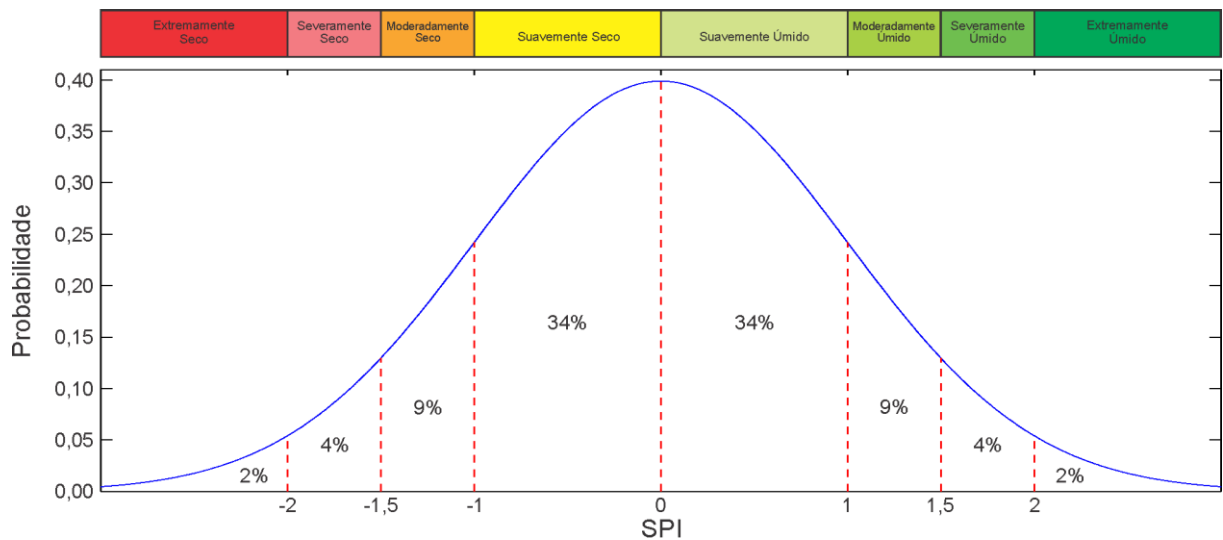


Figura 3.4: Classificação SPI e sua relação com a curva normal.

A Figura 3.4 representa a relação entre a classificação SPI com a curva normal. A intensidade implícita por cada etiqueta corresponde ao grau de remoção de condições médias (isto é, a $SPI = 0$). As percentagens impressas dentro das regiões delimitadas pelas linhas tracejadas indicam a probabilidade para valores SPI para cair no âmbito daquela região; probabilidades cumulativas globais exigem soma das probabilidades de um dado SPI de interesse através de uma cauda da curva. Por exemplo, os valores de SPI de -1,5 ou inferior ocorre em apenas seis por cento (2% + 4%) dos casos. A soma de todos os valores indicados é menos de 100% devido ao arredondamento.

Neste estudo, precipitação total para a estação de interesse e escala de tempo está equipado para a distribuição Gama como:

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

em que α e β são os parâmetros positivos que representam a forma da distribuição, x é a quantidade de precipitação ($x > 0$), e $\Gamma(\alpha)$ é a função gama.

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

Os parâmetros desconhecidos α e β são estimados como sugerido por Edwards e McKee (1997), utilizando a aproximação de Thom (1966) para o máximo de probabilidade para cada estação, cada escala temporal de interesse (3, 6, 9, 12 meses, etc) e cada mês do ano, como segue:

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

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

onde,

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (5)$$

n é o número de observações de precipitação, \bar{x} é a precipitação média ao longo da escala de tempo de interesse, e A é uma medida da assimetria de distribuição (Husak et al., 2007). A probabilidade cumulativa de um evento de precipitação observada para um período e escala de tempo de interesse é calculado usando os parâmetros estimados como:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (6)$$

Substitui t por $x/\hat{\beta}$, esta equação torna-se a função Gama incompleta.

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

Uma vez que a função Gama não está definida para $x = 0$ e uma distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa se torna

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (7)$$

em que q é a probabilidade de um zero. Seja m o número de zeros no tempo de uma série de precipitação, então q pode ser estimada por m/n (Thom, 1966). Finalmente, a probabilidade cumulativa $H(x)$ é transformada na variável Z padrão normal com média zero e variância de um, que é o valor do índice SPI.

Uma vez que a abordagem acima não é prática para calcular estes tipos de dados para um grande número de pontos de dados, uma conversão aproximada sugerido por Abramowitz e Stegun (1965) que converte a probabilidade cumulativa para a variável Z normal padrão foi utilizado:

$$Z = SPI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (8)$$

$$Z = SPI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad 0,5 < H(x) < 1 \quad (9)$$

onde

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(\ln H(x))^2} \right)} \quad 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (10)$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - \ln H(x))^2} \right)} \quad 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (11)$$

$$c_0=2,515517, d_1=1,432788$$

$$c_1=0,802853, d_2=0,89269$$

$$c_2=2,515517, d_3=0,001308$$

Após a extração do SPI, foram gerados mapas com a espacialização dos valores obtidos como também foi aplicada a classificação segundo Vermes (1998), demonstrada anteriormente na Tabela 3.1.

3.9. Análise de *Clusters*

A análise de *cluster* é um método utilizado para identificação de grupos homogêneos de objetos chamados *clusters* que tem o objetivo de identificar grupos com similaridades entre si. Para realizar a análise de *cluster* a maioria dos pacotes de software calcula uma medida de distância de similaridade para estimar a distância entre pares de objetos (Mooi e Sarstedt, 2011).

Uma maneira comum de visualizar o progresso da análise de *cluster* é pelo desenho de um dendrograma, o qual exhibe o nível de distância entre uma combinação de objetos e *clusters*. Considerando a distância da correlação linear entre as precipitações mensais de 1998 a 2013 dos 169 pontos, foi construído o dendrograma com divisão em 30 *clusters*. Posteriormente, foram espacializados os dados referentes à divisão em dois até onze *clusters* como também em 30 *clusters*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Precipitação Total Anual

Analisando a série histórica, a Figura 4.1 apresenta a espacialização da média de precipitação acumulada considerando o período de 1998 a 2013, onde a menor e maior precipitação observada foi 1134,1 mm e 1666,7 mm, respectivamente. A média da precipitação para esse período ficou de 1439,9 mm. Já considerando os dados anuais, individualmente, o ano que obteve maior valor de precipitação foi 2009, com 2129,8 mm, e o de menor precipitação foi o ano de 2012 (Figura 4.2) com 766,9 mm.

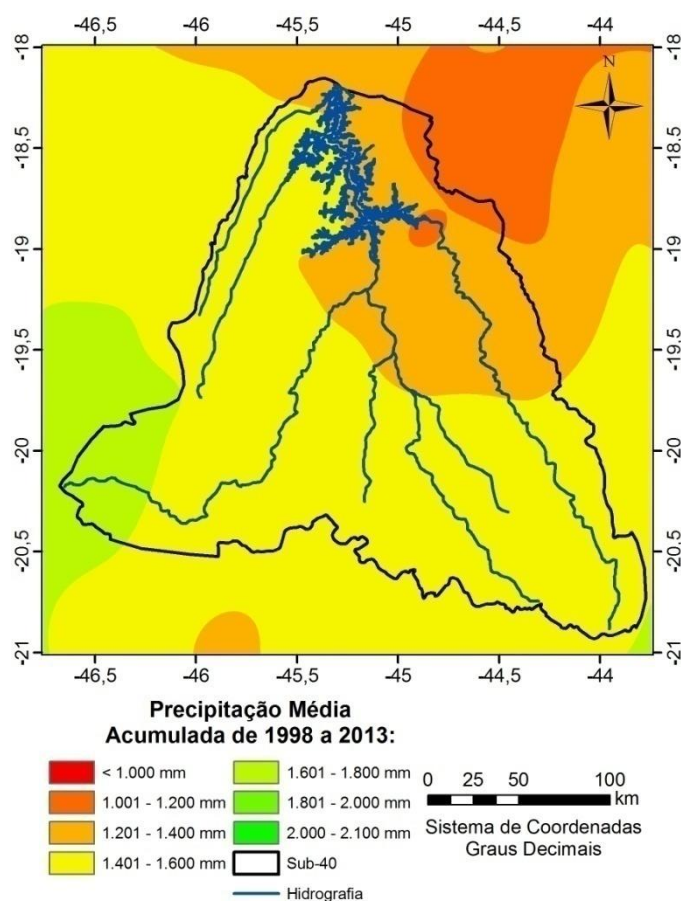


Figura 4.1: Mapa da Precipitação Média Anual do período de 1998 a 2013.

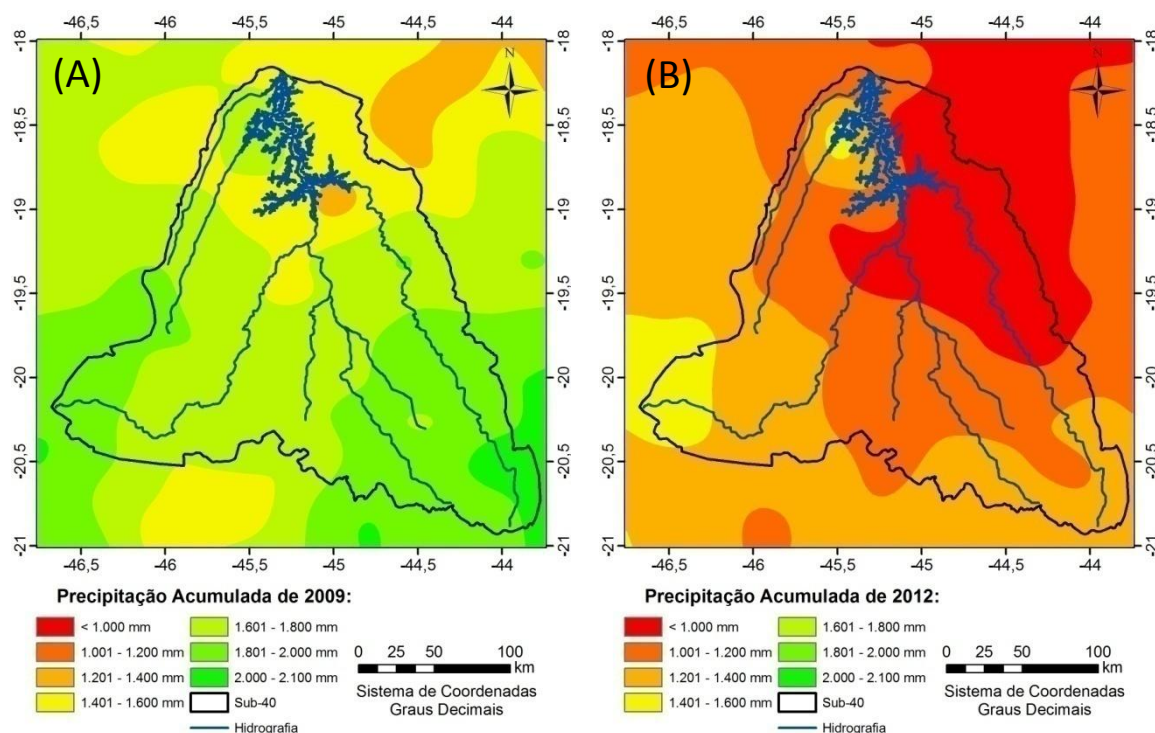


Figura 4.2: Precipitação Anual de (A) 2009 e (B) 2012.

Ainda, em relação às Figuras 4.1 e 4.2, o maior valor de precipitação do ano de 2009 (2129,8 mm) ficou muito acima da média de precipitação (1666,7 mm), considerando o período de 16 anos, assim como o menor valor referente ao ano de 2013 (766,9 mm) ficou muito inferior ao valor mínimo (1134,1 mm).

No Apêndice A-1, é possível visualizar a distribuição e a variabilidade da precipitação total anual no período compreendido entre 1998 a 2013. Ainda, com relação à precipitação acumulada anual, foi percebida a ocorrência de menores índices de precipitação na porção nordeste da bacia, em contrapartida, os maiores valores se apresentam, na maioria dos mapas, na parte oeste e sul da área em questão. Observando o Reservatório Três Marias nas Figuras 4.1 e 4.2, foram constatados que a porção leste do corpo d'água apresenta baixa precipitação enquanto que a oeste a precipitação aumenta.

4.2. Precipitação Média Mensal

Considerando todos os anos de análise, foi extraída a média da precipitação mensal. Observou-se que os meses mais secos da bacia são junho, julho e agosto, sendo julho o mês mais crítico com média mensal de 7,0 mm, enquanto que os mais úmidos são novembro, dezembro e janeiro, com, respectivamente, médias mensais de 211,9 mm, 304 mm e

273,1 mm, conforme mostra o hietograma mensal abaixo. Esse comportamento pode ser observado na Figura 4.3.

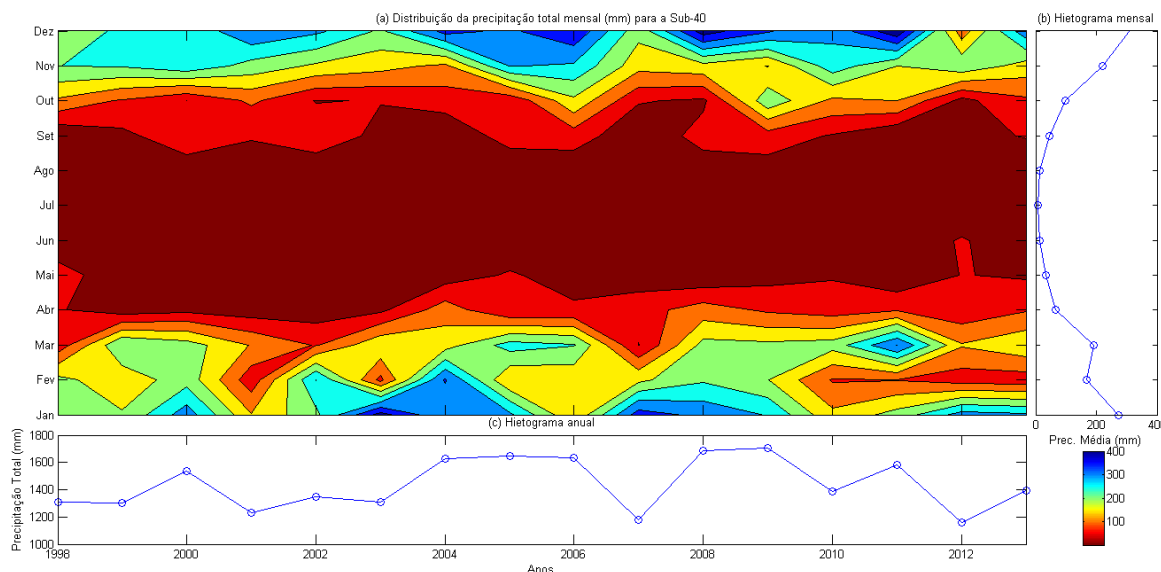


Figura 4.3: Precipitação média mensal e precipitação acumulada anual.

Foram extraídas também as médias mensais dos 169 pontos que compreendem a área da bacia e, a partir desses valores, foram gerados mapas de distribuição da precipitação mensal da bacia. Nas Figuras 4.4 e 4.5, representadas, respectivamente, pelos meses de julho (seco) e dezembro (úmido), pode-se perceber a variabilidade da precipitação ao longo da bacia com menores precipitações na região nordeste da bacia e pontos mais úmidos a oeste. Ainda, na espacialização dos dados é possível perceber que em julho há um intervalo de valores de precipitação de 2,0 a 48,6 mm e que a maioria das médias pontuais deste mês apresenta valores abaixo de 10 mm, enquanto que no mês de dezembro os valores variam de 260,7 a 338,5 mm. A partir destes valores percebe-se uma forte amplitude entre os meses de menor e maior precipitação. A espacialização da média dos demais meses pode ser observada no Apêndice A-2.

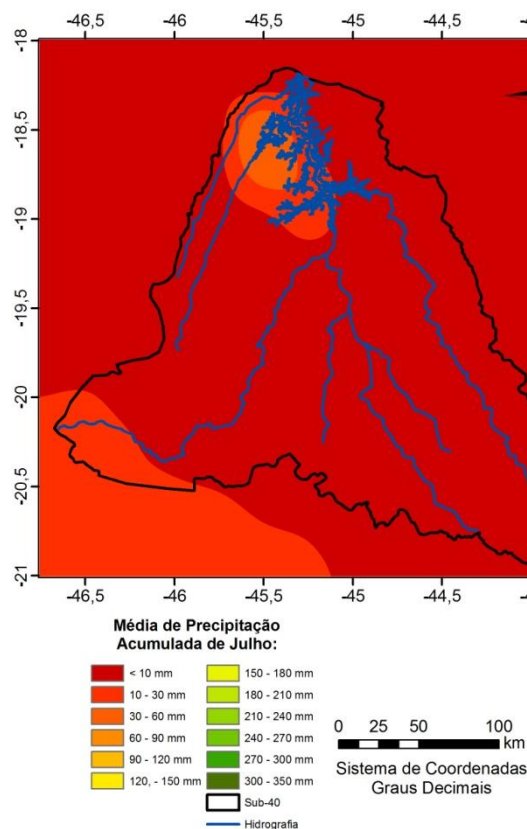


Figura 4.4: Distribuição da precipitação média do mês de julho.

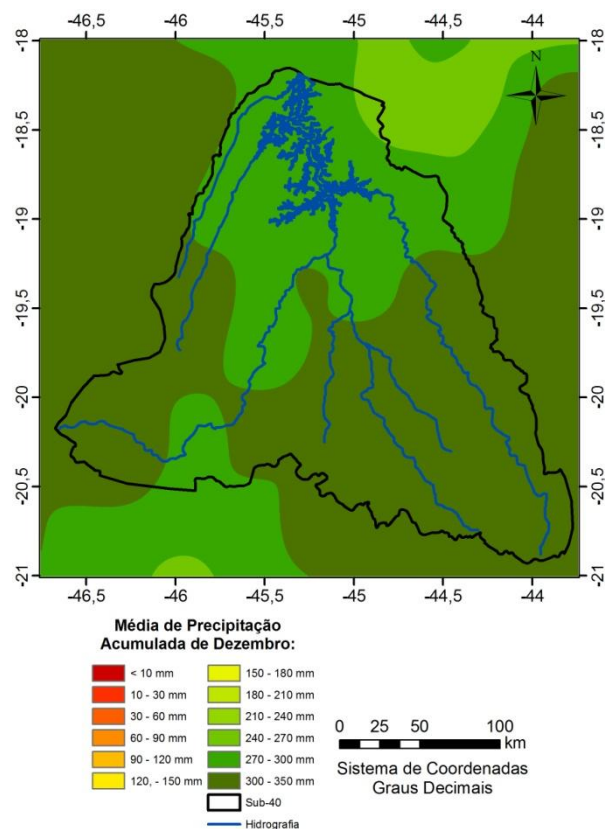


Figura 4.5: Distribuição da precipitação média do mês de dezembro.

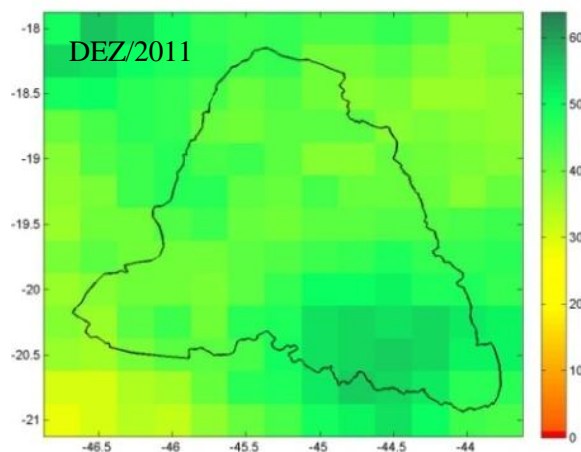


Figura 4.6: Precipitação Mensal de Dezembro de 2011.

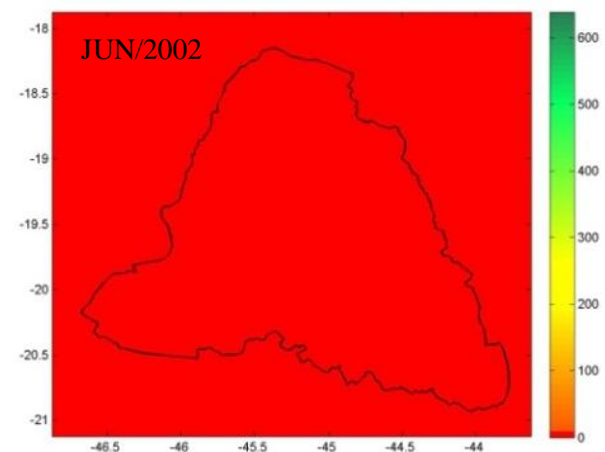


Figura 4.7: Precipitação Mensal de Junho de 2002.

Ainda, em relação à precipitação mensal, foram gerados os mapas de cada mês referente ao período de 1998 a 2013. Dentro deste intervalo de tempo, percebeu-se que o mês de dezembro de 2011 (Figura 4.6) foi o mais úmido e, apesar da média mensal indicar o mês de julho como o mais seco, em junho de 2002 (Figura 4.7) foi o mês que menos choveu. A espacialização de todos os meses está representada no Apêndice A-3.

4.3. Correlação entre Chuva e Vazão

As correlações entre chuva e vazão apresentaram a existência de um padrão de comportamento crescente até a vazão afluyente atingir uma disparidade de quatro dias – lag-4 – em relação à precipitação, e após esse período, os valores de correlação decresceram até o fim das comparações. A comprovação dessa análise visual é expressa pela representação gráfica das correlações médias calculadas para cada situação aplicada na pesquisa (Figura 4.8).



Figura 4.8: Gráfico do comportamento das correlações médias.

No mapa que representa a correlação entre precipitação e vazão medidas para o mesmo dia (Figura 4.9) é possível verificar a existência de quadrículas com valores inferiores a 0,265, e entre 0,266 e 0,300, que juntas não estão mais presentes a partir do mapa elaborado com divergência de três dias entre precipitação e vazão (Figura 4.12). A classe de correlação entre 0,306 e 0,335 volta a aparecer discretamente com cinco dias de disparidade (Figura 4.14) e a valores inferiores a 0,265 somente com 18 dias de diferença entre os parâmetros citados (Figura 4.19). Demonstrando, assim, baixa similaridade entre os dados coletados no mesmo dia.

As faixas com valores inferiores a 0,335 estão presente na maior parte das representações, não colorindo nenhuma quadrícula apenas no mapa com quatro dias de disparidade. As quadrículas com valores entre 0,335 e 0,375, também se mantêm presentes na maioria dos mapas, deixando de aparecer a partir da adoção de uma distinção de 23 dias (Figura 4.20). Já as que apresentam classes acima de 0,372, têm representação significativa somente nos mapas com vazão verificada 3, 4 e 5 dias depois da precipitação.

Mediante essa classificação, foi possível identificar visualmente que a Figura 4.13 obteve as maiores correlações e, assim, quatro dias como intervalo de tempo em que a chuva

sobre a Sub-40 começa a contribuir em sua totalidade com os das vazões observadas na barragem. Mesmo assim, para comprovar o resultado, outros dois mapas foram elaborados, um demonstrando a subtração entre as correlações com 3 e 4 dias de disparidade (Figura 4.21) e o outro entre 5 e 4 dias (Figura 4.22). E foi constatado que a maioria de dados positivos foi apresentada na Figura 4.21, comprovando maior correlação entre vazão e precipitação no mapa com quatro dias de disparidade.

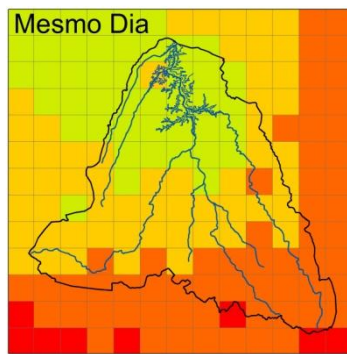


Figura 4.9: Correlação usando lag-0.

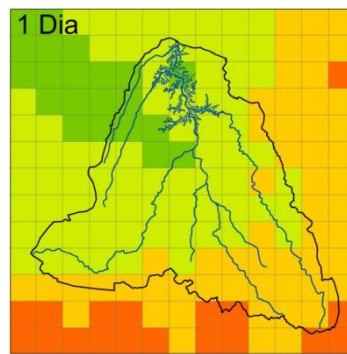


Figura 4.10: Correlação usando lag-1.

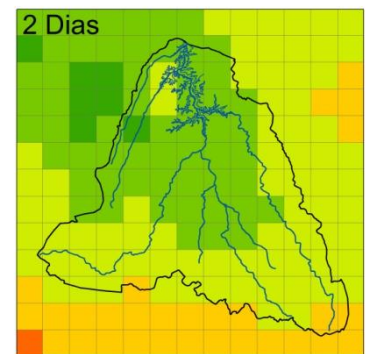


Figura 4.11: Correlação usando lag-2.

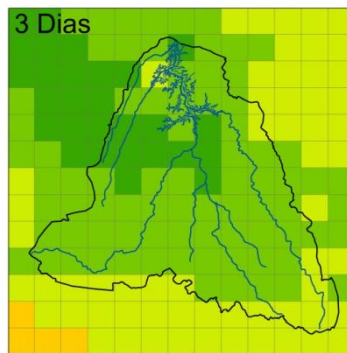


Figura 4.12: Correlação usando lag-3.

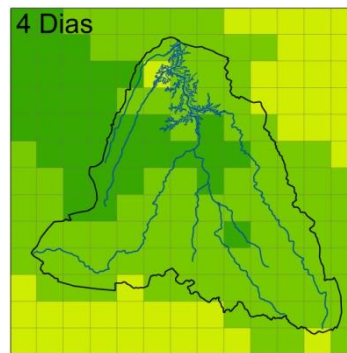


Figura 4.13: Correlação usando lag-4.

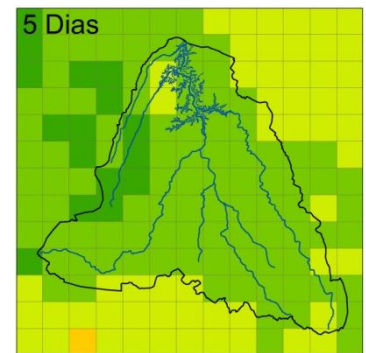


Figura 4.14: Correlação usando lag-5.

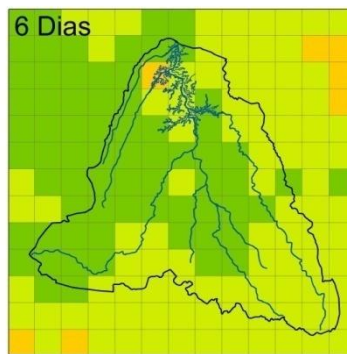
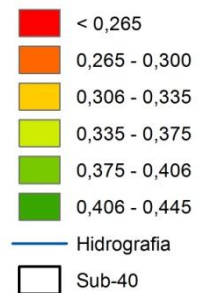


Figura 4.15: Correlação usando lag-6.



Figura 4.16: Correlação usando lag-7.

Correlação



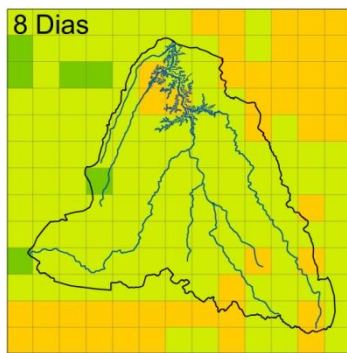


Figura 4.17: Correlação usando lag-8.

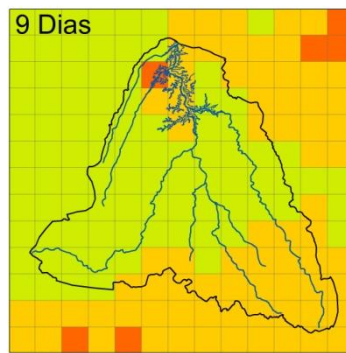


Figura 4.18: Correlação usando lag-9.

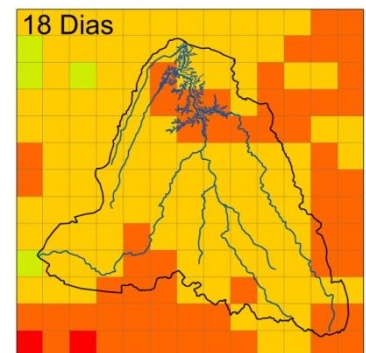


Figura 4.19: Correlação usando lag-18.

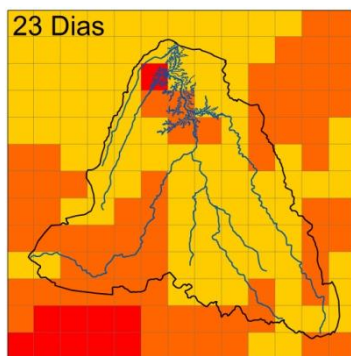
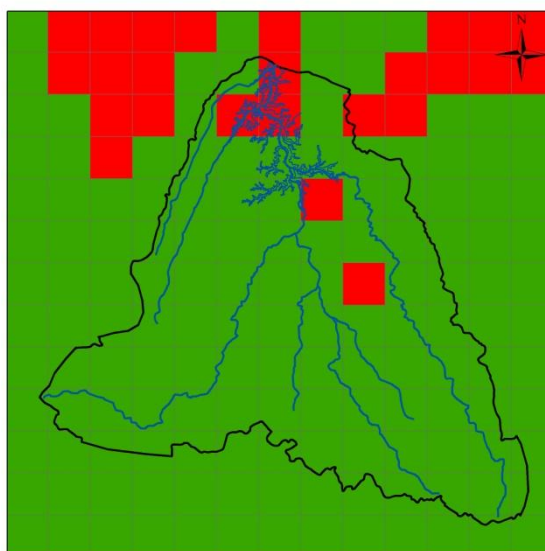
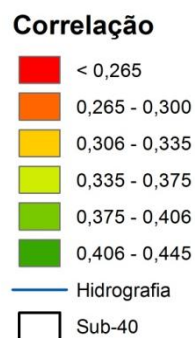


Figura 4.20: Correlação usando lag-23.



Diferença entre a Correlações
(três dias - quatro dias):

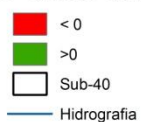
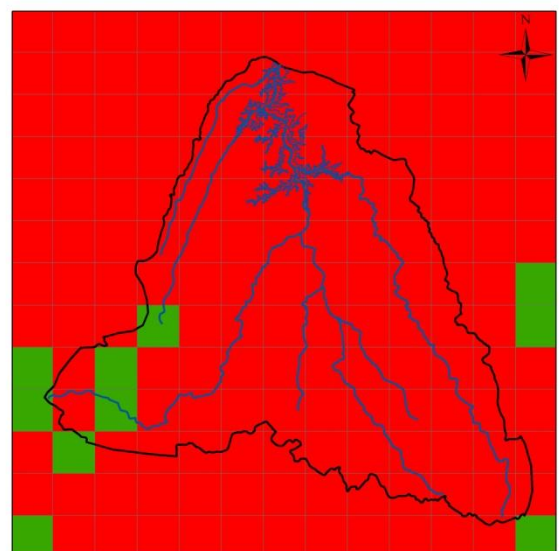


Figura 4.21: Diferença entre as correlações com três e quatro dias de disparidade.



Diferença entre a Correlações
(cinco dias - quatro dias):

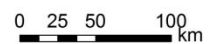
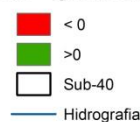


Figura 4.22: Diferença entre as correlações com cinco e quatro dias de disparidade.

4.4. Análise Comparativa entre Altimetria e Precipitação Anual

Comparando dados de altimetria e de precipitação média acumulada anual, ou seja, considerando os 16 anos, percebe-se que, de maneira geral, a partir da Figura 4.23, que as regiões de menores altitudes estão localizadas nas áreas de menor ocorrência de chuvas enquanto que as mais altas indicam maior precipitação.

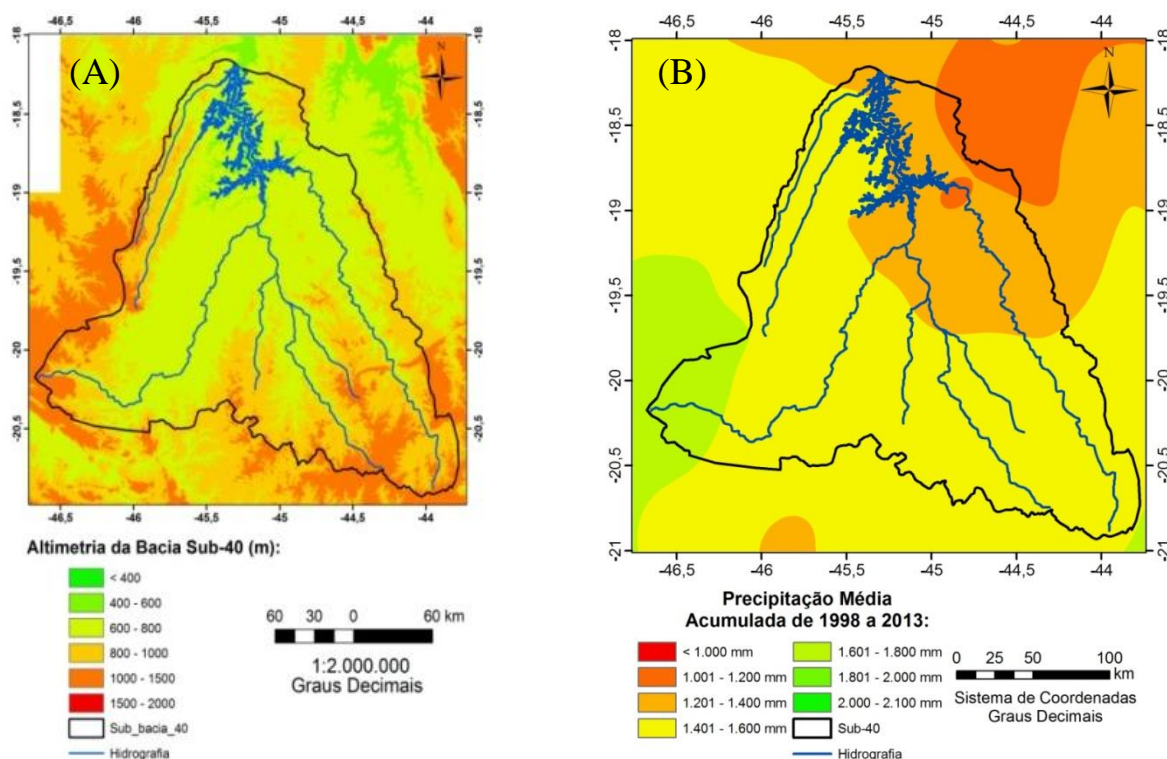


Figura 4.23: (A) Mapa de Altimetria da Sub-40 e de (B) Precipitação Média Acumulada Anual.

Foram criados os perfis AA' e BB' de altimetria da bacia, conforme mostra a Figura 4.24. Após extrair esses dados, foram gerados os gráficos de dois eixos contendo a altimetria e os dados de precipitação anual das coordenadas geográficas correspondentes aos perfis gerados.

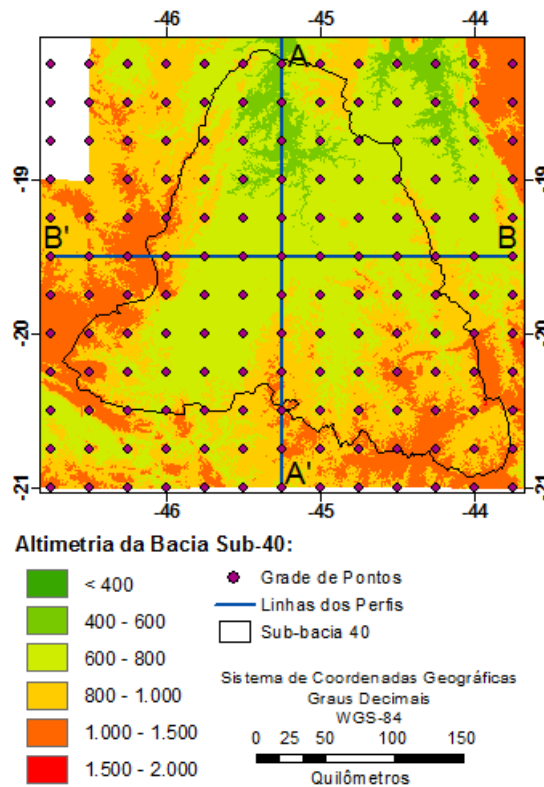


Figura 4.24: Mapa de altimetria com cortes dos perfis AA' e BB'.

De acordo com os Apêndices A-4 e A-5, os hietogramas da precipitação total anual apresentaram comportamento bem variado ao longo dos anos.

Observando os gráficos, percebe-se que, na maioria dos gráficos, as áreas mais altas nos perfis apresentam maior precipitação. Em contrapartida, nas áreas mais baixas, menor precipitação. No perfil AA' nos anos de 1998, 2001, 2003, 2004, 2007, 2008 e 2012 essa relação fica evidente. Já no perfil BB', os anos que mostram esse comportamento foram os dos anos 1998, 1999, 2001, 2003, 2004, 2007, 2012 e 2013. Esse comportamento pode ser percebido a partir da Figura 4.25.

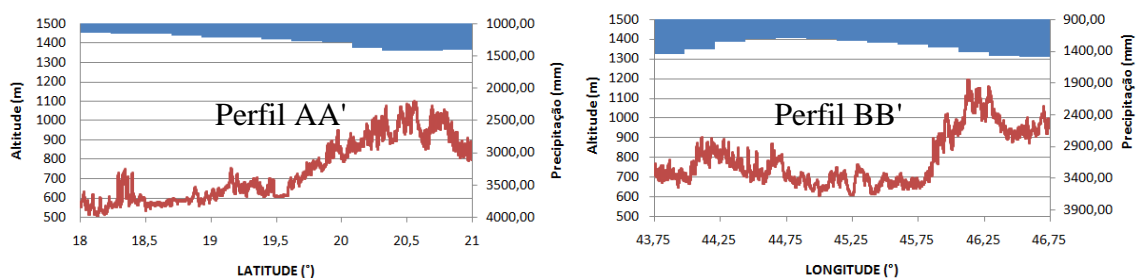


Figura 4.25: Perfis AA' e BB' (vermelho) com suas respectivas precipitações acumuladas (azul) do ano de 1998.

Alguns anos, como 2000, 2002, 2005, 2006, 2009, 2011, considerando os perfil AA' e BB', se mantiveram com pouca variabilidade da precipitação em relação à altimetria do terreno.

4.5. Dias Secos e Úmidos Consecutivos

Os mapas de dias secos consecutivos (CDD) apresentaram distribuição bem variada. O ano de 2009 (Figura 4.26) apresentou os menores valores, não ultrapassando o intervalo de 60–90 dias sem precipitação. Enquanto que o ano de 2011 (Figura 4.27) apresentou valores bastante elevados em grande parte da área estudada. A área a qual está localizado o Reservatório Três Marias, na maioria dos mapas, apresentou os menores valores CDD, porém no ano de 1999, a região nordeste do reservatório apresentou altos índices CDD, demonstrado na Figura 4.28.

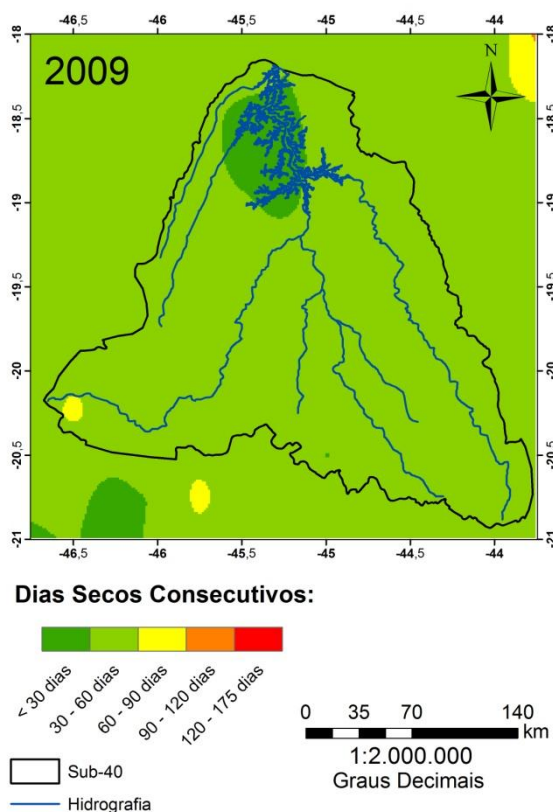


Figura 4.26: CDD do ano de 2009.

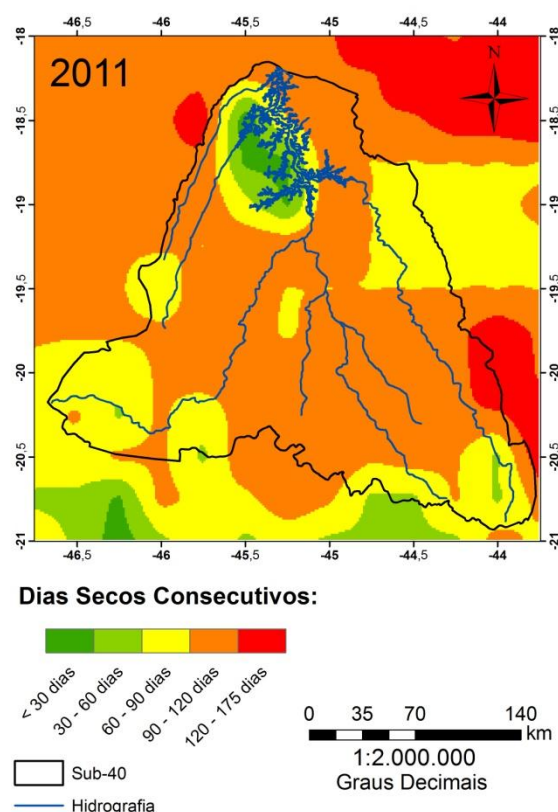


Figura 4.27: CDD do ano de 2011.

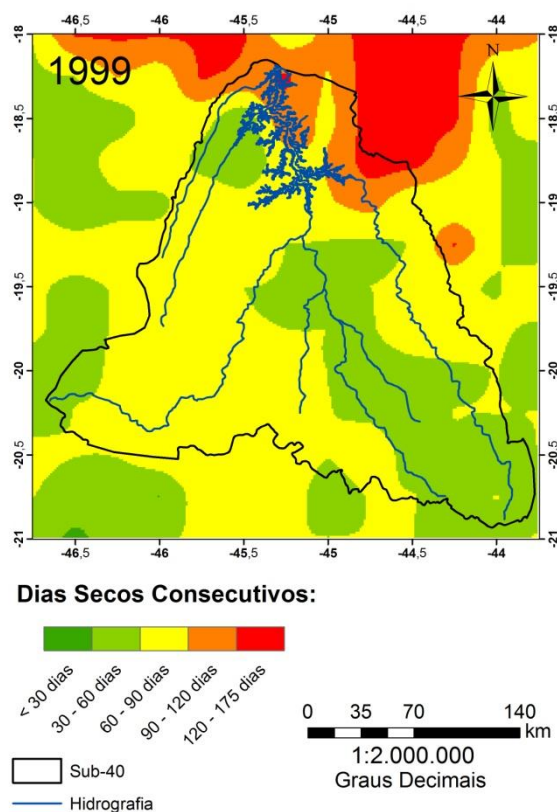


Figura 4.28: CDD do ano de 1999.

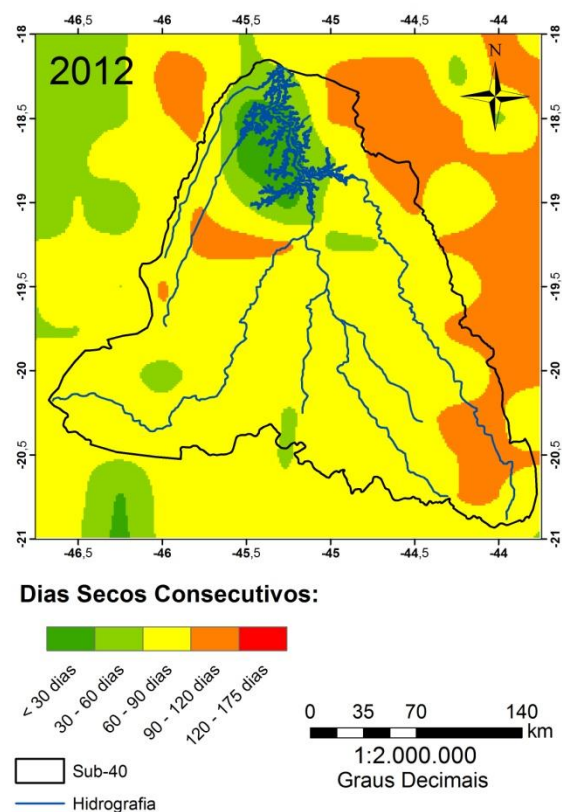


Figura 4.29: CDD do ano de 2012.

Ainda, em relação ao CDD, apesar do ano de 2012 apresentar menor precipitação acumulada anual (Figura 4.2) dentre os anos considerados, o mapa dessa variável do mesmo ano, representado pela Figura 4.29, não apresentou índices tão severos com relação aos dias secos consecutivos. Grande parte da área em estudo no ano de 2012 apresentou valores de 60 a 90 dias secos consecutivos.

O comportamento dos valores CDD dos 169 pontos foi visualizado a partir do gráfico apresentado na Figura 4.30. Posteriormente, foi gerada uma divisão de 10 clusters, considerando valores de correlação linear, representado pelo dendrograma, exposto na Figura 4.31. A partir do dendrograma é possível perceber quais grupos tem maior semelhança entre eles, como é o caso dos *clusters* três e cinco. Para compreender como estes dados estão subdivididos, a Figura 4.32 mostra os gráficos dos pontos pertencentes a cada *clusters*, demonstrando que os clusters 9 e 10 apresentam comportamento bem singular.

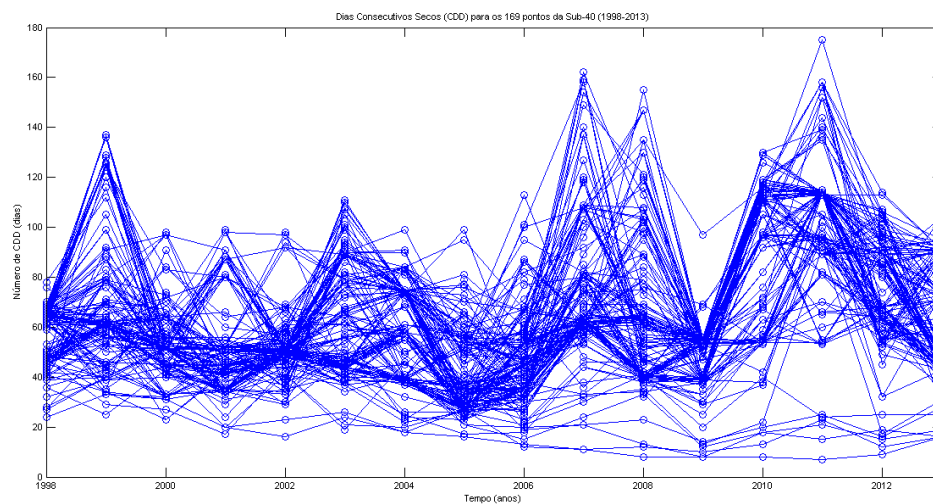


Figura 4.30: Séries temporais dos CDD para os 169 pontos (1998–2013).

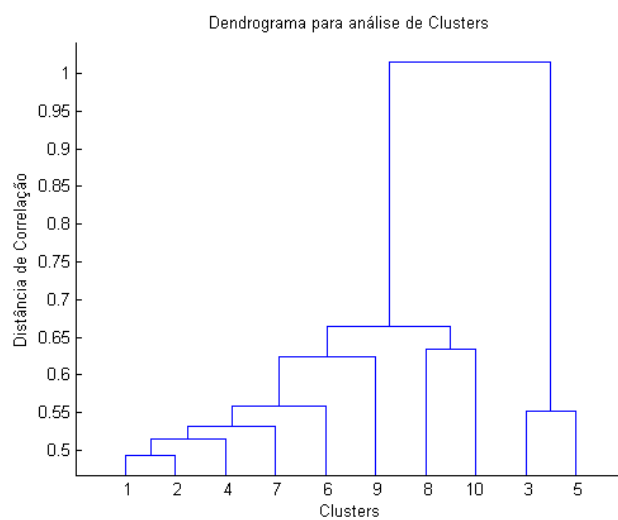


Figura 4.31: Dendrograma do CDD.

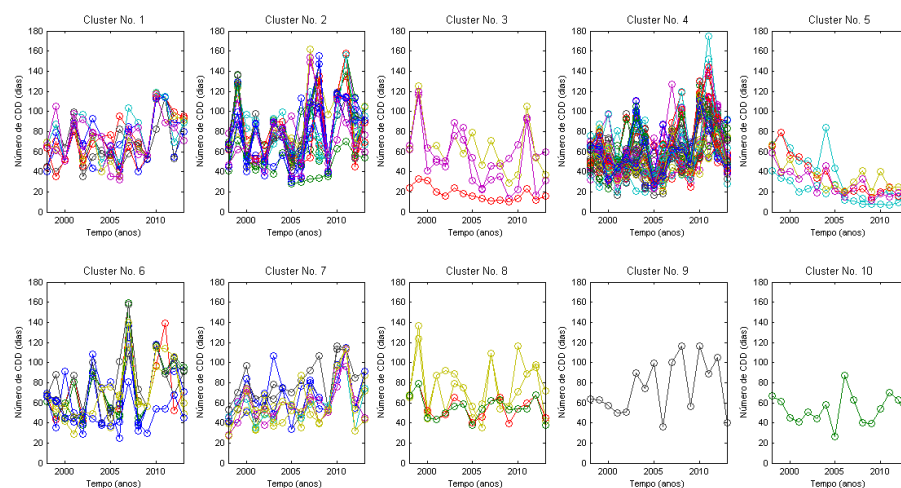


Figura 4.32: Séries temporais dos valores de CDD divididas em 10 clusters (1998–2013).

Diante do que foi exposto acima, gerou-se o mapa da espacialização dos *clusters* (Figura 4.33). Analisando a Figura 4.33 foi possível perceber que os *clusters* dos grupos três e cinco estão inseridos na área do reservatório Três Marias, visto que o último apresenta uma pequena região na parte sul da área em estudo. Ainda observou-se que nem sempre pontos pertencentes aos mesmos grupos localizam-se próximos entre si, como, por exemplo, ocorreu no grupo 8, presente em várias regiões da ilustração.

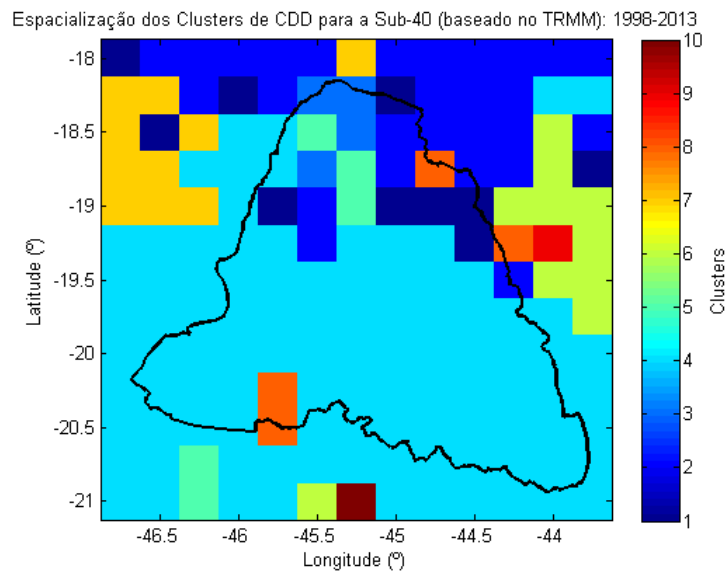


Figura 4.33: Espacialização dos *clusters* de CDD.

Analisando os dias úmidos consecutivos (CWD), os anos que indicaram menores valores de CWD foram: 1999, 2007 e 2012, indicados na Figura 4.34. É possível perceber que as áreas centrais da bacia indicaram os menores valores. Já a região sul apresentou os valores mais elevados e o ano que demonstrou os maiores valores CWD foi 2008 (Figura 4.35).

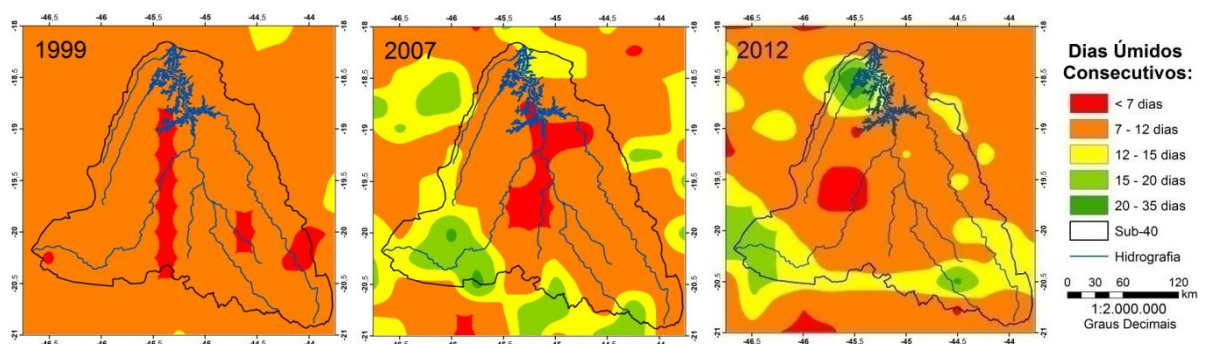


Figura 4.34: Espacialização do CWD nos anos de 1999, 2007 e 2012.

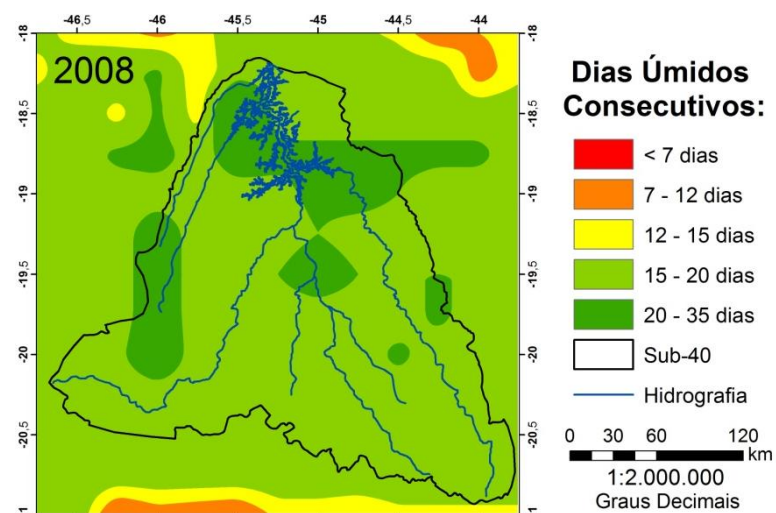


Figura 4.35: Espacialização do CWD no ano de 2008.

O comportamento dos valores CWD dos 169 pontos foram expostos no gráfico, apresentado na Figura 4.36. A partir da divisão dos valores CWD em 10 *clusters*, considerando valores de correlação linear, construiu-se o dendrograma, exposto na Figura 4.37. Com o dendrograma é possível identificar os grupos de maior semelhança entre eles, como é o caso dos *clusters* dois e três. Para compreender como estes dados estão subdivididos, a Figura 4.38 mostra os gráficos dos pontos pertencentes a cada *cluster*. No cluster 8 percebe-se um pico de dias úmidos consecutivos no ano de 2009 enquanto que no cluster 10 os valores se mostram com certa regularidade ao longo dos anos.

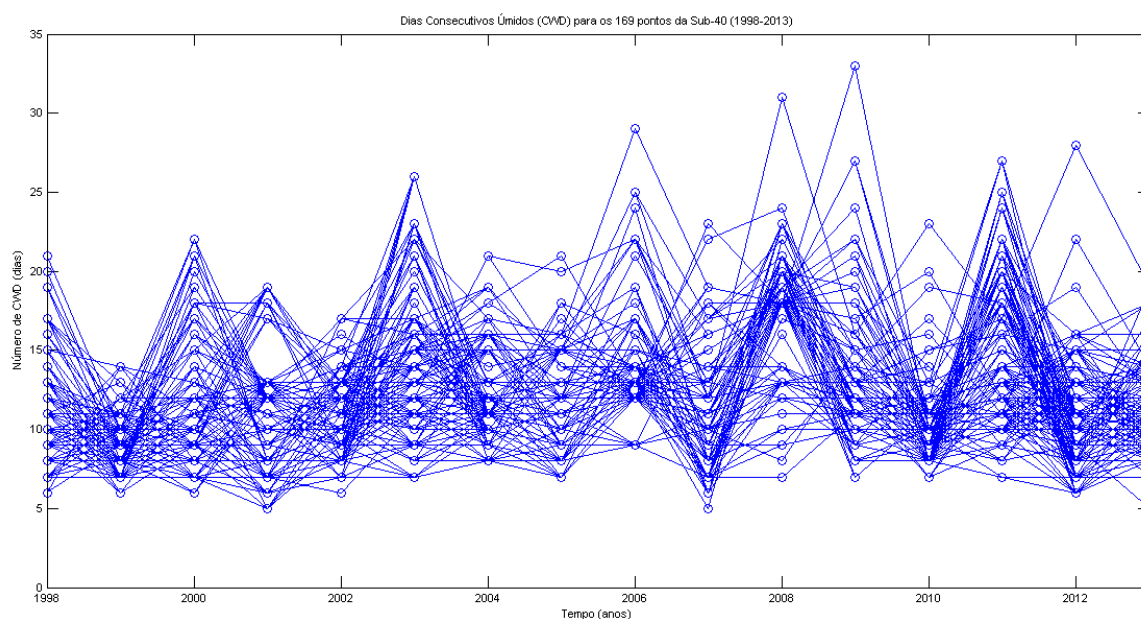


Figura 4.36: Séries temporais dos CWD para os 169 pontos (1998–2013).

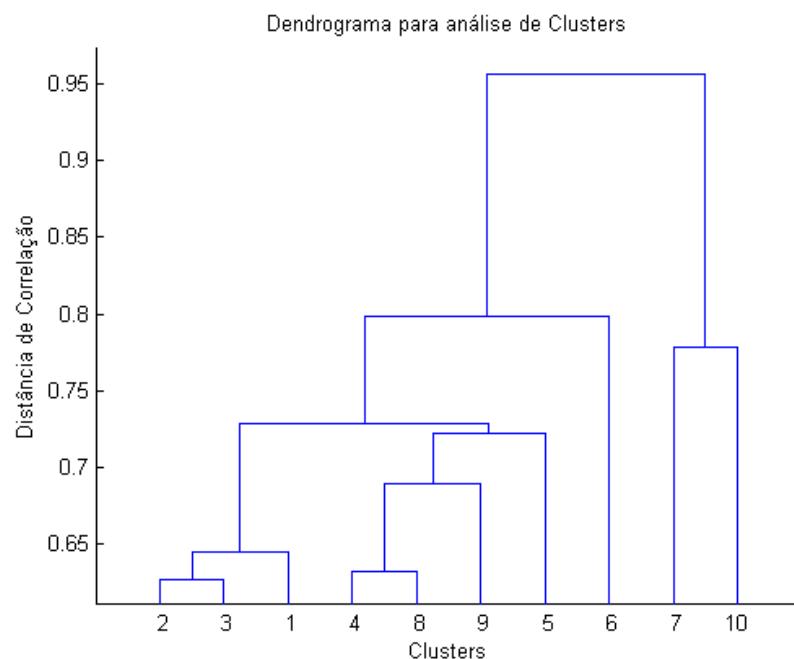


Figura 4.37: Dendrograma de 10 clusters do CWD.

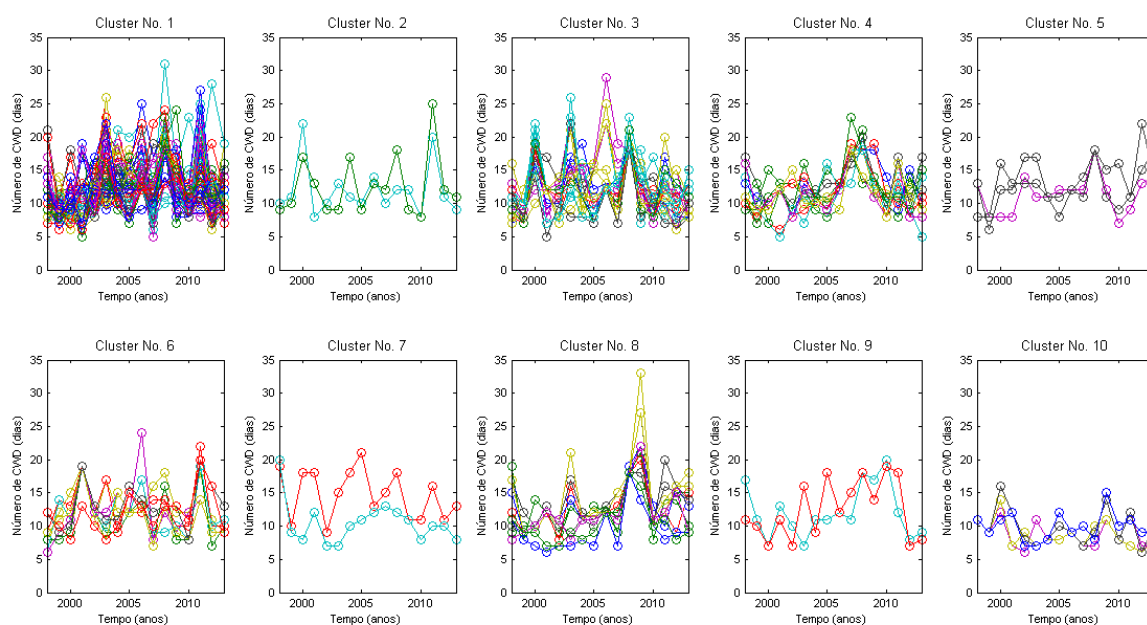


Figura 4.38: Séries temporais dos valores de CWD divididas em 10 clusters (1998–2013).

A partir da espacialização dos *clusters* de CWD (Figura 4.39), foi possível a visualização de cada grupo. Como também se observou no CDD, nem sempre os pontos dos mesmos *clusters* do CWD localizam-se próximos uns dos outros, com pode-se perceber no *cluster* sete, regiões distintas que apresentam comportamento de dados CWD semelhantes.

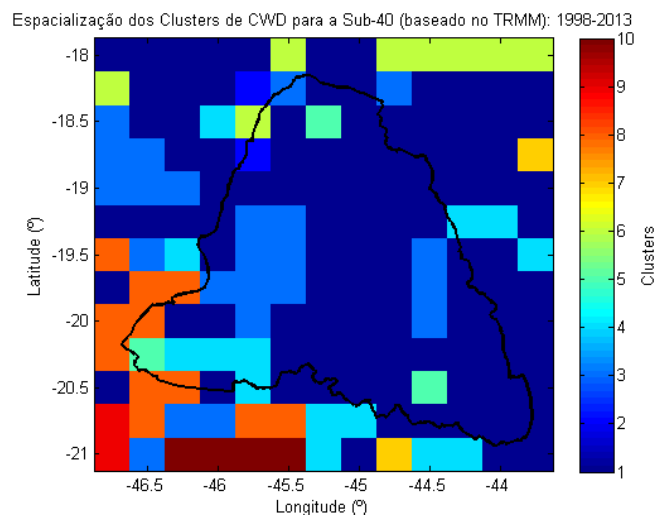


Figura 4.39: Espacialização dos *clusters* de CWD.

Ainda foi estimada a declividade da linha de tendência (*Slope*) do CDD e DWD. Observando os gráficos abaixo, representados, respectivamente, pelas Figuras 4.40 e 4.41, identificou-se que, tanto o CDD quanto o CWD, a maioria dos dados tende a aumentar ao longo do tempo. Alguns pontos localizados na área do Reservatório Três Marias demonstram comportamento inverso. Isto pode ser observado de maneira espacializada na Figura 4.42.

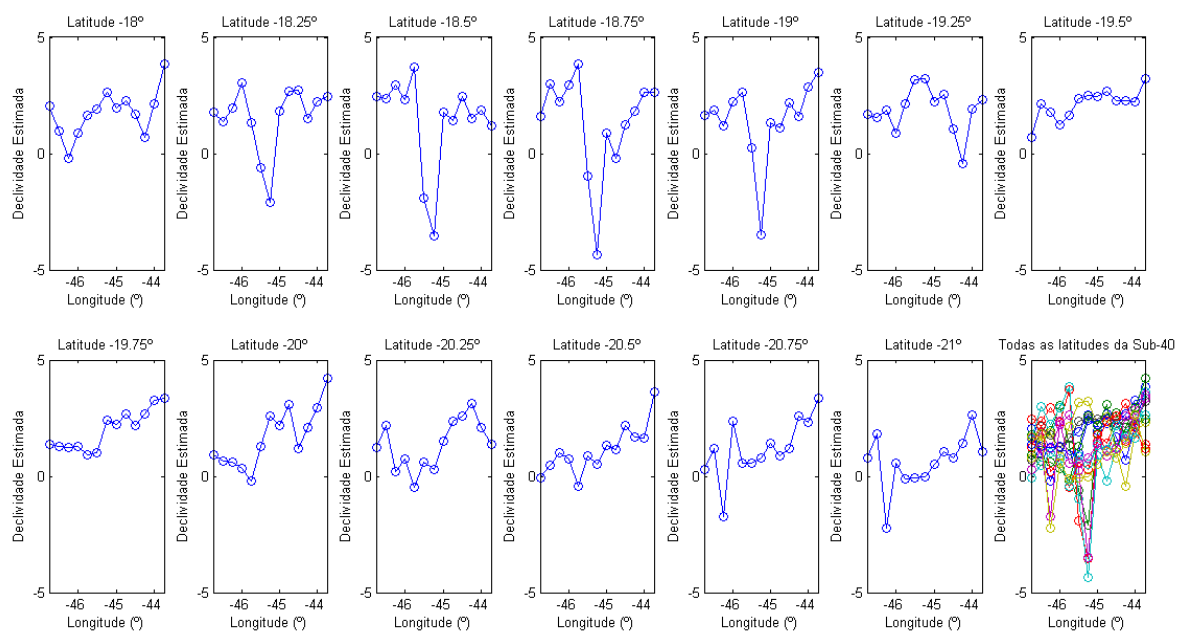


Figura 4.40: Variação ao longo das longitudes da declividade da linha de tendência dos CDD.

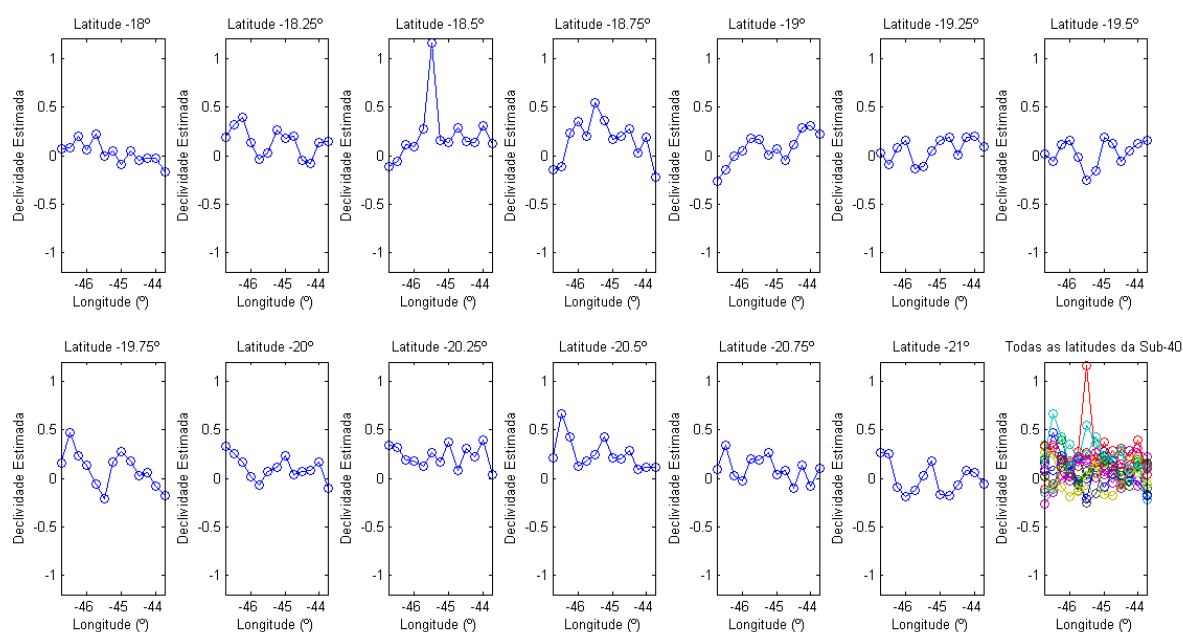


Figura 4.41: Variação ao longo das longitudes da declividade da linha de tendência dos CWD.

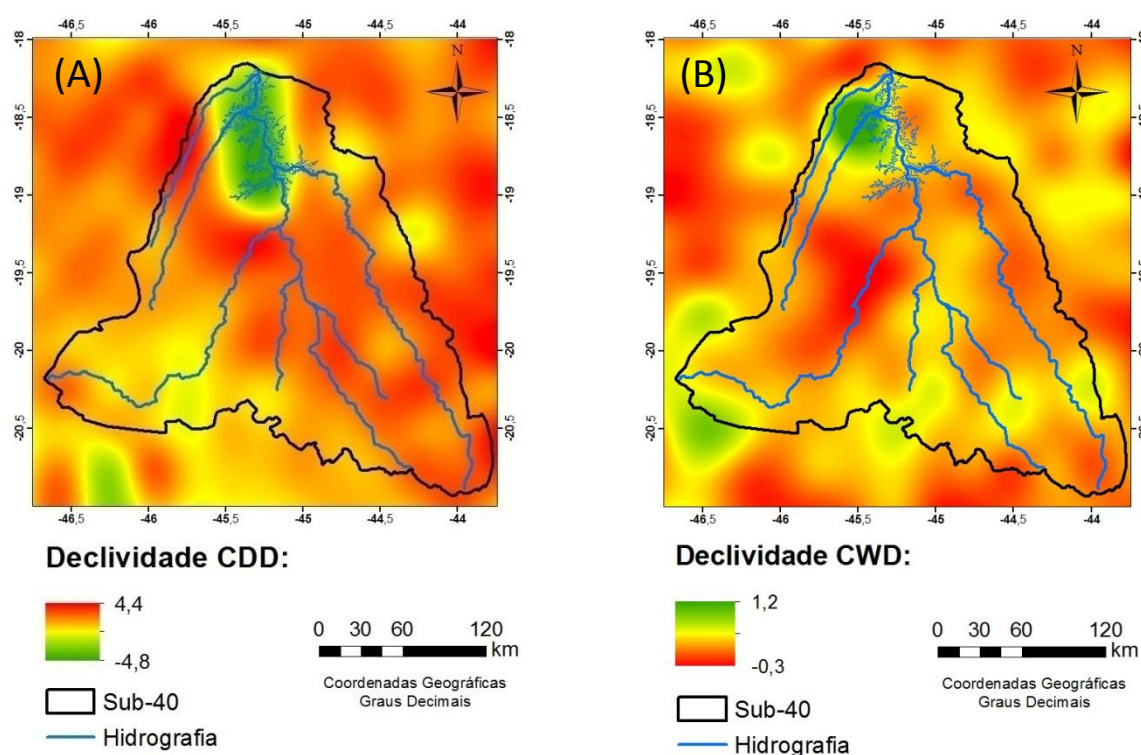


Figura 4.42: Espacialização da declividade da linha de tendência do (A) CDD e (B) CWD.

Porém, para determinar qual dos índices, CDD ou CWD, tem maior declividade, aplicou-se a diferença entre os dados das Figuras Apêndice A-8 e A-9. Na Figura 4.43 foi possível identificar quais as regiões as declividades da linha de tendência CDD superam as

CWD (cor vermelha). Em especial, na região do reservatório Três Marias esse comportamento se apresenta de maneira inversa com valores de declividade da linha de tendência CWD acima dos valores CDD (cor verde).

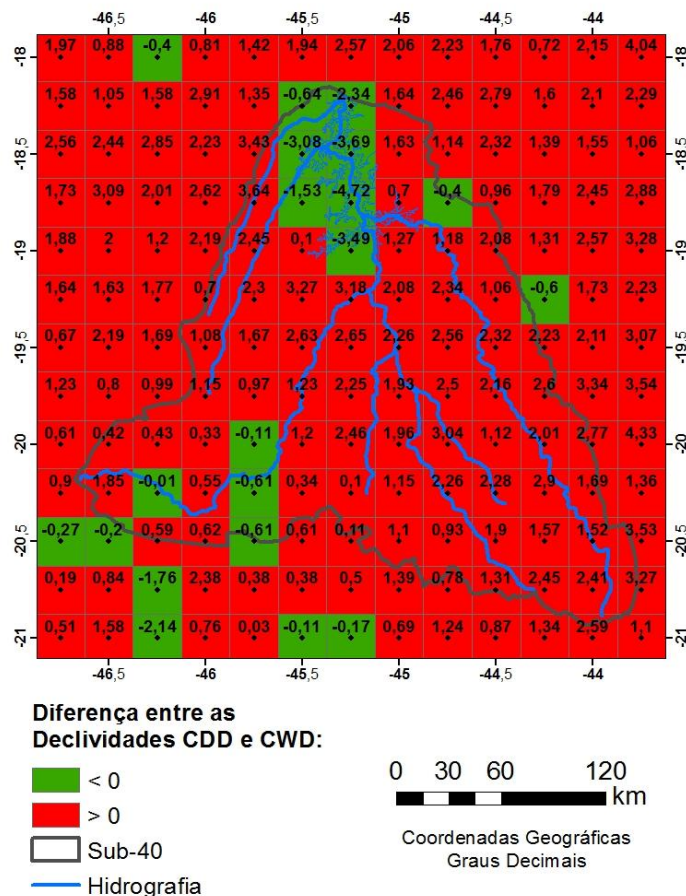


Figura 4.43: Diferença entre os valores de declividade da linha de tendência CDD e CWD.

4.6. Análise Espacial do SPI

A partir do cálculo do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24 e SPI-48 foram gerados os mapas SPI referentes aos Apêndices A-10, A-11, A-12, A-13, A-14, A-15 e A-16, respectivamente.

Com relação ao SPI-1, percebeu-se que os meses de março do ano de 2007 e dezembro de 2012 (Figura 4.44 e 4.45) apresentaram valores SPI próximo a -3 indicando que neles a precipitação foi muito abaixo da média. Já os meses de fevereiro (Figura 4.46) e julho (Figura 4.47) de 2004 foram bastante úmidos em relação à média de precipitação desses meses, com índices próximos a 3.

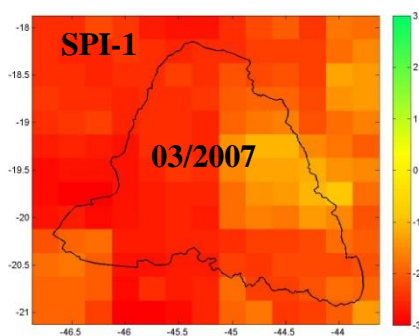


Figura 4.44: SPI-1 em março de 2007.

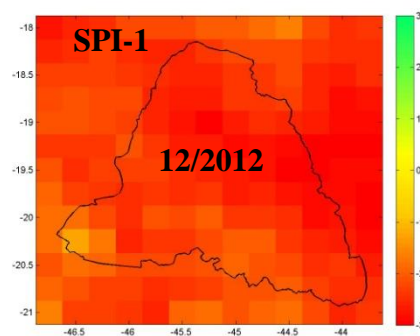


Figura 4.45: SPI-1 em dezembro de 2007.

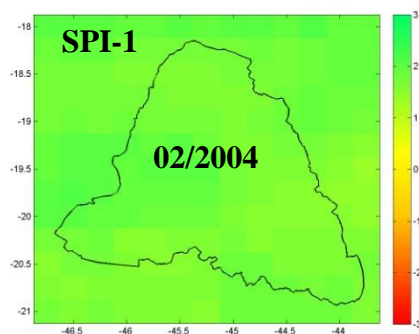


Figura 4.46: SPI-1 em fevereiro de 2007.

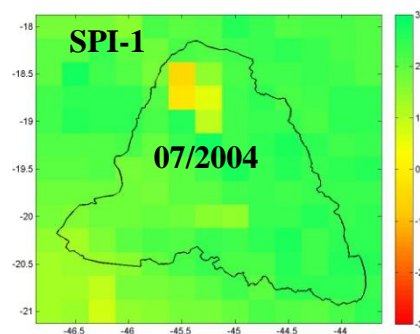


Figura 4.47: SPI-1 em julho de 2007.

Observando a Figura 4.48, verifica-se que é possível ocorrer em SPI de menores escalas de tempo, como, por exemplo, no SPI-1, períodos úmidos temporários durante períodos que indicam secas hidrológicas.

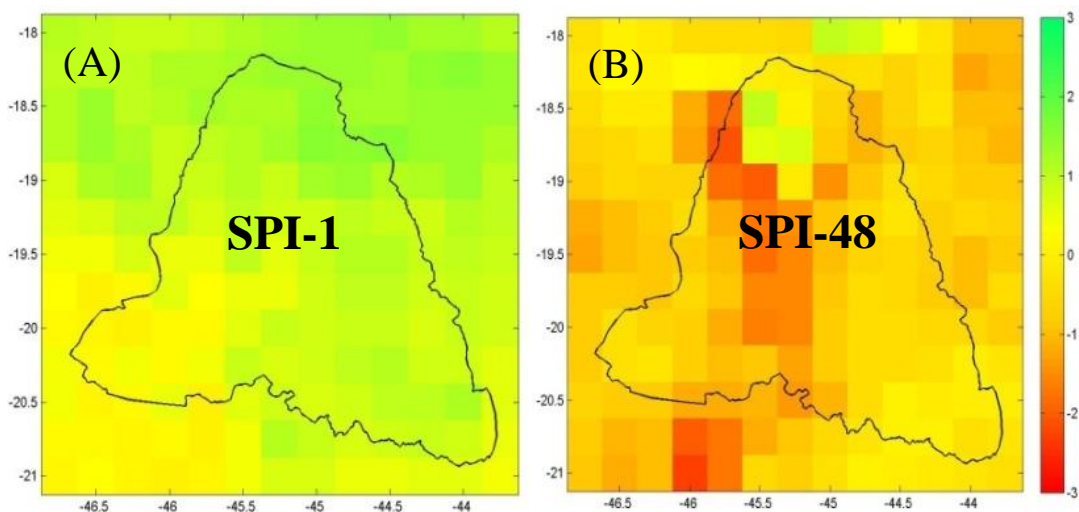


Figura 4.48: (A) SPI-1 e (B) SPI-48 em abril de 2013.

Já analisando os mapas SPI-3, foram identificados períodos que indicam seca nos SPI para três meses referentes aos meses de fevereiro, março e abril do ano de 2001 (Figura 4.49),

os quais consideram, respectivamente, para o cálculo do SPI as médias entre os meses: dezembro, janeiro e fevereiro; janeiro, fevereiro e março; fevereiro, março e abril. Ainda, percebeu-se que para os mesmos meses (fevereiro, março e abril) do ano de 2004, na Figura 4.50, o comportamento do SPI-3 indicou um período úmido.

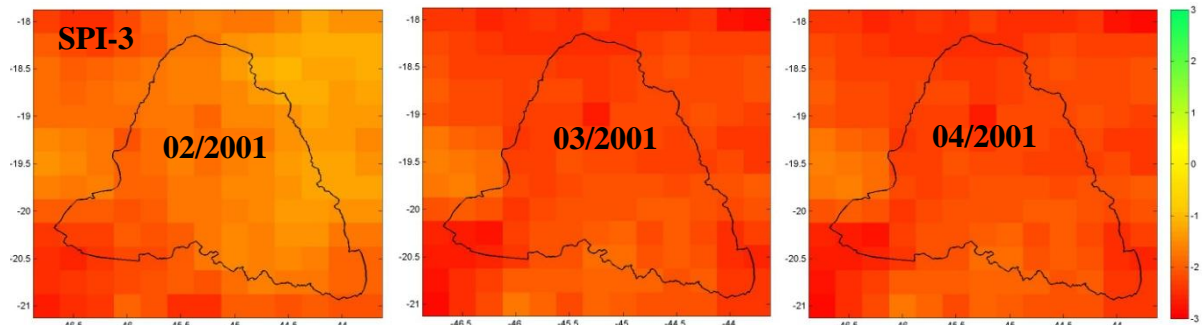


Figura 4.49: SPI-3 dos meses de fevereiro, março e abril do ano de 2001.

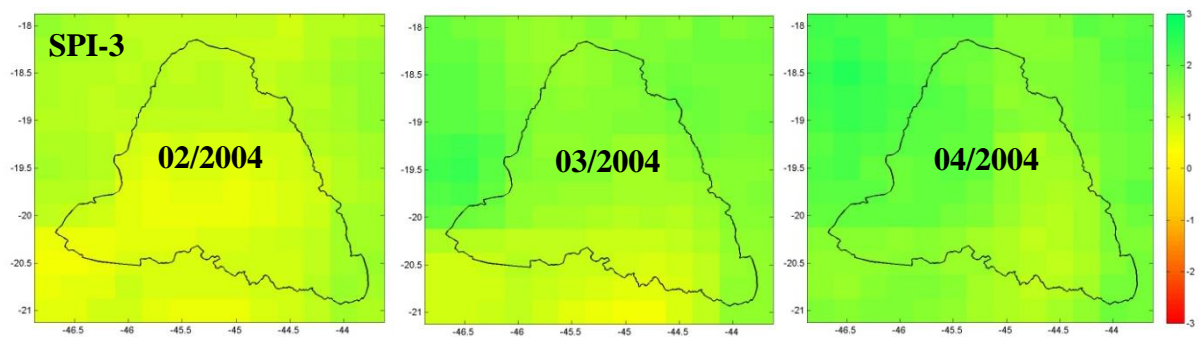


Figura 4.50: SPI-3 dos meses de fevereiro, março e abril do ano de 2004.

Comparando o SPI-3 com prazos mais longos, a Figura 4.51 mostra que mesmo apresentando a precipitação abaixo da normalidade para um período de três meses, os SPI-6, SPI-9 e SPI-12 indicam períodos úmidos, ou seja, percebe-se que esse comportamento é apenas um período seco temporário visto que em prazos mais longos demonstra outra realidade hídrica. É importante frisar a importância de observar prazos mais longos para evitar má interpretação dos dados.

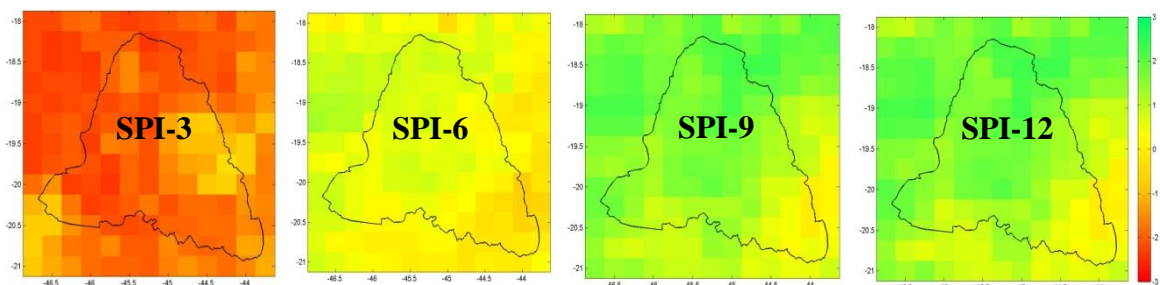


Figura 4.51: SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 do mês de maio do ano de 2007.

O SPI-6 indicou que os meses de março e abril do ano de 2001 continuam indicando períodos secos como também este comportamento se estende aos SPI-6 referentes aos meses de maio, junho e julho do mesmo ano (Figura 4.52). O SPI-6 do mês de junho se mostrou o mais seco, identificando os seis primeiros meses de 2001 como os mais críticos. É importante observar que o SPI-6 referente ao mês de dezembro de 2012 (Figura 4.53) se apresentou bastante seco, indicando que os últimos seis meses do ano de 2012, considerado ano de menor precipitação acumulada anual (Figura 4.2), foram os que apresentaram menor precipitação ao longo do ano referente ao mesmo período nos demais anos.

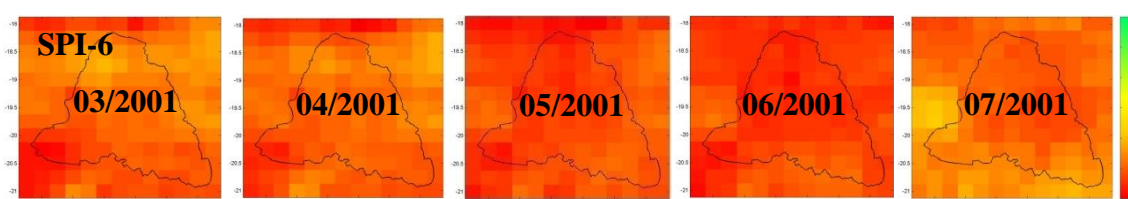


Figura 4.52: SPI-6 dos meses de março, abril, maio, junho e julho do ano de 2001.

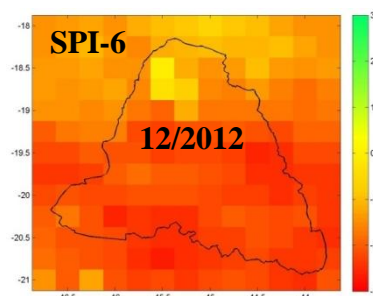


Figura 4.53: SPI-6 do mês de dezembro do ano de 2012.

Ainda associando os mapas SPI-6 (Apêndice A-12) aos dados de vazões mensais do Reservatório Três Marias (Apêndice A-25), observou-se que este índice tem influência direta nos valores de vazão do reservatório. Os maiores e menores valores SPI-6 e dos dados de vazão do reservatório foram representados em períodos similares, como ocorreu no SPI-6 de dezembro de 2012. Neste período o SPI-6 apresentou valores de SPI com indicativo de seca e a vazão do reservatório apresentou 330 m³/s, uma das menores vazões do mês de dezembro para todo o período.

No SPI-9, em 2001, apresentou um período bastante seco referente aos SPI-9 dos meses de janeiro até setembro (Figura 4.54). O SPI-9 de janeiro de 2001 considera a média entre os meses de maio do ano anterior a janeiro/2001, ou seja, o período seco começou não no ano de 2001, mas desde o ano anterior. Em contrapartida, no ano de 2007, os SPI-9 dos meses de janeiro a agosto, indicam períodos úmidos, já o SPI-9 do mês de setembro mostra

valores próximos à normalidade (Figura 4.55). Após este período, os SPI dos meses de outubro, novembro e dezembro de 2007 demonstram indicativos de seca (Ver Apêndice A-13).

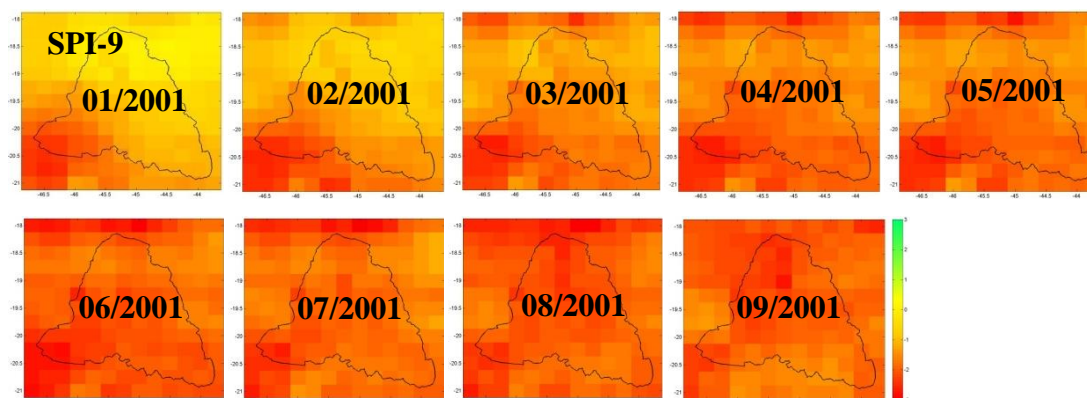


Figura 4.54: Os SPI-9 referentes de janeiro a setembro do ano de 2001.

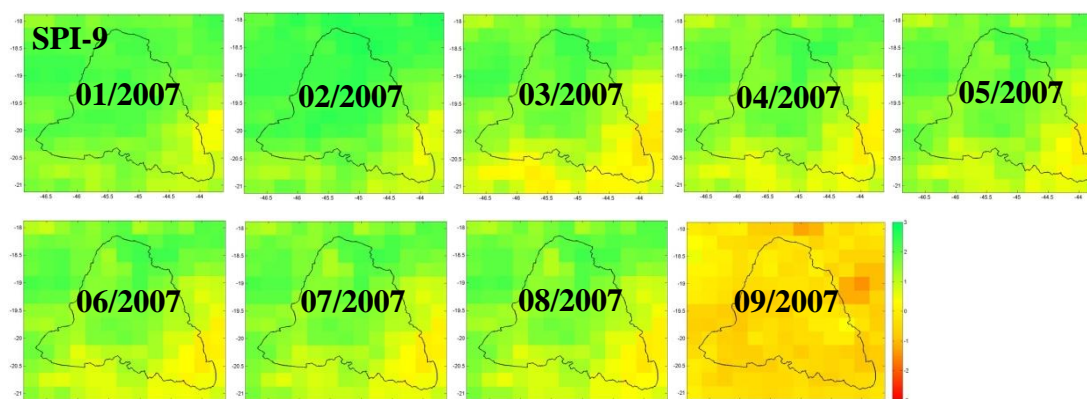


Figura 4.55: Os SPI-9 referentes de janeiro a setembro do ano de 2007.

Os mapas SPI-9 dos períodos de janeiro a setembro de 2001, outubro a dezembro de 2007 e janeiro a agosto de 2013 demonstram valores SPI abaixo de -1.5, requerendo atenção especial visto que é um forte indicativo de seca com impactos significativos na agricultura, o que consequentemente afetará outras atividades.

No SPI-12, o comportamento do ano de 2001 continuou indicando que este foi um ano bastante seco em relação à média histórica bem como o ano de 2000, visto que a partir do SPI-12 de janeiro/2001 já apresenta período seco estendendo-se até o SPI-12 de dezembro/2001. Ainda, o SPI-12 de dezembro de 2007 demonstrou que o ano de 2007 esteve abaixo de sua normalidade, como também o ano de 2012.

Períodos de SPI mais prolongados, como os SPI para 24 e 48 meses, indicaram que o SPI-24 teve período seco de 1998 a 2002 como também SPI-24 de janeiro a dezembro de 2013. Os SPI-24 de janeiro a outubro de 2007 correspondem a períodos bastante úmidos

(Apendice A-15). Já o SPI-48 apresentou período seco para os SPI-48 até dezembro de 2004, como também para o SPI-24 de janeiro a dezembro de 2013 (Apendice A-16).

Ainda foi percebido que os SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24 e SPI-48 para janeiro de 2005 indicaram seca na localização do Reservatório Três Marias. No Apêndice A-16, observou-se que este período seco no reservatório foi prolongado, visto que este comportamento se estendeu até o SPI-48 de outubro de 2005, o qual considera a média de novembro de 2001 a outubro de 2005.

Conforme dito, anteriormente, por McKee *et al.* (1993), o SPI com períodos de tempo menores (1, 3 e 6 meses), percebeu-se maior oscilação acima e abaixo de zero. Já como os períodos de tempo de nove, 12, 24 e 48 meses, o SPI reagiu mais lentamente para mudanças na precipitação, ou seja, períodos com SPI negativo e positivo se tornar em menor número, porém de maior duração.

Com relação à classificação aplicada aos níveis SPI, ou seja, em: extremamente, severamente, moderadamente e suavemente úmido como também em extremamente, severamente, moderadamente e suavemente seco. A classificação extremamente úmido indicou que o SPI-1 (Figura 4.56) tem baixa representabilidade com percentagem abaixo de 3% dos dados enquanto o SPI-24 (Figura 4.57), na área leste do Reservatório Três Marias, apresentaram os índices mais significativos, acima de 5%.

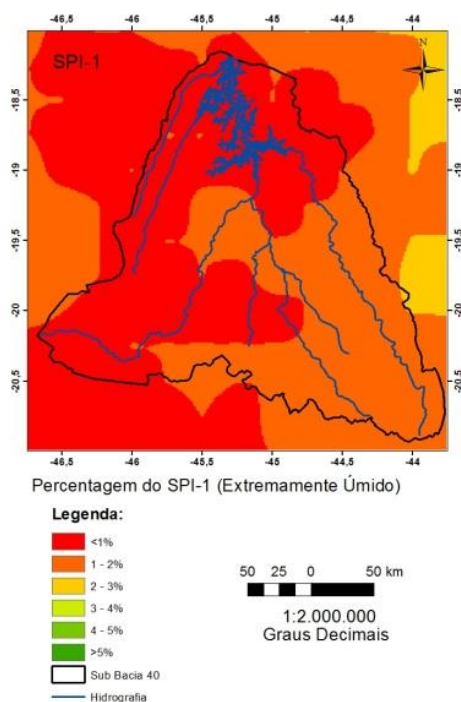


Figura 4.56: Percentagem dos dados SPI-1 para classificação Extremamente Úmido.

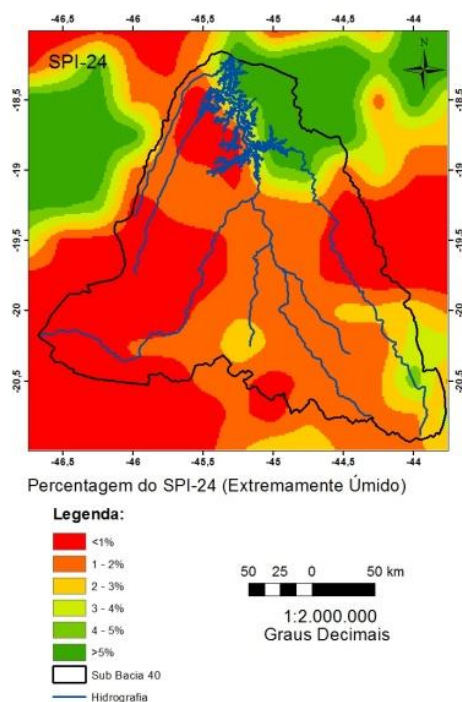


Figura 4.57: Percentagem dos dados SPI-24 para classificação Extremamente Úmido.

Os mapas de severamente úmido apresentou menores valores no SPI-6 (Figura 4.58) enquanto que no SPI-24 (Figura 4.59) demonstrou os maiores valores distribuídos de forma bem variada.

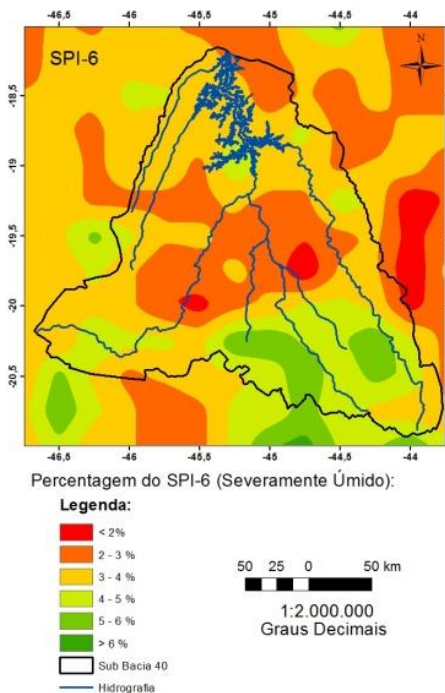


Figura 4.58: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Severamente Úmido.

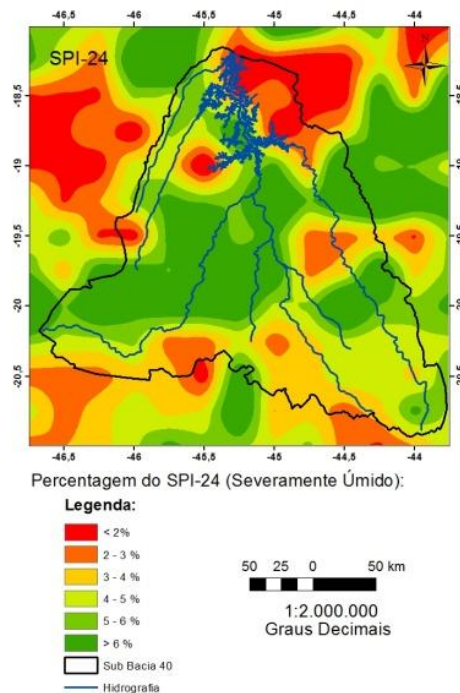
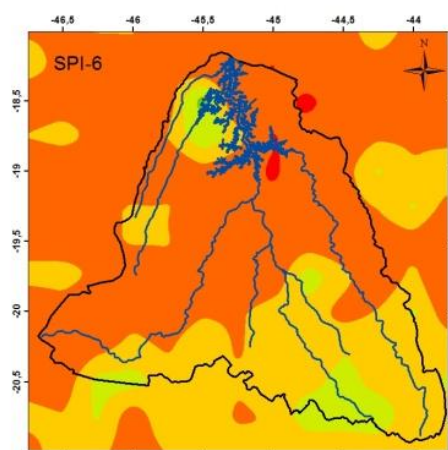


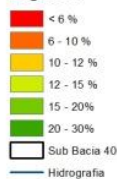
Figura 4.59: Percentagem dos dados SPI-24 para classificação Severamente Úmido.

Já nos mapas de moderadamente úmido e seco, o SPI-6, apesar de apresentar baixa representabilidade tanto para úmido quanto para seco, como demonstra as Figuras 4.60 e 4.62. Enquanto que o SPI-48 ilustra que na área central estão representadas suas maiores percentagens, acima de 20% dos dados (Figuras 4.61 e 4.63).



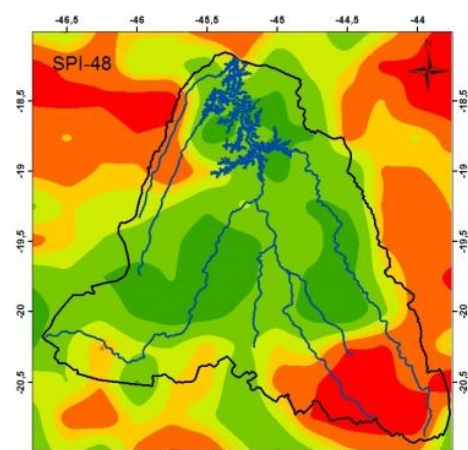
Percentagem do SPI-6 (Moderadamente Úmido):

Legenda:



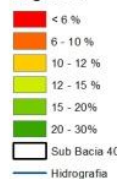
50 25 0 50 km
1:2.000.000
Graus Decimais

Figura 4.60: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Moderadamente Úmido.



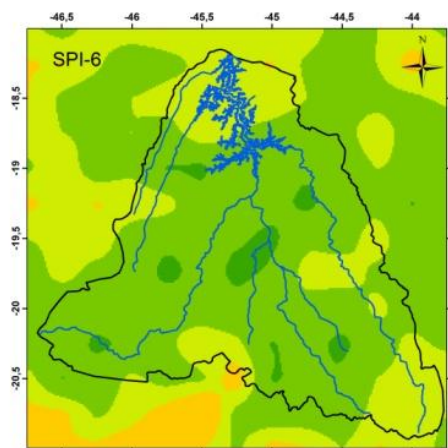
Percentagem do SPI-48 (Moderadamente Úmido):

Legenda:



50 25 0 50 km
1:2.000.000
Graus Decimais

Figura 4.61: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Moderadamente Úmido.



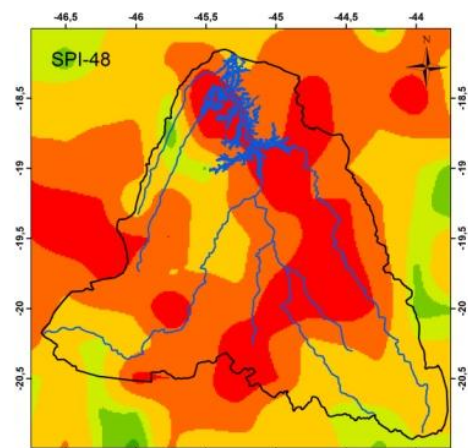
Percentagem do SPI-6 (Moderadamente Seco):

Legenda:



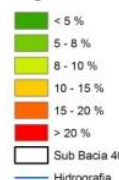
60 30 0 60 km
1:2.000.000
Graus Decimais

Figura 4.62: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Moderadamente Seco.



Percentagem do SPI-48 (Moderadamente Seco):

Legenda:



60 30 0 60 km
1:2.000.000
Graus Decimais

Figura 4.63: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Moderadamente Seco.

Em relação à classificação suavemente úmida e seca, foi possível perceber nos mapas de SPI-48, especialmente na região sul da bacia, que os menores valores da classificação

suavemente úmida (Figuras 4.64) possuem a mesma distribuição espacial dos menores valores nos mapas de suavemente seco (Figuras 4.65).

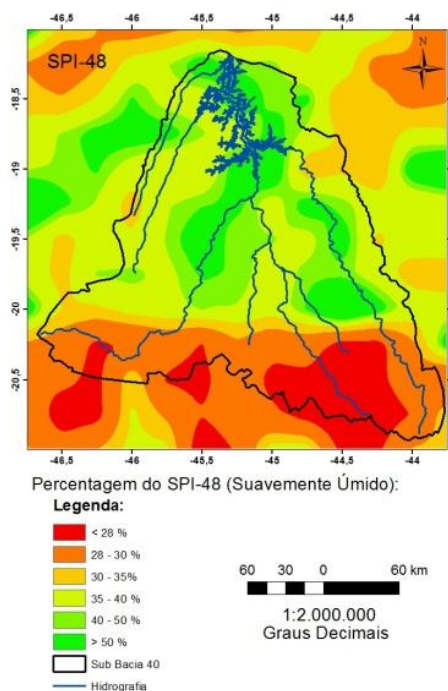


Figura 4.64: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Suavemente Úmido.

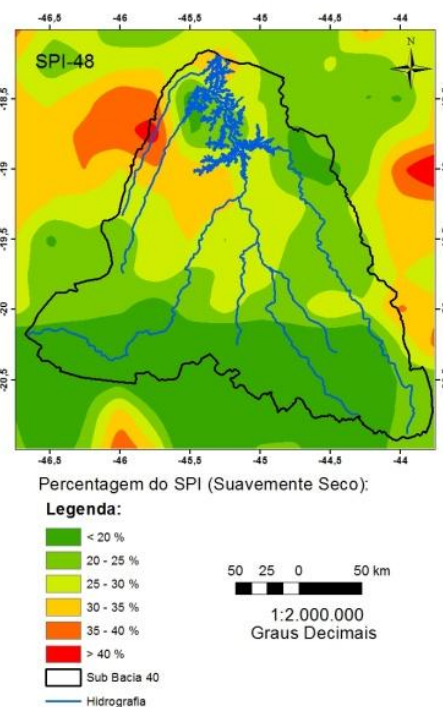


Figura 4.65: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Suavemente Seco.

As percentagens referentes à classificação do SPI em severamente seco demonstrou que o SPI-9 e SPI-48 tiveram, respectivamente, os menores e maiores valores. A partir da Figura 4.67, para SPI-48, identificou-se que para este índice obteve-se menos de 2% dos dados na área central e acima de 10% ao sul.

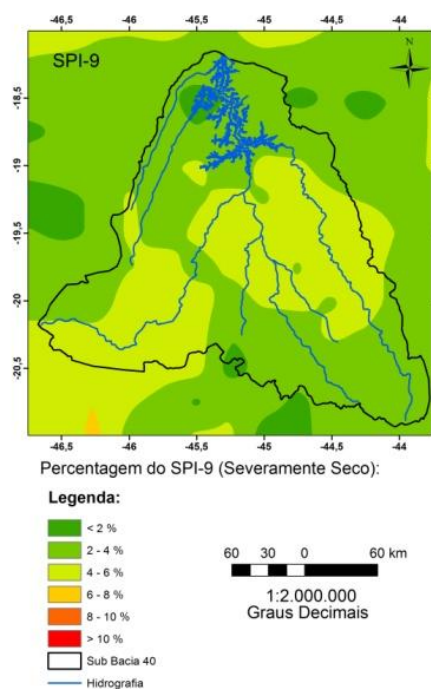


Figura 4.66: Percentagem dos dados SPI-9 para classificação Severamente Seco.

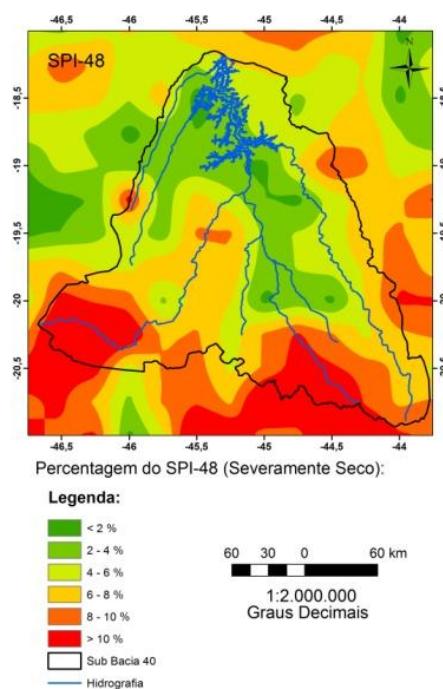


Figura 4.67: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Severamente Seco.

Analisando os mapas de classificação extremamente seco, foi observado na Figura 4.68, referente ao SPI-48, percentagem muito baixa, com menos de 1% dos dados, enquanto que para o SPI-6 (Figura 4.69) foi observado valores acima de 4% em grande parte da Sub-40.

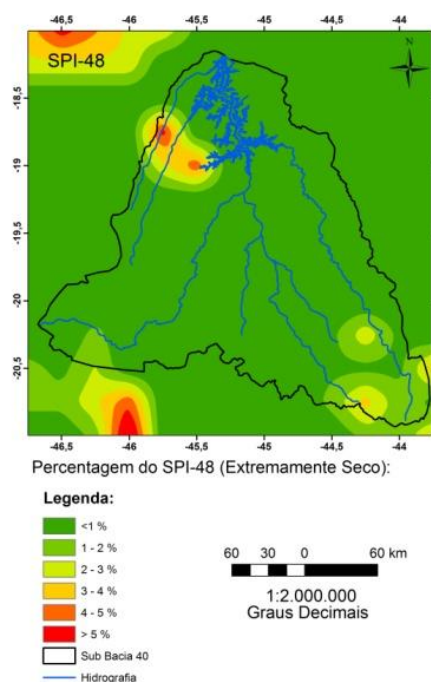


Figura 4.68: Percentagem dos dados SPI-48 para classificação Extremamente Seco.

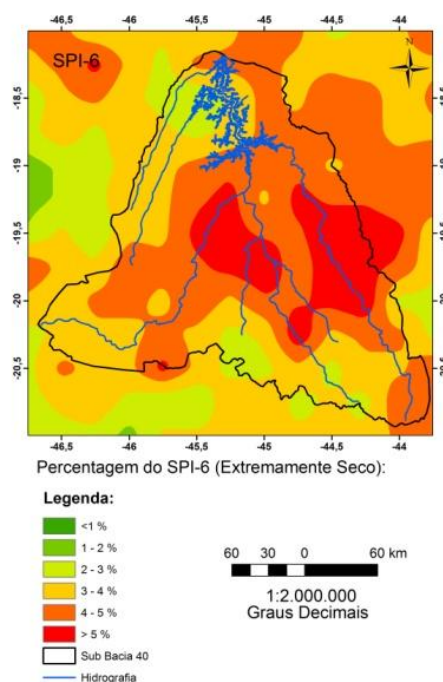


Figura 4.69: Percentagem dos dados SPI-6 para classificação Extremamente Seco.

Os demais mapas de classificação SPI estão representados nos Apêndices A-17, A-18, A-19, A-20, A-21, A-22, A-23 e A-24.

4.7. Dendrograma e Mapas de *Clusters*

A partir da construção do dendrograma, foi possível realizar a análise de *clusters*. No dendrograma, representado pela Figura 4.70, o eixo vertical mostra a diferença entre os valores da distância de correlação e no eixo horizontal estão distribuídos os trinta grupos formados.

Para decidir a quantidade de *clusters* que serão analisados, primeiramente, é preciso identificar qual o nível de similaridade entre as correlações será necessária para o estudo. Observando a Figura 4.70 percebe-se que considerando a diferença entre as correlações seja de 0,1, o conjunto de dados será dividido em 2 *clusters*, em que no grupo 1 estarão contidas todas as aglomerações, exceto o grupo 2, e o grupo 2 continua com a mesma denominação. Mas, se o nível de detalhamento for 0,015, os dados serão divididos em 26 *clusters* e que, por exemplo, os grupos 20 e 23, separados na divisão em 30 *clusters*, pertencerão a um único conjunto de dados.

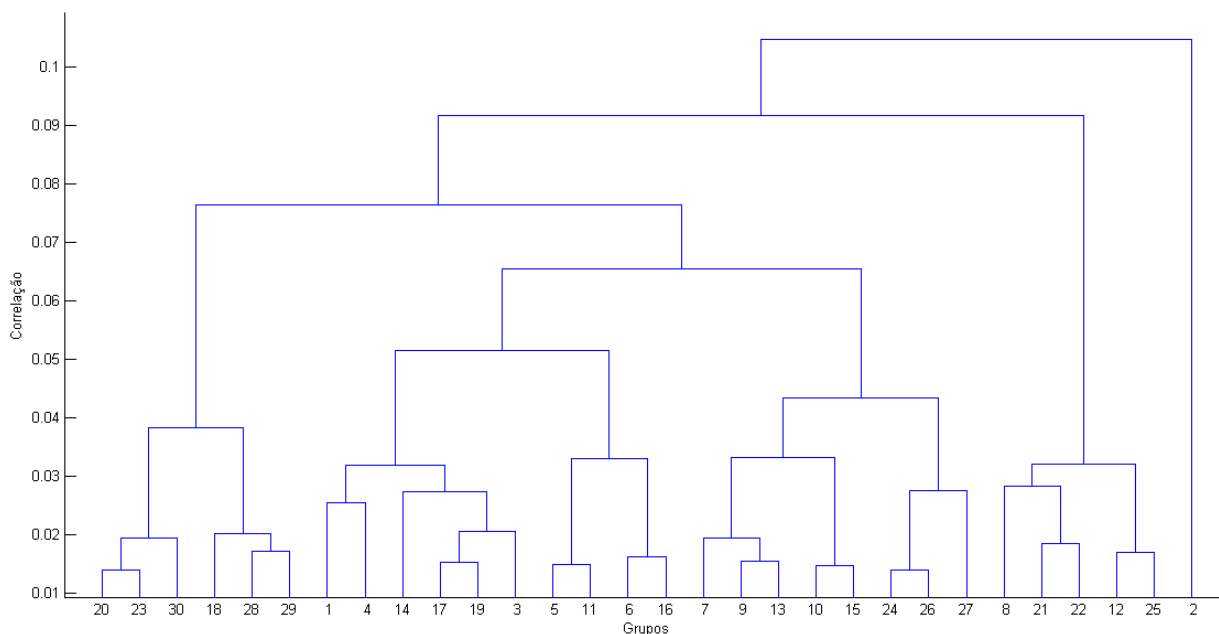


Figura 4.70: Dendrograma de 30 *clusters* dos dados de precipitação acumulada mensal TRMM.

Porém, visto que os dados utilizados no dendrograma foram de correlação da precipitação acumulada mensal dos 169 pontos pertencentes à área da Sub-40 e suas adjacências, fez-se necessária à espacialização de tais dados. Para melhor demonstrar o

comportamento dos *clusters* formados, foram construídos mapas de dois até 11 como também de 30 *clusters*, respectivamente expostos na Figura 4.71.

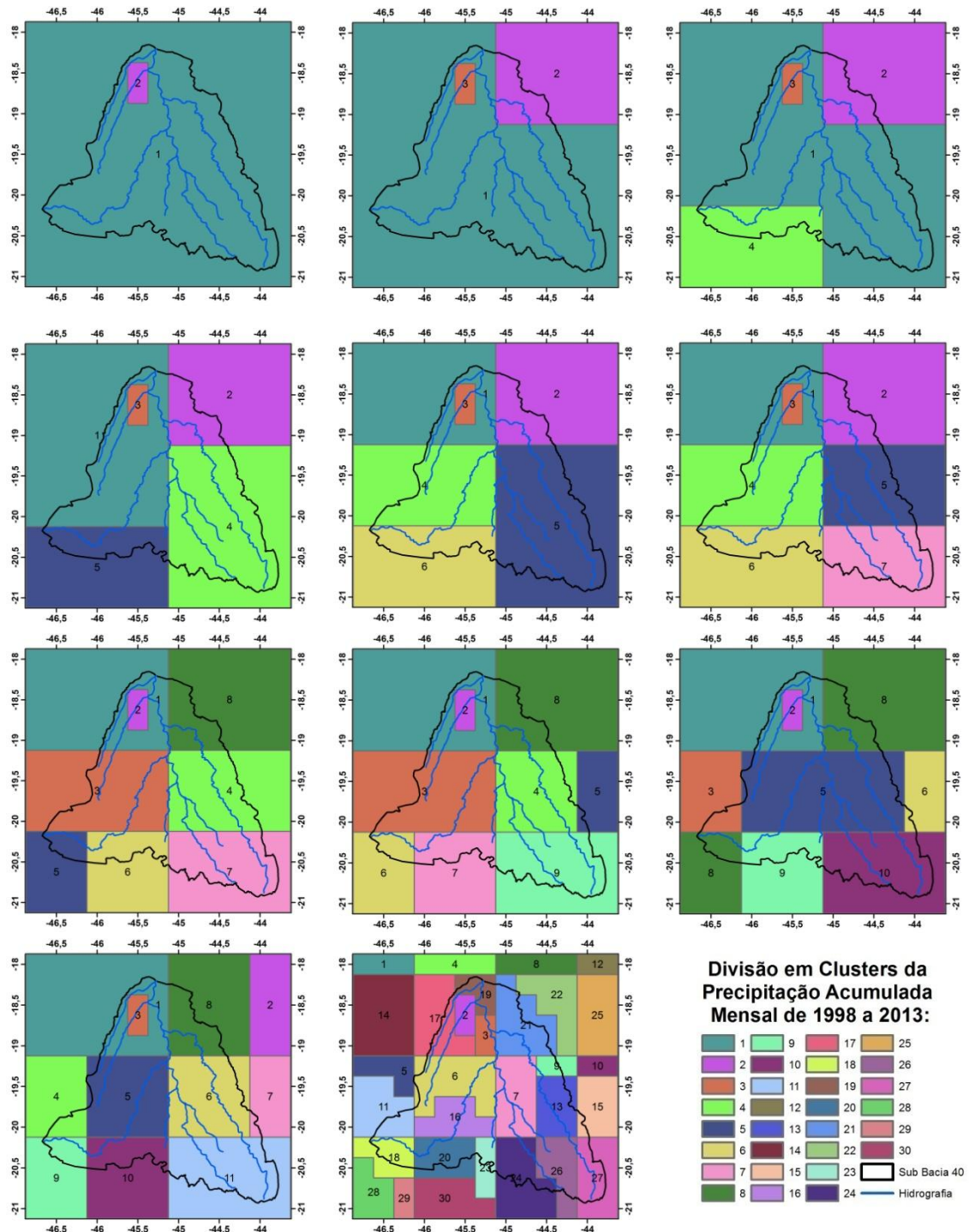


Figura 4.71: Mapas de dois a onze e 30 *clusters* considerando a distância de correlação entre as precipitações mensais de 1998 a 2013.

A partir da Figura 4.71, foi possível identificar a localização dos 30 *clusters* (último mapa) representados no dendrograma. E, partindo deste, visualizou-se quais *clusters* mais se

assemelham, ou seja, no mapa de 11 *clusters* (penúltimo mapa) o grupo 9 é representado pelo conjunto dos *clusters* 18, 28 e 29, presente na ilustração com 30 *clusters*. Através do dendrograma, percebeu-se que o grupo 2, formado pelos pontos P32 e P45 (Figura 4.72), apresentou comportamento singular frente aos outros dados, visto que este não se subdividiu à medida que a diferença entre as correlações tornava-se menor. Permanecendo na mesma localização em todos os mapas.

Ainda, através da Figura 4.72, identificou-se quais pontos pertencem a cada *cluster*, ou seja, os pontos P1, P2 e P3 pertencem ao grupo 1 para a divisão em 30 *clusters*.

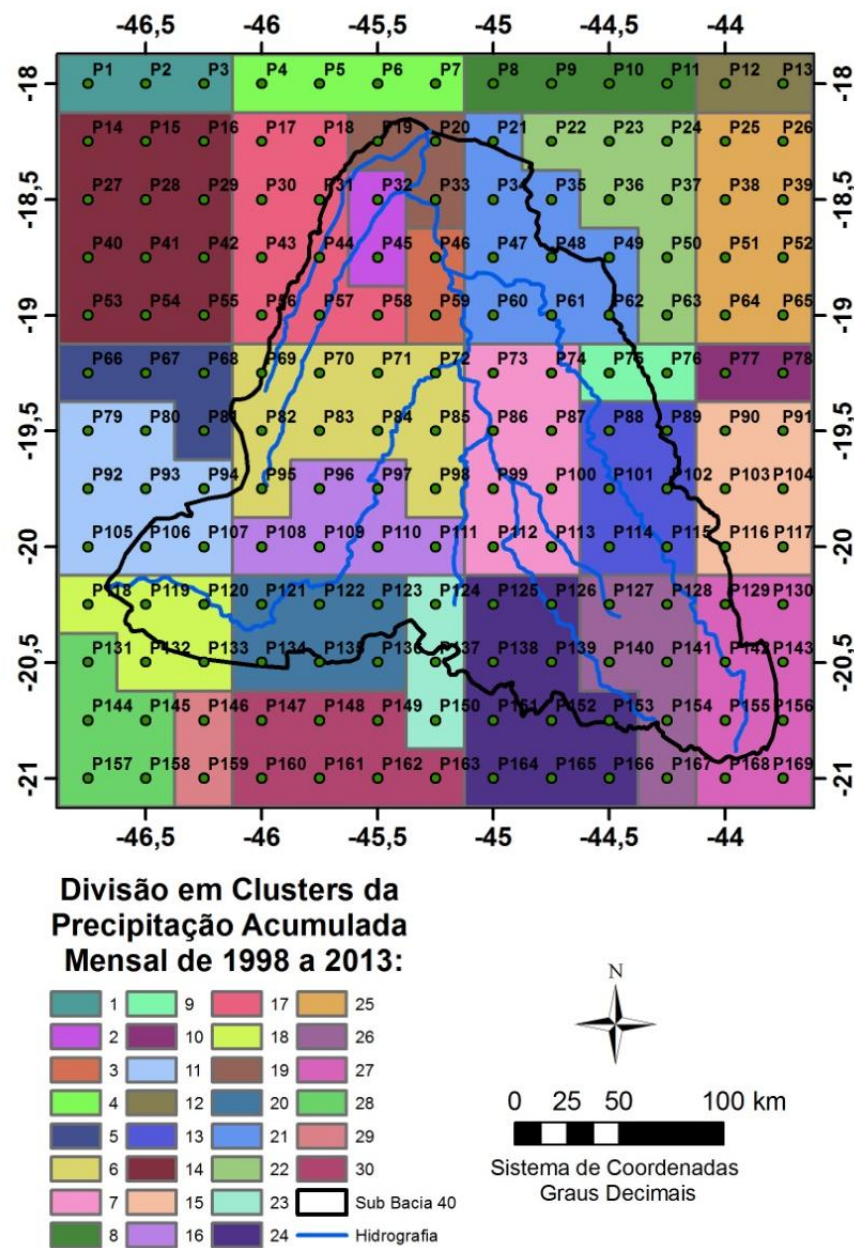


Figura 4.72: Mapa de 30 *clusters* com pontos de coleta de dados TRMM.

5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados, foi possível entender o comportamento e a distribuição da precipitação ao longo da bacia do Alto São Francisco (Sub-40), para o período de 16 anos recentes (1998 a 2013), utilizando dados estimados pelo TRMM, i.e., 169 séries diárias contínuas, abrangendo toda a área de estudo.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se constatar que os anos de maior e menor valor de precipitação acumulada anual foram, respectivamente, os anos de 2009 e 2012. Os meses mais secos foram junho, julho e agosto, sendo julho, em relação à média de todos os períodos, o mês de menor média de precipitação. Em contrapartida, os meses mais úmidos foram novembro, dezembro e janeiro, com maior precipitação em dezembro. Ambos os dados de precipitações acumuladas anuais e mensais mostraram que a região nordeste da bacia chove menos e que o oeste e sul são mais úmidos.

A partir da espacialização dos dados, foi possível identificar não só os anos e meses mais úmidos e secos como também outros resultados. Pode-se observar o comportamento da correlação da chuva versus vazão, indicando que o tempo de resposta da precipitação frente à vazão afluente ao reservatório Três Marias são de quatro dias após a ocorrência de chuvas. Dessa forma, recomenda-se que estudos envolvendo, por exemplo, a modelagem chuva-vazão, deva usar a precipitação de quatro dias anteriores para que se obtenham melhores resultados na simulação. Apresentando-se de forma espacializada, identificaram-se as áreas de maior e menor correlação entre a chuva e a vazão da área em questão. Estas áreas identificadas servem para indicar os melhores locais para serem realizados monitoramentos pluviométricos, com o intuito de melhorar o desempenho de tais modelos chuva-vazão.

A relação entre a precipitação e altimetria mostra que a maioria dos dados de precipitações acumuladas anuais é diretamente proporcional a altimetria, mas que em alguns casos ela apresenta pouca variabilidade em relação ao terreno. Esta informação pode ser utilizada em planejamento de ações de uso e ocupação do solo, visto que, dependendo da atividade projetada para cada área, entender o comportamento da chuva pode influenciar diretamente no desenvolvimento da mesma.

O ano de 2009, além de expressar a maior precipitação anual, foi o que apresentou menor número de dias secos consecutivos, mostrando que as chuvas do referido ano foram bem

distribuídas, não havendo, portanto, grandes períodos de estiagem. Ainda com relação ao CDD, pode-se concluir que região do reservatório Três Maria apresenta certa regularidade de chuvas, visto que demonstrou menores índices CDD em todos os mapas como também foi onde se obteve os maiores índices de dias úmidos consecutivos. É importante conhecer tais índices, CDD e CWD, pois a partir destes, identificou-se que nem sempre os anos de maior precipitação acumulada são, também, os períodos de regularidade de chuva.

Com relação ao SPI, a partir dos mapas, produziram-se informações de SPI de maneira espacializada identificando a cada período as regiões de maiores e menores valores. Com a extração das porcentagens da classificação SPI proposta por Vermes (1998), identificou-se os SPI mais representativos para cada classificação. A partir de tal informação, é possível localizar quais áreas demonstram maior propensão a períodos secos e/ou úmidos e em quanto tempo tais classificações se tornam mais evidentes, como, por exemplo, ocorreu na classificação severamente seco, onde o SPI-48 indicou que a parte sul da Sub-40 apresentou o maior volume de dados com tal classificação, requerendo maior atenção na análise de secas hidrológicas.

Observando os mapas de *clusters* e dendrograma, identificaram-se as regiões com maior e menor similaridade entre os dados de precipitação acumulada mensal. A partir dos mapas de *clusters*, podem-se realizar estudos quanto à divisão de tais dados em regiões menores ou maiores em detrimento da proximidade da informação que se espera adquirir, como, por exemplo, a criação de zonas pluviométricas.

Quanto ao satélite TRMM, este se mostrou hábil na análise da variabilidade de precipitação sobre a bacia, representando de forma satisfatória os períodos secos e chuvosos. Com fácil aquisição e manuseio, os dados do satélite são uma alternativa viável para se coletar uma série contínua e longa de dados diários sobre grandes áreas com qualidade espacial e temporal. Este tipo de informação é de suma importância principalmente em países em desenvolvimento ou em áreas grandes ou de difícil acesso.

5.2. Recomendações

De acordo com os resultados obtidos, este trabalho deve ser considerado como um material de consulta para obtenção de informações sobre o comportamento da precipitação mensal e anual da Sub-40, sobre o número de dias secos e úmidos consecutivos, bem como sobre o índice SPI etc.

Como sugestões de futuros trabalhos, os resultados que se apresentam são ponto de partida para tomada de decisões como também para estudos mais aprofundados referentes aos dados hidrológicos.

Através dos índices SPI, demonstrados nos Apêndices A-10 a A-16, é possível identificar os tipos de seca existente em um determinado período. Um analista pode utilizar-se dos SPI para 1 ou 2 meses nas análises de seca meteorológica. Já para seca agrícola seriam considerados os SPI a partir de 1 mês a 6 meses. E SPI de 6, 9, 12, 24 e 48 meses para análises de seca hidrológica.

A análise de clusters aqui apresentada deve ser consultada quando se fizer necessário a divisão da bacia em zonas homogêneas. É importante frisar que para a construção dos clusters, além da diferença entre correlações lineares, utilizada para este trabalho, podem ser aplicados outros parâmetros para a divisão, como: as distâncias euclidiana, euclidiana padronizada, de blocos, Minkowski, Chebychev, Mahalanobis e Hamming como também a diferença entre os co-senos dos ângulos entre as observações, a classificação de Spearman, o coeficiente de Jaccard entre outras. Cada tipo de distância deve ser utilizada de acordo com o estudo que se pretende realizar.

Ainda, utilizando a espacialização da precipitação, aqui apresentada, estudos sobre outros índices de seca, como o SPEI (*Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index*) e o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), poderão ser desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical table**. Dover, New York, 1965.
- ADLER R.F.; HUFFMAN, G. J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P.; NELKIN, E. **The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–present)**. Journal of Hydrometeorology. p. 1147–1167, 2003.
- ADLER, R.F.; HUFFMAN, G.J.; KEEHN, P.R. **Global tropical rain estimates from microwave-adjusted geosynchronous IR data**. Remote Sensing Reviews, v. 11, p. 125- 152, 1994.
- ADLER, R.F.; NEGRI, A.J. **A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall**. Journal of Applied Meteorology, v. 27, p. 30-51, 1988.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Região Hidrográfica do São Francisco**. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx#>. Acesso em: Jan. de 2015.
- ARABIE P.; HUBERT L. J.; SOETE G. D. **Clustering and classification**. World Scientific, 1996.
- ASADULLAH, A.; McINTYRE, N.; KIGOBÉ M. **Evaluation of five satellite products for estimation of rainfall over Uganda**. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, v. 53, n. 6, p. 1137-1149, 2008.
- BARBOSA, A. R. **Precipitação**. Apostila da disciplina “Elementos de Hidrologia Aplicada a Estudos de Graduação”. Disponível em: http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodriques/13_Precipitacao.pdf. Acesso em: Dez. de 2013.
- BEGA, R. M. **Variabilidade Espacial e Temporal das Precipitações Pluviais e das Perdas de Água e Solo em Pindorama, SP**. Dissertação, Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, Agricultura Tropical e Subtropical - Área de Concentração em Gestão dos Recursos Agroambientais. São Paulo: 2003.
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. **Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 22, n.1, p. 105-111, 2007.
- BRAS, R.L. **Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science**. EUA: Wesley, 1990.
- BRITO, R.; JULAIA, C. **Descrição das Secas na Bacia do Limpopo em Moçambique**. UEM - Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal e Departamento de Engenharia Rural – Secção de Uso de Terra e Água. Agosto de 2006. 37 p.
- BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. **Objective quantification of drought severity and duration**. Journal of Climate, Boston, v. 12, n. 9, p. 2747-2756, 1999.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 255 p., 2003.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; MOREIRA, I. A.; JUSEVÍCIUS, M. A. R.; PEREIRA FILHO, A. **Estimativas de Precipitação por Radar, Pluviômetros e Satélite para Previsão Hidrometeorológica no Paraná.** *Congreso Paraguay de Recursos Hídricos*. 31 de octubre al 2 de noviembre de 2005. Hernandarias - Paraguay. Disponível em: <http://www.aprh.org.py/congresos/icongreso/html/hidrometeorologia.htm>. Acesso em: Jan de 2015.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco. **Socioeconomia**. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco/a-socioeconomia>. Acesso em: Dez. de 2013.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **50 Anos de Três Marias**. Energia da Gente. Agosto/Setembro, Ano IX, N.º 91, 2012.

CLIMATE DATA GUIDE. **Standardized Precipitation Index (SPI)**. National Center for Atmospheric Research (NCAR) e University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>. Acesso em: Jul de 2015.

CODEVASF. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Caracterização da Bacia**. Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/identificacao>. Acesso em: Dez. de 2013.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Dissertação). Porto Alegre, 196p., 2006.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Desempenho do Satélite TRMM na Estimativa de Precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior**. Revista Brasileira de Cartografia No 59/01, p. 93-99, 2007.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates**. Journal of Hydrology, v. 360, p. 207– 216, 2007.

CONDOM, Thomas; RAU, Pedro; ESPINOZA, Jhan Carlo. **Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998–2007**. Hydrological Processes, N° 25, p. 1924–1933, 2011. DOI: 10.1002/hyp.7949.

CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. **SPEI**. España. Disponível em: <http://sac.csic.es/spei/>. Acesso em: Dez. de 2003.

DNR, Indiana Department of Natural Resources. **Explanation of Standard Precipitation Index (SPI)**. Disponível em: <http://www.in.gov/dnr/water/4864.htm>. Acesso em: Mar. de 2015.

EDWARDS, D. C.; MCKEE T. B. **Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales**. Atmospheric Science Paper No. 634, p. 1–30, 1997.

FENSTERSEIFER, C. A. **Qualidade das Estimativas de Precipitações Derivadas de Satélites na Bacia do Alto Jacuí - RS**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2013.

GOODISON, B. E., FERGUSON, H. L. E MCKAY, G. A. **Comparison of point snowfall measurement techniques**. Handbook of Snow, D. M. Gray and M. D. Male, Eds., Pergamon Press, p. 200–210, 1981.

HEIM, R. R.. **A review of twentieth-century drought indices used in the United States**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 1149–1165, 2002.

HUSAK G. J., MICHAELSEN J., FUNK C. **Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications**. *International Journal of Climatology*, v.27, p. 935–944, 2007, DOI: 10.1002/joc.1441.

INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acesso em: Jan. 2015.

BRITO, R. ; JULAIA, C. **Drought characterization at Limpopo Basin Mozambique**. In: Brito, R.; JULAIA, C. Descrição das Secas na Bacia do Limpopo em Moçambique. Challenge Program. Projecto, CP 17, 37 p., 2006.

JAXA. **Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial**. Disponível em: http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/index_j.htm. Acesso em: Jul. de 2014.

JOYCE, R.J.; JANOWIAK, J.E.; ARKIN, P.A.; XIE, P. **CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution**. *Journal of Hydrometeorology*, Boston, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.

KARAVITIS, C. A.; ALEXANDRIS, S.; TSESMELIS, D. E.; ATHANASOPOULOS, G. **Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece**. *Journal Water*, 2011. ISSN 2073-4441.

KUMMEROW, C.D., BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. **The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package**. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 15, p. 809-817, 1998.

LEIVAS, J. F.; RIBEIRO, G. G.; SOUZA, M. B. de; FILHO, J. R. **Análise comparativa entre os dados de precipitação estimados via satélite TRMM e dados observados de superfície em Manaus**. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, INPE, p. 1611-1616, 2009.

McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kliest, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. *American Meteorological Society*, Boston, Massachusetts, USA, 179–184, 1993.

MOOI, E.; SARSTEDT, M. **A Concise Guide to Market Research. Cluster Analysis (Capítulo 9)**. DOI 10.1007/978-3-642-12541-6_9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

MORALES, C.A.; ANAGNOSTOU, E.N. **Extending the capabilities of highfrequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of longrange lightning observations**. *Journal of Hydrometeorology*, v. 4, p. 141-159, 2003.

MUTHUWATTA, L.P.; AHMAD, M.D.; BOS, M.G.; RIENTJES, T.H.M. **Assessment of water availability and consumption in the Karkheh River basin, Iran: using remote sensing and geo-statistics**. Water Resources Management, v. 24, n. 3, p. 459–484, 2010.

NASA. **National Aeronautics and Space Administration**. Disponível em: <http://pmm.nasa.gov/node/158>. Acesso em: Out de 2013.

NCAR, National Center Atmospheric Research. **Standardized Precipitation Index (SPI)**. Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>. Acesso em: Fev. De 2015.

NDMC, **National Drought Mitigation Center**. Disponível em: <http://drought.unl.edu/portals/0/docs/spi-program-alternative-method.pdf>. Acesso em: Jan. de 2015.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **Satellite and information service**. Disponível em <http://www.oso.noaa.gov>. Acesso em Março 2012.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **Satellites**. Disponível em <http://www.noaa.gov/satellites.html>. Acesso em Janeiro 2015.

NÓBREGA R. S.; SOUZA, E. P. de; SOUSA, F. A. S. **Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO)**. Revista Brasileira de Geografia Física. Recife-PE. v. 01, n. 01, p. 47-61, 2008.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Séries Históricas de Vazões**. Disponível em: http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx. Acesso em: Jan. de 2015.

OSAWA T, PRASETIA R, AS-SYAKUR R A. **Validation of TRMM Precipitation Radar satellite data over Indonesian region**. Theor. Appl. Climatol., v. 112, p. 575–587, 2013..

OTTONI, A. B.; NETO, Cláudio N.; SILVA, Denis de S.; FERREIRA, Aloísio C. **Análise da Influência do Reservatório no Regime de Chuva Regional e no Rendimento Hidrológico de uma Bacia Degradada: Estudo de Caso do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas**. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH. Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/b09902a98df19827b12384f8c800ac70.pdf>. Acesso em: Dez. de 2013.

PALMER, W.C. **Meteorological drought**. US Weather Bureau Res. Nº 45. Washington, 58 p. 1965.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. **Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. Volume 18, n.3, p. 139-148, 2013.

PIRES, V. **Frequência e intensidade de fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Universidade de Lisboa, Portugal, 98 p., 2003.

SANTOS, A. S. P. **Análise De Desempenho dos Campos de Chuva Estimados pelo Satélite TRMM na Paraíba, para Fins de Modelagem Hidrológica Distribuída**.

Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (Dissertação), 149 p., 2014.

SANTOS C. A. G.; MORAIS B. S.; SILVA G. B. L. **Drought forecast using an artificial neural network for three hydrological zones in San Francisco River basin, Brazil**. IAHS Publ. 333, 2009.

SILVA, C. M. S.; LÚCIO, P. S.; SPYRIDES, M. H. C. **Distribuição Espacial da Precipitação Sobre o Rio Grande do Norte: Estimativas Via Satélites e Medidas por Pluviômetros**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, n.3, p. 337 - 346, 2012.

SOUZA, E. P.; NÓBREGA, R. S.; GALVÍNCIO, J. D. **Análise da Estimativa de Precipitação do Trmm em uma Sub-Bacia da Amazônia Ocidental**. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 25, n. 1, 2008.

SOUZA, J. L. L. L.; GOMES, T. S.; DIAS, R.S.; OLIVEIRA, G. M. A.; SANTOS, R. L. **Avaliação de métodos de interpolação aplicados à espacialização das chuvas no território identidade Portal do Sertão / Bahia**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba-PR, 2011. Anais. São José Dos Campos: INPE, p. 4295-4302, 2011.

Su, F. G.; HONG, Y.; LETTENMAIER, D. P. **Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin**. Journal of Hydrometeorology, v. 9, n. 4, p. 622–640, 2007. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2007JHM944.1>. Acesso em: Outubro de 2013.

THOM, H. **Some methods of climatological analysis**. WMO technical note number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, p 53. 1966.

Vermes L. **How to work out a drought mitigation strategy**. ICID Guide, 309, 1998.

VICENTE, G.A; FERREIRA, M.E. **Estimativa de Precipitação Via Satélite para Estudo de Tempo e Clima: Avanços e Perspectivas**. 30 de Julho de 2008. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/13-95f9bb855c97c2fc66b30f2788d95abe.pdf>. Acesso em: Jan. 2015.

VICENTE, G.A.; SCOFIELD, R.A.; MENZEL, P.W. **The operational GOES infrared rainfall estimation technique**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 79, p. 1883-1898, 1998.

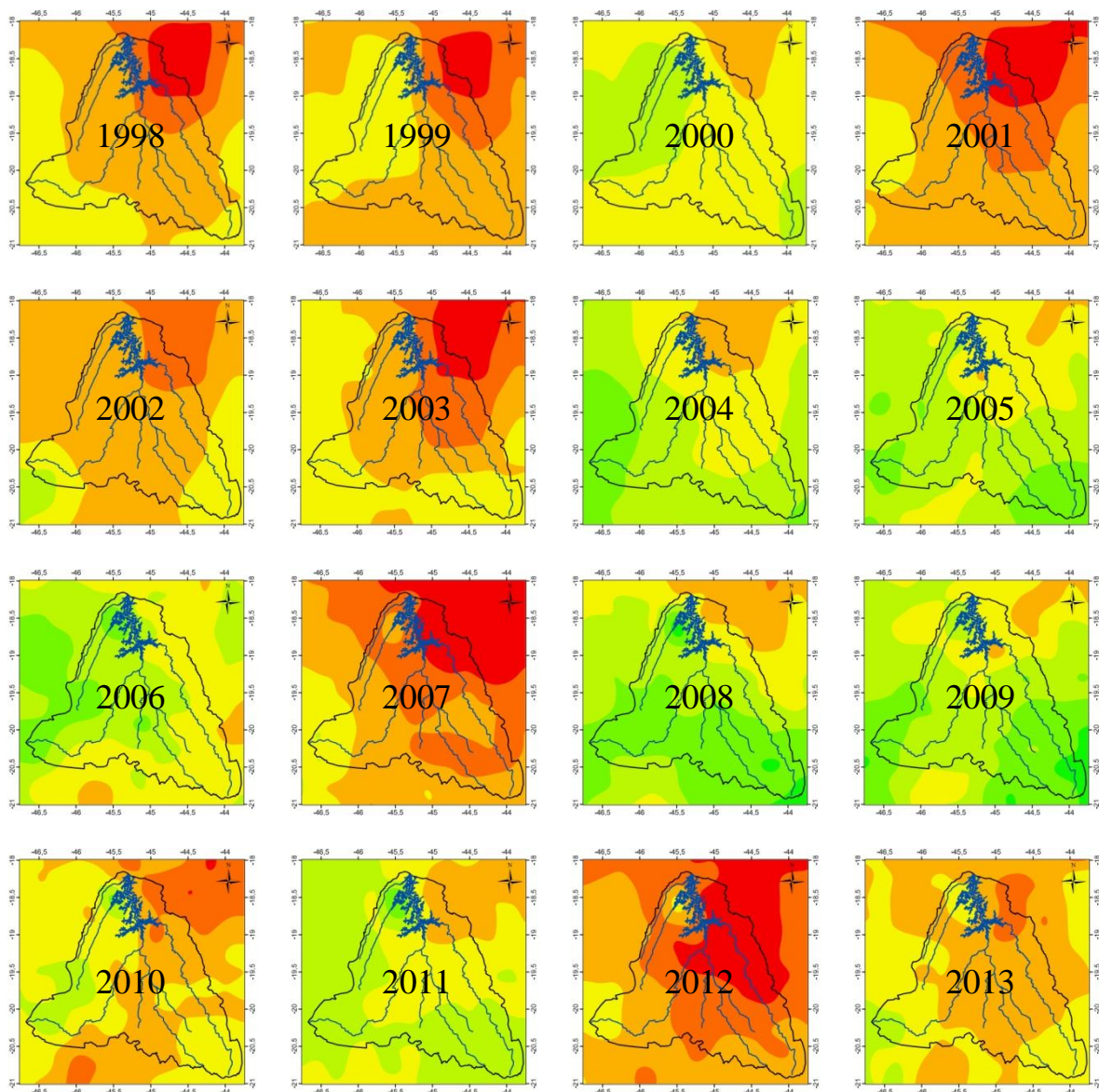
VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo, 1975.

WAGNER, P. D.; FIENER, P. ;WILKEN, F. ;KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. **Comparison and Evaluation of spatial interpolation schemes for Daily Rainfall in Data Scarce regions**. In: Journal of Hydrology, v. 464-465, p. 388-400, 2012.

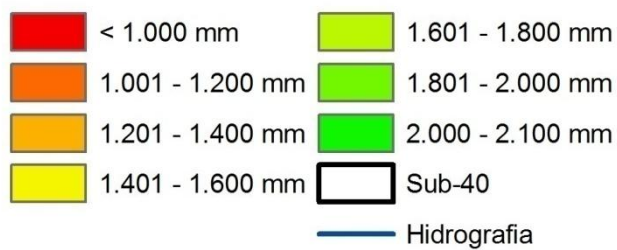
WILHITE, D. A.; GLANTZ, M.H. **Understanding the drought phenomenon: the role of definitions**. In: WILHITE, D. A.; EASTERLING, W. E. (Ed.). Planning for drought: toward a reduction of societal vulnerability. Boulder: Westview Press, p. 11-27, 1987.

WMO, World Meteorological Organization. **Standardized Precipitation Index**. User Guide Nº 1090, 16p., 2012.

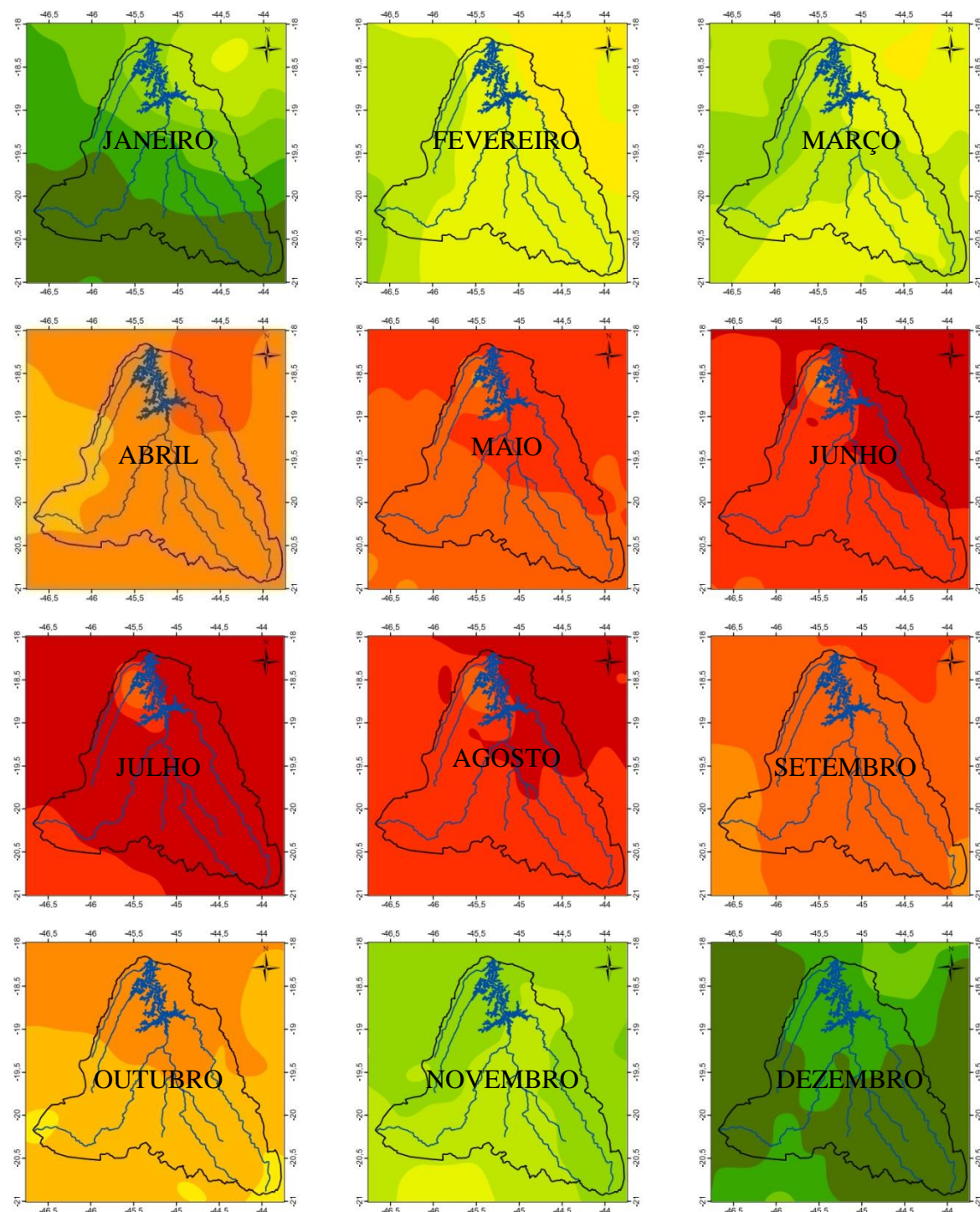
APÊNDICE A



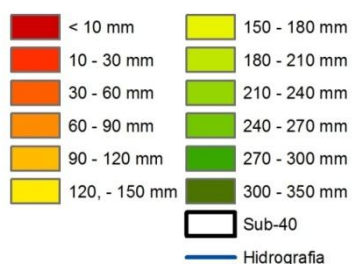
Precipitação Acumulada Anual:



Apêndice A-1: Distribuição da precipitação total anual (1998 a 2013).

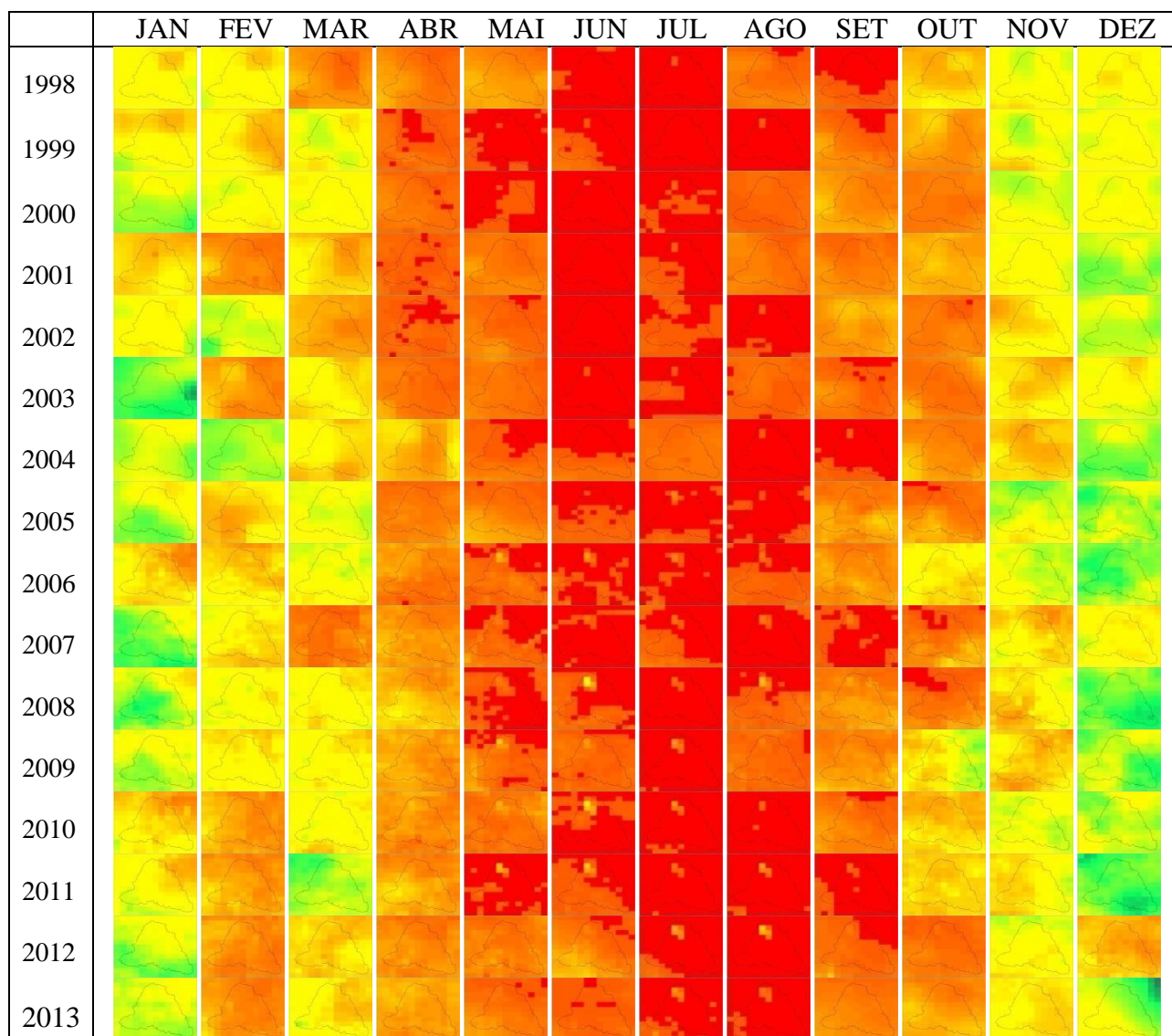


**Média de Precipitação
Acumuladas Mensais (1998 a 2013):**

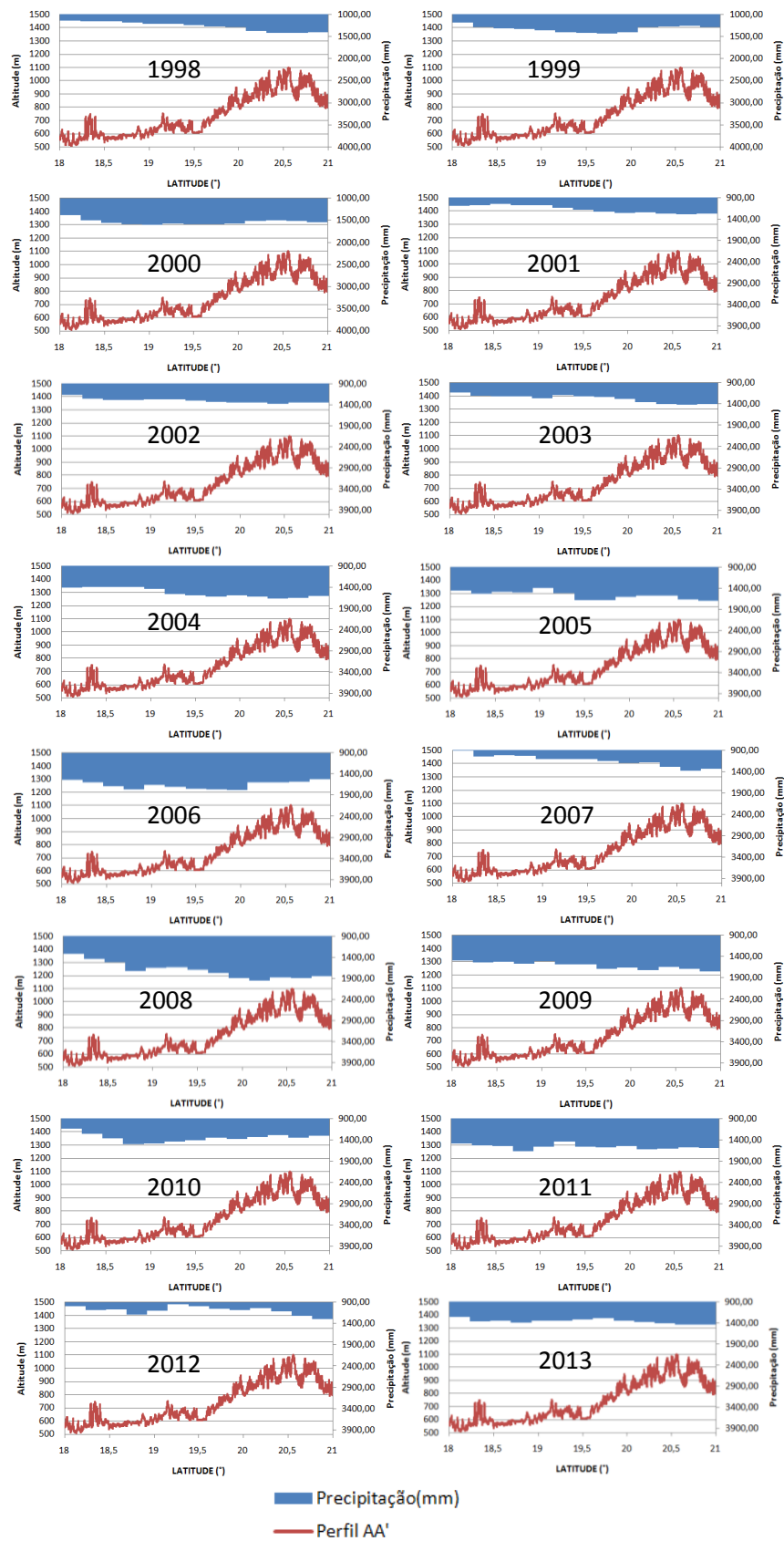


Sistema de Coordenadas Geográficas
Graus Decimais
Datum WGS-84

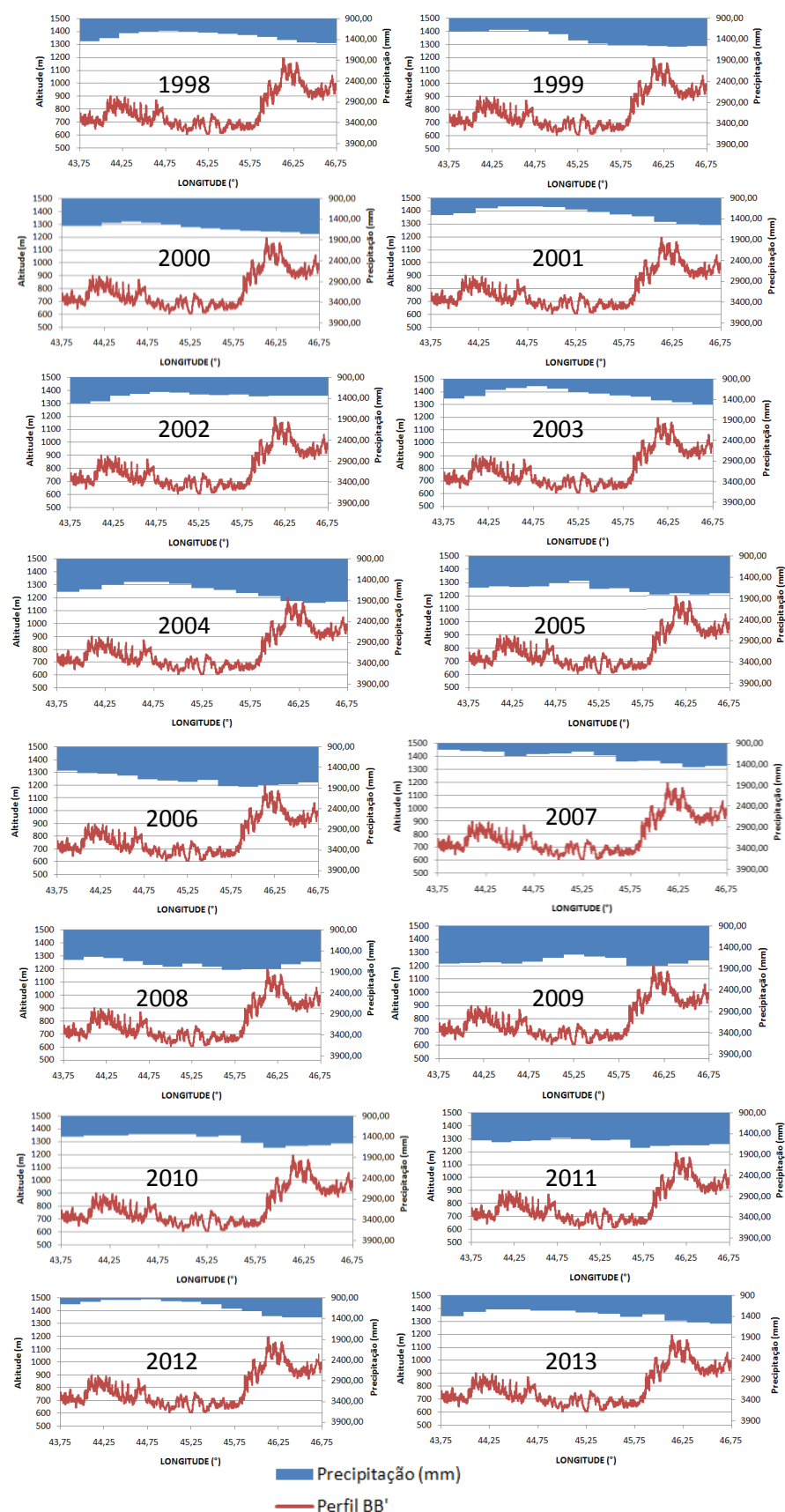
Apêndice A-2: Distribuição espacial da precipitação média mensal(1998–2013) sobre a Sub-40.



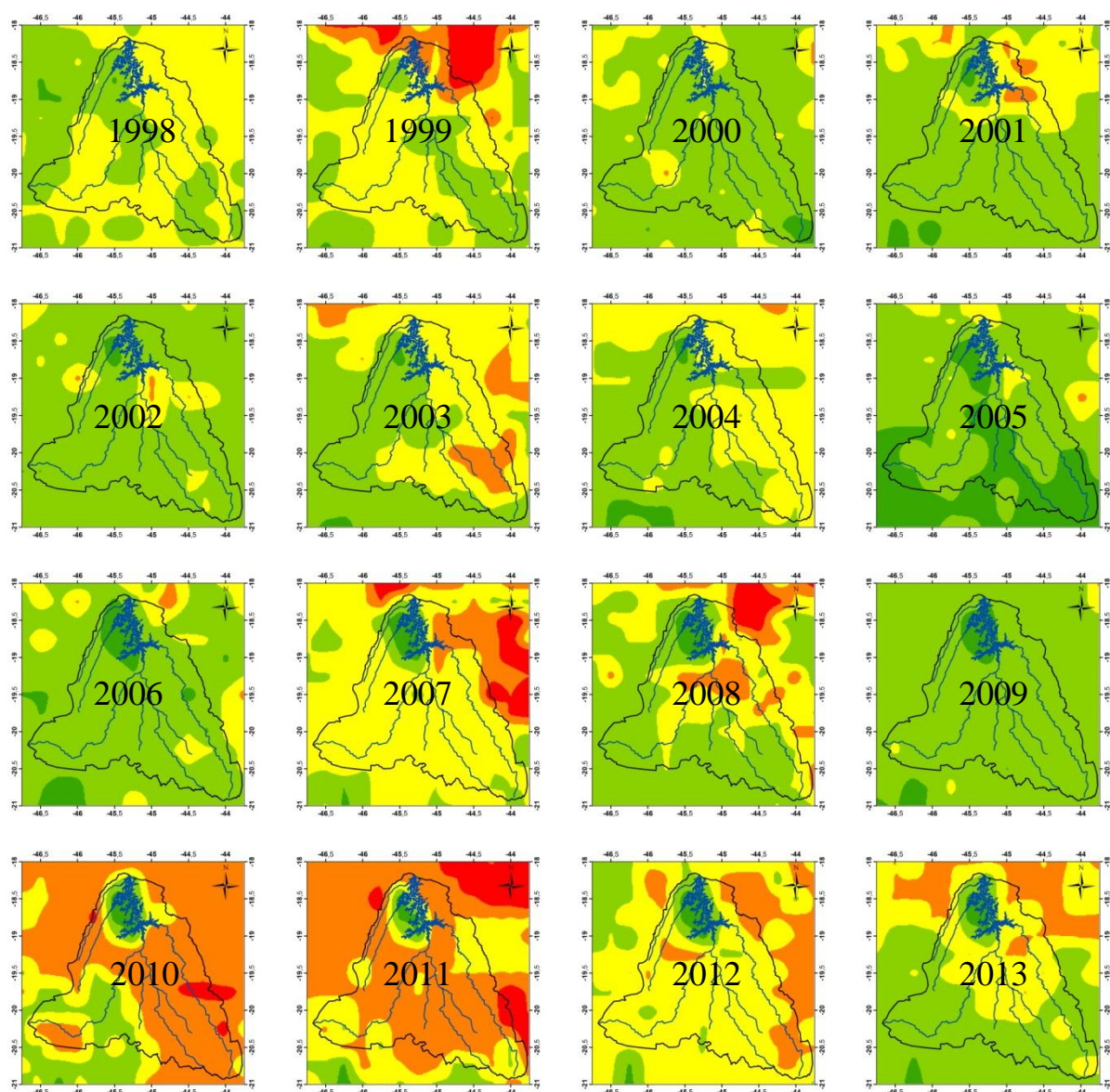
Apêndice A-3: Precipitação mensal de 1998 até 2013.



Apêndice A-4: Hietogramas da precipitação total anual e Perfil AA' (longitude -45,25 e latitude de -18 até -21 graus decimais), da Sub-40 seguindo o sentido Norte-Sul (1998 até 2013).



Apêndice A-5: Hietogramas da precipitação total anual e Perfil BB' (latitude $-19,50$ e longitude de $-46,75$ até $-43,75$ graus decimais), da Sub-40 seguindo o sentido Leste–Oeste (1998 até 2013).

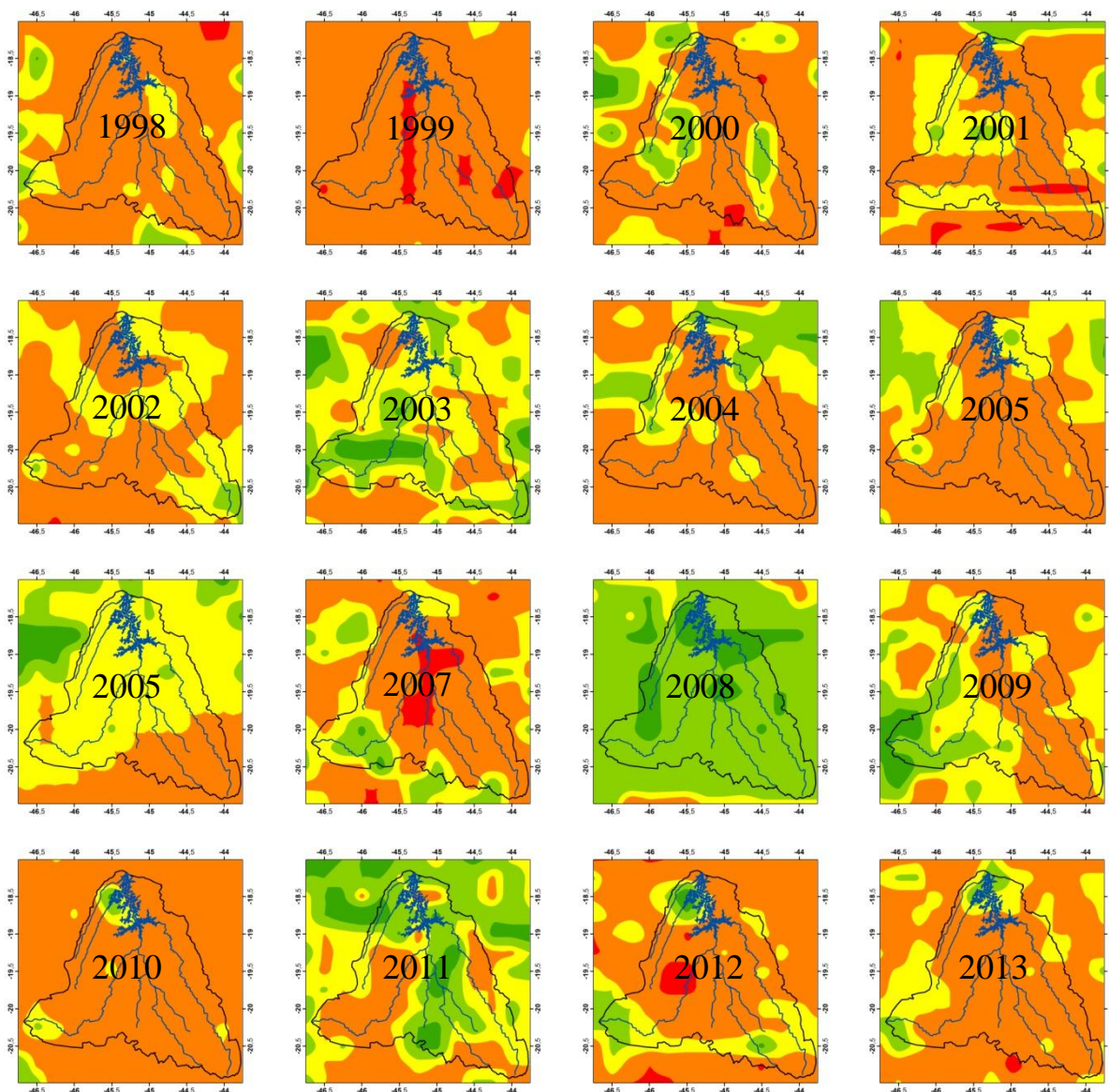


Dias Secos Consecutivos:



Sistema de Coordenadas Geográficas
Graus Decimais
Datum WGS-84

Apêndice A-6: Espacialização anual dos dias secos consecutivos da Sub-40.



Dias Úmidos Consecutivos:



Sistema de Coordenadas Geográficas
Graus Decimais
Datum WGS-84

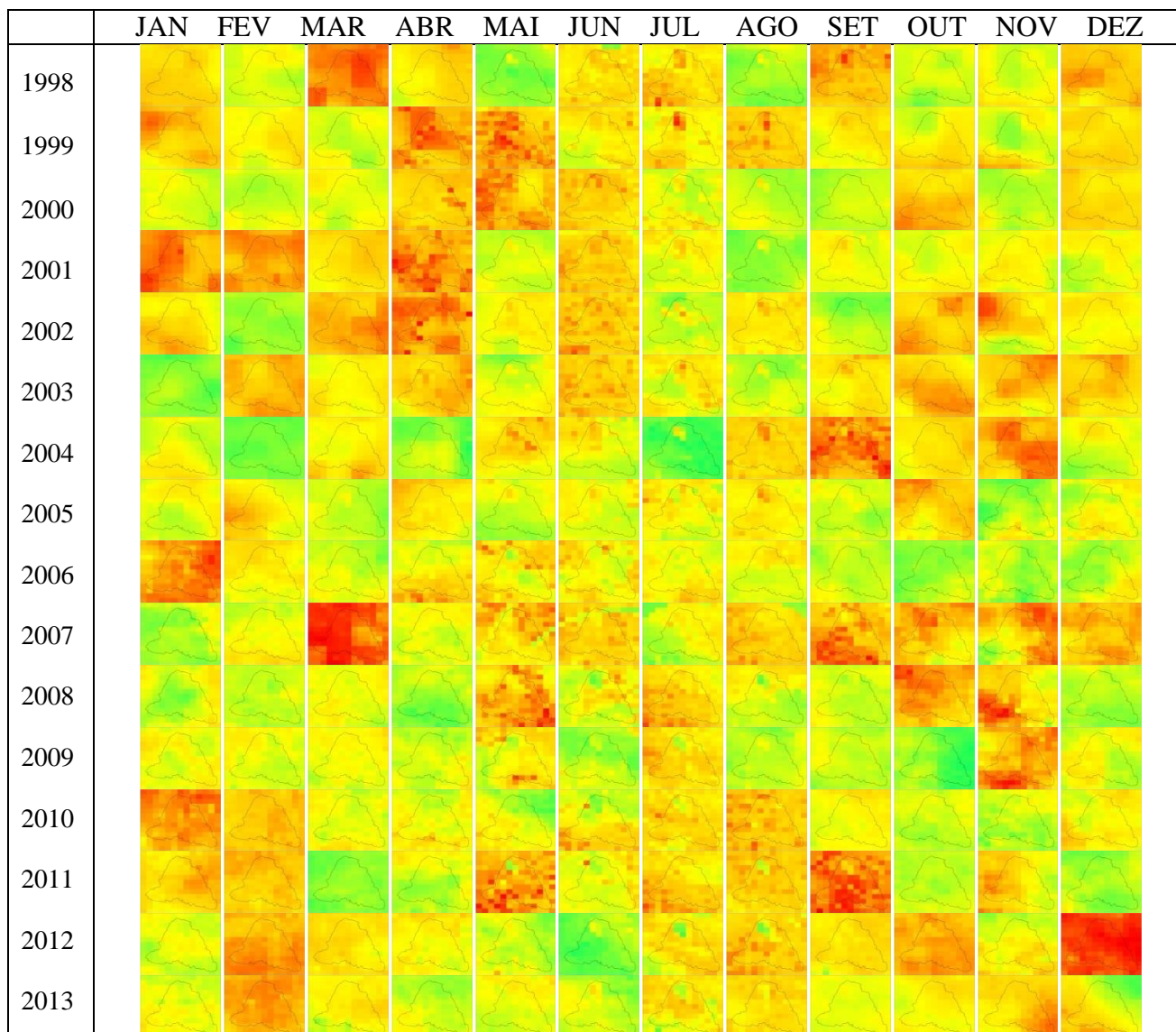
Apêndice A-7: Espacialização anual dos dias úmidos consecutivos da Sub-40.

		Latitude												
		-46,75	-46,50	-46,25	-46,00	-45,75	-45,50	-45,25	-45,00	-44,75	-44,50	-44,25	-44,00	-43,75
Longitude	-18,00	2,04	0,96	-0,21	0,87	1,64	1,93	2,62	1,97	2,28	1,71	0,69	2,12	3,87
	-18,25	1,77	1,37	1,98	3,05	1,31	-0,61	-2,07	1,82	2,66	2,74	1,51	2,24	2,44
	-18,50	2,45	2,37	2,96	2,33	3,71	-1,92	-3,53	1,77	1,44	2,47	1,52	1,85	1,19
	-18,75	1,58	2,98	2,24	2,96	3,84	-0,99	-4,35	0,86	-0,20	1,24	1,82	2,64	2,65
	-19,00	1,62	1,85	1,20	2,24	2,62	0,26	-3,49	1,34	1,12	2,20	1,59	2,88	3,51
	-19,25	1,67	1,54	1,85	0,86	2,16	3,16	3,23	2,23	2,54	1,06	-0,41	1,93	2,31
	-19,50	0,69	2,12	1,80	1,23	1,65	2,37	2,49	2,45	2,68	2,26	2,28	2,24	3,22
	-19,75	1,39	1,27	1,22	1,29	0,91	1,02	2,42	2,21	2,67	2,19	2,66	3,26	3,36
	-20,00	0,95	0,67	0,60	0,35	-0,19	1,27	2,57	2,19	3,08	1,19	2,09	2,94	4,22
	-20,25	1,24	2,17	0,18	0,73	-0,49	0,60	0,28	1,52	2,34	2,59	3,11	2,09	1,40
	-20,50	-0,06	0,47	1,01	0,74	-0,44	0,86	0,53	1,32	1,13	2,19	1,67	1,64	3,65
	-20,75	0,28	1,19	-1,73	2,35	0,58	0,56	0,77	1,44	0,86	1,21	2,59	2,33	3,38
	-21,00	0,78	1,83	-2,24	0,57	-0,10	-0,08	0,00	0,52	1,07	0,81	1,42	2,65	1,04

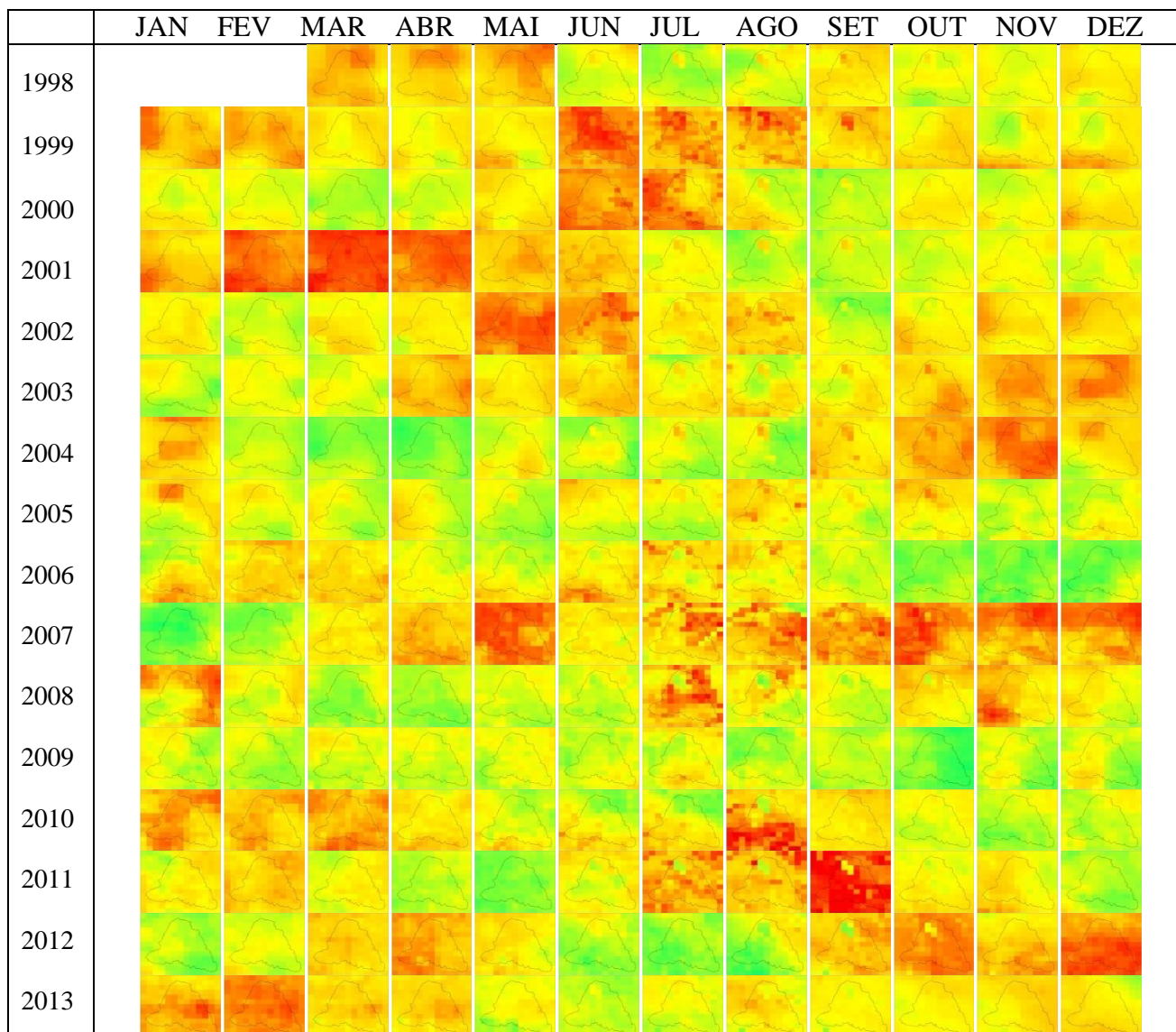
Apêndice A-8: Valores da declividade da linha de tendência para os CDDs.

		Latitude												
		-46,75	-46,50	-46,25	-46,00	-45,75	-45,50	-45,25	-45,00	-44,75	-44,50	-44,25	-44,00	-43,75
Longitude	-18,00	0,07	0,08	0,20	0,06	0,22	-0,01	0,05	-0,09	0,05	-0,05	-0,03	-0,02	-0,17
	-18,25	0,19	0,32	0,40	0,14	-0,04	0,02	0,27	0,18	0,20	-0,05	-0,08	0,14	0,15
	-18,50	-0,11	-0,06	0,12	0,10	0,28	1,16	0,16	0,14	0,29	0,15	0,13	0,31	0,13
	-18,75	-0,15	-0,11	0,23	0,35	0,20	0,55	0,36	0,16	0,20	0,28	0,03	0,19	-0,22
	-19,00	-0,26	-0,15	0,00	0,05	0,18	0,17	0,00	0,07	-0,05	0,12	0,29	0,31	0,23
	-19,25	0,03	-0,09	0,08	0,16	-0,13	-0,11	0,05	0,15	0,19	0,00	0,19	0,20	0,09
	-19,50	0,02	-0,06	0,11	0,16	-0,02	-0,26	-0,15	0,19	0,12	-0,06	0,05	0,12	0,16
	-19,75	0,16	0,47	0,23	0,13	-0,06	-0,21	0,17	0,27	0,17	0,03	0,06	-0,08	-0,18
	-20,00	0,33	0,25	0,17	0,02	-0,07	0,07	0,11	0,23	0,04	0,07	0,09	0,17	-0,10
	-20,25	0,34	0,32	0,19	0,18	0,12	0,26	0,17	0,38	0,08	0,31	0,22	0,40	0,03
	-20,50	0,21	0,66	0,43	0,13	0,17	0,25	0,42	0,21	0,20	0,29	0,10	0,11	0,12
	-20,75	0,09	0,34	0,03	-0,03	0,20	0,19	0,27	0,04	0,08	-0,11	0,13	-0,08	0,11
	-21,00	0,26	0,26	-0,10	-0,18	-0,13	0,02	0,17	-0,17	-0,17	-0,07	0,09	0,06	-0,06

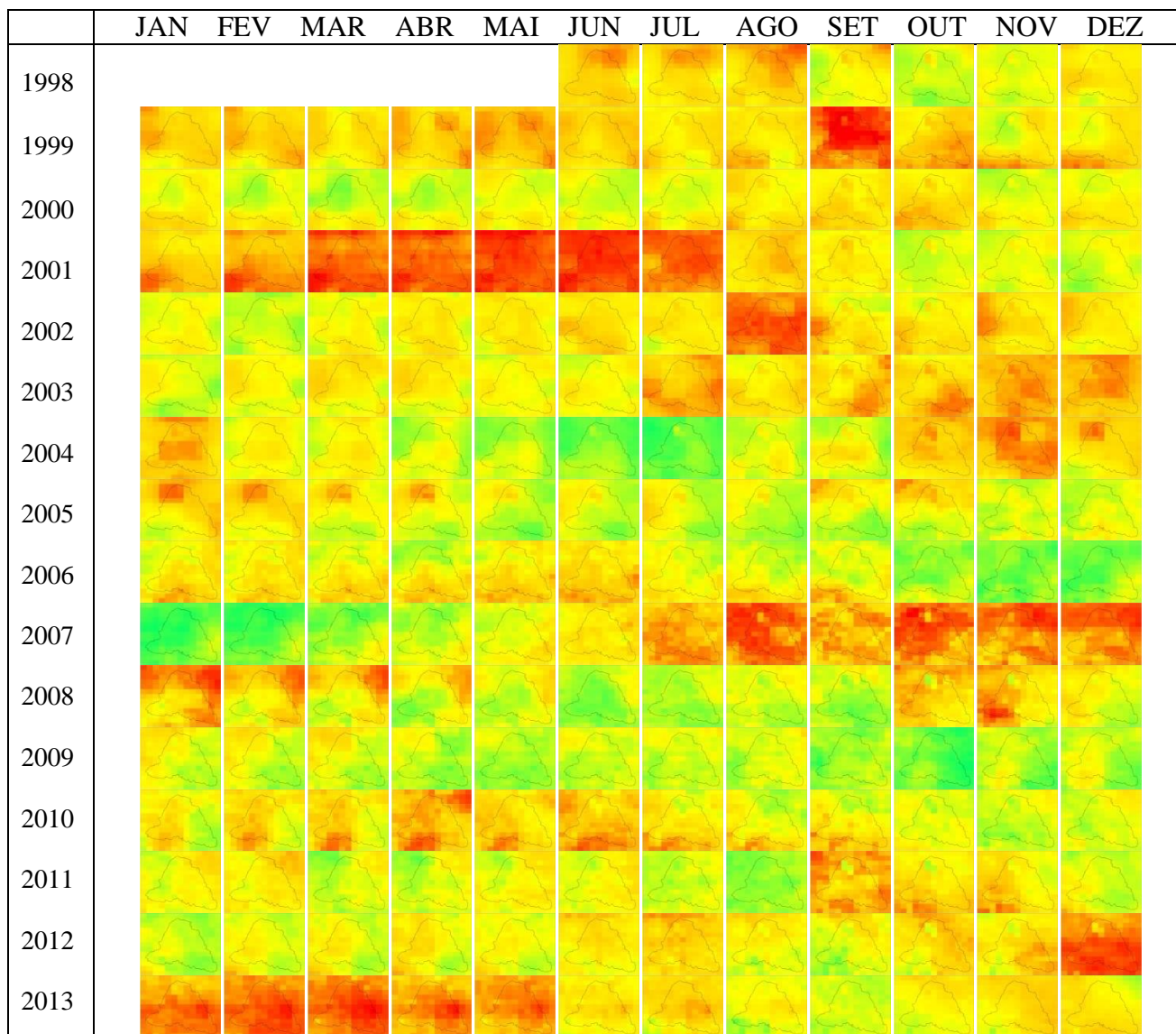
Figura A-9: Valores da declividade da linha de tendência para os CDD.



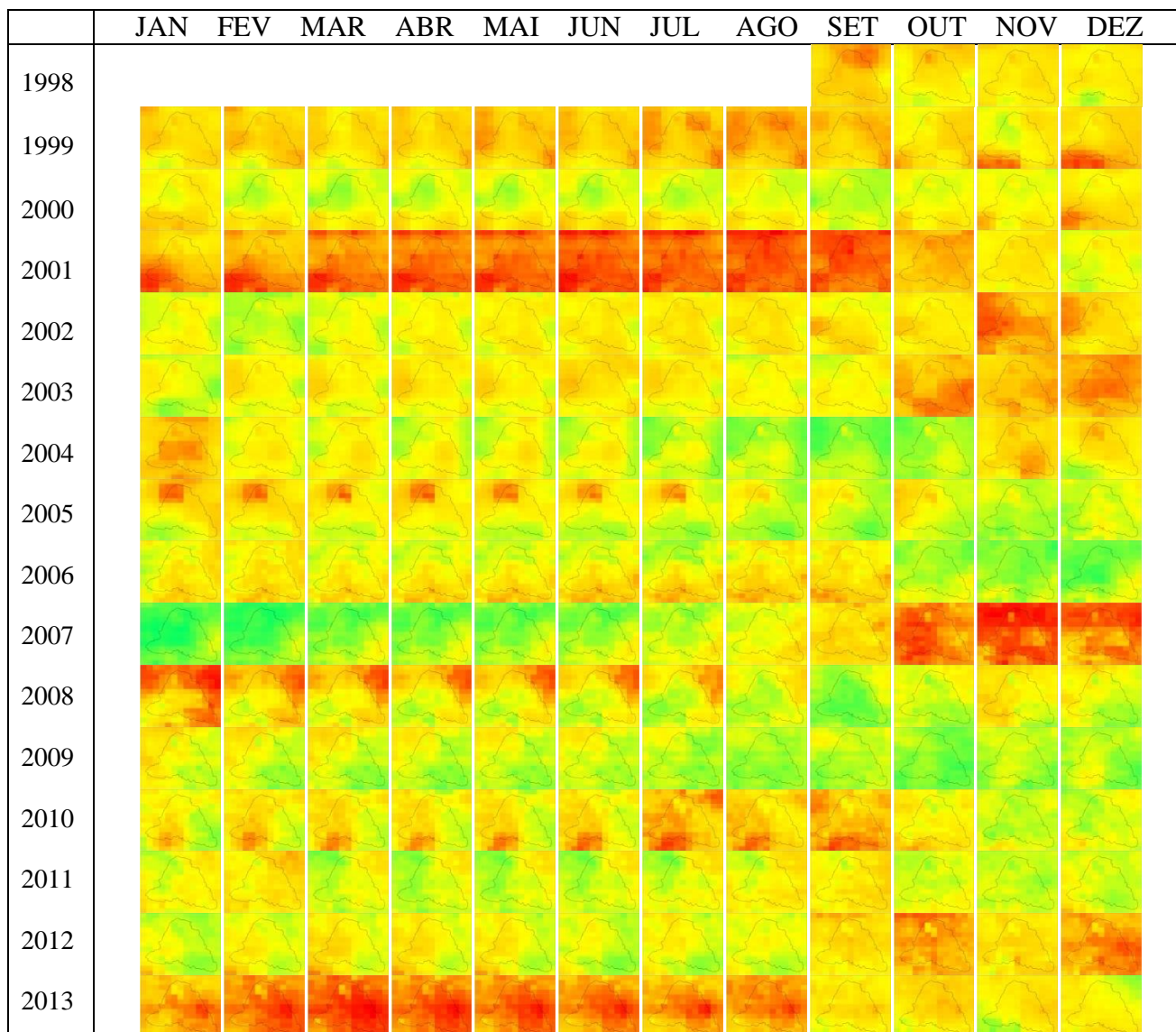
Apêndice A-10: Mapas do SPI-1 no período de 1998 a 2013 da Sub-40.



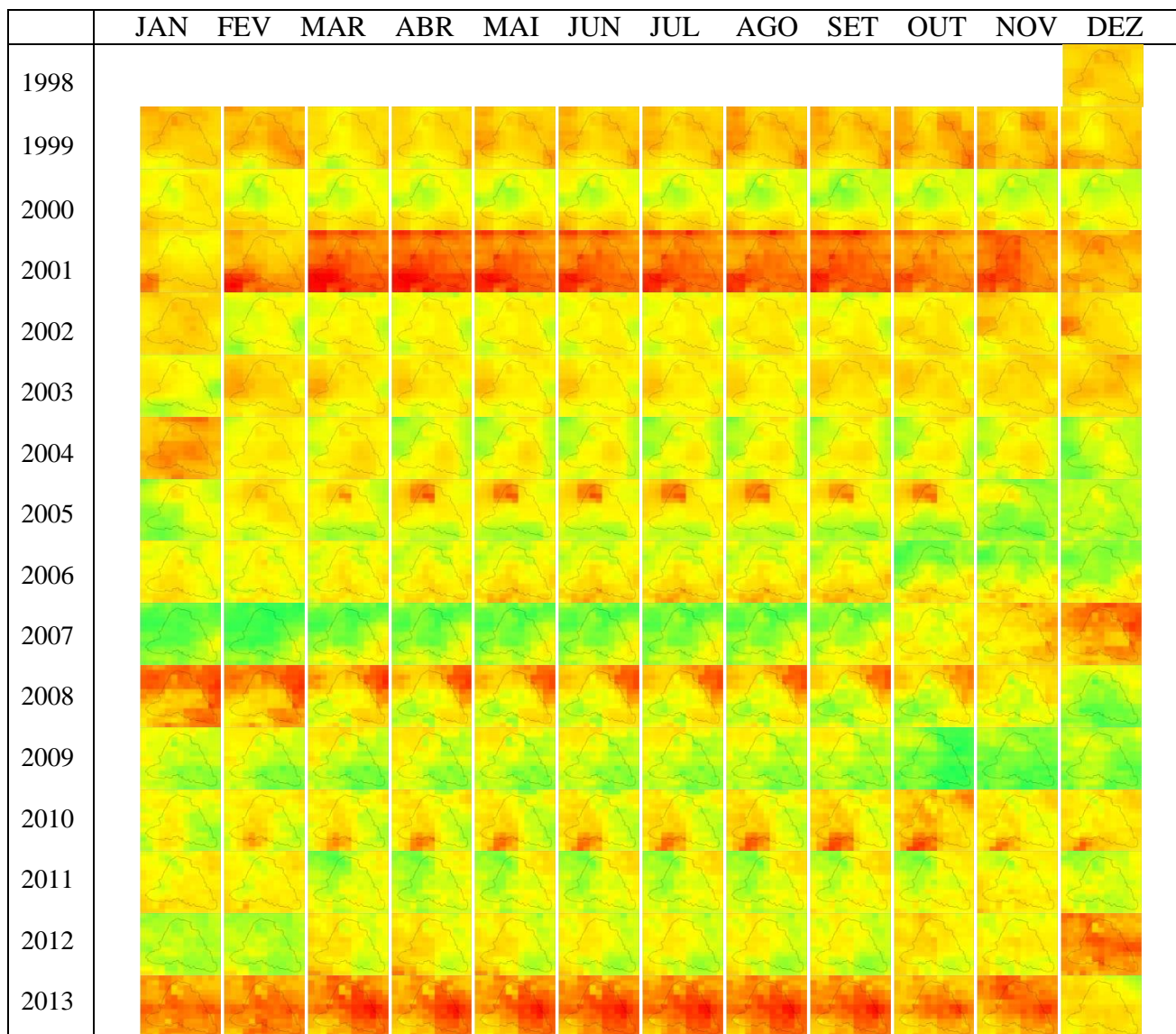
Apêndice A-11: Mapas do SPI-3 no período de 1998 a 2013 da Sub-40.



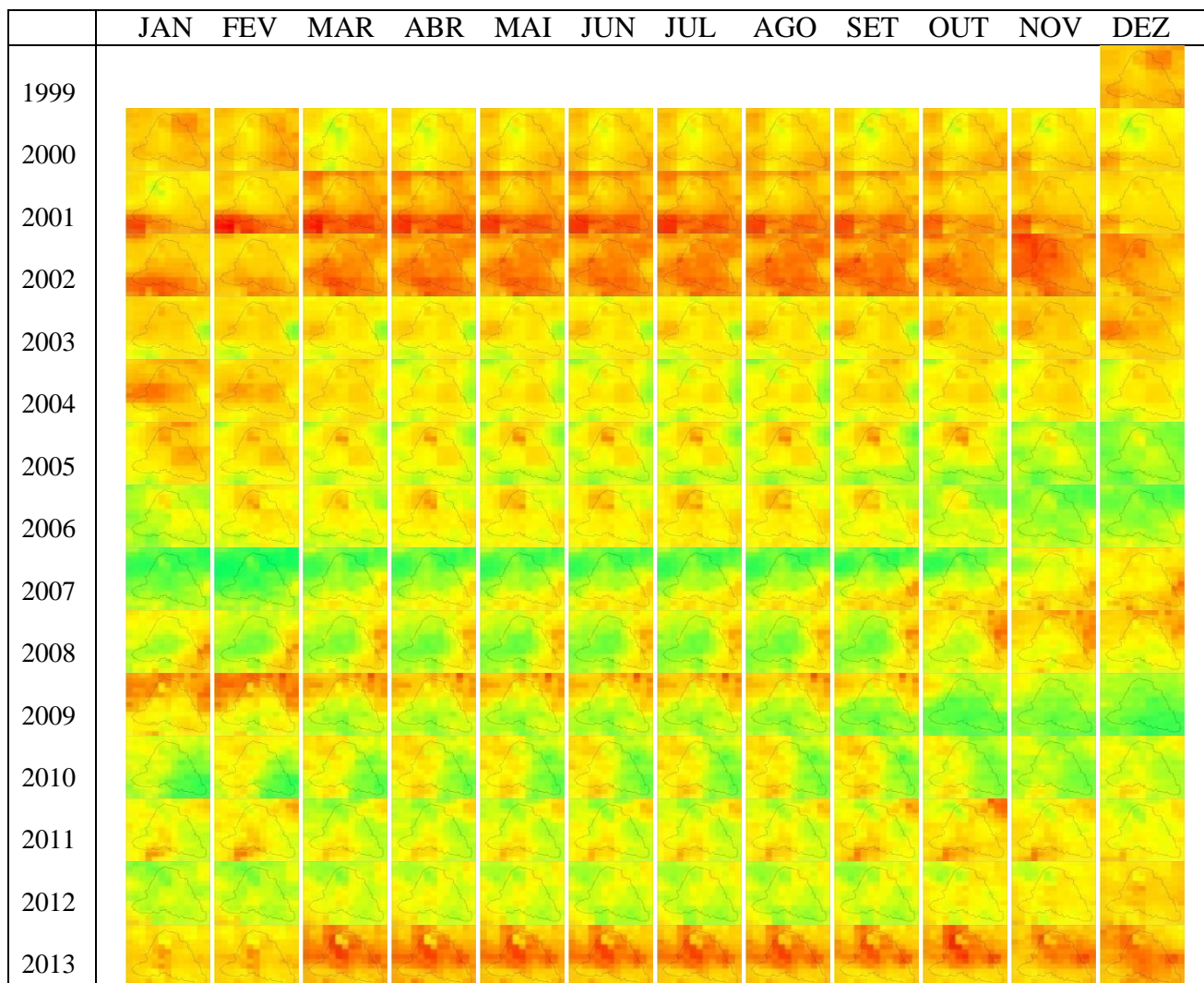
Apêndice A-12: Mapas do SPI-6 no período de 1998 a 2013 da Sub-40 .



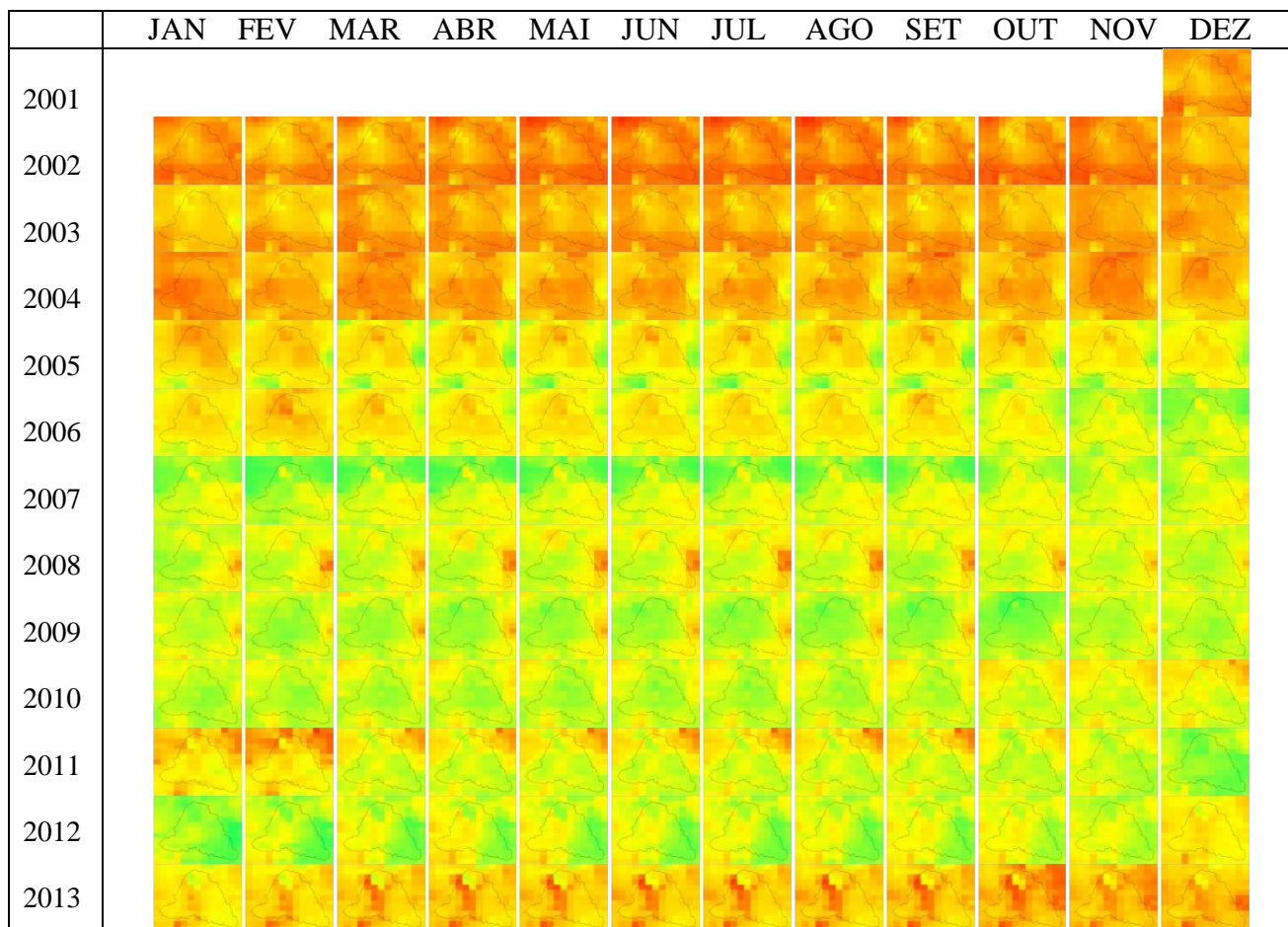
Apêndice A-13: Mapas do SPI-9 no período de 1998 a 2013 da Sub-40 .



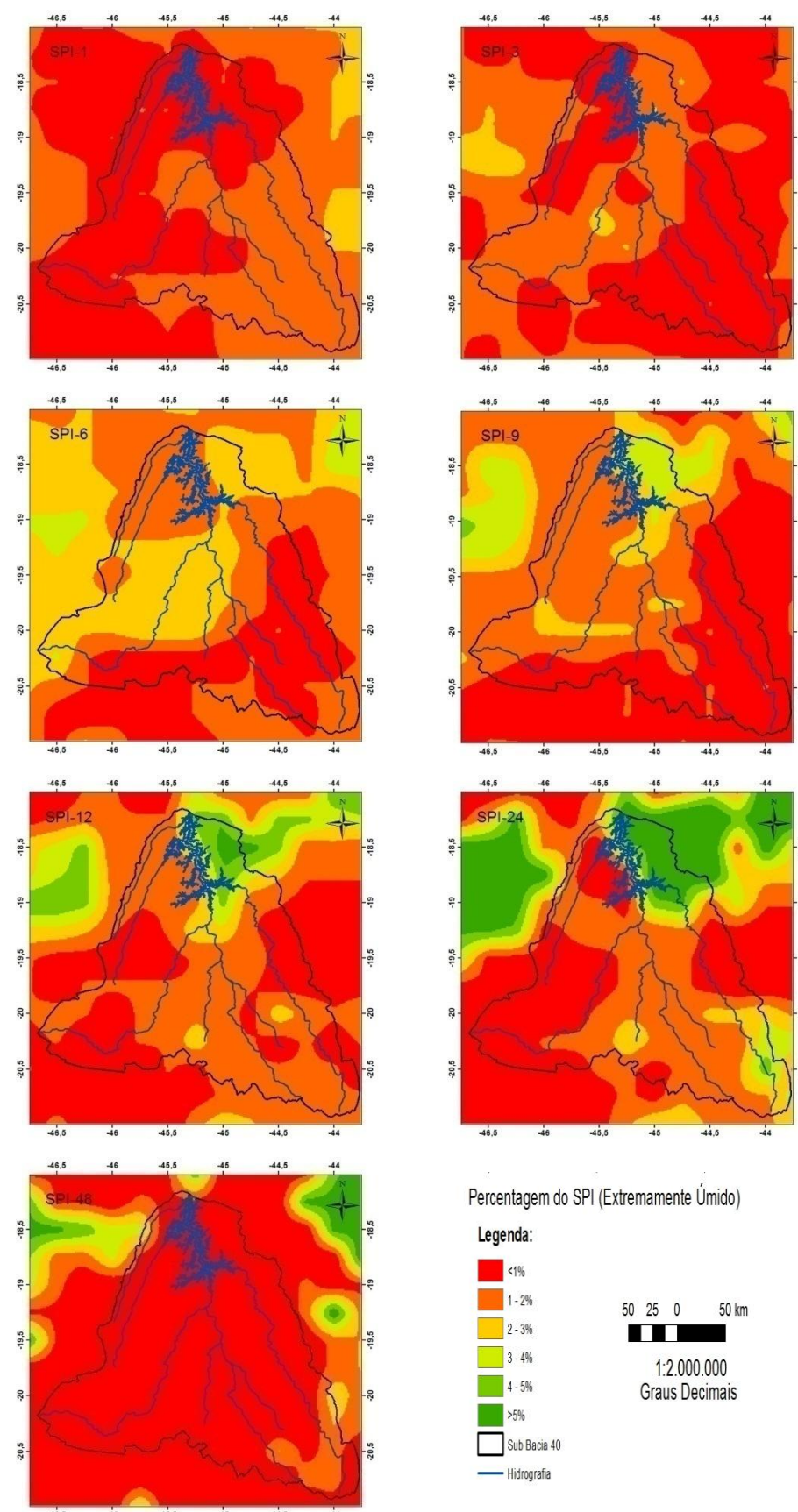
Apêndice A-14: Mapas do SPI-12 no período de 1998 a 2013 da Sub-40.



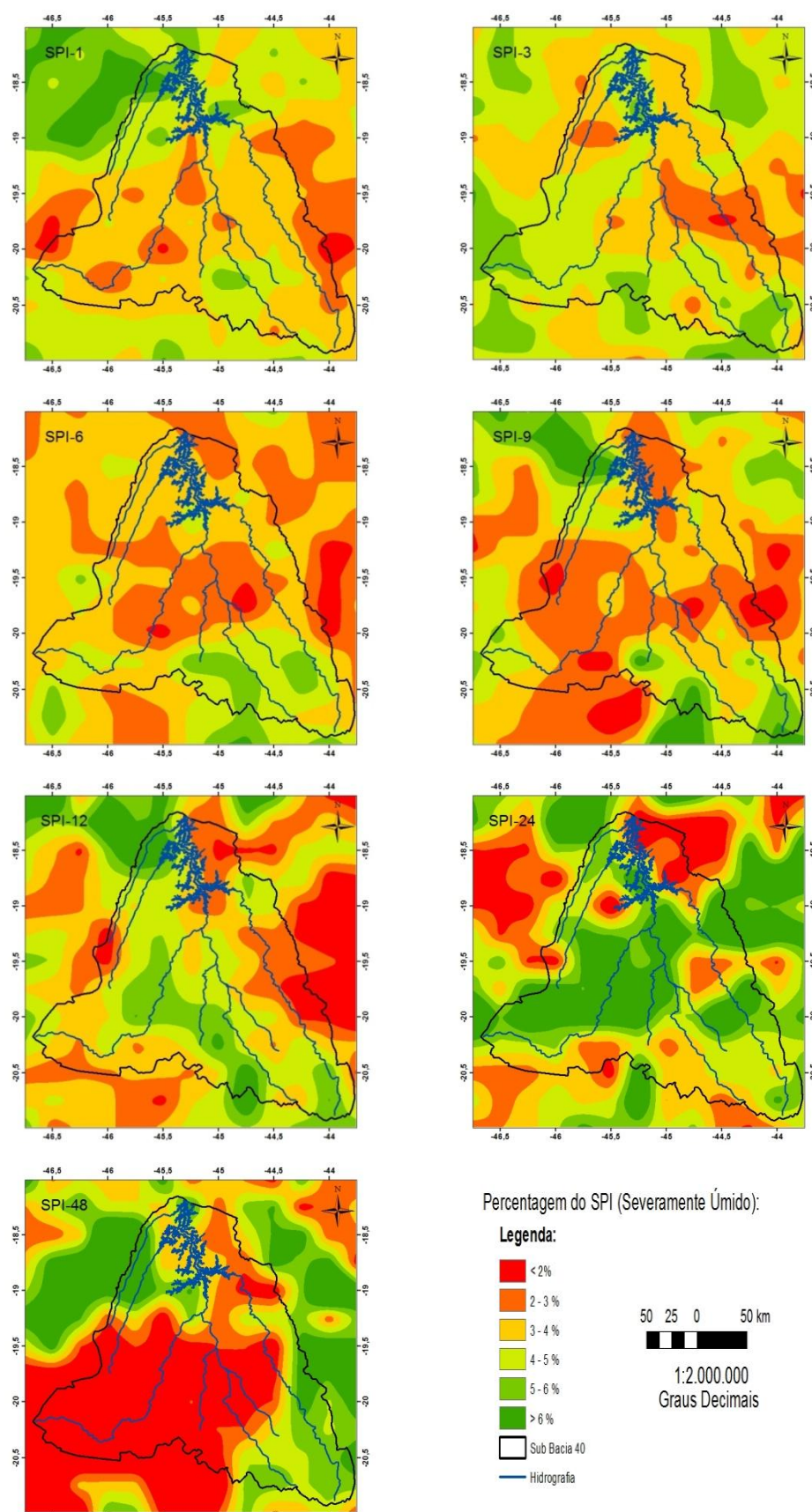
Apêndice A-15: Mapas do SPI-24 no período de 1998 a 2013 da Sub-40 .



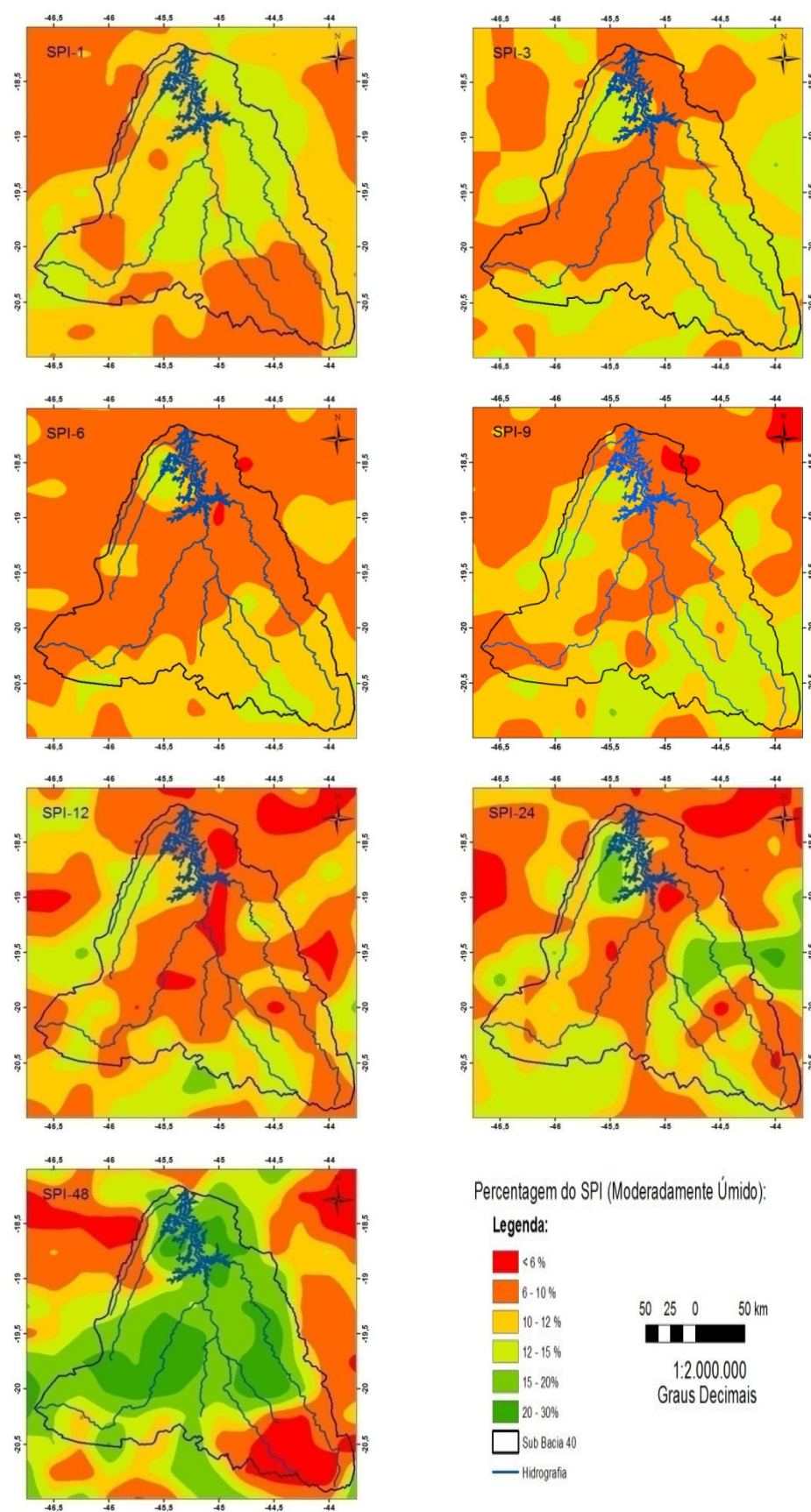
Apêndice A-16: Mapas do SPI-48 no período de 1998 a 2013 da Sub-40 .



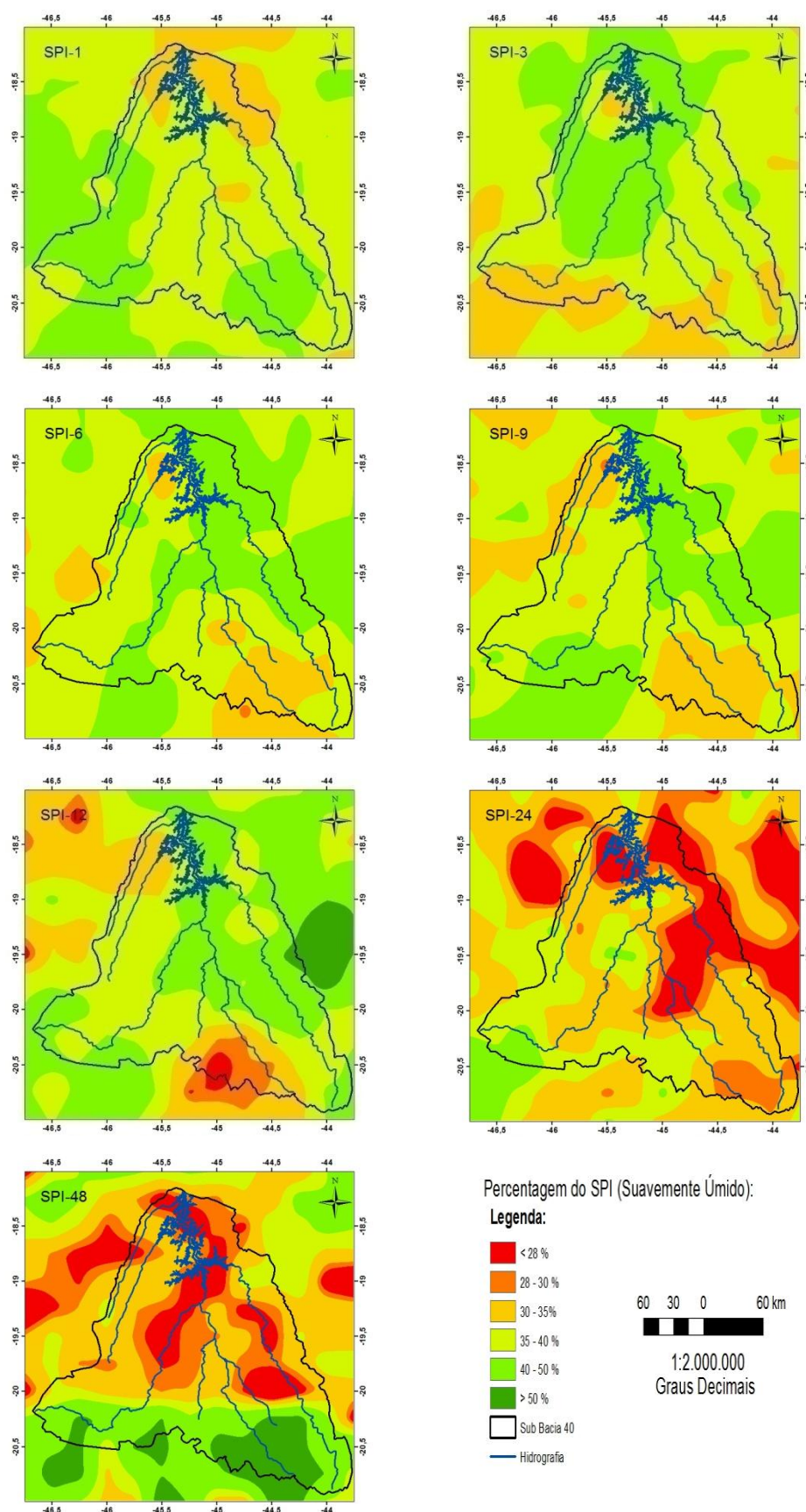
Apêndice A-17: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Extremamente Úmido.



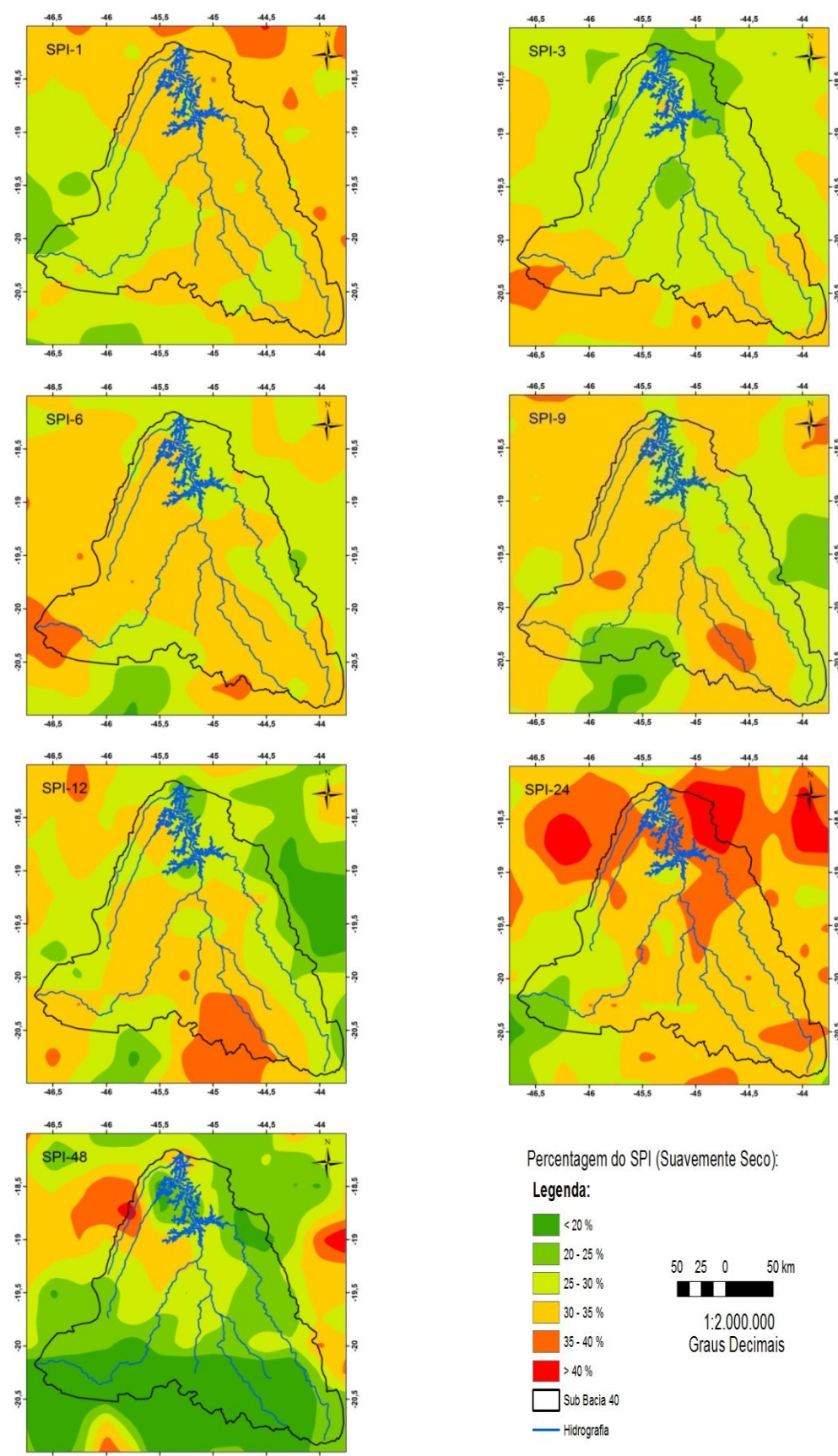
Apêndice A-18: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Severamente Úmido.



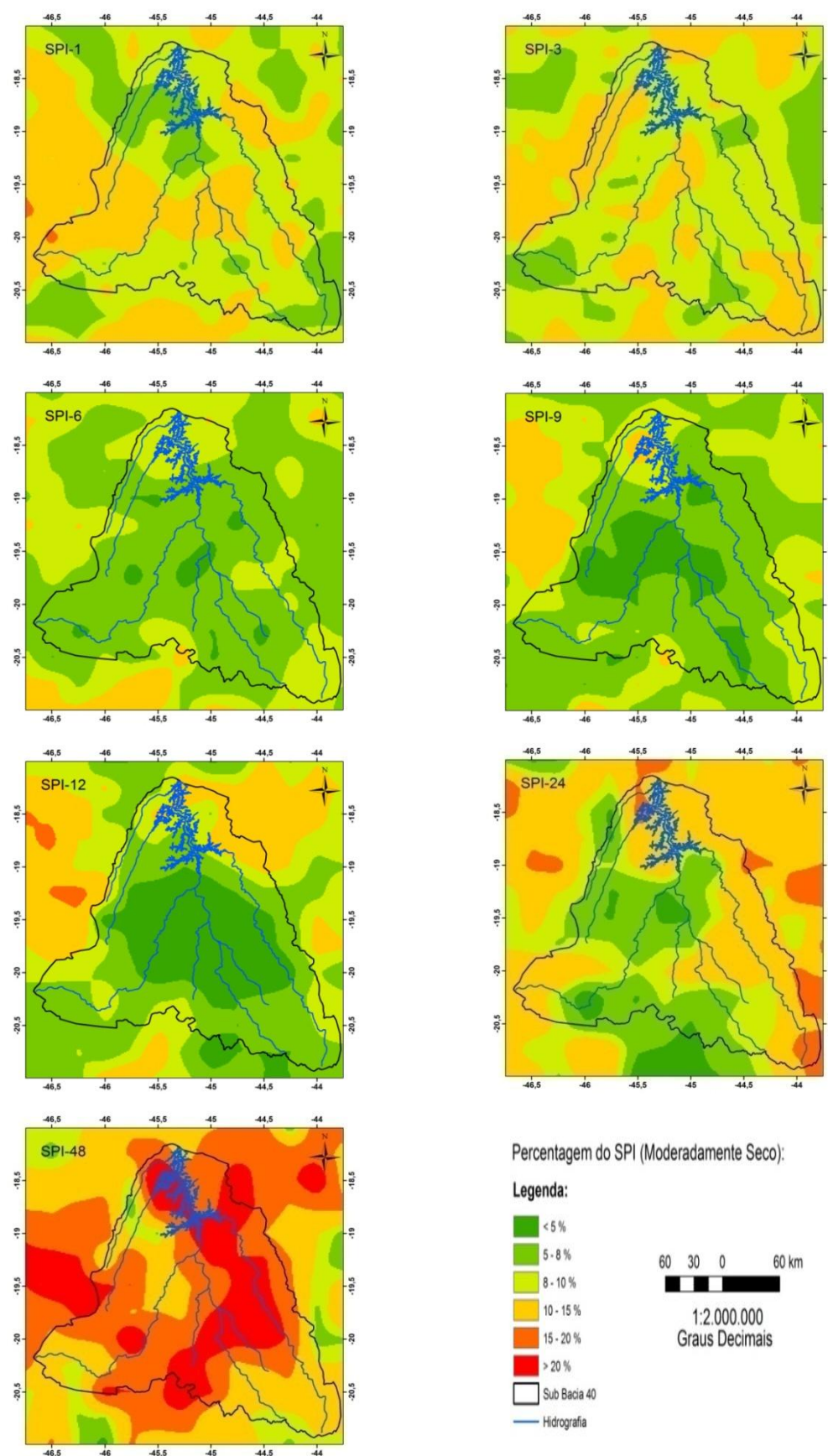
Apêndice A-19: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Moderadamente Úmido.



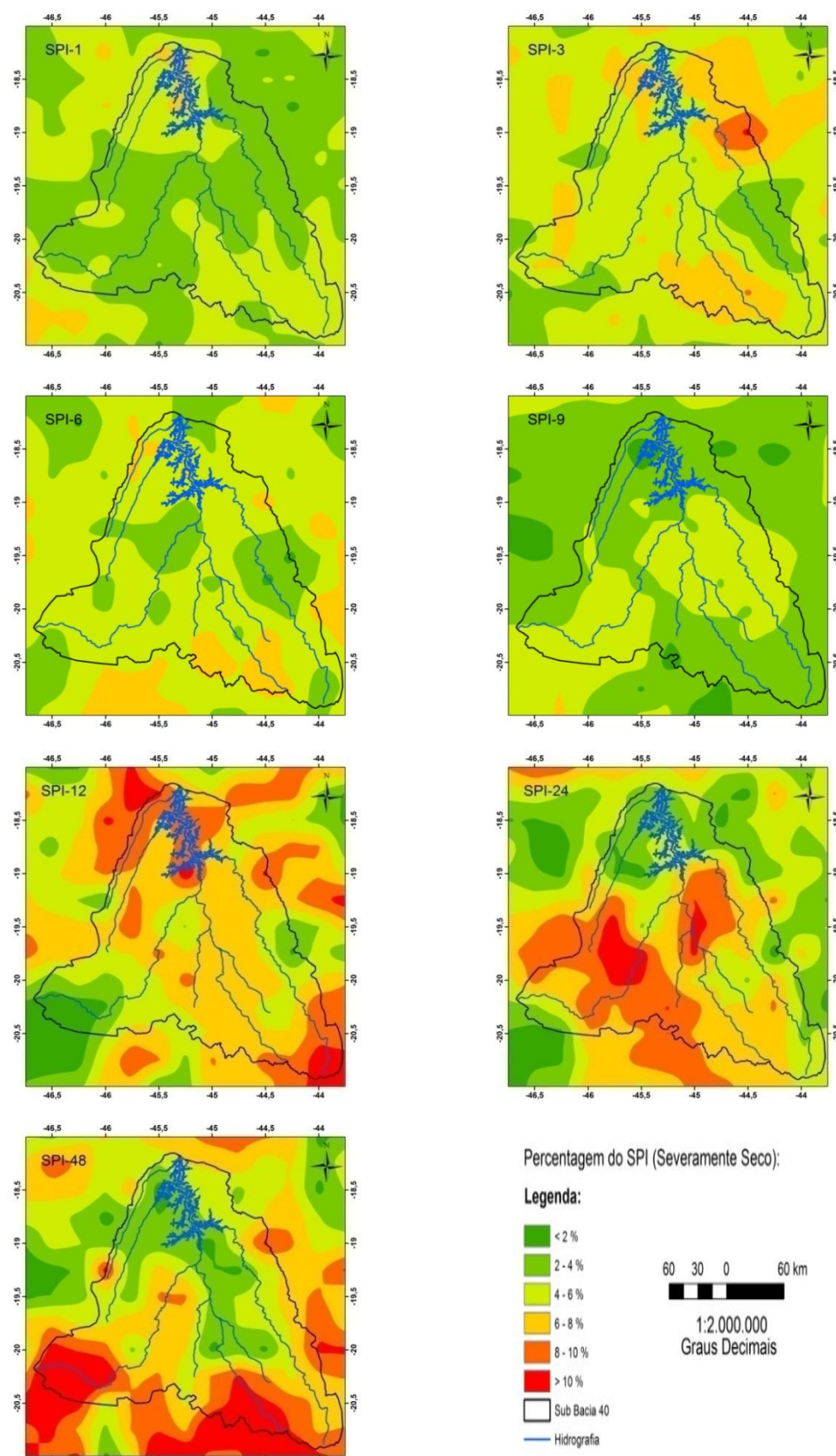
Apêndice A-20: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Suavemente Úmido.



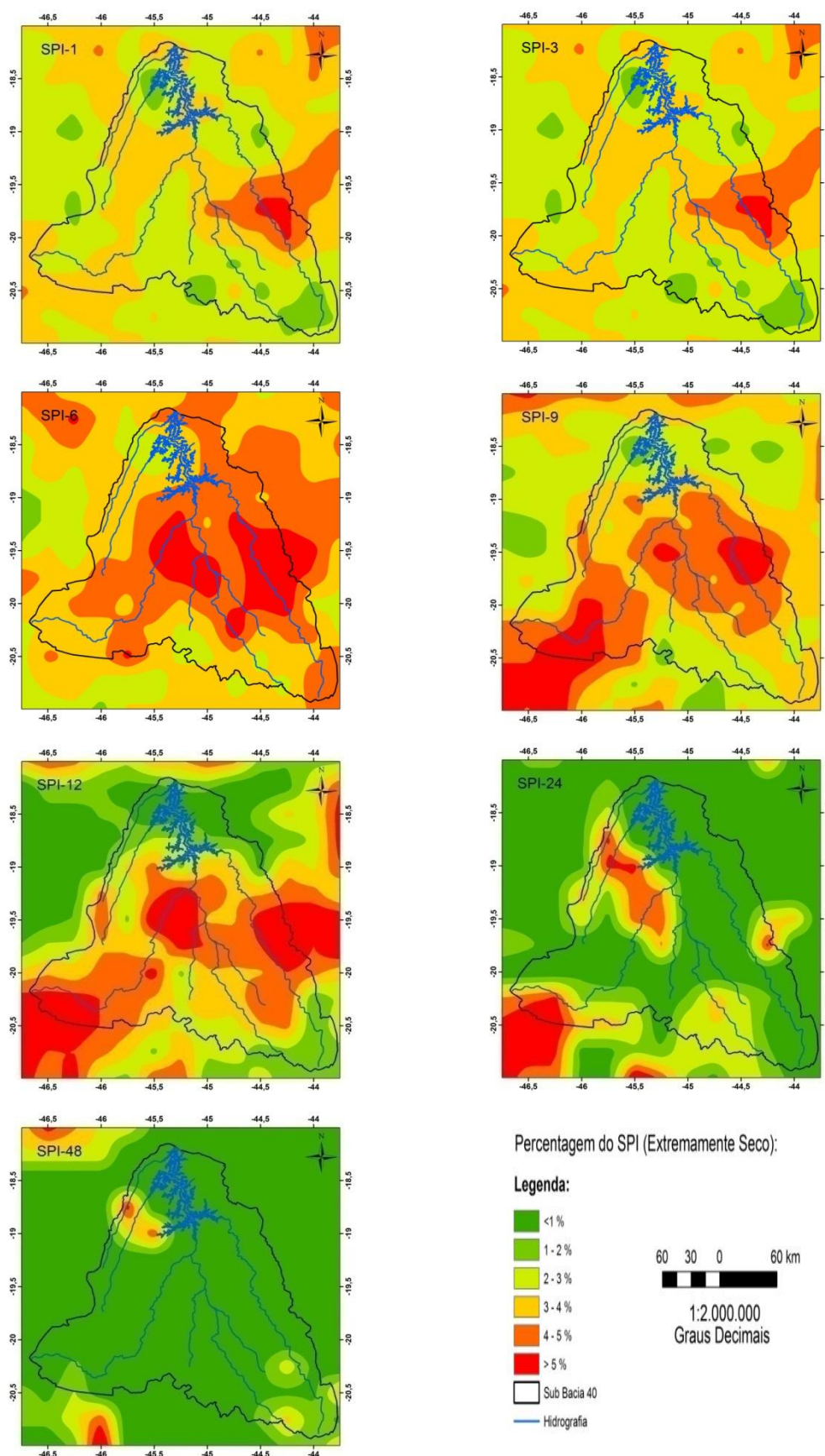
Apêndice A-21: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Suavemente Seco.



Apêndice A-22: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Moderadamente Seco.



Apêndice A-23: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Severamente Seco.



Apêndice A-24: Mapas do SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, e SPI-48 para classificação Extremamente Seco.

VAZÕES MÉDIAS MENSAIS DO RESERVATÓRIO TRÊS MARIAS (m³/s)													
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
1998	1240	1241	770	511	457	379	256	248	196	262	681	698	578
1999	907	600	1637	533	343	216	193	106	104	133	608	759	512
2000	1069	2131	1451	688	419	310	239	166	240	112	570	915	693
2001	741	322	445	215	158	138	117	111	119	199	428	796	316
2002	1329	1808	961	428	304	233	187	112	159	86	345	860	568
2003	1656	1178	883	488	327	249	218	169	151	101	220	718	530
2004	1288	1791	1838	1050	477	394	332	261	195	196	210	1009	753
2005	1721	1247	1617	635	552	397	304	256	244	184	718	1562	786
2006	774	712	1338	689	379	289	252	213	225	410	656	2393	694
2007	3022	2456	814	591	413	331	276	221	172	143	257	649	779
2008	934	2251	1530	1142	531	388	294	238	256	213	447	1607	819
2009	2022	1983	1350	1404	632	453	381	305	325	463	456	1059	903
2010	845	402	1002	492	324	252	186	118	114	274	777	1084	489
2011	1685	505	2218	1059	496	379	305	226	153	251	379	1766	785
2012	2796	1062	690	575	413	415	275	206	174	146	497	330	632
2013	651	1059	596	679	284	324	200	142	127	197	277	945	457

Apêndice A-25: Vazões Médias Mensais do Reservatório Três Marias no período de 1998 a 2013.