UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A EXPANSÃO AGRÍCOLA NO CERRADO E SEUS IMPACTOS NO CICLO HIDROLÓGICO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DO MATOPIBA

PAULO RENATO DE FREITAS DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. SAULO RODRIGUES PEREIRA FILHO

Brasília – DF

Fevereiro/2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A EXPANSÃO AGRÍCOLA NO CERRADO E SEUS IMPACTOS NO CICLO HIDROLÓGICO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DO MATOPIBA

PAULO RENATO DE FREITAS DA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Sustentável, área de concentração: Política e Gestão da Sustentabilidade.
Orientador: Dr. Saulo Rodrigues Pereira Filho

Brasília - DF
Fevereiro/2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A expansão agrícola no Cerrado e seus impactos no ciclo hidrológico: estudo de caso na região do MATOPIBA

PAULO RENATO DE FREITAS DA SILVA

Aprovado em 12 de Fevereiro de 2020.

Membros da Banca:

Prof. Dr. Saulo Rodrigues Pereira Filho

(Orientador / Presidente da Comissão Examinadora – Centro de Desenvolvimento Sustentável-CDS/UnB)

Dr. Nathan dos Santos Debortoli

(Examinador Externo – ESSA Technologies, Ottawa – Canadá)

Profª. Drª. Cristiane Gomes Barreto

(Examinador Interno – Centro de Desenvolvimento Sustentável-CDS/UnB)

Prof. Dr. João Nildo Souza Vianna

(Examinador Suplente – Centro de Desenvolvimento Sustentável Fundação Universidade de Brasília)

Brasília – DF
Fevereiro/2020

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, PAULO RENATO DE FREITAS

A expansão agrícola no Cerrado e seus impactos no ciclo hidrológico: estudo de caso na região do MATOPIBA. Paulo Renato de Freitas da Silva.

PPG-CDS/2020. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília. Centro de Desenvolvimento Sustentável.

1. Cerrado
2. MATOPIBA
3. Desmatamento
4. Precipitação
5. Mudanças climáticas

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, P. R. F. (2020). A expansão agrícola no Cerrado e seus impactos no ciclo hidrológico: estudo de caso na região do MATOPIBA. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento Sustentável. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 155 p.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

AGRADECIMENTO

À Raquel, pelo Amor, carinho e muita paciência.

Aos meus Pais, meu Irmão e Mariana, que mesmo longe estão sempre presentes.

Ao CDS, pela excelência acadêmica, pelo diálogo entre saberes e pela visão de vanguarda nos caminhos da sustentabilidade.

Ao meu orientador, Saulo Rodrigues Pereira Filho, pela generosidade e partilha do seu conhecimento.

Aos amigos Félix Bezerra e Nilva Pacheco pela bondade em nos acolher em todas as horas.

Ao Felipe Lenti e Camila Balzani, do IPAM, por todos os esclarecimentos.

Aos colegas Guilherme Motta, Gabriel Lima e Tayline pela inestimável ajuda.

Ao Cerrado, seus povos tradicionais e comunidades indígenas, pela sua enorme riqueza, resistência e fonte de inspiração.

Muito obrigado!

“Sua tarefa não é de prever o futuro,

mas sim de o permitir”

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

Nas últimas três décadas a expansão agropecuária trouxe mudanças significativas na cobertura e uso do solo do Cerrado, o segundo maior bioma terrestre brasileiro. Tendo como objetivo a análise do papel da cobertura de vegetação natural na regulação do ciclo hidrológico e a sua relação com as mudanças no uso do solo, foram caracterizados, com base em séries históricas de 33 anos (1985-2017), os índices de desmatamento e os dados de precipitação média, mensais e anuais, na região do MATOPIBA, fronteira agrícola situada a norte deste bioma. Em seguida, os resultados obtidos foram correlacionados estatisticamente por meio de *buffers* com 40 km de raio em áreas mais antropizadas e menos antropizadas. Em termos de resultados verificou-se que a tendência de queda de precipitação nas 83 estações pluviométricas analisadas, para qualquer uma das épocas do ano, foi claramente superior à tendência de aumento de precipitação para o período estudado, destacando-se neste cenário a estação das chuvas e a estação de transição seca-chuvas com tendências de queda em 71 e 76 estações, respetivamente. A maior tendência de aumento de precipitação no período analisado de 33 anos registrou-se na época de transição chuvas-seca, com 27 estações. Por sua vez, as épocas do ano com tendências de queda dos padrões de precipitação estatisticamente mais expressivas foram a estação das chuvas e a transição seca-chuvas com 22 estações cada (27%). A perda efetiva de 94.000km^2 de cobertura de vegetação natural na região do MATOPIBA, correspondente a uma supressão média anual de 2.900km^2, acompanhada de tendências de queda das precipitações médias entre 67% e 88%, revelou, para a estação da seca e para a época de transição chuva-seca, uma correlação significativa em termos estatísticos ($p \leq 0,05$) acompanhada de intensidades de correlação máximas respetivamente de -0,57 e 0,53. Ainda que a intensidade das correlações testadas tenha demonstrado valores considerados moderados, esta pesquisa indica, por meio de séries históricas consolidadas de desmatamento e precipitação, que o regime de chuvas na região apresenta significativa redução em função das mudanças de uso e cobertura do solo.

Palavras-chave: Cerrado, MATOPIBA, Desmatamento, Precipitação, Mudanças Climáticas

ABSTRACT

In recent decades agricultural expansion has brought significant changes in Cerrado land-use and land-cover, the second largest biome in Brazil. To assess the role of natural vegetation cover in regulating the hydrological cycle in Cerrado and its relation to land use changes, 33-year historical series (1985-2017) of deforestation rates and month to annual rainfall data in the MATOPIBA region were characterized. The results were then statistically correlated using *buffers* with 40 km radius distributed by more disturbed and less disturbed areas. We found that the falling trend on precipitation in 83 rain gauges analyzed for every periods around the year was clearly superior to the upward trend in precipitation for the period studied, highlighting the rainy season and the dry-rainy transition season, with downward trends in 71 and 76 seasons, respectively. The greatest increasing trend in the analyzed period was registered in the rainy-dry transition season, with 27 rain gauges. On the other hand, the time of the year statistically more expressive with decreasing trends in rainfall patterns was the rainy season and the dry-rain transition with 22 rain gauges (27%). A natural vegetation cover loss of 94.000 km^2 corresponding to an average annual deforestation of 2.900 km^2. was followed by decreasing trends on precipitation between 67% and 88% revealing for the dry season and the rain-dry transition season a statistically significant correlation ($p \leq 0.05$) accompanied by maximum correlation intensities of -0.57 and 0.53 respectively. The correlation results indicates that deforestation in a vast region of agriculture frontier are associated with a significant reduction on precipitation and therefore confirm a significant sensitivity of the hydrological cycle to land use change.

Keywords: Cerrado, MATOPIBA, Deforestation, Precipitation, Climate changes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mudanças projetadas das médias anuais de temperatura e precipitação na América do Sul para os períodos 2046-2065 e 2081-2100, em relação a 1986-2005, sob os cenários RCP 2.6 e RCP 8.5 (Fonte: Magrin, G.O., et al., 2014). 19

Figura 1.2 - Mudanças observadas nas concentrações atmosféricas de GEE: dióxido de carbono, CO2 (verde), metano, CH4 (laranja) e óxido nitroso, N2O (vermelho) (Fonte: IPCC, 2014). 20

Figura 1.3 - Serviços climáticos em florestas tropicais, temperadas e boreais (Fonte: Bonan, G., 2008). 24

Figura 1.4 - O sistema climático (Fonte: sistema climático (Fonte: Sampaio, G.; Dias, P. Leite da Silva, 2014).....27

Figura 1.5 - Mapa de localização e da composição estadual do MATOPIBA (Fonte: Autor, 2019).....29

Figura 1.6 – Biomas continentais do Brasil (Fonte: IBGE, 2012). 30

Figura 1.7 – Mudança na precipitação média anual resultante da conversão de savana tropical em pastagem. As regiões de savana têm uma linha de contorno (Fonte: Hoffmann; Jackson, 2000). 34

Figura 1.8 – Trajetórias de Concentração Representativas (RCP) de emissões de GEE (Fonte: Federici, S.; Lee D.; Herold M., 2016).....36

Figura 1.9 – Linha do tempo das medidas envolvendo Mudanças Climáticas (Fonte:MMA, 2019). 39

Figura 1.10 – Níveis de conformidade da Lei n° 12.651, de 25 de maio de 2012, (Fonte: Soares-Filho, B., et al., 2014). 42

Figura 2.1 – Distribuição e quantidade de grids em todos os biomas brasileiros e regiões de transição usados para processamento das imagens Landsat em ambiente MapBiomas Workspace (Fonte: Mapbiomas, 2019). 50

Figura 3.1 – Mapa do índice de risco de conservação nos biomas brasileiros (Fonte: Overbeck, G. E., et al., 2015). 64

Figura 3.2 – Ilustração das fitofisionomias do bioma Cerrado por José Felipe Ribeiro (Fonte: Portal Embrapa, 2019). 65

Figura 3.3 – Ilustração dos efeitos biofísicos e biogeoquímicos do desmatamento (LE: calor latente; SH: calor sensível; GHG: Gases de Efeito de Estufa) (Fonte: Perugini et al., 2017). 71

Figura 3.4 – Distribuição espacial dos fluxos anuais de vapor de água (mm) promovidos potencialmente pela vegetação nativa, destacando-se a importância das florestas tropicais úmidas, particularmente a bacia amazônica (Fonte: Gordon, L. J., et al., 2005) 77

Figura 3.5 – Dimensões críticas de áreas desmatadas à escala continental (Fonte: Lawrence, D; Vandecar, K., 2014). 79

Figura 3.6 – Circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do El Niño ou La Niña (Condições Normais) e padrão de circulação observada em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico (Fonte: http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt, 2014). 79

Figura 4.1 – Mudanças de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado em 1985 e em 2017 (Fonte: Mapbiomas, 2019). 82

Figura 4.2 –Localização do bioma Cerrado, da fronteira agrícola do MATOPIBA e as 4 RH que compõem esta região de fronteira agrícola: Atlântico Nordeste Ocidental (verde), Parnaíba, (vermelho), São Francisco (azul) e Tocantins-Araguaia (Amarelo) (Fonte: Autor, 2019).....85

Figura 4.3 –Distribuição espacial das 83 estações pluviométricas analisadas na pesquisa (Fonte: Autor, 2019) 86

Figura 4.4 – Distribuição espacial, para o ano 1985 (início da série histórica), dos 54 *buffers* selecionados para análise de correlação (Autor, 2019) 102

Figura 4.5 – Distribuição espacial, para o ano 2017 (fim da série histórica), dos 54 *buffers* selecionados para análise de correlação (Autor, 2019) 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Carbono vegetal, Carbono do solo e Produtividade Primária Líquida (NPP) nos principais ecossistemas terrestres (Fonte: Autor, com base em Christopher B. Field e Michael R. Raupach, 2004). 25

Tabela 1.2 - Estoques de carbono no solo e na biomassa (acima e abaixo do solo) e fluxo de carbono entre diferentes compartimentos nos biomas brasileiros (Fonte: Autor, com base em PBMC-GT1, 2016). 26

Tabela 2.1 - Classificação de cobertura e uso do solo com três níveis de classe de legenda – Coleção 3.0 e legenda. 49

Tabela 3.1 - Compilação dos resultados diários e anuais de evapotranspiração e escoamento superficial para as duas bacias: em área de pastagem e em área não perturbada de Cerrado. 75

Tabela 4.1 - Teste de tendência de precipitação de Mann-Kendall para quatro épocas do ano na região do MATOPIBA (83 estações pluviométricas): estação das chuvas, estação seca, transição chuvas-seca e transição secas-chuva e tendência significativa do teste (estações com valor p ≤ 0,05) 92

Tabela 4.2 - Estações pluviométricas com ruptura significativa (p ≤ 0,05) e respetivo ano da ruptura para as quatro séries históricas sazonais de precipitação analisadas: estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) 100

Tabela 4.3 - *Buffers*/estações mais antropizadas (31), *buffers*/estações menos antropizadas (23) e os correspondentes percentuais de Cobertura Vegetal Remanescente em 2017 103

Tabela 4.4 - Resumo dos resultados da aplicação do teste de correlação de Pearson para *buffers* em áreas mais antropizadas (31) e áreas menos antropizadas (23). A vermelho estão destacados os valores de correlação de intensidade moderada e com valores de p ≤ 0,05 104

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1 - Total das emissões no Brasil, por setor, em CO_{2e} (t) (Fonte: Autor com base em dados do Observatório do Clima/SEEG, 2019 23

Gráfico 2.1 - Aplicação do Método de Dupla Massa à estação pluviométrica Sítio do Mato, localizada no estado da Bahia e pertencente à bacia hidrográfica do Rio São Francisco (Autor, 2019) 54

Gráfico 4.1 - Evolução da área acumulada de cobertura de vegetação nativa (formação florestal e formação savânica) e da área de empreendimentos agropecuários no bioma Cerrado entre 1985 e 2017 (Fonte: Autor, com base em dados do Mapbiomas, 2019 83

Gráfico 4.2 - Perda de cobertura de vegetação nativa (floresta e savana), em área (km^2), na região de fronteira agrícola do MATOPIBA (Fonte: Autor com base em dados do Mapbiomas, 2019) 84

Gráfico 4.3 - Precipitação média anual, por Região Hidrográfica, no MATOPIBA, com base nas Séries Históricas de 33 anos (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019) 87

Gráfico 4.4 - Valores médios mensais de precipitação, por Região Hidrográfica (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019).....88

Gráfico 4.5 - RH do rio São Francisco (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019) 89

Gráfico 4.6 - RH do rio Parnaíba (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019) 89

Gráfico 4.7 - RH do Atlântico Nordeste Ocidental (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019).....90

Gráfico 4.8 - RH do Tocantins-Araguaia (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019).....90

Gráfico 4.9 - Série Histórica de precipitação no MATOPIBA para os 33 anos (1985-2017) e a correspondente linha de tendência (Fonte: Autor, 2019) 92

Gráfico 4.10 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a estação das chuvas. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019) 93

Gráfico 4.11 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a transição chuvas-seca. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019) 94

Gráfico 4.12 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a estação seca. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019) 94

Gráfico 4.13 - Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a transição seca-chuvas. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019) 95

Gráfico 4.14 - Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação para a estação das chuvas, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)..... 96

Gráfico 4.15 - Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação para a transição chuva-seca, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)..... 97

Gráfico 4.16 - Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação para a estação seca, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019) 98

Gráfico 4.17 - Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação para a transição seca-chuva, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)..... 99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP - *Áreas de Preservação Permanente*

AR – *Assessment Report*

CO_2eq– *Dióxido de carbono equivalente*

COP – *Conference of the Parties*

CQNUMC– *Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*

ET– *Evapotranspiração*

FAO– *Food and Agriculture Organization*

GEE – *Gases de Efeito Estufa*

GIZ– *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*

Gt– *Gigatonelada*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

INPE - *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

IUCN– *International Union for Conservation of Nature*

IAF – *Índice de Área Foliar*

MAPA– *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

MCTI– *Ministério de Ciência, Tecnologia eInovação*

MMA– *Ministério do Meio Ambiente*

NPP – *Net Primary Production*

NDC– *Nationally Determined Contributions*

ODS– *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*

ONG– *Organização Não Governamental*

PBMC – *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*

RCP - *Representative Concentration Pathways*

REDD+ - *Redução de emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal*

RL – *Reserva Legal*

USGS– *United States Geological Survey*

W/m^2 – *Watt por metro quadrado*

WMO– *World Metheorological Organization*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....18

1.1 Contexto.....18
1.1.1 As florestas e o sistema climático.....23
1.1.2 A ocupação antrópica no Cerrado.....28
1.2 Motivação e Objetivos.....30
1.3 Marco legal e compromissos internacionais do Brasil.....34

CAPÍTULO 2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....44

2.1 Hipótese e questões da pesquisa.....44
2.2 Objetivos.....46
2.2.1 Objetivo geral.....46
2.2.2 Objetivos específicos.....46
2.3 Materiais e métodos de desenvolvimento da pesquisa.....47
2.3.1 Dados espaciais de desmatamento.....47
2.3.2 Dados de precipitação.....50
2.3.2.1 Seleção das estações e obtenção dos dados.....51
2.3.2.2 Identificação e preenchimento de falhas em séries históricas.....52
2.3.2.3 Análise de consistência de dados.....53
2.3.2.4 Séries históricas.....54
2.3.2.5 Análise estatística das séries históricas.....55
2.3.3 Correlação entre desmatamento e precipitação.....59

CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL E TEÓRICA.....62

3.1 O bioma Cerrado.....62
3.2 O papel do bioma Cerrado no sistema climático.....69
3.3 Impactos das mudanças climáticas no bioma Cerrado.....76

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....81

4.1 As taxas de desmatamento no bioma Cerrado.....81
4.2 As taxas de desmatamento no MATOPIBA.....83
4.3 As séries históricas de precipitação.....85

4.4 Teste de Mann-Kendall 92
4.5 Teste de Theil-Sen 95
4.6 Teste de Pettitt 99
4.7 Correlação entre as séries históricas de precipitação e o desmatamento na região do MATOPIBA 101
4.8 Discussão 106
4.9 Considerações finais 110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 112
APÊNDICE A 122
APÊNDICE B 123
APÊNDICE C 140

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Os recentes relatórios publicados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) indicam a ocorrência inequívoca de um aquecimento global da superfície terrestre e, desde 1950, muitas das mudanças observadas não encontram precedentes ao longo de décadas e mesmo séculos, realçando a contribuição humana para o agravamento do chamado efeito estufa. A atmosfera e os oceanos aqueceram, as quantidades de neve e de gelo diminuíram e o nível do mar aumentou. O período de 1983 a 2012 foi provavelmente o período mais quente de 30 anos dos últimos 800 anos no Hemisfério Norte, onde essa avaliação é possível e, provavelmente, o período mais quente de 30 anos dos últimos 1400 anos (IPCC, 2014).

Uma conclusão comum entre os vários estudos realizados ao longo dos últimos 20 anos, seja por meio de análises baseadas em medições ou de simulações utilizando modelos de circulação geral da atmosfera e oceanos, é que as mudanças climáticas observadas não podem ser explicadas somente por fatores naturais, sendo que a influência antrópica é necessária para explicar essas mudanças (PBMC-GT1, 2016). Os dados combinados da temperatura média global da superfície terrestre e oceânica, determinados por uma tendência linear, mostram um aquecimento médio de 0,85°C (variando entre 0,65ºC e 1,06ºC) entre 1880-2012, período em que existem vários conjuntos de dados produzidos de forma independente (IPCC, 2014).

De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR 5), publicado entre 2013 e 2014, essa elevação das temperaturas médias e as consequentes mudanças nos padrões globais de precipitação contribuiram para alterações de início e fim das épocas de cultivo, para reduções regionais de produção agrícola, para a redução de disponibilidade de água doce e para o aumento da mortalidade da vegetação nativa, colocando a biodiversidade sob estresse adicional.

A Figura 1.1 permite observar as mudanças projetadas das médias anuais de temperatura e precipitação na América do Sul para os períodos 2046-2065 (meio do século 21) e 2081-2100 (final do século 21), em relação ao período 1986-2005, sob os cenários RCP (Representative Concentration Pathways, ou, na tradução para língua portuguesa, Trajetórias de Concentração Representativas) 2.6 e 8.5 do IPCC.

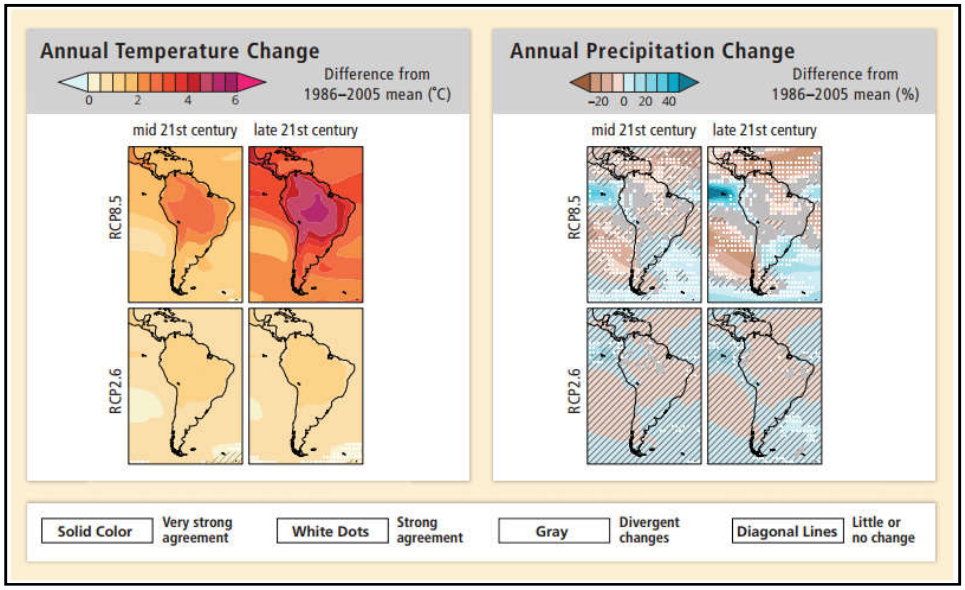


Figura 1.1 – Mudanças projetadas das médias anuais de temperatura e precipitação na América do Sul para os períodos 2046-2065 e 2081-2100, em relação a 1986-2005, sob os cenários RCP 2.6 e RCP 8.5 (Fonte: MAGRIN, G.O., et al., 2014)

Por seu lado, as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) alcançaram níveis sem precedentes desde o inicio da revolução industrial. Conforme se pode constatar pela Figura 1.2, as concentrações de dióxido de carbono (CO_2), de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) evidenciam grandes aumentos desde 1750 (respetivamente 40%, 150% e 20%) (IPCC, 2014).

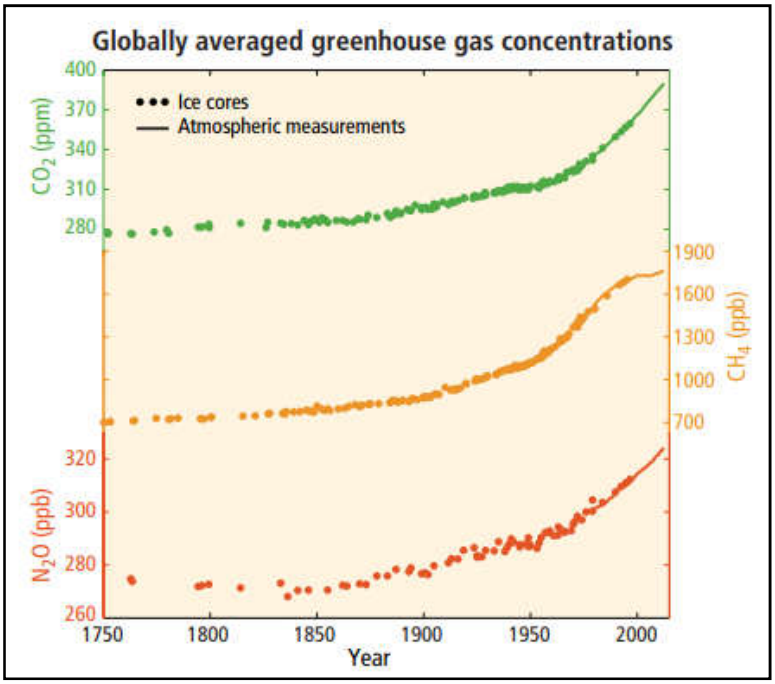


Figura 1.2 – Mudanças observadas nas concentrações atmosféricas de GEE: dióxido de carbono, CO_2 (verde), metano, CH_4 (laranja) e óxido nitroso, N_2O (vermelho) (Fonte: IPCC, 2014)

O desmatamento de florestas nativas, a expansão e intensificação de regiões agrícolas e de pastagem e a construção de infraestruturas de transporte para ligar os centros de produção aos centros de distribuição são dinâmicas globais orientadas pela necessidade de fornecimento de alimentos, fibras e biocombustíveis a uma população mundial em crescimento acelerado, e que já ultrapassou os 7 bilhões de pessoas (FAO, 2018). Essa expansão antrópica, acompanhada de grandes aumentos nos consumos de água, energia e fertilizantes, tem gerado perdas muito elevadas da biodiversidade, um aumento significativo de emissões de GEE, a contaminação de manancias superficiais e subterrâneos, a erosão de solos e impactos na regulação do clima e na qualidade do ar, ampliando vulnerabilidades sociais, especialmente em regiões onde as economias são altamente dependentes dos recursos naturais (FOLEY, J. A. et al., 2005).

Essa intensificação das emissões de GEE desencadeia um conjunto vasto de impactos sobre as sociedades e o meio ambiente, iniciando-se nos sistemas físicos (temperatura e precipitação, entre outros), percorrendo os ciclos biogeoquímicos (do carbono, nitrogênio e fósforo), gerando importantes efeitos sobre as economias, os serviços ecossistêmicos, a biodiversidade e as condições de vida na Terra (RODRIGUES FILHO, S.; SANTOS, A. S., 2011).

Enfrentamos assim os enormes desafios e conflitos de escolha (*trade-off*) de gerenciar as necessidades básicas e imediatas de nos alimentarmos e a capacidade da biosfera em manter a provisão de bens e serviços ecossistêmicos a médio e longo prazo. Neste contexto, a janela de oportunidade em operar mudanças significativas nas sociedades modernas para limitar as alterações climáticas dentro de limites toleráveis está-se estreitando rapidamente.

A Conferência das Partes (COP) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), realizada em Paris no final de 2015 e que culminou com a concretização de um acordo histórico assinado por 196 países (Acordo de Paris), definiu o esforço em limitar o aumento de temperatura entre 1,5ºC e 2,0ºC ao longo deste século, obrigando, até 2020, a uma redução média das emissões de GEE superior a 7 Gt CO_2 eq., além das metas vinculantes após 2020(CQNUMC, 2015), reforçando a necessidade de ações rápidas nos setores de energia, transporte, infraestrutura e agricultura, tendo em conta a acomodação da crescente população humana. O CO_2 equivalente, ou dióxido de carbono equivalente, é uma medida utilizada para comparar as emissões de vários GEE, baseada no potencial de aquecimento global de cada um deles, de acordo com a Decisão17/COP-8. Assim, o dióxido de carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de GEE pelo seu potencial de aquecimento global, sendo que:CO_2 = 1, (Metano) CH_4 = 21, (Óxido nitroso) N_2O = 310, (Hidrofluorocarbonetos) HFC-125 = 2.800, HFC-134a = 1.300, HFC-143a = 3.800, HFC-152a = 140, (Tetrafluorometano) CF_4 = 6.500, (Hexafluoropropileno) C_2F_6 = 9.200, (Hexafluoreto de enxofre) SF_6 = 23.900) (MMA, 2010).

Para alcançar o objetivo final do Acordo de Paris, os países construiram os seus próprios compromissos, as chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas (iNDC, na sigla em inglês), respeitando o princípio das responsabilidades comuns.

Em 12 de setembro de 2016, o Brasil concluiu o processo de ratificação do Acordo de Paris e o instrumento foi formalmente entregue às Nações Unidas. A partir dessa data as metas brasileiras deixaram de ser pretendidas e tornaram-se compromissos oficiais, passando a ser chamadas apenas de NDC. Com base no documento entregue, as NDC brasileiras refletiram o compromisso de reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de GEE em 43% abaixo

dos níveis de 2005, em 2030. Para tal o país se comprometeu, entre outras metas, a restaurar e reflorestar cerca de 120.000 km^2 de florestas e áreas degradadas (BENINI, 2017; MMA, 2019).

As florestas nativas constituem um importante sumidouro dos GEE, contudo, a sua conversão para fins agrícolas e pecuários contribui simultaneamente, e de forma significativa, para a emissão deste tipo de gases. Não é, portanto, surpreendente que a preservação das florestas e dos ecossistemas e a mudança e uso dos solos desempenhem um papel de destaque em muitas das iNDC contidas no Acordo de Paris (IPCC, 2019), bem como na Agenda 2030 das Nações Unidas – um plano de ação que explicita os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e suas 169 metas. Entre os ODS relacionados à problemática de combate à mudança do clima e seus respetivos impactos, bem como à proteção e promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres, destacam-se o ODS 13 e o ODS 15.

Aproximadamente dois terços dos signatários do Acordo de Paris têm sinalizado que usarão as florestas como sumidouro de emissões de GEE para atingir as suas metas de mitigação. Assim, alguns programas internacionais como a Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal (REDD+), incentivo desenvolvido no âmbito da CQNUMC para recompensar financeiramente países em desenvolvimento por seus resultados estabelecidos, e o papel potencial das tecnologias de emissão negativa, com foco na preservação das florestas e dos solos, têm estado a ser explorados (MMA, 2019; KEENAN; WILLIAMS, 2018).

Com base nos dados disponibilizados pelo Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), do Observatório do Clima, o Gráfico 1.1 permite identificar que, desde 1990, o principal setor de emissões de GEE no Brasil é o de Mudança de Uso da Terra e Florestas. Em 2017, este setor da economia representava 46% do total de emissões nacionais de GEE.

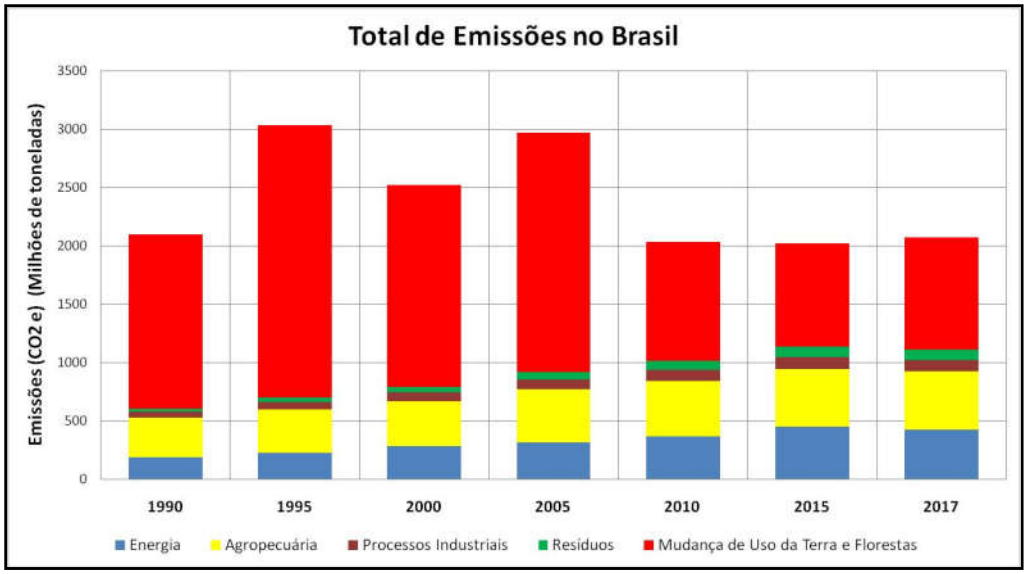


Gráfico 1.1 – Total das emissões no Brasil, por setor, em CO_{2eq} (t) (Fonte: Autor com base em dados do Observatório do Clima/SEEG, 2019)

As estimativas de emissões de GEE publicadas pelo SEEG são geradas segundo as diretrizes do IPCC com base nos dados dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de GEE, elaborados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e em dados obtidos junto a relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisa, entidades setoriais e organizações não governamentais.

No Gráfico 1.1 os dados de emissões são apresentados em toneladas de carbono equivalente (CO_2eq) contendo, de acordo com a definição apresentada anteriormente, todo o inventário nacional de GEE como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e os hidrofluorcarbonetos (HFC) na métrica Global Warming Potential (GWP), seguindo os fatores de conversão do AR5 do IPCC.

1.1.1 As florestas e o sistema climático

As florestas cobrem aproximadamente 40 milhões de km^2 da superfície terrestre, uma área equivalente a 30% da superfície total do planeta, distribuídas entre regiões tropicais, temperadas e boreais, fornecendo serviços ecossistêmicos, econômicos e sociais aos sistemas naturais e às sociedades humanas (BONAN, G., 2008), incluindo refúgios para a biodiversidade, fornecimento de alimentos, produtos medicinais e florestais, regulação dos ciclos hidrológicos e proteção dos recursos

dos solos. Além disso, suportam serviços intangíveis que moldam as sociedades, as culturas e o bem-estar humano, tais como o enriquecimento cognitivo e espiritual e os valores estéticos (HERNÁNDEZ-MORCILLO, M.; PLIENINGER, T., BIELING, C., 2013).

As florestas atuam na regulação do clima por meio de trocas de energia, de água, de dióxido de carbono e de outros componentes químicos com a atmosfera, contribuindo com aproximadamente 50% da produtividade primária líquida terrestre (NPP - Net Primary Production, na sigla em inglês), sequestrando anualmente grandes quantidades de carbono emitido para a atmosfera (Figura 1.3) (FIELD, C. B.; RAUPACH, M. R., 2004).

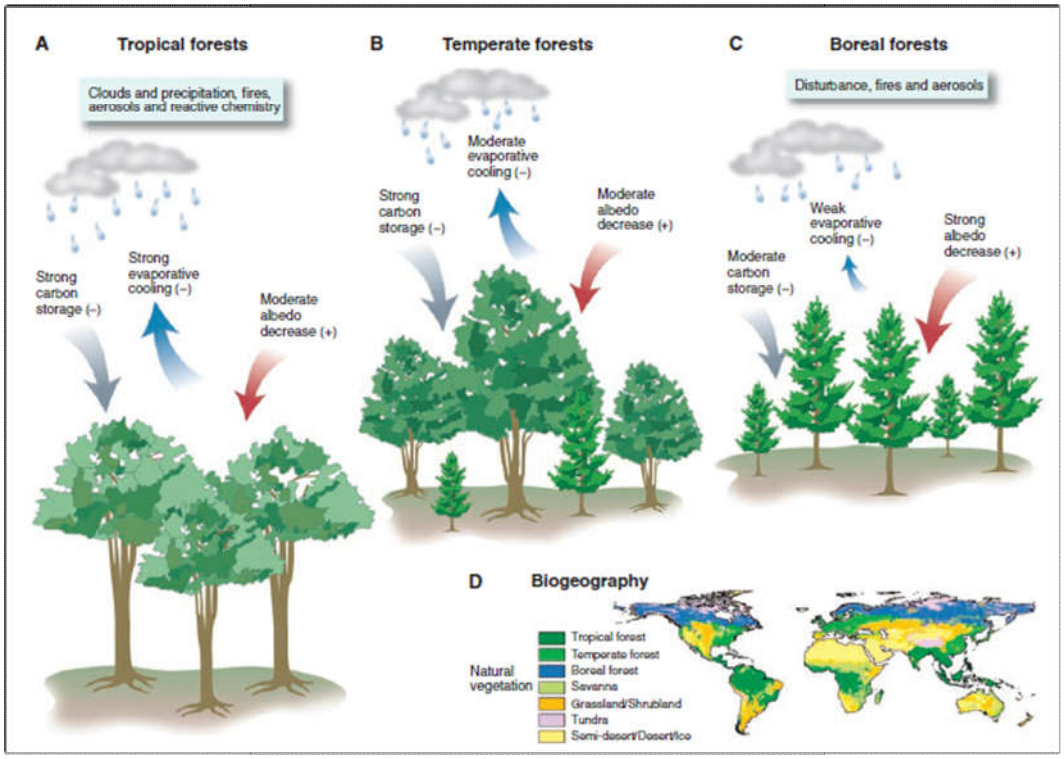


Figura 1.3 – Serviços climáticos em florestas tropicais, temperadas e boreais(Fonte: BONAN, G., 2008)

Na Tabela 1.1 pode observar-se que as florestas tropicais contêm a maior reserva de carbono da biota terrestre e também a maior NPP. Por sua vez, as florestas temperadas cobrem cerca de 60% da área das florestas tropicais e contêm a segunda maior reserva de carbono vegetal. Observamos ainda na Tabela 1.1 que as florestas tropicais e as florestas boreais, juntas, representam aproximadamente 75% do carbono vegetal da Terra (FIELD, C. B.; RAUPACH, M. R., 2004).

Tabela 1.1 – Carbono vegetal, Carbono do solo e Produtividade Primária Líquida (NPP) nos principais ecossistemas terrestres

Ecossistema	Área (10^6 km^2)	NPP (Pg C/ano)	Carbono Vegetal Pg C	Carbono Solo Pg C
Floresta tropical	17,5	20,1	340	692
Floresta temperada	10,4	7,4	139	262
Floresta boreal	13,7	2,4	57	150
Tundra	5,6	0,5	2	144
Floresta mediterrânea	2,8	1,3	17	124
Áreas de cultivo	13,5	3,8	4	248
Savanas tropicais	27,6	13,7	79	345
Pastagens de clima temperado	15	5,1	6	172
Desertos	27,7	3,2	10	208
Subtotal	*149,3*	*57,5*	*652*	*2344*
Regiões úmidas	-	-	-	450
Solos congelados	25,5	-	-	400
Total	*174,8*	*57,5*	*652*	*3194*

(Fonte: Autor, com base em FIELD, C. B.; RAUPACH., M. R., 2004)

Assim, a atuação das florestas na regulação do clima, por interação nos ciclos da água, de energia e do carbono, afeta onde e quando a chuva cai e, por consequência, determina as necessidades de irrigação para a agricultura, a frequência e a intensidade das ondas de calor e a qualidade do ar que respiramos, entre outros aspetos (IPCC, 2019). Relativamente aos biomas brasileiros, os estoques de carbono no solo e na biomassa (acima e abaixo do solo), bem como o fluxo de carbono entre diferentes compartimentos dos ecossistemas tem a distribuição apresentada na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Estoques de carbono no solo e na biomassa (acima e abaixo do solo) e fluxo de carbono entre diferentes compartimentos nos biomas brasileiros

Bioma	Estoques (Mg C/ha)			Produção Serapilheira (Mg C/ha/ano)	CO_2 – Respiração do solo (Mg C/ha/ano)	Troca líquida do ecossistema (Mg C/ha/ano)
	Solos	Biomassa acima do solo	Biomassa abaixo do solo			
Amazônia	85-100	95-250	100	2-7	12-17	-0,11 a -0,5
Mata Atlântica	190 - 280	90 - 130	20 - 29	2,6 - 4	3,6	-
Pantanal	11,2 – 15,8	7,4 - 100	36,1	2,5 – 5,2	6,5	-1 a -1,3
Cerrado	72 - 120	10 - 35	15	1 - 4	6 - 8	-0,1 a -0,3
Caatinga	25	15 - 25	3 - 6	1 - 3	2 - 10	-
Pampa	68	-	-	-	-	-

(Fonte: Autor, com base em PBMC-GT1, 2016)

A Figura 1.4 ilustra como a superfície terrestre interage com a atmosfera por meio de trocas de GEE, de água, de energia ou dos chamados poluentes climáticos de curta duração (ex: os compostos orgânicos voláteis biogênicos e o carbono negro), expondo alguns dos principais processos que estabelecem os efeitos biofísicos, biogeoquímicos e respectivas retroalimentações (*feedbacks*) do sistema climático.

Essas interações podem, contudo, ser modificadas pelas mudanças climáticas globais e regionais, pelas variações climáticas interanuais e sazonais, pelos extremos climáticos, bem como pela ação humana no meio ambiente (ex. desmatamento). Por sua vez, as ações antrópicas afetam a composição da atmosfera, a temperatura da superfície terrestre, o ciclo hidrológico, ou seja, de novo o clima, na sua escala local, regional e global (IPCC, 2019).

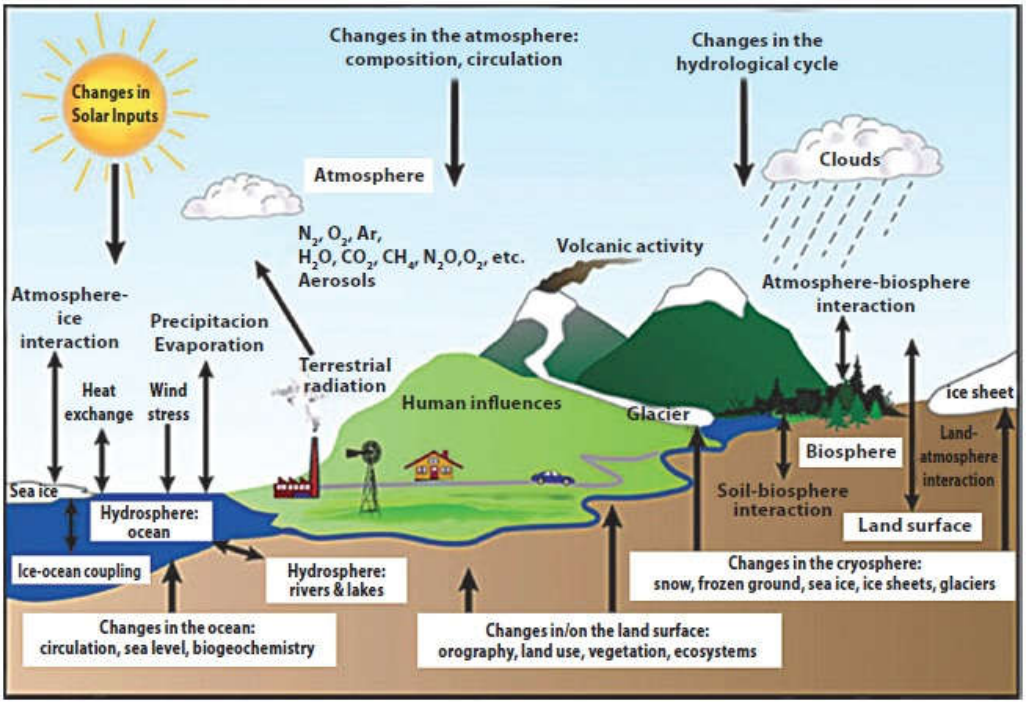


Figura 1.4 – O sistema climático (Fonte: SAMPAIO, G.; DIAS, P. LEITE da SILVA, 2014)

No Capítulo 3, onde se expõe a Fundamentação Conceitual e Teórica deste trabalho de pesquisa, serão aprofundados os processos e conceitos climáticos aqui introduzidos.

As simulações realizadas em modelos climáticos globais (Global Climate Models - GCM na sigla em inglês) têm mostrado que as florestas tropicais mantêm taxas elevadas de evapotranspiração (ET), diminuem a temperatura do ar da superfície e aumentam a precipitação em comparação com as áreas convertidas em pastagem. Esses modelos têm sido usados para simular as consequências climáticas do desmatamento global e do desmatamento em escalas regionais, como é o caso da bacia amazônica. Os atuais GCM incorporam o ciclo hidrológico e uma representação explícita da cobertura vegetal natural e seus efeitos nos fluxos de água e energia (incluindo transferências radiativas e de turbulência, além do controle físico e biológico da ET) (DUBREUIL, V. et al., 2011; MAHMOOD, R. et al., 2014).

Por seu lado, medições diretas na atmosfera realizadas na floresta amazônica, acima de áreas com cobertura vegetal natural e áreas desmatadas, indicam que a temperatura da superfície aumenta e a ET se reduz quando a floresta tropical úmida é convertida em pastagem, particularmente na estação seca. Dados de satélite confirmam que, mesmo durante os períodos de seca, a ET continua a

alimentar a umidade de volta para a atmosfera nas florestas intactas, o que não se verifica no caso de áreas desmatadas (LAWRENCE, D.; VANDECAR, K., 2014).

A redução da ET pode levar assim a uma redução da pluviosidade. Medições e modelos de impactos climáticos do desmatamento demonstram um limiar pelo qual o desmatamento completo das florestas tropicais reduziria substancialmente a precipitação (NOBRE, C. A.; BORMA, L. S., 2009).

Vale ressaltar que em muitas regiões tropicais o desmatamento ocorreu em grande escala apenas nas últimas décadas, em áreas sem dados meteorológicos robustos e representatividade espacial e temporal de longo prazo. A modelagem é uma ferramenta essencial para entender a maneira como o desmatamento afeta o clima em escalas locais, regionais e globais, Assim sendo, é imprescindivel intensificar as observações diretas e a coleta sistemática de dados de séries históricas de diversas variantes climáticas, como a precipitação e a temperatura, para calibração e validação de modelos climáticos (LAWRENCE, D.; VANDECAR, K., 2014; PBMC-GT1, 2016).

1.1.2 A ocupação antrópica no Cerrado

Nas últimas décadas, o Cerrado tem sido alvo de um rápido processo de conversão da sua cobertura vegetal por atividades produtivas de elevada escala (KLINK, C. A., 2013), resultando em extensas transformações na cobertura da terra e mudanças significativas no seu ciclo hidrológico, como veremos em seguida. Além disso, como apenas cerca de 8% do Cerrado é legalmente protegido e existem ainda cerca de 400.000 km^2 de terras disponíveis para desmatamento legal (MMA, 2011), poderá potencialmente intensificar-se a exploração deste bioma para implantação de grandes complexos agropecuários.

A ocupação territorial mais recente tem-se concentrado em fronteiras agrícolas do chamado “arco do desmatamento”, onde se inclui o MATOPIBA, uma região composta por 337 municípios nos estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Bahia (BA), considerada a última fronteira agrícola do Brasil, com uma extensão de 731.700 km^2 (dos quais 665.400km^2 no bioma Cerrado) e integrada por 4 importantes regiões hidrográficas (RH) (São Francisco, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba) (Decreto nº 8.447, de 6 de Maio de 2015).

Em termos de recorte geográfico, esta região de fronteira será o foco principal da presente Dissertação, conforme se ilustra na Figura 1.5.

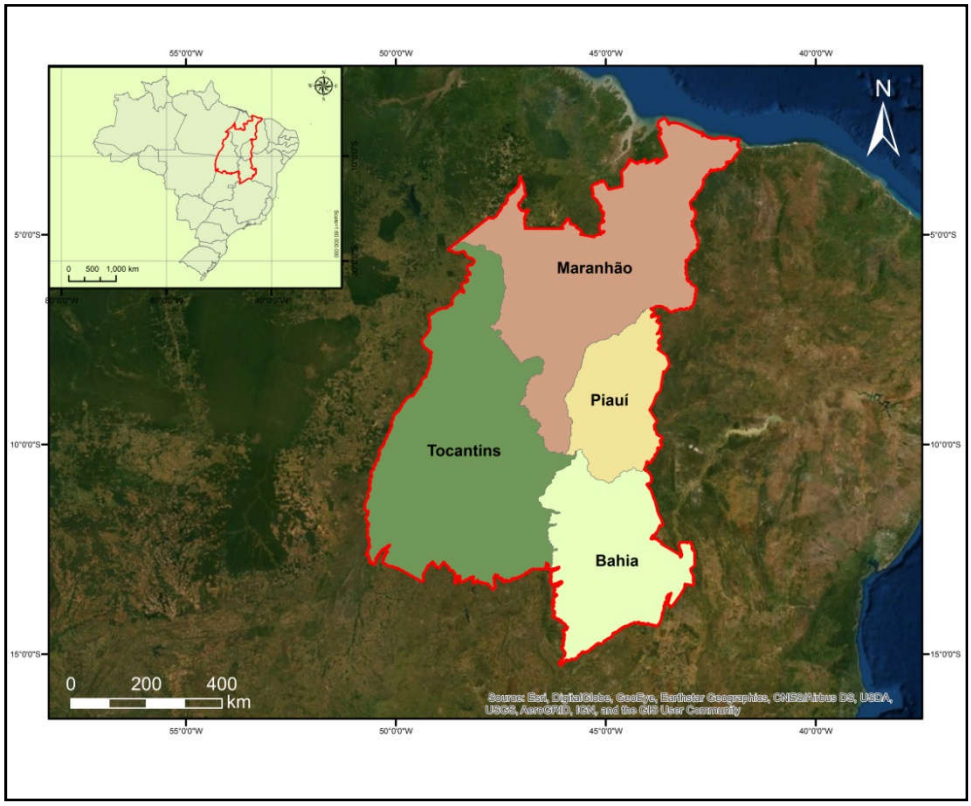


Figura 1.5 – Mapa de localização e da composição estadual do MATOPIBA (Fonte: Autor, 2019)

Atualmente, a região de MATOPIBA apresenta-se como um dos grandes polos nacionais de produção agrícola, com municípios onde se concentram empreendimentos de agricultura irrigada entre 100 e 300 km^2 e superiores a 300 km^2 (ANA, 2017). Devido em particular à expansão do agronegócio, tem-se verificado um aumento no desmatamento e na contaminação dos solos e dos corpos hídricos, com a consequente perda de biodiversidade, bem como de mudanças, a diferentes escalas, no balanço hídrico de diversas regiões hidrográficas (RH).

Esta região de fronteira agrícola tem apresentado uma dinâmica diferenciada, com crescimentos de produção agropecuários extraordinários em relação à produção média nacional. Os quatro estados que compõem o MATOPIBA deverão atingir uma produção de grãos de 25,4 milhões de toneladas nos próximos 10 anos, numa área plantada estimada de 88.000 km^2 em 2027/28 (MAPA, 2018).

Em consequência de políticas públicas de incentivo à expansão agrícola, das políticas de redução do desmatamento no bioma amazônico e das características

edafoclimáticas e topográficas da região do MATOPIBA (NOOJIPADY, P. et al., 2017), entre 1985 e 2017, a perda efetiva de cobertura vegetal natural (contabilizando a formação florestal e formação savânica) foi de aproximadamente 94.000km^2, correspondente a uma taxa média anual de desmatamento de 2.900 km^2/ano em toda esta região (Autor, com base nos dados do Projeto Mapbiomas).

1.2 Motivação e Objetivos

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) classificou o território continental brasileiro em seis biomas: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal e Pampa (ou Campos Sulinos), conforme se apresenta na Figura 1.6. Estes seis biomas envolvem formações dominantes em um conjunto característico de tipos de vegetação, designadas de fitofisionomias.

Figura 1.6 – Biomas continentais do Brasil. (Fonte: IBGE, 2012)

Na classificação das fitofisionomias, os parâmetros climáticos mais importantes são o número de meses secos ou frios, que determinam as subclasses de vegetação, e também as temperaturas médias que podem influenciar as formações em altitude (MMA-PNA, 2016). Neste sentido, qualquer alteração nos padrões de parâmetros climáticos, como variações fortes na quantidade ou na concentração de chuvas, na duração dos períodos de seca ou de eventos extremos, poderá, em algum nível, gerar impactos nas fitofisionomias.

O maior impacto da mudança do clima sobre os ecossistemas está na NPP, já mencionada anteriormente. Essa produtividade poderá aumentar ou diminuir, dependendo, entre outros fatores, de novos padrões de precipitação (BEAUMONT, L. J. et al., 2011).

Para os ecossistemas característicos de climas mais secos, como é o caso dos biomas Caatinga e Cerrado no Brasil, a redução gradual da pluviosidade e o aumento da temperatura têm efeitos ainda pouco estudados. Contudo, será expectável um impacto sobre os nichos climáticos das espécies, levando à perda de resiliência dos ecossistemas originais (MMA/PNA, 2016). No bioma Caatinga, estes impactos podem agravar processos de desertificação em curso, associados principalmente à intensificação da perda da cobertura vegetal por mudança de uso do solo. Por sua vez no Cerrado poderá ocorrer a redução das formações florestais e aumento das formações abertas, reduzindo o porte e a densidade de árvores nas fitofisionomias deste bioma (PBMC-GT1, 2016).

As evidências de que a cobertura da terra é importante para o sistema climático são conhecidas há muito tempo, especialmente a partir de estudos iniciais de modelagem paleoclimática e impactos do desmatamento induzido pelo Homem à margem de regiões desérticas. A compreensão de como as atividades de mudanças e uso da terra afetam o clima foi apresentada em 1975 pelos pesquisadores Jule Charney, Peter Stone e William Quirk no trabalho pioneiro que examinou o papel da desertificação induzida por excesso de áreas de pastagem no clima desértico do Saara. O estudo, realizado com duas integrações de um modelo de circulação geral da atmosfera, que diferiam apenas na superfície de albedo (fração de radiação solar refletida por uma superfície terrestre), mostrou que um aumento do albedo resultante de uma diminuição na cobertura vegetal causaria uma diminuição na precipitação. De forma simples, o que o estudo colocou em evidência foi que qualquer tendência

de diminuição da cobertura vegetal reforçaria a diminuição da precipitação, podendo-se assim iniciar (e eventualmente estender) um período de seca.

Como vimos antes, as características físicas da vegetação e dos solos têm grande influência nas trocas de água e energia entre a superfície terrestre (a biosfera) e a atmosfera. Mudanças na vegetação implicam em mudanças das propriedades físicas da superfície, incluindo o albedo superficial, a rugosidade da superfície, o índice de área foliar (IAF), a profundidade das raízes, e a disponibilidade de umidade do solo (PBMC-GT1, 2016; IPCC, 2019; BONAN, G., 2008).

Por seu lado, uma modificação do albedo na superfície terrestre resultará em alterações no balanço entre perda de calor sensível e perda de calor latente, implicando em modificações do balanço de energia e de temperatura, tanto à escala local quanto regional (FOLEY, J. A., et al., 2005; COE, M. T., 2017).

Os modelos numéricos usados no estudo do sistema climático terrestre devem considerar a atmosfera e a biosfera terrestres como um sistema acoplado em que os processos biofísicos e biogeoquímicos ocorrem numa certa escala de tempo. Na escala de tempo de curto prazo, isto é, de segundos a horas, esse sistema acoplado é dominado pelos rápidos processos biofísicos e biogeoquímicos de troca de energia, água e dióxido de carbono entre a atmosfera e a biosfera. Na escala de tempo intermediária, isto é, de dias e meses, os processos incluem mudanças na quantidade de umidade do solo, mudanças na alocação de carbono e na fenologia da vegetação. Já em escalas de tempo mais longas, de anos e décadas, podem ser fundamentais as mudanças na estrutura da vegetação causadas por distúrbios intensos, como as mudanças no uso do solo e a interrupção no crescimento da vegetação nativa, entre outros fatores. Assim, para se poder considerar todos estes processos de interação entre a biosfera e a atmosfera, é necessário que os modelos climáticos sejam capazes de simular tanto os fenômenos ecológicos intermediários, de curto e médio prazo, quanto os que se desenvolvem em longo prazo (COSTA, M. H. e FOLEY, J. A., 2000; STERLING; DUCHARNE; POLCHER, 2012).

Na ultima década, os resultados divulgados a partir de modelos climáticos têm demonstrado que os padrões de desmatamento em larga escala apresentam tendências de aumento considerável de temperatura, acompanhado de decréscimos de ET, do escoamento superficial e da precipitação média anual (NOBRE, C. A.;

BORMA, L. S., 2009; PBMC-GT1, 2016; COE, M. T., LATRUBESSE, E. M., FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L., 2011; COE, M. T. et al., 2017).

Resultados publicados recentemente, baseados em dados de medição, confirmam o aumento dos padrões de temperatura e a diminuição dos padrões de ET e precipitação em regiões tropicais sujeitas a supressão da cobertura da vegetação nativa (PERUGINI et al., 2017; SPERA, S. A. et al., 2016; CASAGRANDE; RECANATI; MELIÀ, 2018).

Contudo, o uso de medições para avaliação dos componentes de balanço hídrico (ex: precipitação e ET) e de tendências de alteração dos padrões de temperatura coloca, ainda, grandes desafios no presente devido à inconsistência, acessibilidade e à falta de transparência dos dados coletados pelas redes de monitoramento territoriais, conjugado com os custos elevados para sua obtenção (PBMC-GT1, 2016; POUSA, R. et al., 2019).

Um estudo realizado por Hoffmann e Jackson (2000) indicou que, em quatro das cinco regiões de savana mundiais (Cerrado, Llanos - região norte da América do Sul, norte e sul de África e norte da Austrália) a precipitação simulada em modelo diminuiu aproximadamente 10% após a conversão do bioma savana em pastagem, revelando ainda que as épocas de seca podem se tornar mais frequentes após a conversão do bioma. O estudo revelou ainda que essa alteração do regime de chuvas poderá implicar em impactos negativos na regeneração da cobertura de vegetação nativa, com consequências ecológicas, sociais e econômicas determinantes.

A Figura 1.7 ilustra as alterações na precipitação média anual em resultado da conversão de savana tropical em pastagens. Todas as regiões da savana, exceto as do norte de África, apresentaram um declínio significativo na precipitação.

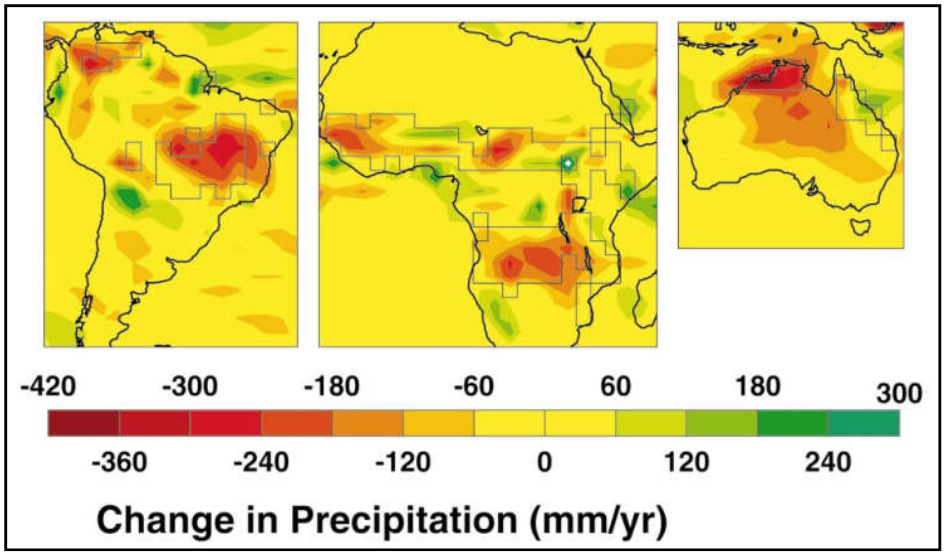


Figura 1.7 – Mudança na precipitação média anual resultante da conversão de savana tropical em pastagem. As regiões de savana têm uma linha de contorno (Fonte: HOFFMANN; JACKSON, 2000)

Face ao exposto, a principal motivação deste trabalho é a de compreender as implicações da mudança de uso e cobertura do solo no bioma Cerrado na regulação ecossistêmica do seu ciclo hidrológico, particularmente na região do MATOPIBA.

Deste modo, entender se as mudanças de uso e cobertura do solo podem afetar os padrões de precipitação e, consequentemente, o ciclo hidrológico de uma vasta região de fronteira agrícola, a partir de dados medidos anualmente durante um período de 33 anos, será crucial para caracterizar e avaliar os processos biofísicos de interação da biosfera com a atmosfera e, a uma escala regional, avançar na compreensão dos impactos no clima, designadamente em relação a alterações dos regimes de chuvas ao longo do ano.

1.3 Marco legal e compromissos internacionais do Brasil

A *ecologização do pensamento*, proposta por Edgar Morin, sugere-nos uma expansão da dimensão de tempo. Enquanto as teorias econômicas clássicas nos habituaram a raciocinar em escalas de tempo de anos, ou, no máximo de décadas, a escala de tempo da ecologia se amplia para séculos e milênios. Assim, este *novo* conceito de tempo permitiu lançar os alertas sobre como as nossas ações locais podem afetar acontecimentos globais determinantes e complexos. Por outras

palavras, em que medida os impactos sobre ecossistemas terrestres e aquáticos têm origem em muitas de nossas opções quotidianas de consumo e de estilos de vida (SACHS, I., 2009).

A partir do pós-guerra, a crescente preocupação universal sobre o uso saudável e sustentável do planeta e de seus recursos culminou, em 1972, com a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em Estocolmo e promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU). Esta cimeira global foi um marco histórico que colocou, pela primeira vez, a dimensão ecológica na agenda internacional e permitiu discutir as múltiplas dependências entre desenvolvimento socioeconômico e meio ambiente. Em resultado desta Conferência a grande maioria dos países participantes criou agências e legislações ambientais, como foi o caso do Brasil, com a aprovação em 1981 da Lei da Política Nacional do Meio Ambiente e da inclusão de vários preceitos em defesa do meio ambiente e da biodiversidade na Constituição Federal, em 1988 (MMA, 2011).

A Conferência de Estocolmo, como ficou conhecida, foi seguida de uma série de encontros e relatórios internacionais que culminaram, duas décadas depois, com a Cúpula da Terra, ou Rio92, realizada em 1992 no Rio de Janeiro – a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Destacam-se entre os resultados da Cúpula da Terra a Agenda 21, a Declaração de Princípios sobre o Uso de Florestas, a Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB) e a CQNUMC (MCTI, 2016; ONU, 2019).

As ratificações da CQNUMC, em 1992, e do Protocolo de Quioto, em 1997, constituiram dois marcos históricos importantes, em âmbito global, de afirmação da temática das mudanças climáticas. O Protocolo de Quioto, no qual os países pertencentes ao Anexo I (países industrializados membros da Convenção do Clima da ONU) se comprometiam a reduzir em 5,2% até o ano de 2012 os níveis de emissões de GEE, em relação àqueles observados em 1990, constituiu um tratado complementar à CQNUMC e entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005 (MENDES, T. A., 2014).

Pese embora a sua implementação algo frustrada, o Protocolo de Quioto permitiu a realização de inventários nacionais de emissões pelos países signatários e a implantação de mais de 7000 projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) em mais de 30 países em desenvolvimento (ONU, 2019; MMA, 2019).

Pelos enormes desafios que impõem à Humanidade e pela sua natureza interdisciplinar, as mudanças climáticas abrangem um espaço de debate muito amplo, complexo e de múltiplas escalas, integrando temas como a investigação em diversas áreas do conhecimento científico, a regulação, o desenvolvimento de políticas públicas e o planejamento estratégico e operacional. Por via de arranjos nos meios político e científico, a institucionalização da agenda climática no plano internacional teve o seu início em 1988 com a criação do IPCC, sob a coordenação da World Metheorological Organization (WMO) e da United Nations Environment Program (UNEP).

Desde então, o IPCC tem vindo a revisar e publicar o estado da arte do conhecimento sobre o tema, por meio de sucessivos relatórios de avaliação, cuja quinta edição (AR5) foi divulgada entre 2013 e 2014 (IPCC, 2014; BURSZTYN, M. e RODRIGUES FILHO, S. (Org.), 2016).

Entre os resultados mais aguardados e mais importantes divulgados pelo IPCC estão as RCP de emissões de GEE.

Na Figura 1.8, as RCP descrevem quatro cenários climáticos até 2100, todos considerados possíveis, dependendo das emissões de GEE nos próximos anos. As RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 são assim designadas após uma gama possível de valores de forçantes radiativos no ano 2100, em relação aos valores pré-industriais (+2.6, +4.5, +6.0, and +8.5 W/m^2, respetivamente) (IPCC, 2014; FEDERICI, S.; LEE D.; HEROLD M., 2016).

AR5 global warming increase (°C) projections		
time period	2046-2065	2081-2011
Scenario	Mean and likely range	
RCP2.6	1.0 (0.4 to 1.6)	1.0 (0.3 to 1.7)
RCP4.5	1.4 (0.9 to 2.0)	1.8 (1.1 to 2.6)
RCP6.0	1.3 (0.8 to 1.8)	2.2 (1.4 to 3.1)
RCP8.5	2.0 (1.4 to 2.6)	3.7 (2.6 to 4.8)

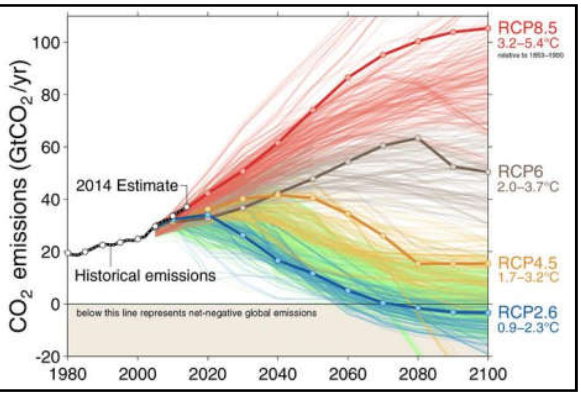


Figura 1.8 – Trajetórias de Concentração Representativas (RCP) de emissões de GEE (Fonte: FEDERICI, S.; LEE, D.; HEROLD, M., 2016, 2016)

As mudanças climáticas constituem uma ameaça direta aos ecossistemas florestais, aos povos dependentes da floresta e à sociedade como um todo, devido à possibilidade de redução da oferta de produtos, além da qualidade e diversidade de serviços que os mesmos asseguram. Embora os ecossistemas sejam inerentemente dinâmicos, é provável que a velocidade das mudanças climáticas previstas exceda em muito a sua capacidade natural de adaptação. Neste contexto, os países precisam antecipar as ameaças diretas e indiretas impostas por essas mudanças aos sistemas naturais, agindo no sentido de reduzir a sua vulnerabilidade, aumentar a sua resiliência e fortalecer a capacidade de adaptação (FEDERICI, S.; LEE D.; HEROLD M., 2016).

De acordo com o Relatório de Avaliação Global de Recursos Florestais da FAO (2018), as florestas armazenam cerca 296 Gt de carbono, distribuidas pela biomassa acima e abaixo do solo, sendo que as maiores densidades de carbono são encontradas nas florestas da América do Sul e da África Ocidental e Central, que armazenam cerca de 120 toneladas de carbono por hectare.

Em 2015, no âmbito do Acordo de Paris, os países signatários tomaram a decisão de enfrentar as mudanças climáticas e a adaptação aos seus efeitos acelerando as ações e os investimentos necessários para um futuro sustentável de baixo carbono, reconhecendo a importância do uso da terra na remoção de GEE da atmosfera, enfatizando o papel das florestas enquanto sumidouros e reservatórios de carbono, abrindo assim novas perspectivas sobre as políticas florestais nacionais e incentivando a articulação de propostas das NDC de cada país signatário, tornando-as mais ambiciosas para os anos vindouros (IPCC, 2019; FAO, 2018; CQNUMC, 2015).

Ainda nesse ano de 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas adotou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que consiste em 17 metas estratégicas para acabar com a pobreza, proteger o planeta, garantir a prosperidade e promover a paz e a justiça – os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS não são juridicamente vinculativos, porém é esperado que os Estados membros signatários da Agenda 2030 estabeleçam estruturas nacionais para sua realização.

A contribuição das florestas é particularmente relevante para o cumprimento do ODS 13 (de combate à mudança do clima e seus respetivos impactos) e do ODS

15 (sobre a promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres), além do seu papel na implementação bem sucedida do Acordo de Paris.

Recentemente, a Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou uma resolução declarando a década de 2021 a 2030 como a década da ONU de Restauração dos Ecossistemas (UNGA Resolution 73/284) que deverá estimular múltiplas ações do setor público, do setor privado e de ONG (GIZ, 2019; IPCC, 2019; FAO, 2018).

Relativamente aos mecanismos de financiamento estabelecidos no contexto da CQNUMC, o Acordo de Paris lançou uma mensagem forte e sem precedentes ao estabelecer o REDD+ (Redução de Emissões Provenientes de Desmatamento e Degradação Florestal). Este incentivo, desenvolvido para recompensar financeiramente os países em desenvolvimento por seus resultados de Redução de Emissões de GEE provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal, destaca o papel da conservação de estoques de carbono florestal e o manejo sustentável das florestas (FEDERICI, S.; LEE, D.; HEROLD, M., 2016; MMA, 2016; ONU, 2019).

Na Figura 1.9 ilustra-se a linha do tempo das medidas tomadas pelo Brasil, envolvendo mudanças climáticas no contexto da CQNUMC, desde a Cúpula da Terra (Rio92) até 2030.

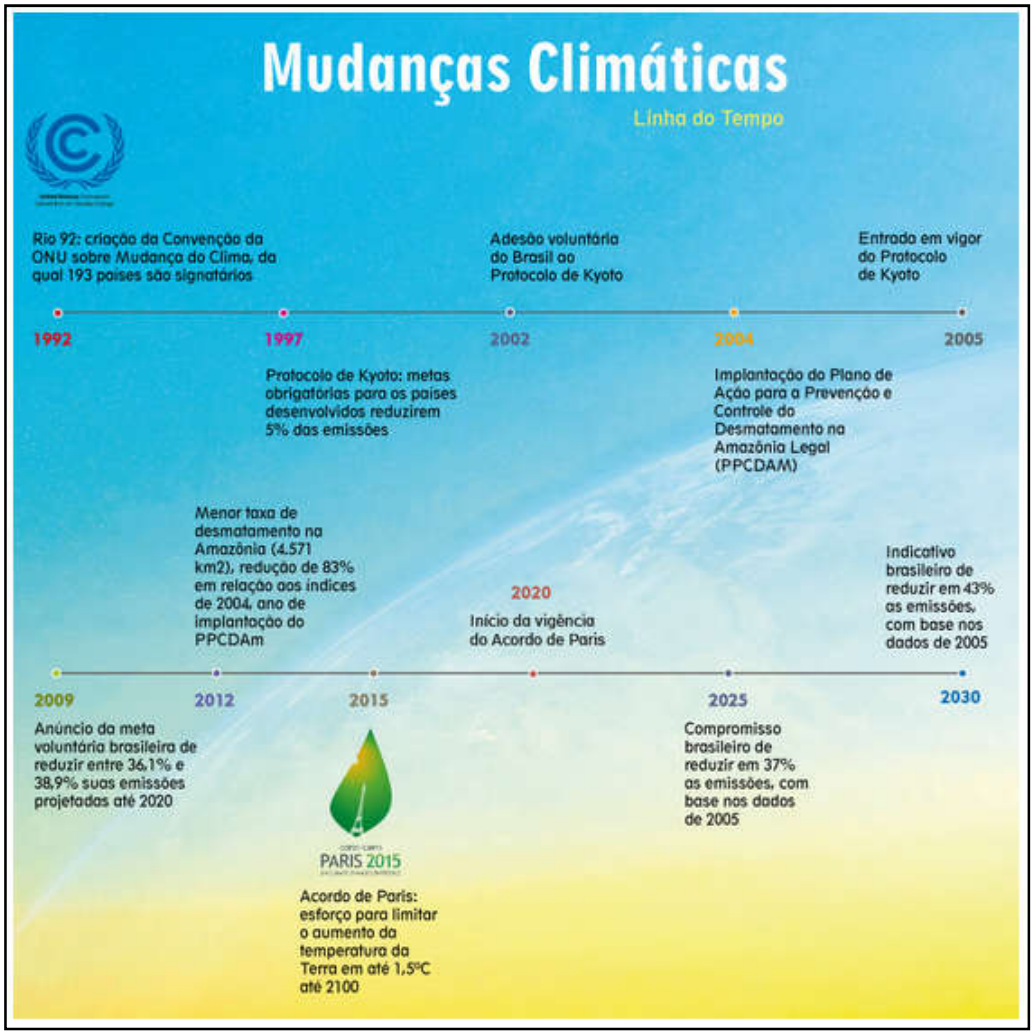


Figura 1.9 – Linha do tempo das medidas envolvendo Mudanças Climáticas (Fonte: MMA, 2019)

Apesar dos desafios colocados pela dimensão continental, pelas assimetrias regionais e pelas dificuldades institucionais e administrativas, a legislação sobre meio ambiente brasileira é, reconhecidamente, uma das mais avançadas do mundo, incorporando, no plano jurídico, diretrizes claras para a busca de um desenvolvimento sustentável (MCTI, 2016).

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída em 2009 pela Lei nº 12.187/2009, visa, entre outros pontos, a compatibilização do desenvolvimento econômico e social com a proteção do sistema climático, a redução das emissões antrópicas de GEE em relação às suas diferentes fontes, o fortalecimento das remoções antrópicas por sumidouros de GEE e a implementação de medidas de promoção da adaptação à mudança do clima pelas três esferas da Federação, incentivando a participação e a colaboração dos agentes econômicos e sociais interessados ou beneficiários. Entre os instrumentos incluídos na PNMC,

merecem destaque no âmbito da presente pesquisa o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, os Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas, em particular o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PPCerrado) e o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) (MCTI, 2016, MAPA, 2016; MMA, 2011; 2014).

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima, apresentado formalmente em dezembro de 2008, visa incentivar o desenvolvimento e o aprimoramento de ações de mitigação no Brasil, colaborando com o esforço mundial de redução das emissões de GEE e criando condições internas para lidar com os impactos das mudanças climáticas globais. Trata-se de um Plano que deve contar com a contribuição tanto de estados e municípios como dos diversos setores da sociedade, algo que ocorreu a contento em sua elaboração, com a realização de consultas públicas e de reuniões setoriais promovidas pelo Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. O Plano estrutura-se em quatro eixos: oportunidades de mitigação; impactos, vulnerabilidades e adaptação; pesquisa e desenvolvimento; e educação, capacitação e comunicação (MMA, 2019).

Por seu lado, o PPCerrado, instituído pelo Decreto Interministerial de 15 de setembro de 2010 é, como se referiu antes, um dos principais instrumentos para a implementação da PNMC, contribuindo para a implementação da Estratégia Nacional para Redução das Emissões de GEE provenientes do Desmatamento e da Degradação Florestal (REDD+). Os demais planos setoriais ancorados na PNMC, como o da Agropecuária e o da Siderurgia (relacionado à extração de carvão vegetal), têm ampla complementaridade e integração com o PPCerrado, uma vez que é nesse bioma que se inserem algumas das atividades econômicas desses setores. Este Plano, que se encontra atualmente na sua 3ª fase de operação (2016-2020), tem um modelo de desenvolvimento econômico que leva em conta a conservação da biodiversidade, dos recursos hídricos e do patrimônio cultural e natural das populações tradicionais, com objetivos consistentes com os ODS da Agenda 2030 (PPCerrado/Plano Operativo 2016-2020, 2016).

O Plano ABC, por sua vez, tem por finalidade a organização e o planejamento das ações a serem realizadas para a adoção das tecnologias de produção sustentáveis, com o objetivo de responder aos compromissos de redução de

emissões de GEE no setor agropecuário assumidos pelo país. Este Plano é composto por sete programas, seis referentes às tecnologias de mitigação e um com ações de adaptação às mudanças climáticas. Os programas são os seguintes:

- P1: Recuperação de Pastagens Degradadas;
- P2: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e Sistemas Agroflorestais;
- P3: Sistema Plantio Direto (SPD);
- P4: Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN);
- P5: Florestas Plantadas;
- P6: Tratamento de Dejetos Animais;
- P7: Adaptação às Mudanças Climáticas.

Em cada um destes programas foi proposta a adoção de uma série de ações, como fortalecimento da assistência técnica, capacitação e informação, estratégias de transferência de tecnologia, palestras, seminários, workshops, implantação de Unidades de Referência Tecnológica (URT), campanhas de divulgação e chamadas públicas para contratação de serviços de Assistência Técnica e Extensão Rural (Ater). A abrangência do Plano ABC é nacional e o seu período de vigência é de 2010 a 2020, estando previstas revisões e atualizações em períodos regulares não superiores há dois anos, para readequação do Plano às demandas da sociedade, às novas tecnologias, além da incorporação de novas ações e metas, caso seja necessário (Plano ABC, 2012).

Sublinhe-se que, durante a 13ª Conferência das Partes – COP da Convenção da Diversidade Biológica - realizada em dezembro de 2016 no México, o governo brasileiro anunciou a sua adesão ao desafio de Bonn e à Iniciativa 20x20, um conjunto de ações voltadas à restauração da paisagem florestal. Paralelamente, tendo em vista ampliar ainda mais os esforços de adaptação guiados pelo Plano ABC, foi estabelecido o objetivo de implementar, até 2030, 5 milhões de sistemas integrados que combinem lavoura-pecuária-floresta em qualquer arranjo (BENINI, 2017).

Por fim, mas não menos importante, ressalta-se a Lei Nacional de Proteção da Vegetação Nativa (Lei n° 12.651, de 25 de maio de 2012), também conhecida como Novo Código Florestal, e a partir da qual foi instituída a Política Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa, conhecida como Proveg, por meio do Decreto nº 8.972, de 23 de janeiro de 2017 (MMA, 2019).

O principal instrumento de implementação da Proveg é o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg), lançado por meio da Portaria Interministerial nº 230, de 14 de novembro de 2017. O objetivo do Planaveg é ampliar e fortalecer as políticas públicas, incentivos financeiros, mercados, boas práticas agropecuárias e outras medidas necessárias para a recuperação da vegetação nativa de, pelo menos, 12 milhões de hectares até 2030, principalmente em Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal (RL), mas também em áreas degradadas com baixa produtividade (BENINI, R. M., 2017; GIZ, 2019).

Na Figura 1.10 pode observar-se os níveis de conformidade da Lei n° 12.651, de 25 de maio de 2012, ou seja a diferença de porcentagem entre a área restante de vegetação nativa e a área necessária para cumprir o Novo Código Florestal de 2012: os valores positivos indicam excedentes florestais ou terras que podem ser desmatados legalmente; os valores negativos indicam deficit florestal, ou seja terrenos que requerem restauração (SOARES-FILHO, B., et al., 2014; GIZ, 2019).

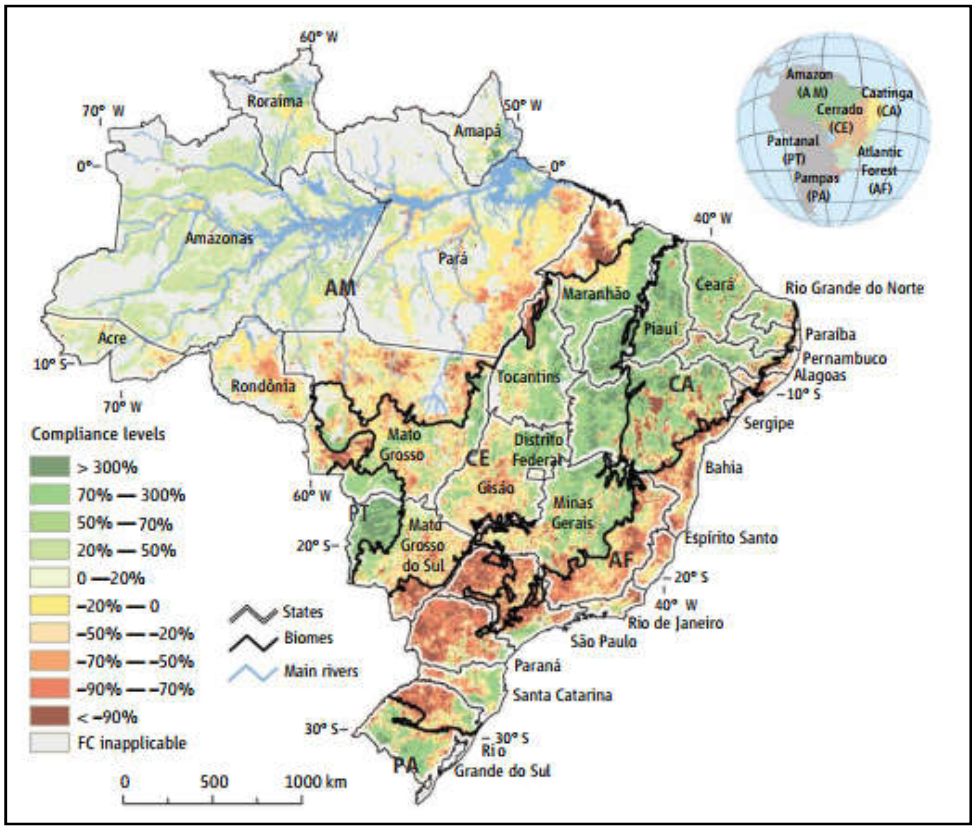


Figura 1.10 – Níveis de conformidade da Lei n° 12.651, de 25 de maio de 2012, (Fonte: SOARES-FILHO, B., et al., 2014)

Aproximadamente 53% da vegetação nativa do Brasil ocorre em propriedades particulares, tratando-se portanto da legislação mais importante para a conservação do meio ambiente nessas áreas. Nessas terras, as florestas e savanas nativas (como o bioma Cerrado) armazenam 105 ± 21 Gt CO_2eq, desempenhando um papel vital na manutenção de uma ampla gama de serviços ecossistêmicos (SOARES-FILHO, B., et al., 2014). Neste contexto, o gerenciamento adequado dessas propriedades particulares é fundamental para que os esforços globais para mitigar as mudanças climáticas sejam bem sucedidos.

Em anos recentes, particularmente até 2014, o Brasil alcançou um sucesso sem precedentes na redução do desmatamento na Amazônia. Porém, como veremos nos capítulos seguintes, esse ganho é relativo e deverá ser observado com prudência, dado que, no caso do bioma Cerrado, as taxas de desmatamento têm refletido tendências consecutivamente crescentes.

Capítulo 2

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

2.1 Hipótese e questões da pesquisa

Ao longo de dois milênios tem existido uma conexão sólida entre clima e florestas, acreditando-se que as florestas influenciam o clima de uma determinada região e que a ação humana, pelas modificações na cobertura vegetal nativa e nas funções dos ecossistemas, pode alterar o clima dessa região. As origens deste pressuposto se fundaram, desde as primeiras civilizações, na experiência e no conhecimento ancestral de convivência da Humanidade com a Natureza. Por sua vez, a ciência moderna tem vindo a confirmar, inequivocamente, o papel dos ecossistemas terrestres no sistema climático, por meio do estudo das complexas interações entre biosfera e atmosfera e seus respetivos processos biogeofísicos e biogeoquímicos (BONAN, G.B., 2016).

Partindo deste ponto e das formulações desenvolvidas no âmbito do Capítulo anterior emergiram as duas questões desta pesquisa. As questões são as seguintes:

1 - São evidentes, na estação seca e/ou na estação das chuvas, ou nos meses de transição destas estações, alterações nos índices de precipitação ao longo dos últimos 33 anos na região do MATOPIBA?

2 - Na condição de se terem registrado mudanças nos regimes de precipitação, pode-se observar correspondência com as taxas de desmatamento monitoradas na região?

Com base nestas questões definiu-se a hipótese que serviu de orientação à presente pesquisa, buscando-se um diálogo entre os resultados obtidos nas medições da variável de desmatamento, as medições da variável climática precipitação, as correspondentes correlações entre as duas variáveis e a literatura científica pertinente.

Assim, a hipótese central desta pesquisa é seguinte:

Hipótese: Existe uma correspondência entre as taxas anuais de desmatamento no MATOPIBA e as tendências anuais e sazonais de mudança nos regimes de precipitação nesta região de fronteira agrícola.

A partir de dados observados de precipitação e de supressão da cobertura de vegetação nativa na região de MATOPIBA (formação florestal e formação savânica) coletados por sensoriamento remoto de imagens *LandSat*, durante um período de 33 anos (1985-2017), pretende-se compreender, na perspectiva do funcionamento do sistema climático, em que medida os processos biofísicos entre atmosfera e biosfera estão sendo influenciados pela ação antrópica (desmatamento), num dos biomas brasileiros mais ameaçados.

Para tal, com base nas estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) e o recurso a ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), usando o software *ArcGIS*, versão 10.1, foi realizada uma análise espacial, suportada em *buffers* (áreas tampão) de 40km de raio, que permitiu correlacionar os resultados de tendências de alterações nos índices de precipitação, na estação seca, estação das chuvas e nos meses de transição destas estações, com os resultados medidos de supressão da cobertura vegetal na região de estudo.

A análise de correlação fundamentou-se na comparação entre dois conjuntos distintos de *buffers*: aqueles que se inserem em áreas mais antropizadas e os que se inserem em áreas menos antropizadas.

Para refinar a análise de correlação entre áreas mais antropizadas e menos antropizadas com os resultados de precipitação foram quantificadas, para cada *buffer*, as referências de classificação de uso do solo definidasno âmbito do Projeto Mapbiomas.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o de realizar uma análise exploratória do papel da cobertura vegetal natural na regulação do ciclo hidrológico no bioma Cerrado e a sua relação com as mudanças no uso e cobertura do solo na região do MATOPIBA.

Será analisada a variabilidade temporal e espacial da precipitação no Cerrado Setentrional, especificamente na região do MATOPIBA, e correlacionada com os processos de desmatamento, nos últimos 33 anos (1985-2017).

2.2.2 Objetivos específicos

Objetivo 1 – Caracterizar e analisar os índices de desmatamento na região em estudo, compilados por meio dos dados disponíveis pelo Projeto MapBiomas (1985-2017) e os dados de precipitação média mensal e anual, colectados nas séries históricas de 33 anos (1985-2017) em estações pluviométricas selecionadas da rede de monitoramento da ANA.

Objetivo 2 – Correlacionar os resultados das taxas de supressão de cobertura de vegetação nativa na região em estudo com os índices de precipitação anual e sazonais, por meio da seleção de estações pluviométricas inseridas em áreas antropizadas e áreas não antropizadas. Para tal, serão definidos *buffers* de 40km de raio centralizados em cada uma das estações selecionadas.

2.3 Materiais e métodos de desenvolvimento da pesquisa

2.3.1 Dados espaciais de desmatamento

Os dados de desmatamento usados na pesquisa foram coletados na sua totalidade por meio do Projeto Mapbiomas, uma iniciativa multi-institucional do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e promovido pelo Observatório do Clima (uma rede de mais de 40 *ONG* que atuam na área de mudanças climáticas no Brasil). O projeto foi lançado em julho de 2015, com o objetivo de contribuir para o entendimento da dinâmica da mudança e uso do solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2019a).

Vale ressaltar que estão disponíveis para consulta e pesquisa outras fontes de dados de monitoramento por satélite da cobertura de vegetação natural do Cerrado, como o PRODES-Cerrado, um projeto com coordenação geral do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e articulação do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTI). A iniciativa PRODES-Cerrado é composta por uma série histórica da remoção antrópica da vegetação natural que é bienal para o período de 2000 a 2012 e anual para os anos de 2013 a 2018, fornecendo assim uma base dados que cobre um período de 18 anos.

Contudo, e comparativamente com o PRODES-Cerrado, justifica-se na presente pesquisa a escolha da coleta de dados de desmatamento por meio do Projeto Mapbiomas uma vez que esta plataforma oferece a possibilidade de pesquisar o bioma Cerrado a partir de uma série histórica anual ininterrupta de supressão da vegetação natural com cobertura temporal superior a 30 anos, com início no ano de 1985.

De acordo com o documento *Algorithm Theoretical Basis Document* (ATBD) elaborado pelo Mapbiomas, os mapas de mudança e uso do solo produzidos neste projeto se baseiam no Landsat Data Archive (LDA), disponível na plataforma Google Earth Engine, abrangendo todos os anos desde 1985 até à atualidade. As coleções dos mapas, à medida que o projeto foi evoluindo, foram abrangendo períodos cada vez mais alargados, sendo que, para esta pesquisa, a coleção de mapas utilizada foi a versão 3.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil,

lançada em agosto de 2018. A versão 3.0 compreende o período de 1985 a 2017, baseia-se em decisão florestal aleatória para todos os biomas e inclui os temas transversais zona costeira, infraestrutura urbana, mineração, pastagem e agricultura. Refira-se que a decisão aleatória está suportada em uma abordagem de aprendizagem de máquina ("machine learning") que permite ao computador aperfeiçoar o seu desempenho de interpretação de imagens de satélite, identificando padrões de uso e ocupação do solo e tomando a decisão de classificá-los, superando assim a calibração empírica dos parâmetros de entrada para classificação de imagens (MAPBIOMAS; 2019a, 2019b).

Entre os produtos disponíveis na coleção Mapbiomas indispensáveis à pesquisa destacam-se os mapas em formato GeoTIFF, georreferenciados e disponíveis na plataforma *Google Earth Engine*, e a base de dados em formato *Excel*, ambos correspondentes ao bioma Cerrado. A base de dados disponibilizada compreende a classificação de cobertura e uso do solo e três níveis de classe de legenda atribuidos pelo projeto Mapbiomas, conforme se apresenta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação de cobertura e uso do solo com três níveis de classe de legenda – Coleção 3.0 do Mapbiomas

Nivel 1	Nivel 2	Nível 3
1. Floresta	1.1. Floresta Natural	1.1.1. Formação Florestal 1.1.2. Formação Savânica 1.1.3. Mangue
	1.2. Floresta Plantada	
2. Formação Natural não Florestal	2.1. Área Úmida Natural não Florestal 2.2. Formação Campestre (Campo) 2.4. Outra Formação não Florestal 2.3. Apicum	
3. Agropecuária	3.1. Pastagem	
	3.2. Agricultura	3.2.1. Cultura Anual e Perene 3.2.2. Cultura Semi-Perene
	3.3 Mosaico de Agricultura e Pastagem	
4. Área não Vegetada	4.1. Praia e Duna 4.2. Infraestrutura Urbana 4.3. Outra Área não Vegetada 4.4. Mineração 4.5. Afloramento Rochoso	
5. Corpo D'água	5.1. Rio, Lago e Oceano 5.2. Aquicultura	
6. Não Observado		

(Fonte: Autor, com base no Mapbiomas, 2019a)

Os mapas do bioma Cerrado foram usados na ferramenta SIG para realizar a análise espacial de correlação dos resultados de precipitação com os resultados do desmatamento na região do MATOPIBA, conforme se verá no Capítulo 4.

A base de dados em *Excel*, que permitiu realizar todos os cálculos de áreas de supressão da cobertura vegetal entre 1985 e 2017 e elaborar os respetivos gráficos, foi trabalhada a partir dos 4 estados que compõem a região em estudo – Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia – com identificação e filtragem dos 337 municípios do MATOPIBA e a seleção de 2 níveis de classe de legenda atribuídos pelo Projeto Mapbiomas: Nível 2 – Floresta Natural e Nível 3 – Formação Florestal e Formação Savânica. Esta base de dados, na sua versão 3.0, foi acessada em 12 de fevereiro de 2019 por meio do link: https://mapbiomas.org/download_estatisticas.

Na Figura 2.1 podemos observar a distribuição e a quantidade de *grids* em todos os biomas brasileiros e regiões de transição usados para processamento das imagens *Landsat*.

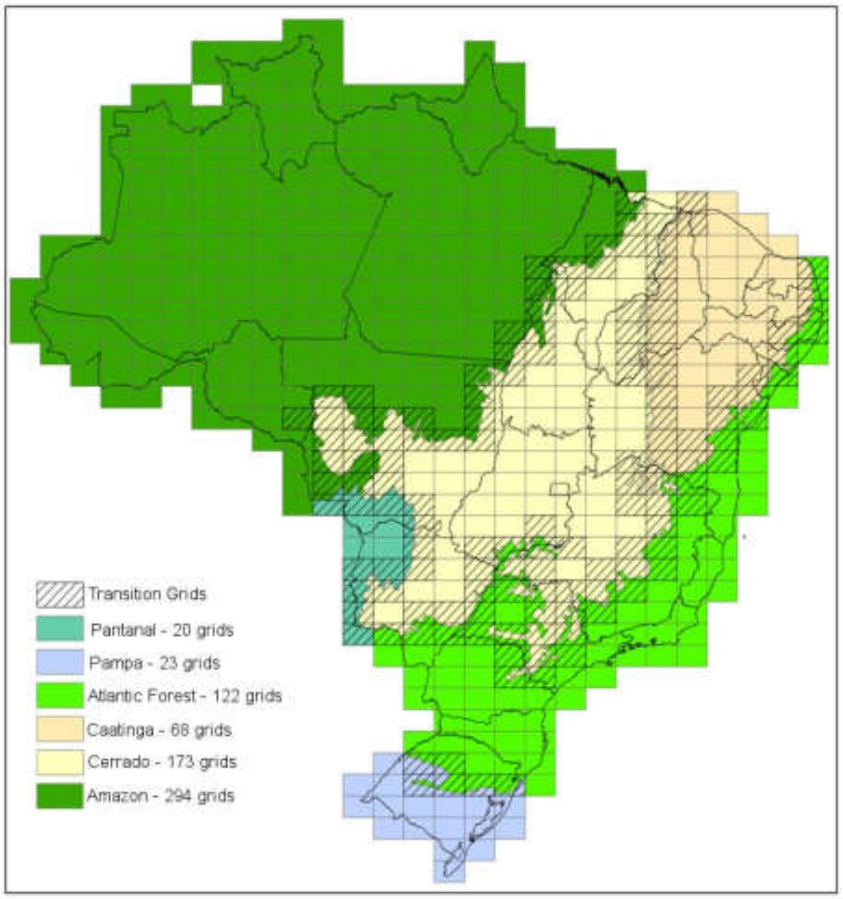


Figura 2.1 – Distribuição e quantidade de grids em todos os biomas brasileiros e regiões de transição usados para processamento das imagens Landsat em ambiente MapBiomas Workspace (Fonte: MAPBIOMAS, 2019a)

2.3.2 Dados de precipitação

A observação e a avaliação de dados climatológicos constituem a matéria fundamental da análise de variabilidade climática, da detecção de tendências, da alteração de regimes (ex: precipitação e temperatura), ou qualquer estudo que envolva mudanças climáticas. Nesta área de conhecimento, que envolve coleta de dados de longo prazo, a grande maioria dos estudos apresenta três problemas: 1) a escassez de séries longas e contínuas de variáveis climáticas, o que limita, por exemplo, a detecção de alterações de padrões em valores médios mensais, sazonais e anuais; 2) a densidade espacial heterogênea de postos de observação, associada intrinsecamente ao primeiro problema, limitando uma caracterização climática apropriada, tanto regional quanto local; 3) e a presença de dados errados ou espúrios, que, em algum momento, foram inseridos no lugar de dados faltantes, existência de dados duvidosos decorrentes de falhas na anotação ou digitação e

alteração irreal de regime climático em uma estação pluviométrica, por mudança de local (PBMC-GT1, 2016).

É, portanto, crucial a verificação cuidadosa dos dados para detecção e correção destes problemas, antes da realização de estudos climáticos. Num país tão vasto como o Brasil, com dimensões continentais e influenciado por diferentes tipos de clima, é assim essencial o estudo da variabilidade e das mudanças climáticas por meio de observações meteorológicas confiáveis e com boa representatividade espacial.

2.3.2.1 Seleção das estações e obtenção dos dados

Os dados de precipitação foram tratados inicialmente por meio dos programas *Access* e *Excel*, do pacote de software *Microsoft Office*.

Os dados pluviométricos, diários e mensais, das estações convencionais instaladas nos Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia foram disponibilizados pela ANA por meio de arquivo em formato *Access* (.MDB) do sistema Hidro, versão 1.3, referente ao período disponível na base de dados corporativa da ANA, até à data de 21 de fevereiro de 2019.

Para acessar o arquivo no formato Access, foi então utilizado o sistema Hidro versão 1.3 e, em seguida, conectado o sistema ao banco de dados enviado pela ANA.

Após identificação e seleção de todas as estações pluviométricas com interesse para a região estudada, por sub-bacia e região hidrográfica, exportaram-se os dados do formato *Access* para o formato *Excel* com os seguintes conteúdos de informação: código e nome da estação, nome do município, unidade federativa, data (mês e ano), máxima medição mensal, total da medição mensal, nº de dias de chuva, latitude, longitude e altimetria.

Já em ambiente *Excel*, elaborou-se uma base de dados organizada inicialmente por unidade federativa, de modo a selecionar apenas as estações pluviométricas pertencentes aos 337 municípios que compõem o MATOPIBA, tendo-se obtido um total de 139 estações pluviométricas. Por fim, identificaram-se e separaram-se espacialmente as estações pluviométricas pelas quatro RH que integram a área em estudo: São Francisco, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental e Parnaíba.

Com o objetivo de atender à melhor representatividade espacial nas quatro RH, bem como à premissa obrigatória de uma cobertura temporal idêntica à dos dados de desmatamento (1985-2017), definiu-se a seleção inicial das séries históricas com base nos 139 postos pluviométricos com 33 anos de dados contínuos (01/01/1985 - 31/12/2017). Deste modo, foi respeitado o período mínimo de 30 anos recomendado pela WMO para obtenção de normais climatológicas (WMO, 1989). Em seguida, organizaram-se os dados de precipitação em totais mensais e submeteram-se as séries históricas das estações selecionadas a uma verificação visual, estação por estação, para identificação de falhas, e seu posterior preenchimento.

Valores atípicos em relação à média histórica mensal e à média das estações pertencentes à mesma bacia hidrográfica, os designados *outliers*, bem como as séries históricas com mais de 3% de falha mensal foram eliminados (TUCCI, 2009; RIO, S.; HERRERO, L.; FRAILEB, R.; PENAS, A., 2011).

De posse dos dados, os mesmos foram organizados e tratados por meio de planilhas de *Excel*, o que possibilitou a realização de diferentes cálculos visando a correções de falhas, a geração de gráficos de tendências, a análise de consistência de dados e construção das séries históricas mensais e anuais.

2.3.2.2 Identificação e preenchimento de falhas em séries históricas

Segundo Bertoni et al. (2001), o “objetivo de um posto de medição de chuvas é o de obter uma série ininterrupta de precipitações ao longo dos anos”. Contudo, poderão sempre ocorrer períodos sem informações ou com falhas nas observações, devido a problemas com os aparelhos de registro e/ou com o operador no caso da estação ser convencional. Por este motivo os dados coletados devem ser submetidos a uma análise antes de serem utilizados (ANA, 2011).

Na pesquisa usaram-se dois métodos distintos para o preenchimento das falhas detetadas nas séries históricas de precipitação: a Média Histórica Mensal e o Método da Regressão Linear Simples (ANA, 2011).

Esse processo de preenchimento de falhas foi realizado na escala mensal da seguinte forma:

a) Média Histórica Mensal: sempre que uma estação pluviométrica apresentar falhas de até dois (02) meses num determinado ano, esses meses serão

preenchidos pela média histórica mensal da própria estação (DEBORTOLI, N. S. et al., 2015; RIO, S.; HERRERO, L.; FRAILEB, R.; PENAS, A., 2011);

b) Regressão Linear Simples: quando existam mais de dois (02) meses faltantes num determinado ano usou-se este método que consiste em correlacionar a estação com falhas (Y) com outra vizinha sem falhas (X), de características físicas e climáticas semelhantes à estação com dados faltantes (ANA, 2011).

Para o ajuste da regressão linear simples os parâmetros da equação de regressão podem ser estimados por mínimos quadrados. Uma vez definida a equação, as falhas podem ser preenchidas por $Y = a + bX$.

Sublinhe-se que, para cada par de estações correlacionada, se usou uma equação de regressão linear simples. O resultado do preenchimento das séries foi considerado satisfatório quando o coeficiente de determinação foi superior a 0,7 (VILANOVA, M. R. N., 2014).

2.3.2.3 Análise de consistência de dados

Esta análise é utilizada para verificar a presença de alguma anormalidade na estação pluviométrica analisada, tal como mudança de local ou das condições do aparelho ou modificação no método de observação.

Neste trabalho de pesquisa usou-se o Método de Dupla Massa, desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, na sigla em inglês) e válido apenas para séries históricas mensais e anuais. Este método consiste em plotar as precipitações acumuladas da estação analisada (no eixo das ordenadas) contra a média dos valores acumulados da região em que a estação se insere - mesma região hidrográfica (RH) - (no eixo das abscissas). Por este método é possível identificar erros sistemáticos (mudança de declividade ou tendência), erros de transcrição ou postos sujeitos a diferentes regimes pluviométricos (ANA, 2011).

A título de exemplo apresenta-se no Gráfico 2.1 a aplicação desta metodologia à estação pluviométrica Sítio do Mato no estado da Bahia, situada na RH do Rio São Francisco. Refira-se que, à semelhança da estação Sítio do Mato, todas as estações pluviométricas validadas obtiveram valor de $R^2 \geq 0{,}99$.

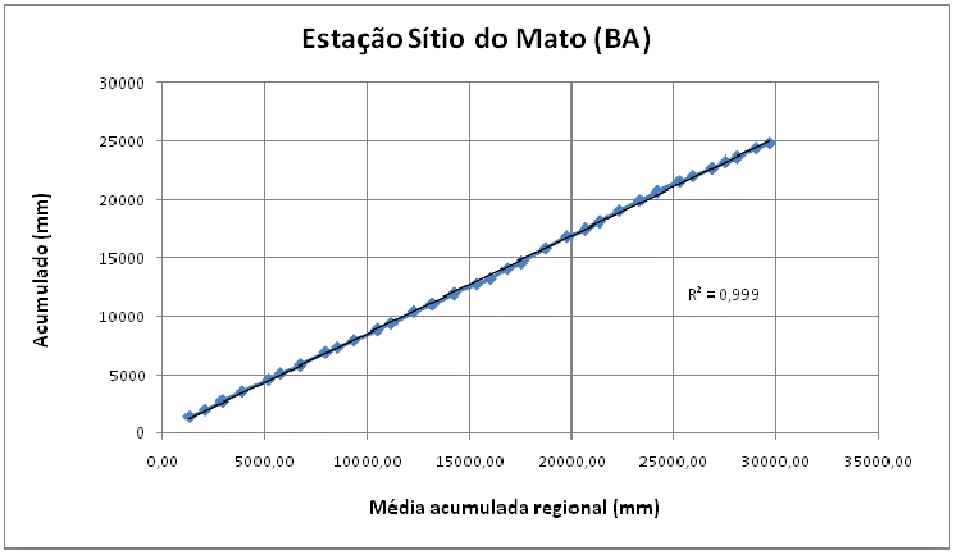


Gráfico 2.1 – Aplicação do Método de Dupla Massa à estação pluviométrica Sítio do Mato, localizada no estado da Bahia e pertencente à bacia hidrográfica do Rio São Francisco (Autor, 2019)

2.3.2.4 Séries históricas

De um total inicial de 139 estações pluviométricas, chegou-se a um número final de 83 estações para construção das séries históricas. Este conjunto final de 83 estações pluviométricas preencheu assim todos os requisitos e critérios anteriormente expostos de preenchimento de falhas e de análise de consistência de dados.

Foram analisadas as seguintes séries históricas de precipitação, divididas por RH (entre parêntesis o nº de séries):

a) Série histórica anual individual (83);

b) Série histórica mensal individual (996);

c) Série histórica sazonal do período de transição da estação seca para a estação das chuvas – meses de setembro e outubro (166);

d) Série histórica sazonal do período de transição da estação das chuvas para a estação da seca – meses de abril e maio (166);

e) Série histórica sazonal da estação da seca – meses de maio a setembro (415);

f) Série histórica sazonal da estação das chuvas – meses de outubro a abril (581);

O Cerrado é definido como uma savana sazonal úmida, caracterizada pela presença de invernos secos e verões chuvosos e clima classificado predominantemente como Aw (classificação *Köppen*), com precipitação média anual variando de 800 a 1.800 mm, conforme a região, sendo que 90% da precipitação ocorre na estação chuvosa, entre outubro e abril (RIBEIRO, J. F. et al., 1998).

Nas savanas tropicais, como é caso do bioma Cerrado, onde a precipitação é abundante por um período de 5 a 6 meses do ano, as mudanças nos padrões sazonais de precipitação podem ser mais importantes do que uma redução geral na precipitação média anual (HOFFMANN; JACKSON, 2000).

Esta fundamentação, traduzida na primeira questão desta pesquisa, justifica a necessidade de avaliar a sazonalidade dos padrões de precipitação das séries históricas ao longo do período de 33 anos, conforme definido anteriormente.

2.3.2.5 Análise estatística das séries históricas

Foram aplicados três testes não-paramétricos para análise estatística das séries históricas anuais das estações pluviométricas selecionadas: o teste de Mann-Kendall, o teste de Pettitt e o teste de Theil-Sen. A aplicação destes três testes foi realizada por meio do software R, versão 3.6.0 para sistema operativo *Windows*.

a) Teste de tendência (Mann-Kendall)

O teste não-paramétrico de Mann-Kendall (POHLERT, T., 2016) é amplamente empregue para detectar tendências monotônicas em séries de dados ambientais, dados climáticos ou dados hidrológicos (ZUO, D. et al., 2014).

O método baseia-se em rejeitar ou não a hipótese nula (*H0*), de que não exista tendência na série de dados, adotando-se um nível de significância (α). O nível de significância pode ser interpretado como a probabilidade de cometer-se o erro de rejeitar a *H0* quando esta for verdadeira (POHLERT, T., 2016).

O índice $Z_{M\text{-}K}$ segue a distribuição normal, na qual a sua média é igual a zero, valores positivos indicam uma tendência crescente e valores negativos tendências decrescentes. Para os casos em que $n > 10$, a estatística de teste $Z_{M\text{-}K}$ é estimada por:

$$Z_{M-K} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var\,(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var\,(S)}} & s < 0 \end{cases}$$

A variável estatística *S*, para uma série de *n* dados do teste de Mann-Kendall é calculada a partir da somatória dos sinais (sgn) da diferença, par a par, de todos os valores da série (X_i) em relação aos valores que a eles são futuros (X_j), expressa na seguinte equação:

$$S = \sum_{i-1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sgn}(X_j - X_i)$$

$$sgn\,(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & X_j - X_i > 0 \\ 0 & X_j - X_i = 0 \\ -1 & X_j - X_i < 0 \end{cases}$$

Considerando $n \geq 10$, a variável *S* pode ser comparada com uma distribuição normal, na qual a sua variância, Var(*S*), pode ser obtida por meio da expressão abaixo apresentada, na qual *ti* representa a quantidade de repetições de uma extensão *i* (como uma série histórica com três valores iguais entre si teria 1 repetição de extensão igual a 3, ou *ti*=1 e *i*=3).

$$Var\,(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18}$$

O teste de Mann-Kendall permitiu avaliar as tendências nas séries históricas sazonais das 83 estações pluviométricas selecionadas da região do MATOPIBA. Assim, foi realizado este teste de tendência para a estação das chuvas, estação seca, estação de transição chuvas-seca e estação de transição seca-chuvas.

b) Teste de magnitude da tendência (Theil-Sen)

O teste de tendência de Sen (SEN, Z., 2012) calcula tanto a inclinação (isto é, a taxa de variação linear) quanto a intercepção. O método permite a identificação de três tipos de tendências diferentes: nenhuma tendência, tendência crescente ou tendência decrescente. A tendência é calculada da seguinte forma:

$$d_k = \frac{X_j - X_i}{j - i}$$

para (1 ≤ i < j ≤ n), onde d é a inclinação, X significa a variável, n é o número de dados e i, j são índices.

A inclinação de Sen é então calculada como a mediana de todas as inclinações: b = mediana d_k. Por sua vez, as intercepções são calculadas para cada passo de tempo t dado pela expressão:

$$a_t = X_t - b * t$$

O teste de Theil-Sen permitiu avaliar a magnitude de tendências nas quatro séries históricas sazonais das 83 estações pluviométricas selecionadas da região do MATOPIBA. Este teste foi realizado para a estação das chuvas, estação seca, estação de transição chuvas-seca e estação de transição seca-chuvas.

c) Teste de ruptura da tendência (Pettitt)

O método desenvolvido por Pettitt (1979) é comumente aplicado em séries climáticas e hidrológicas de dados contínuos e tem a propriedade de apontar, em uma série temporal, o valor de ruptura de uma tendência, bem como o local (tempo) da série onde ela ocorreu, quando o tempo exato da mudança é desconhecido (ZUO, D. et al., 2014).

O método de Pettitt não requer que os dados obedeçam a qualquer distribuição de probabilidade. Este teste utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney, em que se verifica se duas amostras Y1, Y2...,Yt e Yt+1, Yt+2...,YT são ou não da mesma população.

A hipótese nula do teste de Pettitt é a ausência do ponto de mudança. A estatística $U_{t,T}$ faz uma contagem do número de vezes que um membro da primeira

amostra é maior que um membro da segunda amostra, que pode ser escrita de acordo com a equação:

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} + \sum_{j=1}^{T} \text{sgn}(Y_i - Y_j), \text{ para } t = 2, ..., T$$

onde, sgn(x) = 1 para x > 0; sgn(x) = 0 para x = 0 e sgn(x) = -1 para x < 0. A partir disso, $U_{t,T}$ é, então calculada para valores de 1 ≤ t ≤ T, e K(t) é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$ por meio da equação:

$$K(t) = \max_{1 \le t \ge T} |U_{t,T}|$$

Deste modo a estatística K(t) localiza o ponto em que houve uma mudança brusca em uma série temporal, e sua significância pode ser avaliada por meio da equação:

$$p \cong 2.e^{\left(\frac{-6(K(t))^2}{(T^3+T^2)}\right)}$$

O ponto de mudança brusca é aquele no qual o valor de t ocorre para o máximo de K(t). O teste de Pettitt foi aplicado a todas as 83 estações pluviométricas da área de estudo, tendo-se utilizado o nível de significância de 5%. O teste permitiu avaliar a ruptura nas séries históricas sazonais das 83 estações pluviométricas selecionadas da região do MATOPIBA, tendo sido aplicado para a estação das chuvas, estação seca, estação de transição chuvas-seca e estação de transição seca-chuvas.

2.3.3 Correlação entre desmatamento e precipitação

Com o objetivo de compreender se existe uma correlação entre o desmatamento e as tendências das precipitações, sazonais e anuais, recorrendo a ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), adotou-se uma metodologia que consiste na geração de áreas de influência, com uma determinada abrangência.

As áreas de abrangência (*buffer*), também designadas anteriormente de áreas tampão, têm como centro geométrico as coordenadas (latitude e longitude) de um conjunto determinado de estações pluviométricas e se materializam em áreas circulares com raio de 40 km, perfazendo assim cada *buffer* a área aproximada de 5026 km^2.

Entre o total das 83 estações pluviométricas estudadas foram escolhidas 54, cumprindo os seguintes critérios:

a) Estações totalmente contidas no bioma Cerrado;
b) Representatividade e distribuição espacial em relação à área de estudo tanto das estações mais antropizadas quanto das estações menos antropizadas.

Resultaram assim 23 estações com porcentagem total de formação florestal e formação savânica igual ou superior a 60% no ano 2017 (áreas menos antropizadas) e 31 estações com porcentagem total de formação florestal e formação savânica inferior a 60% no ano 2017 (áreas mais antropizadas);

O critério de seleção das áreas/*buffers* mais e menos antropizadas foi validado com recurso ao software *ArcGIS* usando-se o arquivo de extensão GeoTIFF, disponibilizado pelo Projeto Mapbiomas, referente ao ano 2017 e ao bioma Cerrado.

Em seguida, e com base na classificação Mapbiomas de uso e ocupação do solo (ver Tabela 2.1), foram quantificadas em cada *buffer* duas áreas de cobertura vegetal para efeitos de correlação: 1) Variação de cobertura vegetal (1985-2017), resultante da subtração das áreas classificadas como formação florestal e savânica em 1985 e 2017; 2) Área remanescente de cobertura vegetal, resultante do somatório das áreas de formação florestal e da formação savânica no ano 2017.

Em cada *buffer*, as áreas de cobertura vegetal calculadas em km^2 foram convertidas em porcentagem, para então se proceder à análise de correlação com os dados de precipitação.

Por sua vez, os dados de precipitação usados na correlação foram extraídos de duas análises preliminares: 1) para a correlação do desmatamento com as séries sazonais de precipitação (chuvas, seca, transição chuvas-seca e transição seca-chuvas) usaram-se os resultados do teste de magnitude de tendência de Theil-Sen, que permite obter a taxa de variação linear (inclinação) em cada estação pluviométrica ao longo dos 33 anos; 2) na correlação do desmatamento com a precipitação média anual, usou-se a regressão linear da série histórica de cada estação pluviométrica que compõem o respetivo *buffer*.

A análise de correlação foi avaliada por meio da ferramenta *Excel* com o recurso à função *Pearson*. Para avaliar a significância estatística desta função de correlação (valor p ≤ 0,05 ou nível de significância de 95%) usou-se a função Regressão do suplemento de cálculo Análise de Dados do *Excel*.

$$r = \frac{1}{n-1}\sum\left(\frac{xi-\bar{X}}{sx}\right)\left(\frac{yi-\bar{Y}}{sy}\right)$$

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida adimensional que pode assumir valores no intervalo entre -1 e +1. O coeficiente mede a intensidade e a direção de relações lineares.

A intensidade diz respeito ao grau de relacionamento entre duas variáveis. Quanto mais próximo dos extremos do intervalo (-1e+1) mais forte é a correlação entre as variáveis. Por sua vez, quanto mais próximo do centro do intervalo (0) mais fraca é essa a correlação. A direção diz respeito ao tipo de correlação. Uma correlação positiva ou direta (r>0) traduz que os valores altos de uma variável correspondem a valores altos da outra variável. Por sua vez, uma correlação negativa ou inversa representa que valores altos de uma das variáveis correspondem a valores baixos de outra (HAUKE, J, KOSSOWSKI, T., 2011; DEBORTOLI, N. S., et al., 2016).

O valor p ≤ 0,05 ou significância estatística ao nível de 5 % de probabilidade, expressa que o valor calculado pelo teste de correlação de Pearson (ou qualquer

outro aplicável) só poderá ser encontrado, por simples variação natural do acaso, no máximo 5 vezes em 100 amostras aleatórias semelhantes.

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL E TEÓRICA

3.1 O bioma Cerrado

Localizado predominantemente na região do Planalto Central do Brasil, o Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, totalizando uma área aproximada de 2.040.000 km^2 (24% do território nacional), partilhando transições territoriais com os biomas Amazônia, Caatinga, Pantanal e Mata Atlântica (MYERS, N., et al.,2000).

Sendo reconhecido como um *hotspot* global de biodiversidade, este bioma destaca-se pela abundância de espécies endêmicas, abrigando mais de 12.000 espécies de plantas nativas catalogadas, cerca de 250 espécies de mamíferos, mais de 260 espécies de répteis e uma população rica e diversificada de cerca de 850 espécies de aves, todas distribuídas por uma grande variedade de habitats, resultando em transições notáveis entre as diferentes tipologias de vegetação (LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DALLA-NORA, E. L., 2016).

Complementarmente, o seu ambiente aquático abriga cerca de 1.300 espécies de peixes - estimativas recentes indicam que este bioma é o refúgio de cerca de 13% das borboletas, 35% das abelhas e 23% dos cupins de todas as regiões tropicais (CEPF, 2017).

A Mata Atlântica e o Cerrado estão incluídos entre os 25 principais *hotspots* mundiais, áreas de elevado endemismo e com menos de 30% de vegetação natural restante (MYERS, N., et al.,2000). Globalmente, essas regiões cobrem 1,4% da superfície terrestre, abrigando 44% das espécies de plantas vasculares (ou

traqueófitas) e 35% de todas as espécies em quatro grupos de vertebrados (OLIVEIRA; MARQUIS, (Orgs.) (2002)).

O bioma Cerrado integra as cabeceiras das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazonas/Tocantins, São Francisco e Prata), desempenhando um papel primordial no processo de captação e distribuição das águas de 8 das 12 regiões hidrográficas brasileiras, contribuindo com 43% da água superficial em território nacional fora da bacia amazônica (MMA, 2011). Destaca-se assim a sua importância para a segurança dos recursos hídricos e da biodiversidade, não apenas em território brasileiro, mas também à escala continental (STRASSBURG, et al., 2017; CEPF, 2017).

Apesar de sua enorme importância para a conservação das espécies e para a prestação de serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar das pessoas e à manutenção das atividades produtivas, o Cerrado já perdeu cerca de 880.000 km^2 (46%) de sua cobertura vegetal nativa, permanecendo imperturbável apenas 19,8% da área original (STRASSBURG, et al., 2017).

A supressão da cobertura vegetal nativa do Cerrado é um processo não aleatório, concentrando-se nas áreas mais adequadas para a agricultura e pecuária, como veremos no Capítulo 4. Esse desmatamento seletivo provoca a destruição da integridade da matriz dos habitats originais do bioma, precipitando a extinção de espécies de fauna e flora devido a uma variedade de efeitos relacionados (OLIVEIRA, P. S., et al.,2002; KLINK, C. A., et al., 2005).

A Figura 3.1 apresenta, em verde, as áreas florestais e, em amarelo, as áreas não florestais. Os gráficos de barra indicam áreas convertidas (a vermelho) e protegidas (a azul; inclui UCs de categorias I-VI da IUCN, bem como Terras Indígenas) em 2009.

O Índice de Risco de Conservação (IRC) é a razão de área convertida para protegida. Na esquerda, a taxa de conversão de áreas naturais recente (2002-2009) por bioma (CE = Cerrado; CA= Caatinga, PA = Pampa, PL = Pantanal, AM = Amazônia, MA = Mata Atlântica (OVERBECK, G. E., et al., 2015).

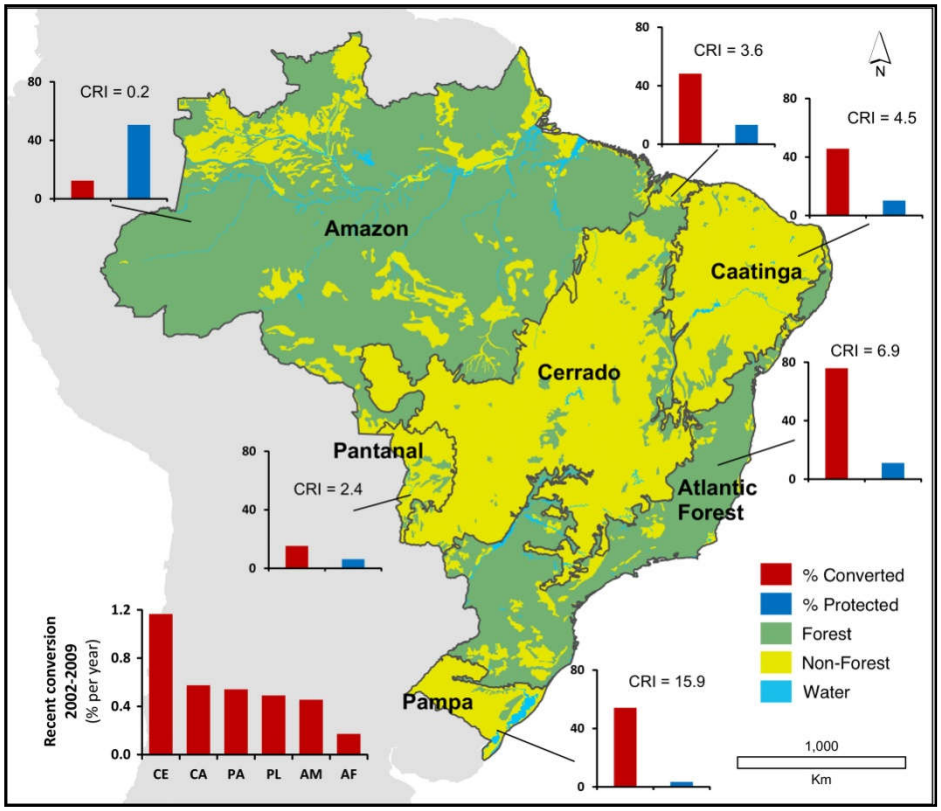


Figura 3.1 – Mapa do índice de risco de conservação nos biomas brasileiros (Fonte: OVERBECK, G. E., et al., 2015)

O bioma Cerrado é composto por um complexo de vegetação que possui relações ecológicas e fisionômicas com outras savanas da América tropical (os Llanos na Colômbia e no Equador, o Chaco na região da Bolívia e Paraguai e o Gran Chaco na Argentina) bem como de outros continentes, como África e Austrália, ocorrendo, no Brasil, em altitudes que variam entre 300m (Baixada Cuiabana no estado de Mato Grosso) e 1600m (Chapada dos Veadeiros no estado de Goiás) (SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F., 1985; RIBEIRO, J. F. et al., 1998; CEPF, 2017).

A vegetação do bioma Cerrado se distribui fundamentalmente em três fitofisionomias: formações florestais (que integram a Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), formações savânicas (que integram o Cerrado sentido restrito, a Vereda, o Parque de Cerrado e o Palmeiral) e as formações campestres (que incluem Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre), conforme se observa na Figura 3.2.

Como se referiu no Capítulo 1, as mudanças na cobertura de vegetação primária podem alterar os fluxos de água e energia da superfície terrestre, por meio de modificações no albedo, na rugosidade da superfície e no IAF, influenciando as variantes climáticas de precipitação e temperatura e, consequentemente, o ciclo hidrológico. No bioma Cerrado, as duas fitofisionomias mais relevantes para essa análise, que constitui o fio condutor da presente pesquisa, são a formação florestal e a formação savânica, devido ao porte médio dos seus estratos arbóreos e a maior porcentagem de cobertura arbórea, em formação (ou não) de dossel (RIBEIRO, J. F. et al., 1998; CEPF, 2017).

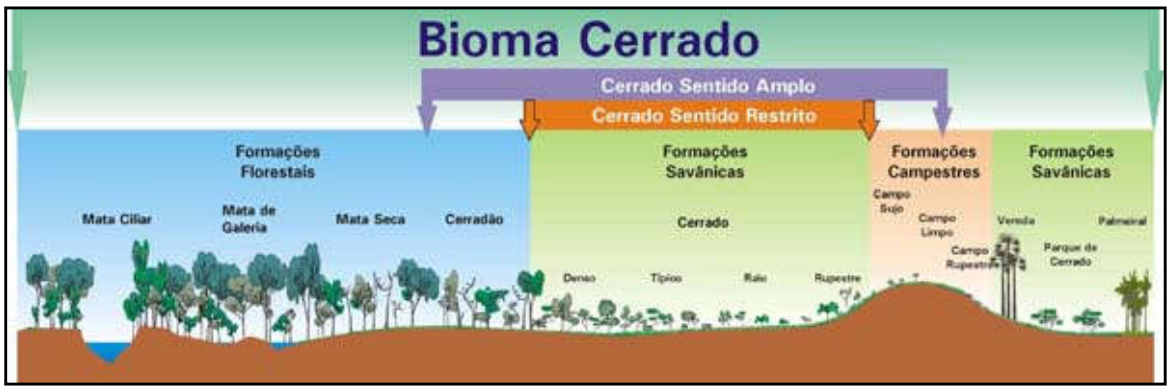


Figura 3.2 – Ilustração das fitofisionomias do bioma Cerrado por José Felipe Ribeiro (Fonte: Portal Embrapa, 2019)

Em termos de seleção e coleta de dados de desmatamento no Projeto Mapbiomas foram essas as duas formações analisadas, descrevendo-se em seguida, e de forma sucinta, cada uma delas.

As formações florestais agregam os tipos de vegetação com predominância de espécies arbóreas e formação de dossel. A Mata Ciliar e a Mata de Galeria são fisionomias associadas a cursos de água, que podem ocorrer em terrenos bem ou mal drenados. A Mata Seca e o Cerradão ocorrem nos interflúvios, em terrenos bem drenados. A altura média dos estratos arbóreos deste tipo de formação varia entre 15 e 30 metros, apresentando uma cobertura arbórea de 50 a 95% (RIBEIRO, J. F. et al., 1998). No caso do interior da Mata Ciliar e da Mata de Galeria a umidade relativa é alta, mesmo na época mais seca do ano, entre maio e outubro (CEPF, 2017).

Por sua vez, as formações savânicas englobam quatro tipos fitofisionômicos principais: o Cerrado sentido restrito, o Parque de Cerrado, o Palmeiral e a Vereda. O Cerrado sentido restrito caracteriza-se pela presença de árvores baixas, situando-

se entre 2 e 8 metros a altura média dos estratos arbóreos deste tipo de formação, com cobertura arbórea de 5 a 50%. O Parque de Cerrado é caracterizado pela presença de árvores agrupadas em pequenas elevações de terreno e possuem uma altura média de 3 a 6 metros, formando uma cobertura arbórea de 5% a 20% (RIBEIRO, J. F. et al., 1998).

Relativamente ao Palmeiral, quando o dossel é tipicamente descontínuo ou ainda quando não há mesmo formação de dossel, são formados pelas espécies que caracterizam o Macaubal ou Guerobal - se a espécie dominante for o Babaçual geralmente o dossel é mais contínuo. A altura média dos estratos arbóreos deste tipo de formação varia entre 8 e 15 metros, com cobertura arbórea de 30 a 60%. Finalmente a Vereda é um tipo de vegetação natural circundada por Campo Limpo (formação campestre), geralmente úmido, e os buritis que a compõe têm altura média de 12 a 15 metros e a sua cobertura arbórea varia entre 5% e 10% (RIBEIRO, J. F.; et al., 1998; CEPF, 2017).

O Cerrado é definido como uma savana sazonal úmida, caracterizada pela presença de invernos secos e verões chuvosos e clima classificado predominantemente como Aw (classificação *Köppen*), com precipitação média anual variando de 600 a 2.200 mm conforme a região - sendo que 90% da precipitação ocorre na estação chuvosa, entre outubro e abril (PBMC-GT1, 2016; RIBEIRO, J. F. et al., 1998). Em áreas adjacentes à Caatinga, a precipitação varia entre 600 e 800mm e nas regiões mais próximas da Amazônia entre 2.000 e 2.200mm. Na estação seca ocorrem queimadas frequentes, expondo as camadas superficiais do solo a um déficit hídrico sazonal (SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F., 1985; LENZA, E.; KLINK, C. A., 2005).

Ainda que a média anual de temperatura se situe entre 20ºC e 26ºC no bioma há uma acentuada variação nas temperaturas devido às diferenças em altitude, que chegam a mais de 1.000 m (RIBEIRO, J. F. et al., 1998). O contraste entre altitudes mais baixas, de menos de 300 metros, e vastos planaltos situados entre 900 e 1.600 metros, combinado com a ampla distribuição em latitude, resulta em uma ampla gama de ambientes (PBMC-GT1, 2016; CEPF, 2017).

As temperaturas mínimas na região sul do bioma (estado de São Paulo) podem atingir -4º C, enquanto na região norte (estado do Piauí) as temperaturas mínimas se situam em torno de 14ºC. As variações térmicas ao longo do ano também são extremamente díspares. No estado do Piauí essas variações são de

aproximadamente 22º C, enquanto no estado de São Paulo podem atingir 44ºC (CEPF, 2017). Estas amplitudes térmicas ao longo do ano, juntamente com as diferenças de precipitação e de altitude determinam algumas assimetrias marcantes na composição das espécies, caracterizando e definindo a biodiversidade do Cerrado em cinco núcleos principais: região sudeste e central, centro oeste, região mesotrófica do extremo oeste, norte e nordeste e região sul (BUSTAMANTE, M.M.C., et al, 2012).

Por sua vez, o mecanismo atmosférico geral determina uma cadência estacional de precipitação, criando uma tendência uniforme de pluviometria semelhante em toda a região. A ocorrência de duas estações bem definidas caracteriza a distribuição concentrada das chuvas em toda a região, com uma influência direta sobre a vegetação (SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F., 1985; WALTER, B. M. T. et al., 2006).

A flora e fauna nativas do bioma Cerrado são extremamente adaptadas ao clima árido da região. O bioma é frequentemente apelidado de “floresta invertida” uma vez que os seus solos antigos, profundos e ácidos induzem a vegetação nativa a avançar em raízes profundas: a sua vegetação arbórea baixa e pouco visível acima da superfície aloca, no subsolo, a maior parte da sua biomassa (cerca de 75%) e, consequentemente, do carbono vegetal – uma forma de, simultanemanente, retirar e reabastecer a água dos lençois freáticos (OLIVEIRA et al., 2005). Estes mecanismos naturais da flora nativa, constituidos por raízes excepcionalmente longas e desenvolvidas, promovem funções ecossistêmicas de condução da precipitação, bem como de outras águas superficiais de volta aos reservatórios armazenados em substratos profundos, sendo responsáveis pela manutenção de estruturas aéreas de sustentação e fotossintetizantes ao longo do ano, particularmente na época de seca (LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DALLA-NORA, E. L., 2016).

As longas raízes, tubérculos e outras estruturas da biomassa vegetal do subsolo ocorrem em todas as fisionomias, porém em maior abundância nas comunidades de Cerrado aberto e Cerrado denso (formação savânica). São órgãos de armazenamento de água, nutrientes e energia que facilitam a sobrevivência durante a estação seca, compostos por tecidos meristemáticos latentes que facilitam a regeneração da vegetação nativa aérea após a ocorrência de queimadas, verificando-se que essa regeneração é muito mais comum que a reprodução sexual

na maioria das gramíneas, árvores e arbustos neste bioma (LENZA, E.; KLINK, C. A., 2005; SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F., 1985).

Assim, o enraizamento profundo é especialmente importante em ambientes sazonalmente secos como o Cerrado, por permitir que a vegetação acesse a água armazenada em profundidade durante períodos de baixa disponibilidade hídrica e elevada evaporação, além de permitir manter a transpiração e a fixação de carbono durante esse longo período da estação seca (CASTRO, E. A.; KAUFFMAN, J. B., 1998; OLIVEIRA et al., 2005; LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DALLA-NORA, E. L., 2016).

A combinação entre as flutuações climáticas sazonais, as características físico-químicas dos solos e a ocorrência de queimadas frequentes determinam a distribuição, a estrutura e o funcionamento das diferentes fitofisionomias deste bioma. O ciclo de vida das espécies arbóreo-arbustivas do Cerrado é perene e as espécies possuem mecanismos que facilitam a sua sobrevivência e reprodução durante o período seco, quando aumenta a restrição hídrica. As espécies do estrato lenhoso, por sua vez, possuem diferentes estratégias fenológicas que lhes permite superar o estresse hídrico sazonal. Deste modo, a renovação da folhagem, bem como a floração das espécies, em ambas as fitofisionomias (formação florestal e formação savânica), está normalmente associada ao período seco, ou à transição entre o período seco e o período chuvoso. Em resumo, tanto a produção de folhas quanto a reprodução de espécies lenhosas do bioma Cerrado são reveladoras que a flora nativa não se encontra limitada pela redução de água no solo durante o período seco (SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F., 1985; LENZA, E.; KLINK, C. A., 2005).

Um estudo realizado por Oliveira et al. (2005) evidenciou que, durante o período da estação seca, os lençois freáticos e compartimentos de solo mais profundos podem contribuir com até 83% da água total usada pelas formações florestais e savânicas do bioma, constituindo-se assim em um suporte importante para o balanço hídrico dos ecossistemas do Cerrado.

Em um sistema natural tão complexo, composto por formações florestais, savânicas e campestres, a sua substituição por monoculturas de raízes rasas alterará, provavelmente, o ciclo hidrológico do bioma. Outra ameaça para o bioma é a diminuição da componente lenhosa da vegetação (formação florestal e formação savânica) devido ao aumento da frequência de incêndios por ação humana, gerando

descontinuidades na cobertura de vegetação primária e convertendo o bioma em ecossistemas mais abertos (HOFFMANN; JACKSON, 2000).

3.2 O papel do bioma Cerrado no sistema climático

O dogma de que a vegetação nativa é simplesmente uma consequência do clima e não exerce qualquer influência sobre este foi quebrado na década de 1970 pelo cientista brasileiro Eneas Salati. A partir de amostras de água da chuva coletadas desde o oceano Atlântico até a fronteira brasileira com o Peru, este cientista demonstrou de modo inequívoco que a floresta amazônica gera cerca de metade de sua própria precipitação, reciclando 5 a 6 vezes a umidade, à medida que as massas de ar se movem pela bacia, desde o oceano Atlântico até às suas cabeceiras a ocidente (SALATI, E.; MARQUES, J; MOLION, C, 1978; LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. A., 2018).

Assim, os níveis elevados de evaporação e transpiração produzidos pelas florestas contribuem para uma camada limite da atmosfera mais úmida do que se não existisse floresta.

Globalmente, os biomas de savana constituem uma importante parcela da cobertura de vegetação natural, representando aproximadamente 1/6 da superfície do planeta e assegurando cerca de 30% da NPP. O continente africano destaca-se, à escala global, com a maior área de bioma savânico, com cerca 15 milhões de km^2 (≈ 50% da sua área total) (GRACE, J. et al., 2006). No caso da América do Sul, e em particular do Brasil, esse tipo de bioma tropical cobre a segunda maior área de vegetação nativa do continente, com cerca de 2.040.000 km^2, como observamos no capítulo anterior.

Em consequência da elevada extensão do bioma Cerrado e por nele ocorrerem queimadas frequentes durante a longa estação seca, a sua fraca gestão (ou a precária aplicação de políticas públicas e de controle de fiscalização) pode influenciar os balanços locais, regionais e possivelmente globais de energia, água e carbono, e, concomitantemente, os produtos da sua combustão influenciar profundamente a química da atmosfera (SANTOS, A. J. B., et al., 2003; LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. A., 2018).

Neste contexto, os processos em curso de mudanças globais, como as mudanças no uso e ocupação dos solos, o aumento na concentração de CO_2 na atmosfera e as alterações nos padrões de precipitação, pode significar que o conjunto de fatores abióticos, bióticos e antropogênicos, tão importantes nos biomas savânicos, como o Cerrado brasileiro, se estará alterando. As frequentes queimadas nos biomas de savana emitem uma ampla gama de componentes químicos e matéria particulada, com impactos importantes na radiação solar recebida pela superficie terrestre e na ciclagem de nutrientes nos ecossistemas (HANAN, N. P.; HILL M. J. (Orgs.) (2012); VANDERWERF, G. R. et al., 2006; SOUTHWORTH, J. et al., 2015).

Como vimos no Capítulo 1, as pesquisas pioneiras de Charney et al. (1975), sustentavam que o papel da desertificação induzida por excesso de áreas de pastagem no clima desértico do Saara, por alteração do albedo da superfície, podiam impactar o clima regional alterando os regimes de precipitação, iniciando um *feedback* positivo. Todavia, embora muitos estudos empíricos e baseados em modelo nas últimas décadas tenham examinado as hipóteses postuladas por Charney et al., poucos demonstraram que o *feedback* local sobre o clima da superfície terrestre seja, por si só, suficiente para impactar os processos em escala global que geram a variabilidade de precipitação (CHARNEY et al, 1975; GIANNINI A.; BIASUTTI M.; VERSTRAETE, M. M., 2008; HANAN, N. P.; HILL M. J. (Orgs.) (2012)).

A ilustração da Figura 3.3 permite observar que as modificações na altura e densidade da vegetação afetam a rugosidade da superfície, que por sua vez influencia na turbulência próxima ao solo. Superfícies mais rugosas misturam o ar com mais eficiência, melhorando o processo de resfriamento. Assim, as mudanças no albedo, na rugosidade da superfície e na razão entre perda de calor sensível e calor latente por supressão de vegetação primária podem afetar os fluxos de água e energia entre a biosfera e a atmosfera, resultando em modificações do clima, local e global (PERUGINI et al., 2017).

Por outras palavras, e em oposição ao que se verifica em florestas nativas, a redução da umidade estocada em áreas desmatadas resulta em perdas de energia na forma de calor latente – a ET– e grandes desperdícios, na forma de calor sensível – o aumento de temperatura - o que explica o aquecimento relevante do ar próximo à superfície do solo em áreas de pastagem e campos agrícolas, provocando maior

dessecação nestas regiões (BONAN, G. B., 2016; PBMC-GT1, 2016; SPRACKLEN, D.V.; BAKER, J.C.A.; GARCIA-CARRERAS, L.; MARSHAM, J.H., 2018).

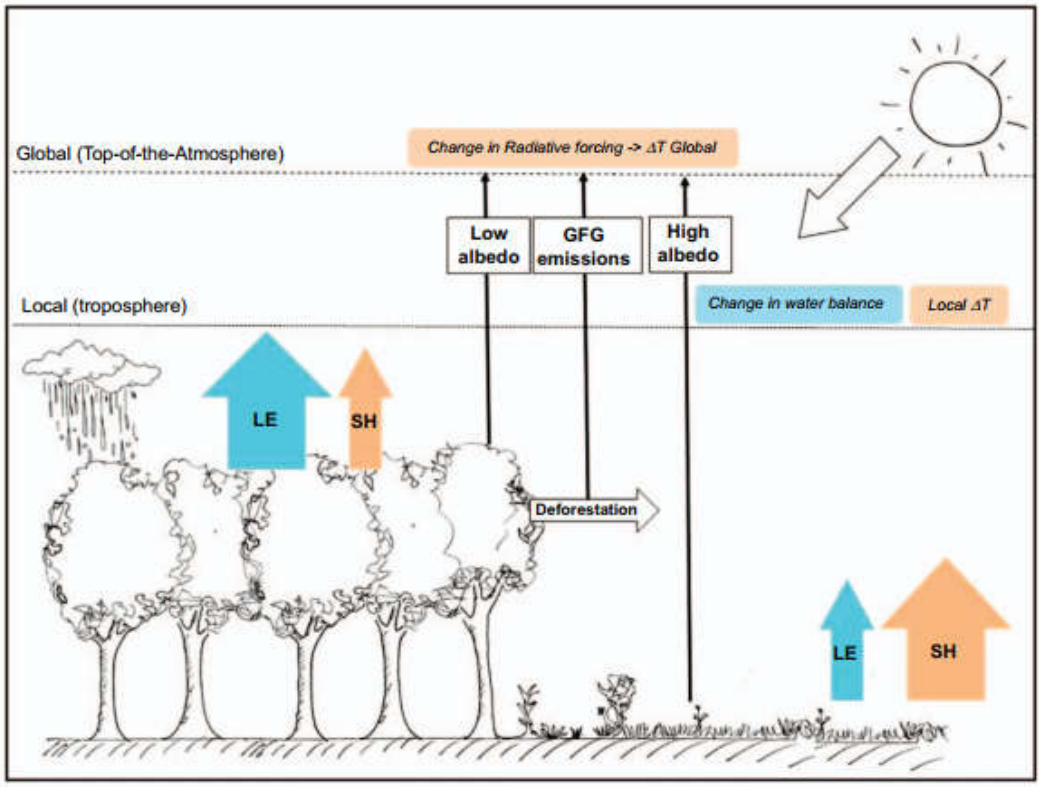


Figura 3.3 – Ilustração dos efeitos biofísicos e biogeoquímicos do desmatamento (LE: calor latente; SH: calor sensível; GHG: Gases de Efeito de Estufa) (Fonte: PERUGINI et al., 2017)

Sabemos que a floresta amazônica exerce um papel fundamental no funcionamento e na regulação do clima regional e global. Por meio da intensa ET ao longo de todo o ano, o vasto e denso dossel florestal contínuo deste bioma bombeia o calor latente à atmosfera e equilibra o calor radiativo da superfície. A intensa convecção tropical sobre o continente durante o verão do Hemisfério Sul transporta o calor latente para a alta troposfera e o distribui nas zonas temperadas. Ao exercer essa função, floresta tropical e convecção, juntas, resfriam a Amazônia, tornando-se simultaneamente uma intensa fonte troposférica de calor para a circulação atmosférica global. Tais processos contribuem para o aumento da umidade em regiões distantes, alimentando o ciclo hidrológico em latitudes médias (temperadas) e tropicais, além de manter a disponibilidade e qualidade da água do solo no longo prazo. Neste sentido, o papel da cobertura vegetal nativa no bioma Amazônia tem sido fortemente ameaçado pelas mudanças de uso do solo, afetando, entre outros, o

ciclo hidrológico nos ecossistemas (NOBRE, C. A.; BORMA, L. S., 2009; DEBORTOLI, N. S., 2013).

No que concerne a áreas desmatadas, em comparação com áreas de floresta nativas, existe uma redução das taxas de ET. Dessa forma, as precipitações são afetadas, podendo ocorrer reduções superiores a 20% nos índices pluviométricos (MARENGO, J. A., et al, 2007).

O total global de fluxo de vapor de água promovido por florestas nativas potenciais foi estimado em 67.000 km^3/ano (GORDON, L. J., et al., 2005). A Figura 3.4 apresenta a distribuição desses fluxos de vapor, ilustrando claramente a maior contribuição das regiões tropicais úmidas em relação ao total global, realçando assim a importância dessas regiões para o funcionamento e regulação do sistema climático do planeta.

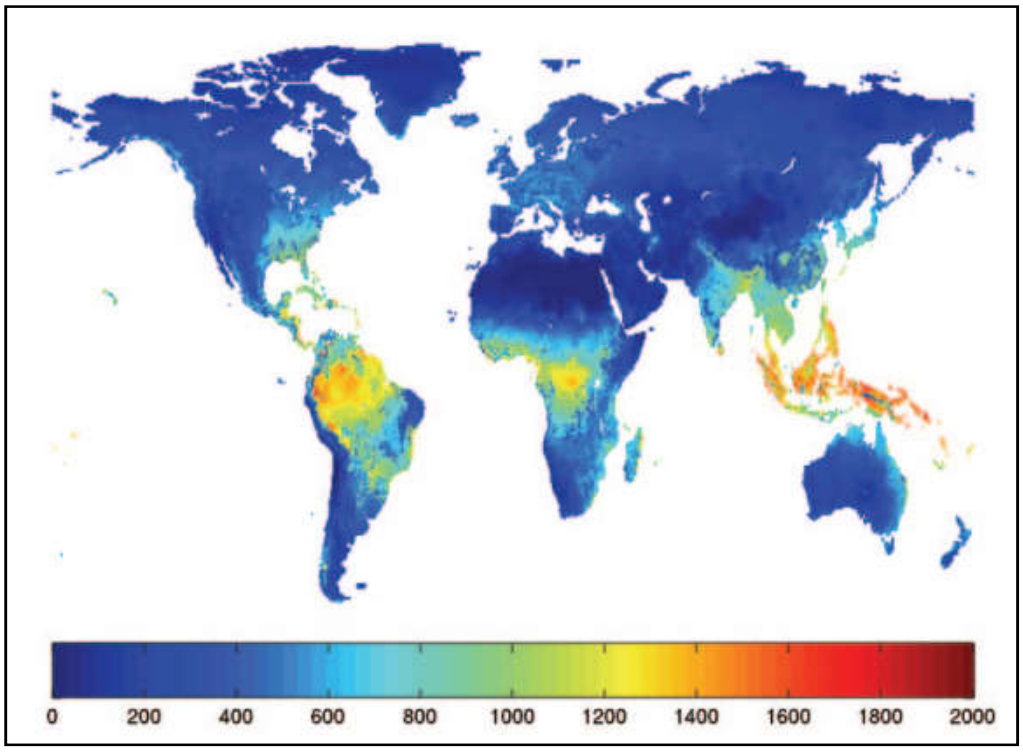


Figura 3.4 – Distribuição espacial dos fluxos anuais de vapor de água (mm) promovidos potencialmente pela vegetação nativa, destacando-se a importância das florestas tropicais úmidas, particularmente a bacia amazônica (Fonte: Gordon, L. J., et al., 2005)

Dentre as principais regiões globais que têm registrado reduções relevantes de fluxo de vapor de água devido à perda de cobertura de vegetação nativa se encontra o Sudeste Asiático, a África Central e o “arco de desmatamento” em torno da bacia Amazônica, que inclui a fronteira agrícola do MATOPIBA (GORDON, L. J., et al., 2005).

Estudos realizados por Spracklen et al. (2012) verificaram que um cenário de desmatamento de 40% do bioma Amazônia resultaria em uma redução de 12% nas chuvas da estação chuvosa e uma redução de 21% nas chuvas da estação seca em toda a bacia amazônica, além de um declínio de 4% na precipitação na bacia do Rio da Prata, a milhares de quilômetros ao sul da Amazônia. Os resultados desta pesquisa revelaram ainda correlações espaciais positivas entre a precipitação média anual e o IAF médio anual (com um coeficiente de correlação de Pearson forte, r=0,81), destacando-se assim o papel da precipitação no controle de padrões de vegetação em larga escala.

Em uma abordagem distinta de modelagem em mesoescala, conduzida por Lawrence, D. e Vandecar, K (2014), baseada em relações empíricas entre vegetação e precipitação ao longo de trajetórias de massa de ar, os resultados alcançados evidenciaram igualmente fortes efeitos da vegetação nativa sobre a precipitação.

Contrariamente ao bioma Amazônia, o Cerrado, com uma estação seca que se prolonga por 5 a 6 meses, é composto por uma mistura de diversos estratos arbóreos e herbáceos, com o dossel menos denso e mais descontínuo que o da Amazônia e respostas distintas entre si às variações das condições ambientais. Um denominador comum entre resultados de pesquisas realizadas no Cerrado está relacionado com a sazonalidade, pelo modo de dissipação da energia disponível: enquanto na estação seca, à medida que decrescem os estratos herbáceos, se observa um forte declínio no fluxo de calor latente, na estação das chuvas as perdas de calor sensível e calor latente são semelhantes. Uma outra caracteristica muito importante se relaciona com a consistência das alterações na densidade dos estratos arbóreos ao longo de gradientes topográficos rasos, devida à frequência das queimadas. Face ao exposto, para se caracterizar com rigor os fluxos de massa e de energia neste bioma, quaisquer medições realizadas deverão refletir as mudanças sazonais bem como as variações espaciais de densidade do dossel arbóreo (GIAMBELLUCA, T. W., et al., 2009; SANTOS, A. J. B., et al., 2003; OLIVEIRA, P. T. S., et al., 2015).

Assim, a conversão de Cerrado não perturbado por culturas agrícolas (onde predominam as gramíneas), combinado com a maior frequência de queimadas na estação seca, terá o potencial de alterar o balanço energético, por aumento do albedo e da temperatura superficial, além de alterar o balanço hídrico, por aumento

do escoamento superficial, diminuição da intercepção do dossel e redução da ET. Uma cobertura de vegetação densa, com elevado IAF, pode absorver mais energia do que a vegetação herbácea, em parte devido a diferenças no albedo da superfície. Além disso, a vegetação densa também envia mais energia de volta à atmosfera na forma de ET, alterando o teor de vapor de água na atmosfera e influenciando a precipitação (BONAN, G. B., 2008; GIAMBELLUCA, T. W., et al., 2009; CHRISTOFFERSEN, B., et al, 2014; OLIVEIRA, P. T. S., et al., 2015; OLIVEIRA, B. S., et al., 2018).

Uma pesquisa publicada por Giambelluca, T. W., et al. (2009), empregando métodos e técnicas de covariância dos vórtices turbulentos (*eddy-covariance*), para caracterizar os fluxos de energia e vapor de água em savanas tropicais, observou alterações significativas nas taxas de ET entre a vegetação de Cerrado denso e de Cerrado aberto, devido, presumivelmente, a diferenças na densidade de vegetação lenhosa, profundidade e densidade das raízes e IAF. Os autores da pesquisa concluiram que quaisquer previsões de valores regionais de ET para o bioma Cerrado devem levar em consideração as variações na densidade de estratos arbóreos bem como do IAF e, portanto, a proporção de diferentes fisionomias do Cerrado. O aumento da ET na estação chuvosa e a menor e constante ET observada durante a estação seca indicou uma diminuição da condutância do dossel na estação seca (GIAMBELLUCA, T. W., et al., 2009)

Numa outra pesquisa conduzida durante 3 anos no bioma Cerrado por Cabral, O. M.R., et al. (2015), a baixa variação nos totais anuais observados de ET evidenciou que o teor de umidade nas camadas profundas de solo suportavam a ET em anos secos. Além disso, a água disponível para recarga de aquíferos era dominada pelo volume de precipitação.

Num estudo apresentado por Oliveira, B. S., et al. (2018), os resultados mostraram que, para a vegetação nativa do Cerrado, a ET foi controlada principalmente pela variação sazonal da radiação líquida, pela precipitação e disponibilidade de água superficial, reproduzindo um padrão típico deste bioma, marcado pela sazonalidade do IAF e da biomassa verde. Este estudo concluiu também que a extensão da rugosidade da superfície tem uma relação direta com o sistema climático, influenciando o grau de acoplamento entre a superfície terrestre e a atmosfera, modulando assim os fluxos de energia – os aumentos na rugosidade da

superfície estão associados a um aumento na eficiência do calor sensível que é transferido da superfície terrestre para a atmosfera.

Por sua vez, uma diminição da convecção térmica, por reduções na rugosidade da superfície, pode diminuir os índices de precipitação e influenciar os padrões de circulação em larga escala (HOFFMANN; JACKSON, 2000; OLIVEIRA, R. S., et al., 2005; GIAMBELLUCA, T. W., et al., 2009; CABRAL, O. M. R., et al., 2015; OLIVEIRA, B. S., et al., 2018; RICHARDSON, A. D., et al., 2013).

Conforme foi realçado anteriormente, a ET é um componente importante do balanço hídrico em regiões tropicais, e em particular no bioma Cerrado. As diferenças de ET entre cobertura de vegetação nativa e áreas convertidas em pastagem desempenham também um papel importante na dinâmica de escoamento superficial em corpos hídricos.

Para finalizar apresentam-se na Tabela 3.1 os resultados de uma pesquisa conduzida por Nóbrega, R. L. B., et al. (2017). Verifica-se que a bacia em área de Cerrado não perturbado apresentou maior ET em comparação à bacia inserida em região de pastagem. Enquanto que na bacia antropizada a ET média diminuiu cerca de 45% da estação chuvosa para a estação seca, na bacia não perturbada a reduçao de ET foi apenas de 24% na transição de estações.

Tabela 3.1 – Compilação dos resultados diários e anuais de evapotranspiração e escoamento superficial para as duas bacias: em área de pastagem e em área não perturbada de Cerrado

Bacia de drenagem	Evapotranspiração			Escoamento superficial		
	Estação seca (mm/dia)	Estação das chuvas (mm/dia)	Anual (mm/ano)	Estação seca (mm/dia)	Estação das chuvas (mm/dia)	Anual (mm/ano)
Área de Cerrado	2,32±24%	3,06±26%	1.004±24%	0,92±27%	1,49±46%	457±18%
Área de pastagem	1,19±44%	2,15±27%	639±31%	1,58±15%	2,20±20%	708±7%

(Fonte: NÓBREGA, R. L. B., et al., 2017)

Os autores da pesquisa sugerem que estes resultados estão relacionados com o desempenho endêmico dos estratos arbóreos do Cerrado ao longo do ano, dada a maior capacidade de armazenamento promovida pelo sistema de raízes

densas e profundas da vegetação nativa, que influencia o balanço hídrico e se revela fundamental para a retirada de água dos aquíferos durante a estação seca.

3.3 Impactos das mudanças climáticas no bioma Cerrado

Os impactos do aumento da temperatura global nos sistemas biológicos se manifestam, entre outras formas, por mudanças na fenologia, na distribuição de espécies e na produção da biomassa líquida terrestre, sendo que a capacidade das espécies e dos ecossistemas de responder positivamente às mudanças climáticas dependerá das características específicas das espécies, das ameaças antropogênicas atuais e futuras, dos próprios regimes climáticos futuros apresentarem condições além das experimentadas até agora e, claro, da resiliência natural dos sistemas biológicos a essas mudanças (BEAUMONT, L. J., et al., 2011;IPCC, 2019).

Os resultados de uma pesquisa realizada por Beaumont, L. J., et al. (2011) sugeriu que as mudanças climáticas projetadas pelo IPCC para os próximos 60 anos poderão colocar uma pressão substancial na integridade e na sobrevivência de algumas das ecorregiões biologicamente mais importantes, particularmente as que se inserem nos ecossistemas tropicais e subtropicais do continente africano e sul americano, sendo que algumas destas regiões já estão expostas a outros tipos de ameaças relacionadas a pressões ambientais, sociais e econômicas.

Várias abordagens em modelos climáticos globais e regionais têm sugerido que, uma vez excedido o desmatamento de 40% em toda a bacia amazônica, um "ponto de inflexão" (“*tipping point*”) poderá ser ultrapassado. A partir desse ponto, a diminuição dos fluxos de energia e de água de volta para a atmosfera (transpiração) pelas áreas desmatadas poderá resultar na redução da convecção e da precipitação, a que se associará uma eventual transição de floresta predominantemente umida para uma formação de vegetação do tipo savana (NOBRE, C. A.; BORMA, L. S., 2009; LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. A. et al., 2018).

Em trabalhos recentes tem sido enfatizada a resiliência da Amazônia e, implicitamente, a de outras regiões com florestas tropicais, sugerindo que esse limite crítico pode ser superior a 50% (LAWRENCE, D.; VANDECAR, K., 2014). Um

contributo adicional para esta análise é explicitado na Figura 3.5, colocando em evidencia que a uma escala continental, como é o caso do Brasil, em regiões com elevada supressão de vegetação primária (da ordem de 50%), a precipitação se poderá reduzir abruptamente, se excedidas determinadas dimensões críticas de áreas desmatadas contínuas.

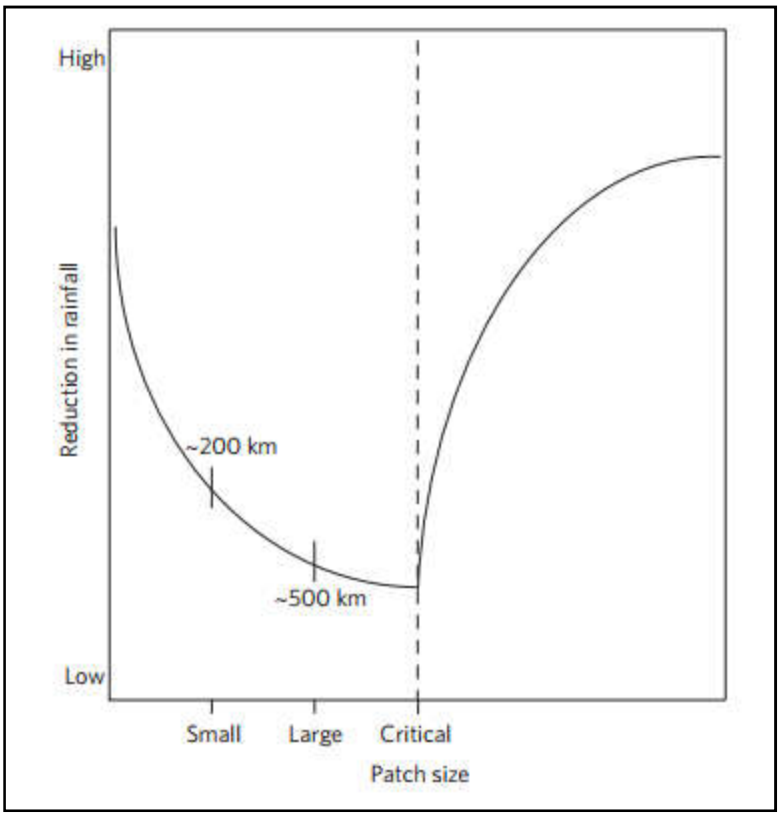


Figura 3.5 – Dimensões críticas de áreas desmatadas à escala continental (Fonte: LAWRENCE, D.; VANDECAR, K., 2014)

As florestas tropicais sazonalmente secas são reconhecidas como um dos ecossistemas terrestres em maior risco de equilibrio ecológico, dado que são ameaçadas não apenas pelo elevado desmatamento mas também pelos impactos das mudanças climáticas. No caso do Cerrado, o balanço entre a vegetação lenhosa (formação florestal e formação savânica) e a vegetação herbácea é um aspecto muito importante da sua diversidade fitofisionômica e a NPP neste bioma pode potencialmente ser reduzida face às mudanças climáticas projetadas. O aumento da temperatura provavelmente resultará em uma redução do processo fotossintético nas plantas do bioma, implicando em um possível decréscimo de sua biomassa. Com este cenário, para a estação seca, o Cerrado passará adicionalmente a ser uma fonte de emissão de carbono para a atmosfera, dado que um aumento na

duração do período seco pode potencialmente resultar em um aumento na vulnerabilidade ao fogo do bioma (PBMC-GT1, 2016; NÓBREGA, R. L. B., et al., 2017).

Para o Cerrado, as projeções mais severas indicam que a maioria do bioma sofrerá um aumento de temperatura em torno de 4ºC até o final deste século, exceto na região de transição com a Amazônia, onde o aumento da temperatura poderá chegar até aos 6ºC. As projeções menos severas de temperatura apontam para um aumento de 2ºC na parte leste do Cerrado (MARENGO, J. A., et al., 2007; 2009).

Quanto à precipitação, as projeções mais severas indicam um decréscimo de 20% a 50% em relação aos valores atuais na parte central e sul do Cerrado e uma redução de aproximadamente 70% na região setentrional. As projeções menos severas indicam uma redução de 30% nas regiões central e sul e uma redução de 40% na região norte do bioma (BUSTAMANTE, M. M. C., et al., 2012; PBMC-GT1, 2016).

As projeções menos severas indicam uma redução de precipitação na ordem de 30% nas regiões central e sul do Cerrado e uma redução de 50% na região nordeste, que inclui a fronteira agrícola do MATOPIBA. São também esperadas mudanças na distribuição das chuvas ao longo do ano em todo o bioma. Na região norte e nordeste do Cerrado, espera-se ainda um aumento de 20 a 30 dias na duração da estação seca (número máximo de dias consecutivos sem chuva) (PBMC-GT1, 2016). Por outro lado, é esperado um aumento no volume de chuva proveniente de tempestades na região centro-sul do bioma Cerrado. As mudanças climáticas projetadas também podem ter impactos no funcionamento dos ecossistemas do Cerrado, diminuindo a absorção de CO_2 (MARENGO, J. A., et al, 2009; BUSTAMANTE, M. M. C., et al., 2012).

Os efeitos das mudanças climáticas no Cerrado deixam ainda outros alertas relacionados ao equilíbrio dos ecossistemas. Estudos utilizando metodologias de modelagem preditiva avaliam uma perda de área superior a 50% para todas as espécies analisadas, sendo que entre 18 a 56 espécies não terão mais áreas habitáveis na região do Cerrado em 2050, e entre 91 e 123 espécies terão sua área habitável diminuída em 90% (CANHOS et al., 2008).

É ainda importante destacar que a principal fonte de variabilidade climática interanual na América do Sul é o fenômeno *El Niño* Oscilação Sul (ENOS). Este fenômeno, de abrangência global, funciona como uma oscilação acoplada oceano-

atmosfera produzindo alterações na superfície dos oceanos, na pressão atmosférica, nos ventos e na convecção tropical, conforme se pode observar na Figura 3.6.

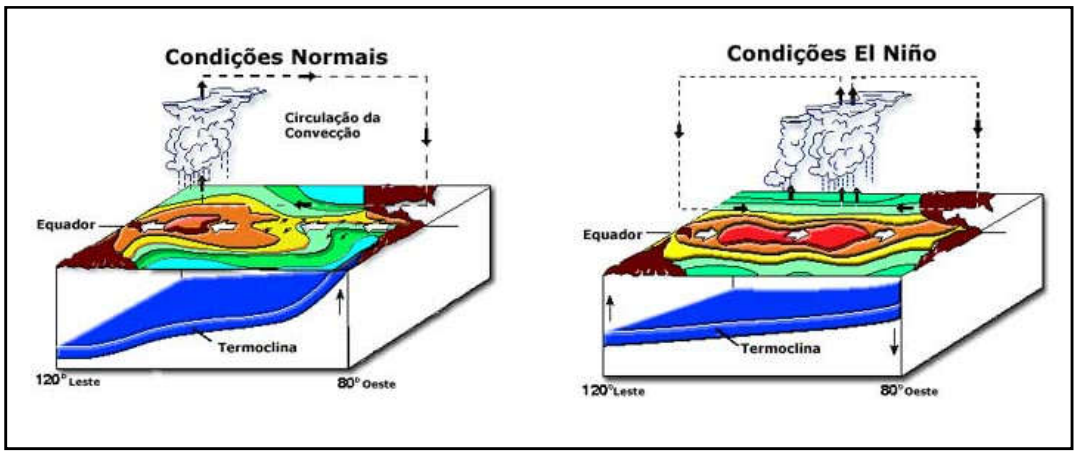


Figura 3.6 – Circulação observada no Oceano Pacífico Equatorial em anos sem a presença do *El Niño* ou *La Niña* (Condições Normais) e padrão de circulação observada em anos de *El Niño* na região equatorial do Oceano Pacífico (Fonte: http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt, 2014)

As suas características são mais bem observadas no Oceano Pacífico, com reflexos em outros lugares do planeta, como o Brasil - as fases opostas deste fenômeno são designadas de *El Niño* e *La Niña*. O fenômeno climático ENOS afeta profundamente as chuvas na bacia amazônica, em particular na região sudeste deste bioma (zona de transição com o Cerrado Setentrional). Durante os anos em que ocorre este fenômeno, existe uma diminuição de vazão do rio Amazonas e de alguns dos seus principais tributários. Em sentido oposto, um aumento de vazão e de inundações ocorre nos anos de *La Niña*. Com esse aquecimento do oceano e com o enfraquecimento dos ventos alísios (que sopram de leste para oeste), começam a ser observadas mudanças da circulação da atmosfera nos níveis baixos e altos, determinando mudanças nos padrões de transporte de umidade, e portanto variações na distribuição das chuvas em regiões tropicais e de latitudes médias e altas (INPE-CPTEC, 2011; DEBORTOLI, N. S., 2013; MARENGO, J. A., et al., 2006).

Enquanto que em escalas regionais e globais a distribuição dos biomas de savana é controlada pelo clima, particularmente pela quantidade de precipitação e sazonalidade, em escalas menores as características biogeoquímicas e o histórico de distúrbios tornam-se determinantes da estrutura e funcionamento desses ecossistemas. O Cerrado está ameaçado por uma taxa atual de desmatamento que

é cerca de 2,5 vezes superior à da Amazônia trazendo consequências para as emissões de GEE e mudançasno regime de queimadas. Essas mudanças são agravadas pela baixa proteção do bioma (≈8,0%), colocando em risco cerca de 12 mil espécies de plantas, 850 aves (metade das espécies brasileiras) e 200 espécies de mamíferos (JOLY, C.A. et al (Eds.), 2019).

Neste contexto, uma melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre o bioma Cerrado exigirá mais informações sobre a variabilidade espacial e temporal dos ecossistemas terrestres e aquáticos que o constituem, além de novas abordagens de modelagem que considerem o *feedback* dos diferentes fatores de perturbação no meio ambiente (BUSTAMANTE, M. M. C., et al., 2012; STRASSBURG, et al., 2017).

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 As taxas de desmatamento no bioma Cerrado

Nas últimas três décadas a expansão agropecuária trouxe mudanças significativas na cobertura e uso do solo do Cerrado, o segundo maior bioma terrestre brasileiro. Quase metade do bioma foi convertida em pastagens (29,5%) ou em terras agrícolas (11,7%), sendo que apenas uma pequena parte do bioma (≈8,0%) é formalmente protegida por Unidades de Conservação (UC) ou Terras Indígenas (TI) (MMA, 2014; NOOJIPADY, P. et al., 2017). Desde 1990 a região do Cerrado se tornou a principal produtora de importantes culturas de exportação e, em 2014, representava a maior parte da área plantada com soja (61%), milho (61%) e algodão (99%) (IBGE, 2013).

Apesar da sua enorme importância para a conservação de espécies e para a prestação de serviços ecossistêmicos, o Cerrado já perdeu aproximadamente 880.000 km^2, o equivalente a 46% do total de sua cobertura vegetal nativa e, atualmente, apenas 19,8% permanece inalterado. Entre 2002 e 2011, as taxas de desmatamento no Cerrado foram de 1% ao ano, cerca de 2,5 vezes superiores que na Amazônia (STRASSBURG, et al., 2017).

As duas imagens da Figura 4.1 permitem identificar diferenças significativas de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado em 1985 e 2017. As cores e tonalidades a verde se referem a áreas de formação florestal e formação savânica, enquanto as áreas ocupadas por empreendimentos agropecuários e de pastagem estão representados respetivamente pelas cores e tonalidades de amarelo e rosa.

A região meridional do bioma, que integra os estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso já evidenciava, em 1985, uma elevada ocupação do solo para fins agropecuários. Essa tendência da ação antrópica se foi acentuando e consolidando na região sul do bioma e tomou sua marcha para a região setentrional do bioma. Na imagem de 2017 da Figura 4.1 verifica-se claramente a mudança de uso e ocupação do solo no Tocantins, Maranhão, Bahia e Piauí, os estados que compõem o MATOPIBA, na região de transição com o bioma Amazônia.

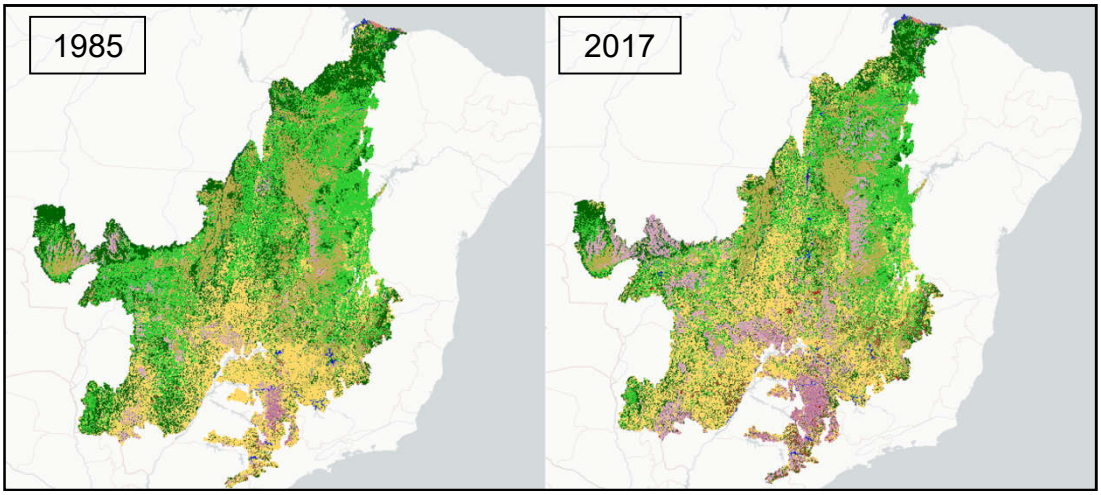


Figura 4.1 – Mudanças de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado em 1985 e em 2017 (Fonte: Mapbiomas, 2019)

Entre 1985 e 2017, intervalo de tempo a que se refere o presente estudo, o bioma Cerrado registrou uma perda líquida de vegetação nativa lenhosa de aproximadamente 23% e, simultaneamente, um aumento da área para fins agropecuários de 51%, tendo-se atingido em 2017 uma convergência e, praticamente, uma equivalência dos valores absolutos nas áreas de vegetação nativa e de empreendimentos agrícolas e de pastagem neste bioma (cerca de 820.000 km^2), conforme se pode observar no Gráfico 4.1.

Esta perda líquida de vegetação nativa em apenas três décadas foi muito expressiva e trouxe, como consequência imediata, o agravamento das emissões de GEE e mudanças no regime de queimadas no bioma Cerrado (BUSTAMANTE, M. M. C., et al., 2012), acentuada pela baixa proteção do bioma, colocando em risco milhares de espécies de plantas, de aves e de mamíferos, como o lobo-guará e o tatu canastra (RICE, J., et al. (Eds.), 2018; JOLY, C.A. et al (Eds.), 2019).

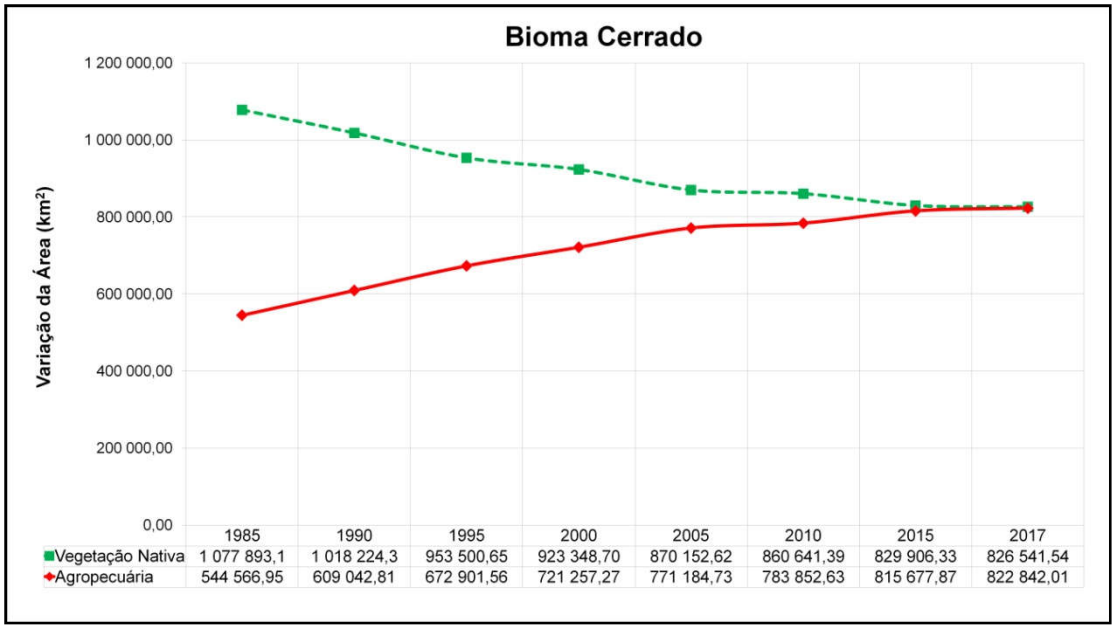


Gráfico 4.1 – Evolução da área acumulada de cobertura de vegetação nativa (formação florestal e formação savânica) e da área de empreendimentos agropecuários no bioma Cerrado entre 1985 e 2017 (Fonte: Autor, com base em dados doMapbiomas, 2019)

Vale ressaltar que as queimadas, associadas principalmente às práticas de conversão da vegetação natural em pastagem e fins agrícolas, têm um papel fundamental no sistema climático ao influenciar os padrões e os processos globais e locais dos ecossistemas e do ciclo do carbono. O Cerrado é, assim, apontado como um bioma gravemente ameaçado, devido às elevadas taxas de desmatamento e às mudanças de regime das queimadas induzidas por ação antrópica (JOLY, C.A. et al (Eds.), 2019).

4.2 As taxas de desmatamento no MATOPIBA

Embora o interesse público sobre desmatamento no Brasil seja mais expressivo no bioma Amazônia, a maior parte do desmatamento da última década ocorreu em áreas adjacentes à zona de transição Cerrado-Amazônia, como a região de fronteira agrícola do MATOPIBA, que se insere no designado “arco do desmatamento” (NÓBREGA, R. L. B., et al., 2017). A situação de disputa de terras entre grandes proprietários, posseiros e povos e comunidades tradicionais tem levado a situações extremas, especialmente nessa região de fronteira agrícola (MMA, 2015).

Atualmente a preocupação com o avanço do desmatamento no bioma Cerrado reside na porção setentrional, onde ainda permanecem as últimas áreas extensas de cobertura de vegetação natural intacta.

Vale lembrar que a Lei Nacional de Proteção da Vegetação Nativa (Lei n° 12.651, de 25 de maio de 2012), também conhecida como Novo Código Florestal (exposta no Capítulo 1 no contexto do marco legal), retirou do seu texto a necessidade de proteção permanente das áreas de topo de colina, os chamados chapadões do bioma Cerrado, abrindo assim grandes áreas da região de MATOPIBA para uso potencial dos soloscom finalidade agrícola (NOOJIPADY, P. et al., 2017).

Conforme se pode observar no Gráfico 4.2, entre 1985 e 2017 a perda efetiva de cobertura de vegetação natural (contabilizando a formação florestal e formação savânica) foi de aproximadamente 94.000 km^2, correspondente a uma taxa média anual de desmatamento de 2.900 km^2 em toda esta região.

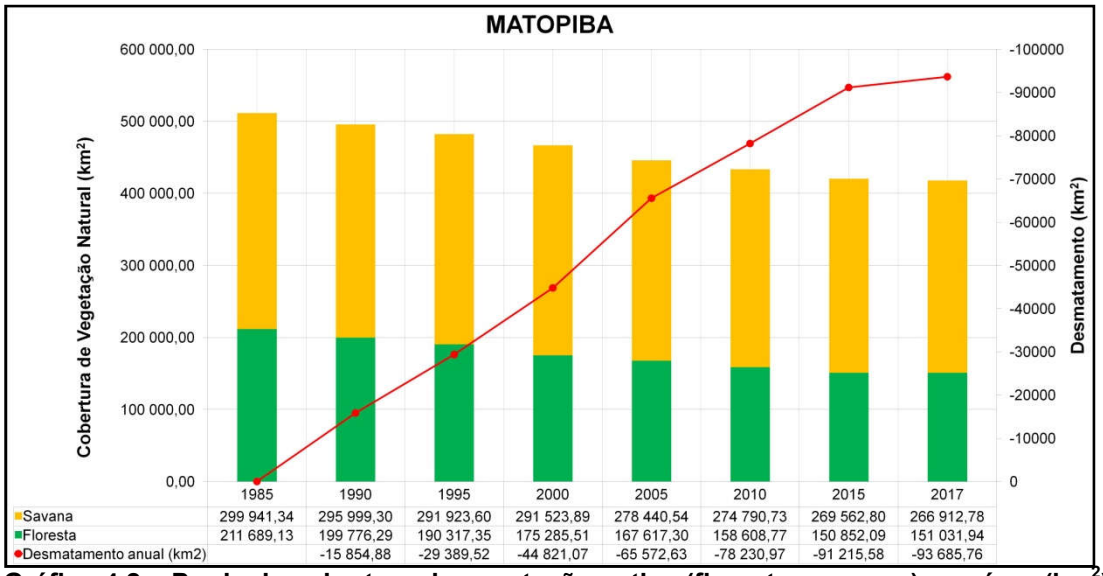


Gráfico 4.2 – Perda de cobertura de vegetação nativa (floresta e savana), em área (km^2), na região de fronteira agrícola do MATOPIBA (Fonte: Autorcom base em dados do Mapbiomas, 2019)

A título de exemplo, no período de 2002 a 2008, o desmatamento oficial em São Desidério (BA) foi de 1.329 km², o equivalente a 9% da vegetação de Cerrado existente no município no início do período analisado. Em Formosa do Rio Preto (BA) foi de 2.000 km², o equivalente a 12,4% da vegetação natural. Por fim, no período entre 2013 e 2015, os dez maiores valores de desmatamento em todo o bioma Cerrado foram identificados no MATOPIBA, cinco deles no oeste da Bahia,

nos municípios de São Desidério (337 km²), Jaborandi (295 km²). Formosa do Rio Preto (271 km²), Cocos (183 km²) e Correntina (165 km²) (SPERA, S. A. et al., 2016).

4.3 As séries históricas de precipitação

As 83 estações pluviométricas analisadas nesta pesquisa estão espacialmente distribuídas pelas 4 RH que integram o MATOPIBA da seguinte forma:

- 28 estações na RH do Tocantins-Araguaia;
- 16 estações na RH do São Francisco;
- 12 estações na RH do Parnaíba;
- 27 estações na RH do Atlântico Nordeste Ocidental.

Na Figura 4.2, vemos representado em contorno azul o Cerrado, em contorno vermelho a região do MATOPIBA e as quatro RH que integram esta região setentrional do bioma (com preenchimento em diferentes cores).

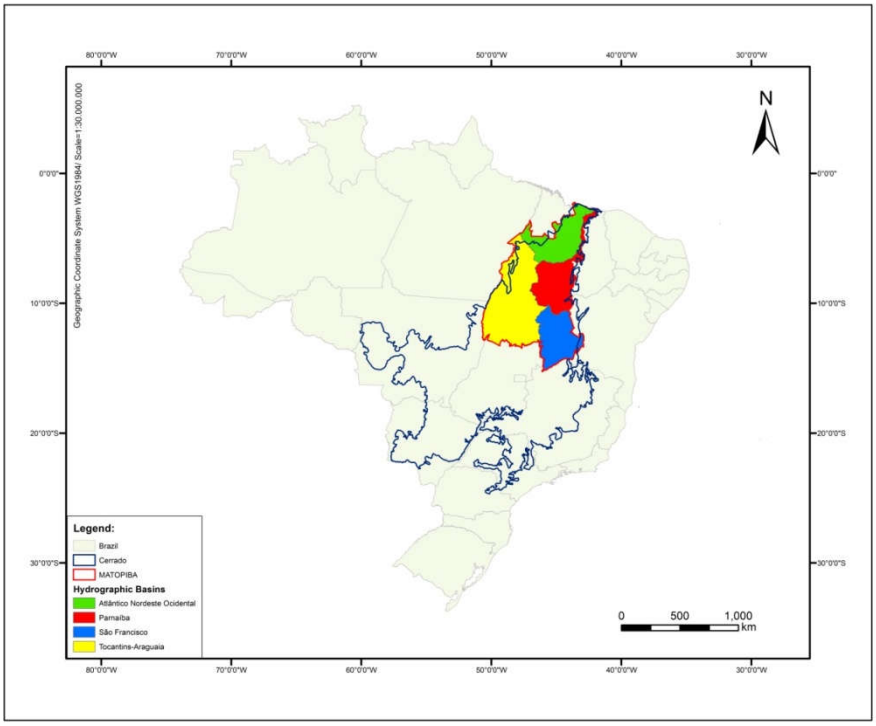


Figura 4.2 – Localização do bioma Cerrado, da fronteira agrícola do MATOPIBA e as 4 RH que compõem esta região de fronteira agrícola: Atlântico Nordeste Ocidental (verde), Parnaíba, (vermelho), São Francisco (azul) e Tocantins-Araguaia (Amarelo) (Fonte: Autor, 2019)

Na Figura 4.3 podemos observar a distribuição espacial das 83 estações pluviométricas.

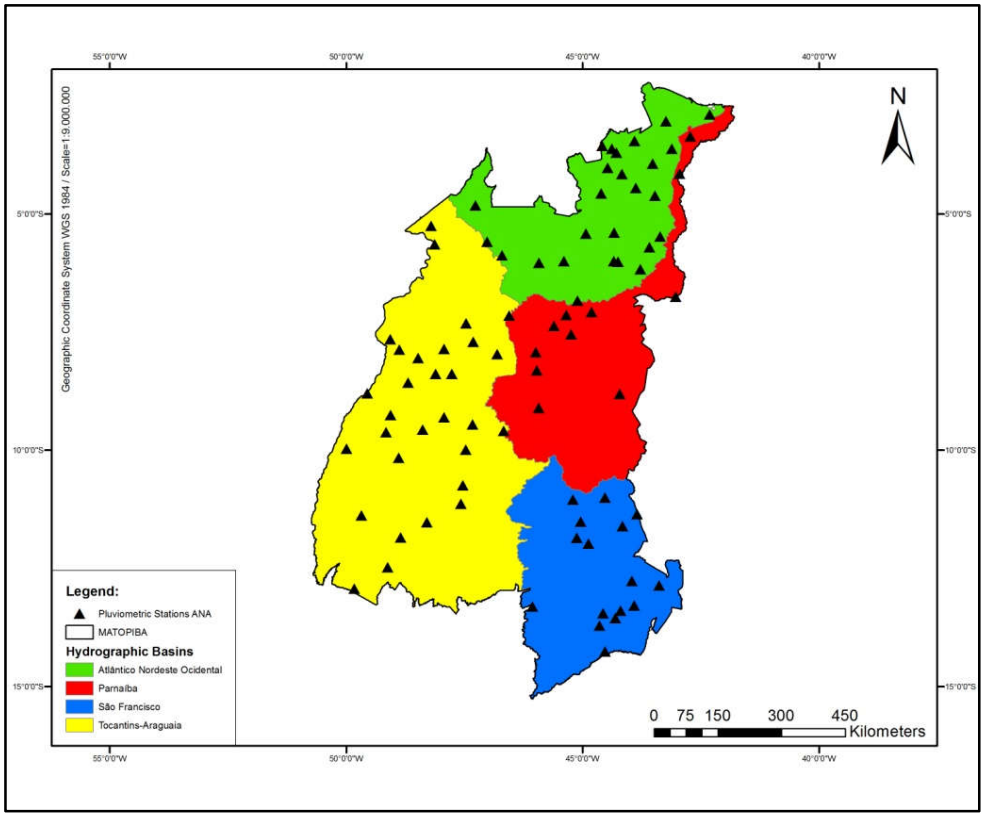


Figura 4.3 – Distribuição espacial das 83 estações pluviométricas analisadas na pesquisa (Fonte: Autor, 2019)

No Apêndice A apresenta-se a lista completa das 54 estações pluviométricas analisadas com *buffer* de 40km de raio, identificando-se, para cada uma, o respetivo nome, Unidade da Federação em que se situa, município a que pertence, altitude e coordenadas no sistema UTM (*Datum* WGS 84) com a latitude, longitude e respectivas zonas.

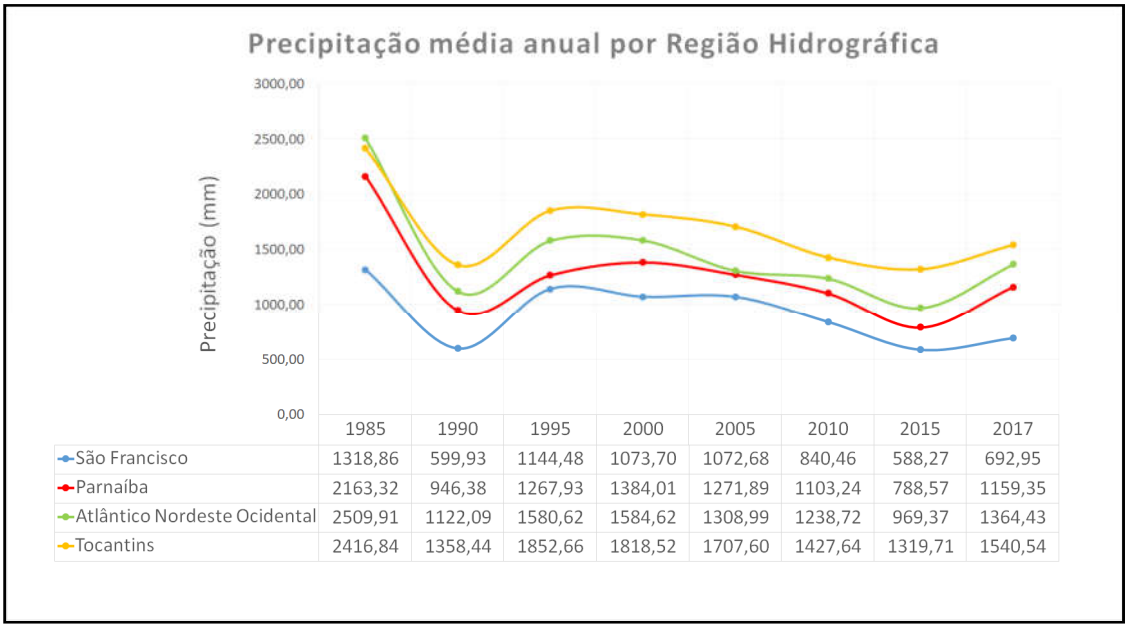
No Gráfico 4.3 apresenta-se a precipitação média anual na região do MATOPIBA, com os valores distribuídos por RH, tendo por base as séries históricas das 83 estações pluviométricas para 33 anos (1985-2017).

Verificou-se que, para este período, a precipitação média anual, no conjunto das 83 estações, foi de 1.536,86mm ± 973,06mm.

Contudo, como se pode verificar no mesmo Gráfico 4.3, os valores de precipitação média variaram consideravelmente entre as quatro BH estudadas.

Assim, a precipitação média anual na RH do São Francisco foi de 941,31mm ± 377,53mm, na RH do Parnaíba foi de 1475,95mm ± 687,37mm, na RH do Atlântico

Nordeste Ocidental foi de 1739,64mm ± 770,27mm e, por fim, na RH do Tocantins-Araguaia essa precipitação média anual foi 1868,28mm ± 548,56mm.



	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017
São Francisco	1318,86	599,93	1144,48	1073,70	1072,68	840,46	588,27	692,95
Parnaíba	2163,32	946,38	1267,93	1384,01	1271,89	1103,24	788,57	1159,35
Atlântico Nordeste Ocidental	2509,91	1122,09	1580,62	1584,62	1308,99	1238,72	969,37	1364,43
Tocantins	2416,84	1358,44	1852,66	1818,52	1707,60	1427,64	1319,71	1540,54

Gráfico 4.3 – Precipitação média anual, por Região Hidrográfica, no MATOPIBA, com base nas Séries Históricas de 33 anos (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019)

Nos resultados por região a precipitação média anual mais baixa registrada no período de 33 anos ocorreu na RH do São Francisco, com o valor de 563,80mm, no ano de 1993 e a precipitação média anual mais elevada foi identificada na RH do Atlântico Nordeste, com o valor de 2509,91mm, no ano de 1985.

Constata-se assim uma grande amplitude dos valores médios anuais de precipitação no período estudado.

Vale ainda ressaltar que a altitude a que se encontram as 83 estações analisadas varia entre 15m (estação pluviométrica Cantanhede - município de Cantanhede, estado do Maranhão, RH do Atlântico Nordeste Ocidental) e 824m (estação pluviométrica Fazenda Prainha – município de São Desidério, estado da Bahia, RH do São Francisco).

Relativamente aos valores médios mensais de precipitação, as quatro RH analisadas apresentaram um comportamento característico em U, conforme se pode observar no Gráfico 4.4.

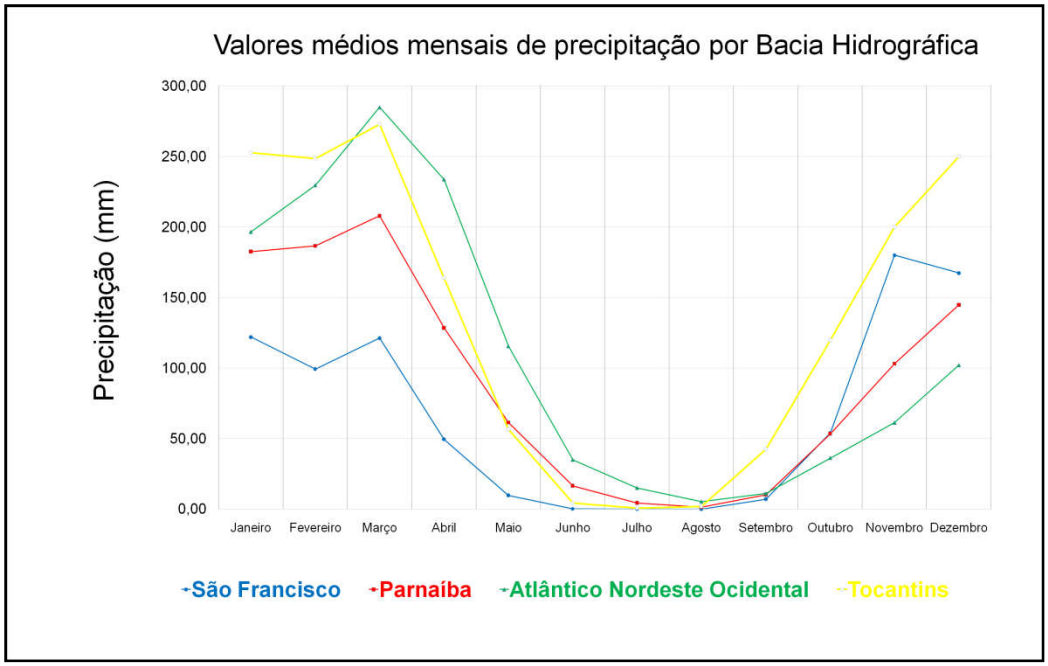


Gráfico 4.4 – Valores médios mensais de precipitação, por Região Hidrográfica (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019)

No período analisado, e para a estação das chuvas (entre outubro e abril) o maior valor médio mensal de precipitação foi registrado no mês de março, na RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com 296,85mm. O menor valor médio para a estação das chuvas foi registrado na RH do São Francisco, no mês de fevereiro, com 99,38mm. Esta tendência, ao nível de RH, se manteve para o período de transição da estação das chuvas para a estação seca (abril/maio), com valores médios máximos no Atlântico Nordeste Ocidental em maio (115,48mm) e valores médios mínimos no São Francisco, também em maio (9,71mm).

Nos gráficos que se apresentam nas páginas seguintes (Gráfico 4.5 a Gráfico 4.8) pode observar-se, por RH, o comportamento das precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro).

Note-se que, por uma questão de escala dos valores, os resultados referentes à estação das chuvas devem ser lidos no eixo das ordenadas da esquerda, enquanto para a estação da seca e meses de transição os resultados da precipitação deverão ser lidos no eixo das ordenadas da direita.

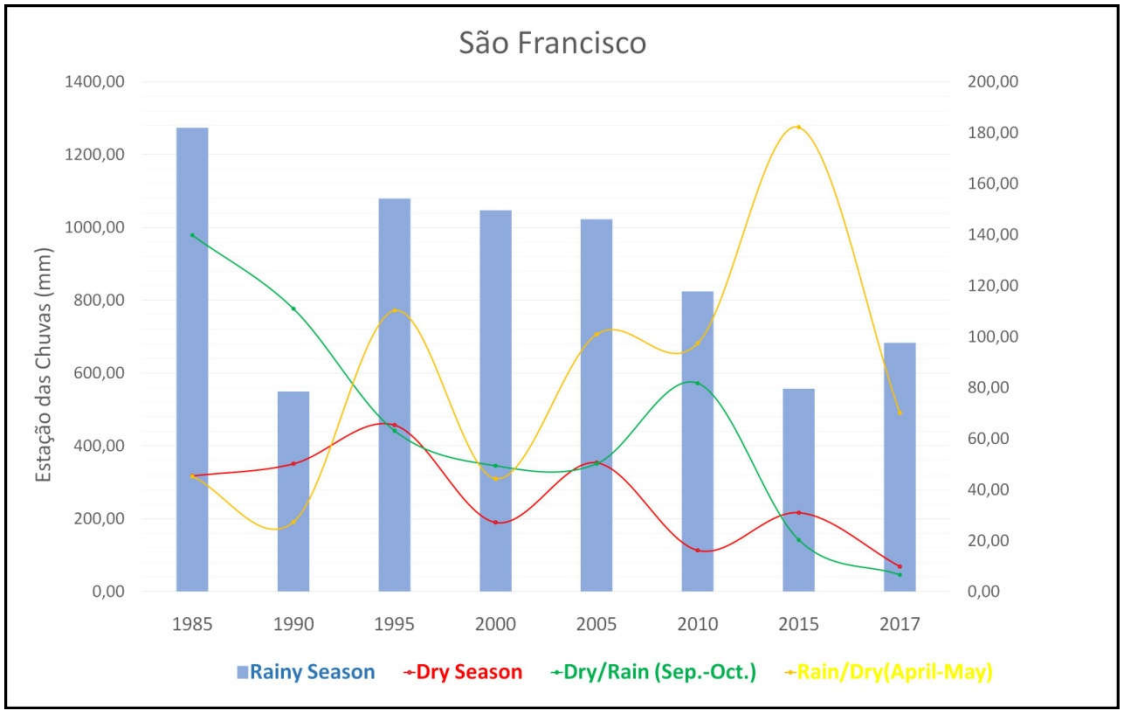


Gráfico 4.5 – RH do rio São Francisco (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019)

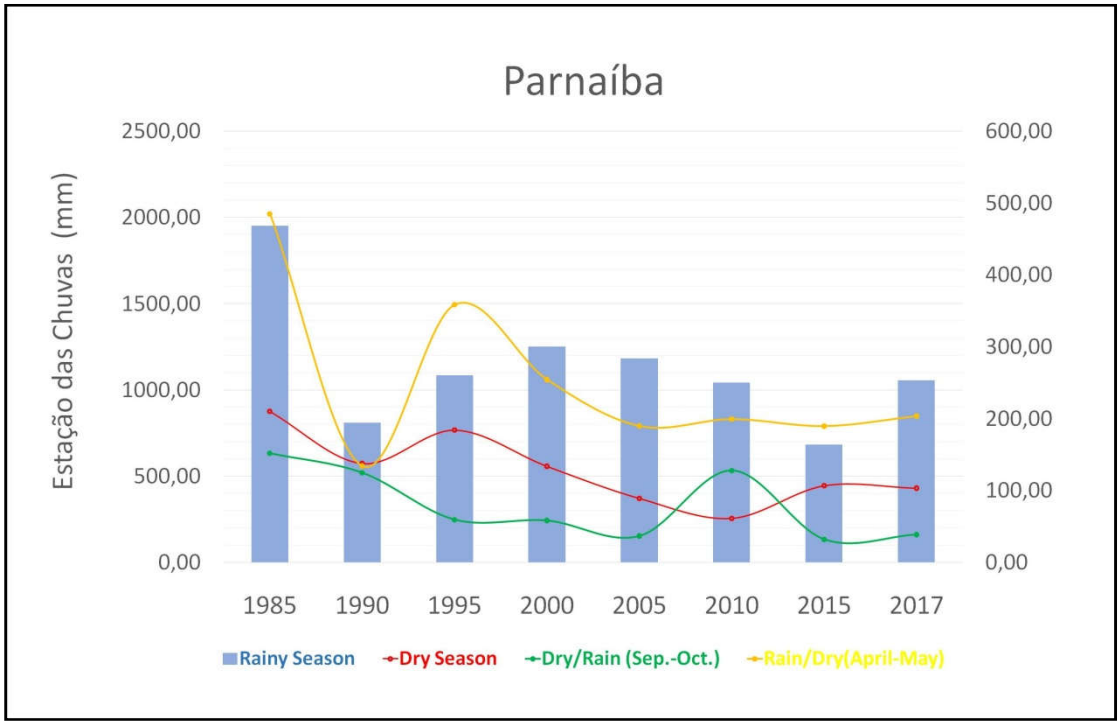


Gráfico 4.6 – RH do rio Parnaíba (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019)

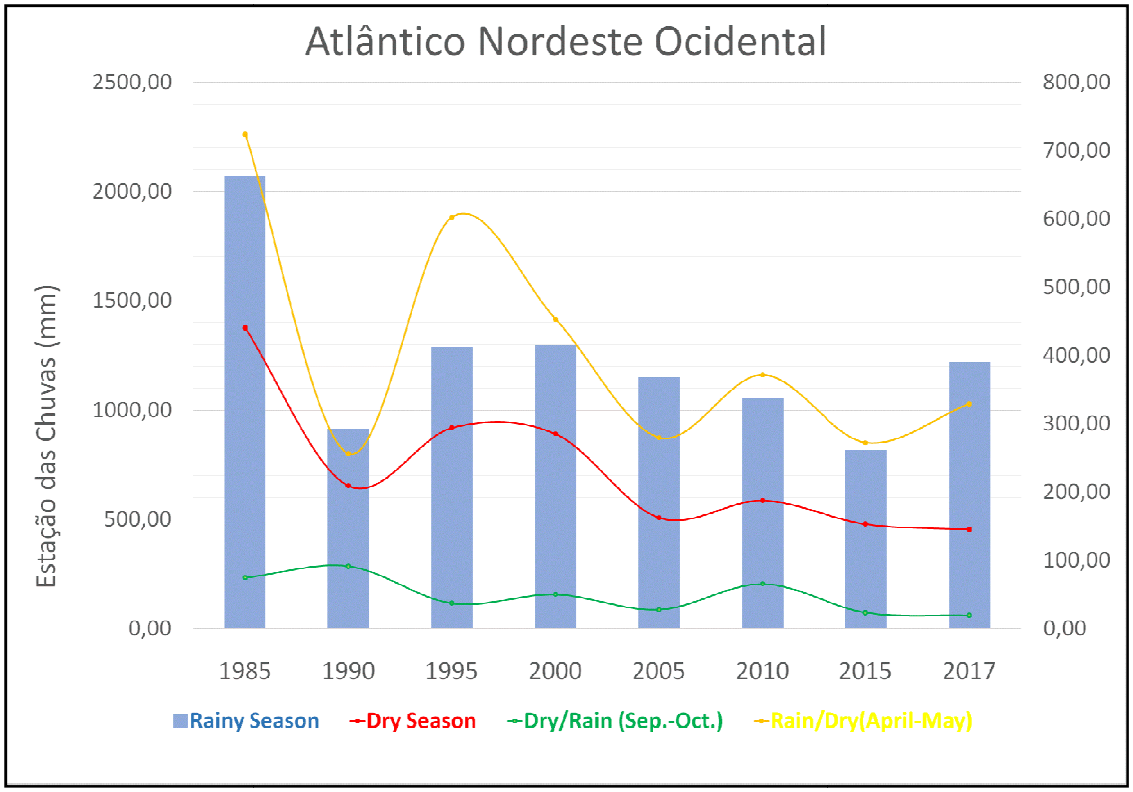


Gráfico 4.7 – RH do Atlântico Nordeste Ocidental (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019)

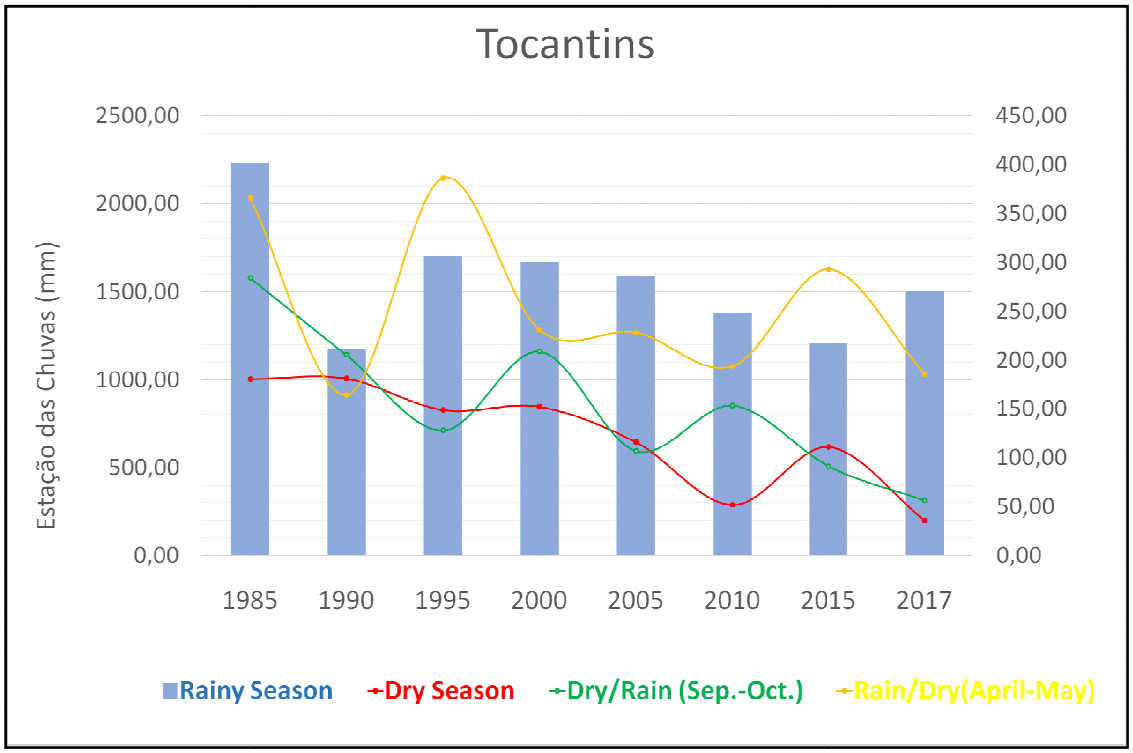


Gráfico 4.8 – RH do Tocantins-Araguaia (1985-2017): Precipitações médias na estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro) (Fonte: Autor, 2019)

Por último, no Gráfico 4.9, apresenta-se a série histórica de precipitação no MATOPIBA para os 33 anos (1985-2017) e a correspondente linha de tendência, tendo-se utilizado a média anual de precipitação das 83 estações pluviométricas analisadas. Conforme se pode verificar pela equação de regressão existe uma clara tendência de queda da precipitação, com uma redução média de 8,64% ao longo do período.

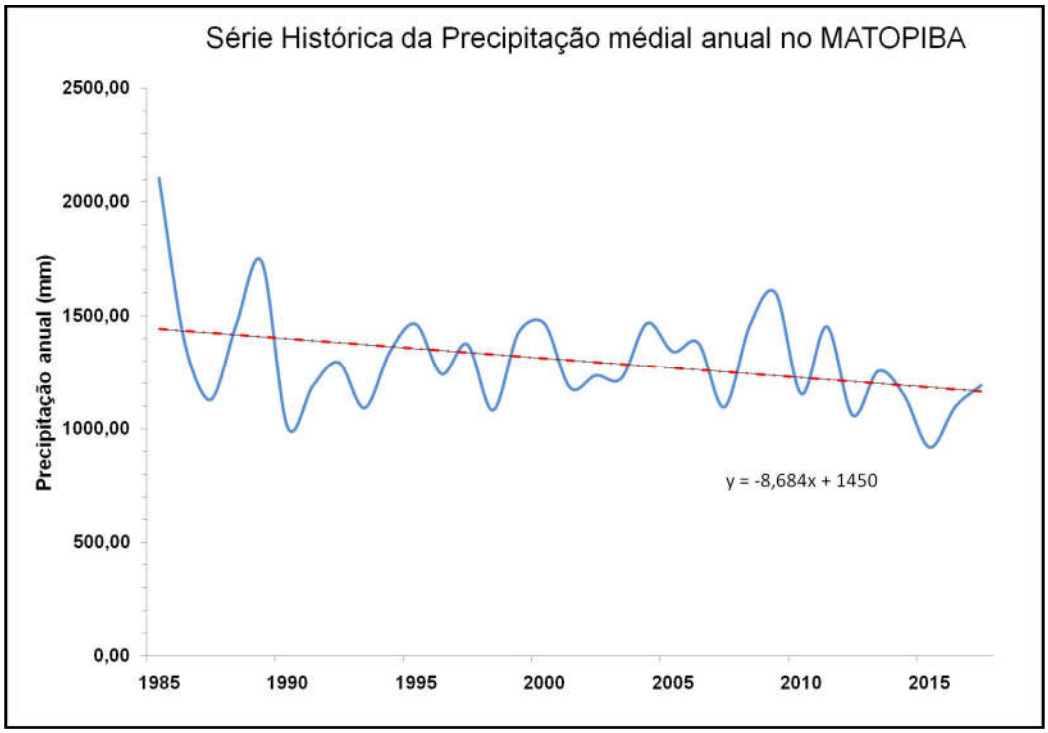


Gráfico 4.9 – Série Histórica de precipitação no MATOPIBA para os 33 anos (1985-2017) e a correspondente linha de tendência (Fonte: Autor, 2019)

Observa-se nesta série histórica de precipitação regional uma variabilidade interanual da precipitação apresentando baixos valores de precipitação nos anos de 1987 (1.125,86mm), 1990 (1.006,71mm) e 2015 (916,48mm), que podem estar associados ao fenômeno *El Niño* (MARENGO, J. A.; Dias, P.S., 2007).

Os fenômenos *El Niño* e *La Niña* sobre o Pacífico Equatorial e o gradiente meridional de anomalias de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) sobre o Atlântico Tropical modulam conjuntamente uma grande parte da variabilidade interanual do clima sobre a América do Sul. No Brasil, as regiões que apresentam sinais consistentes de *El Niño* são o Nordeste e a Amazônia (com tendência para secas) e o Sul do Brasil (com tendência para mais chuvas). As outras regiões não apresentam um sinal evidente de impactos na chuva, contudo durante o *El Niño* todo

o país tende a apresentar temperaturas atmosféricas mais elevadas, seja no período de verão ou no de inverno (MARENGO, J. A., 2007).

Os eventos de *El Niño* e *La Niña* têm uma tendência a se alternar a cada 3 a 7 anos. Porém, de um evento ao seguinte o intervalo pode mudar de 1 a 10 anos. O fenômeno ENOS pode interferir na precipitação em ciclos de variação de aproximadamente 28 anos, de tal modo que as maiores inundações ocorrem quando *La Niña* coincide com a fase úmida desse ciclo. Por sua vez, as piores secas ocorrem quando *El Niño* coincide com a fase seca do ciclo de longo prazo, como a seca de 1992 na Amazônia (INPE-CPTEC, 2011; DEBORTOLI, N. S., 2013; MARENGO, J. A., et al., 2006).

4.4 Teste de Mann-Kendall

Como se referiu no Capítulo 2, o teste não-paramétrico de Mann-Kendall é amplamente utilizado para detectar tendências monotônicas em séries de dados ambientais, dados climáticos ou dados hidrológicos (ZUO, D. et al., 2014). Na presente pesquisa foram realizados os testes estatísticos de tendência de Mann-Kendall, com nível de significância de 95%, para quatro épocas do ano no bioma Cerrado (MATOPIBA): estação das chuvas, estação seca, transição chuvas-seca e transição secas-chuva.

Na Tabela 4.1 estão resumidos os principais resultados deste teste estatístico não paramétrico.

Tabela 4.1 – Teste de tendência de precipitação de Mann-Kendall para quatro épocas do ano na região do MATOPIBA (83 estações pluviométricas): estação das chuvas, estação seca, transição chuvas-seca e transição secas-chuva e tendência significativa do teste (estações com valor p ≤ 0,05)

	Teste de Mann-Kendall (Tendência de precipitação)		**Tendência significativa do teste**
Época do ano	**Queda**	**Aumento**	**(Valor p ≤ 0,05)**
Estação das Chuvas	71	12	22
Estação da Seca	65	18	11
Transição Chuvas-Seca	56	27	1
Transição Seca-Chuvas	76	7	22

(Fonte: Autor, 2019)

Verifica-se que a tendência de queda de precipitação nas 83 estações pluviométricas, para qualquer uma das épocas do ano, é claramente superior à tendência de aumento de precipitação para o período 1985-2017, destacando-se neste cenário a estação das chuvas e a estação de transição seca-chuvas com tendências de queda em 71 e 76 estações, respetivamente.

A maior tendência de aumento de precipitação no período analisado registrou-se na época de transição chuvas-seca, com 27 estações.

Por sua vez, as épocas do ano com tendências estatisticamente mais expressivas (valor p ≤ 0,05) foram a estação das chuvas e a transição seca-chuvas com 22 estações cada (27%).

Nos quatro gráficos seguintes, Gráfico 4.10 a Gráfico 4.13, apresentam-se os valores de Z resultantes do teste de Mann-Kendall para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA, referentes às quatro épocas do ano estudadas, tendo por base as séries históricas de precipitação de 33 anos.

Na época das chuvas os valores de Z mais significativos situaram-se entre -4,01 (queda), na estação Goiatins (TO) - RH do Tocantins-Araguaia e +3,88 (aumento), na estação Grajaú – RH do Atlântico Nordeste Ocidental.

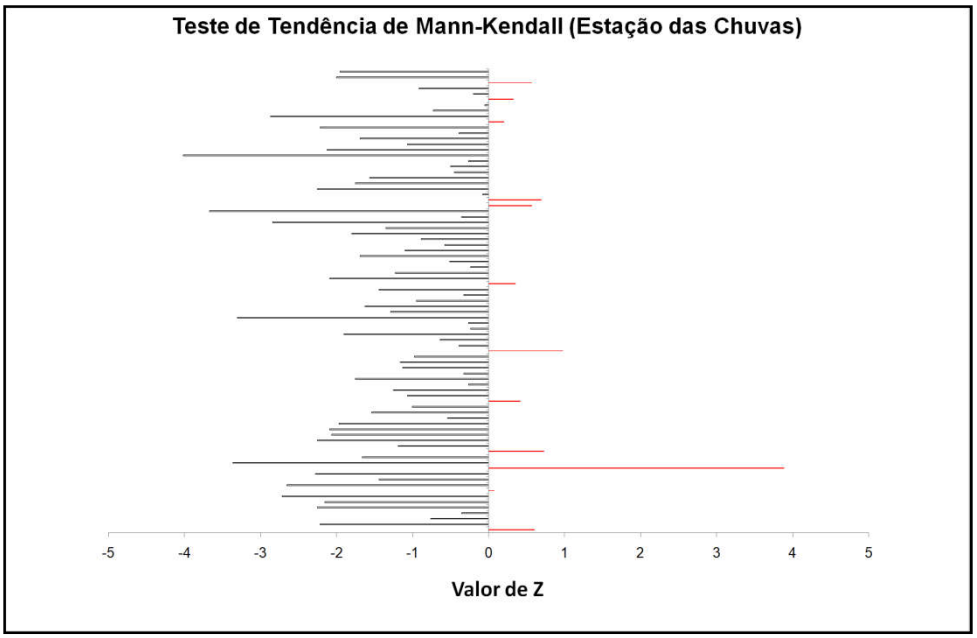


Gráfico 4.10 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a estação das chuvas. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019)

Na época de transição chuvas-seca, o único valor de Z significativo ($p \leq 0,05$) foi registrado na estação pluviométrica Jaborandi (BA) - RH do São Francisco, com o valor de +2,11, traduzindo tendência de aumento de precipitação.

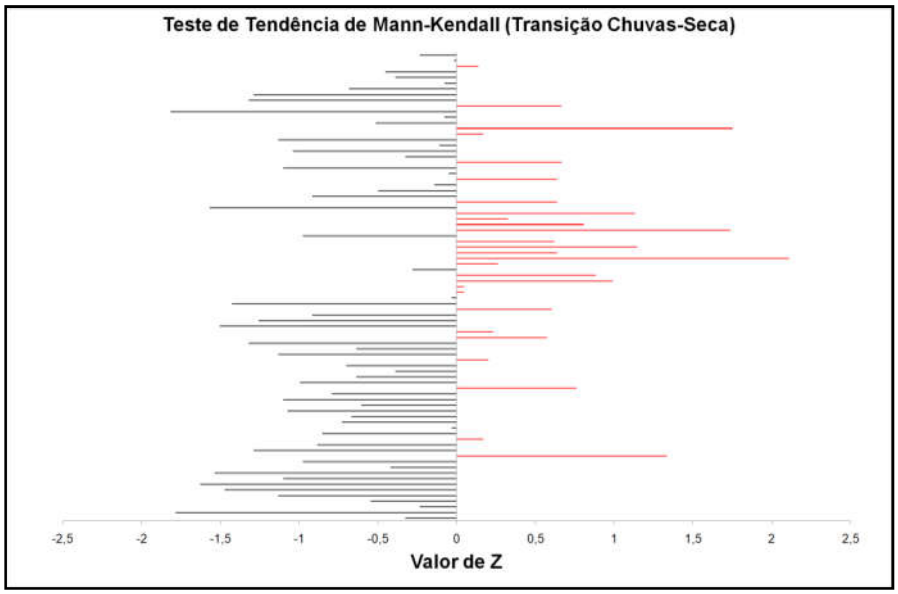


Gráfico 4.11 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a transição chuvas-seca. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019)

Quanto à época da seca os valores de Z mais significativos registraram-se entre -2,67 (queda), na estação Cantanhede (MA) - RH do Atlântico Nordeste Ocidental e -1,99 (queda), na estação Correntina (BA) – RH do São Francisco.

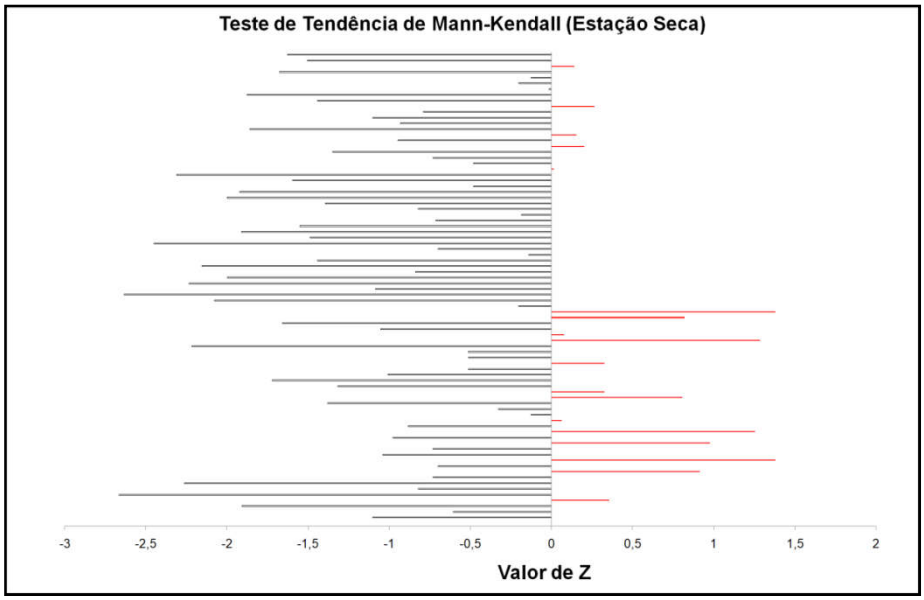


Gráfico 4.12 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a estação seca. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019)

Finalmente na época de transição seca-chuvas os valores de Z mais significativos registraram-se entre -1,98 (queda), na estação Rio Sono (TO) - RH do Tocantins-Araguaia e -3,70 (queda), na estação Arapoema (TO) – RH do Tocantins-Araguaia, conforme se pode observar no Gráfico 4.13.

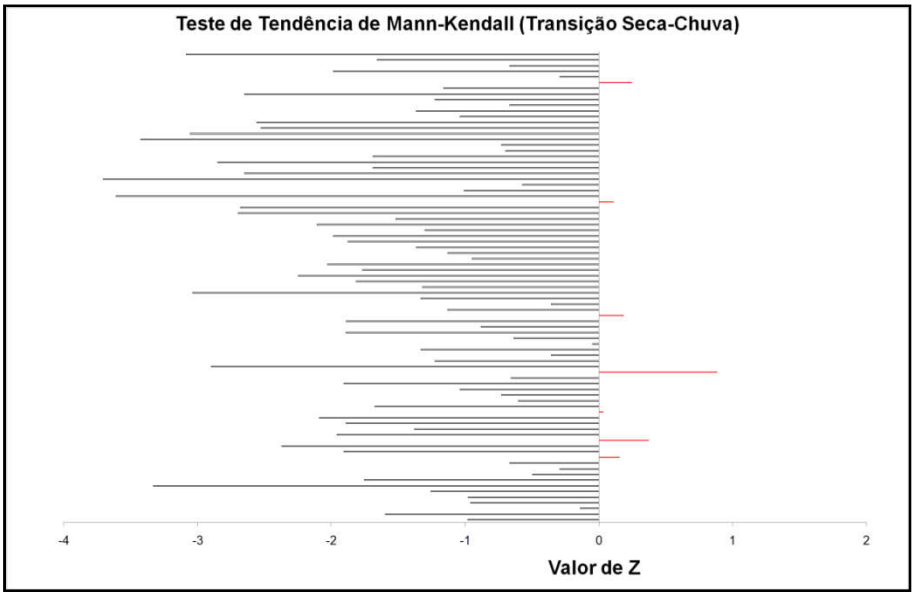


Gráfico 4.13 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (Valor de Z) para as 83 estações pluviométricas analisadas no MATOPIBA para a transição seca-chuvas. Série Histórica de precipitação (1985-2017) (Fonte: Autor, 2019)

No Apêndice B apresenta-se, para cada uma das 83 estações e para as 4 épocas anuais analisadas (estação das chuvas, estação seca e respetivas transições), os resultados em formato gráfico do teste de tendência de Mann-Kendall, realizado com recurso ao software R, versão 3.6.0, para sistema operativo Windows.

4.5 Teste de Theil-Sen

Por meio do teste de Theil-Sen procedeu-se à avaliação da magnitude de tendência (slope), ou de inclinação, de cada uma das 83 estações pluviométricas observadas, para as quatro séries históricas sazonais: estação das chuvas, estação seca, estação de transição chuvas-seca e estação de transição seca-chuvas.

De um modo geral, as quatro épocas do ano analisadas refletiram magnitudes de tendência de queda das precipitações para as 83 estações. Assim, para a

estação das chuvas a tendência de queda dos índices de precipitação foi de 86%, na época de transição chuva-seca foi de 67%, para a estação da seca a tendência de queda foi de 78% e, por fim, para a época de transição seca-chuva essa tendência de queda da precipitação atingiu 88%.

Nos quatro gráficos seguintes, Gráfico 4.14 a Gráfico 4.17, apresentam-se os índices de inclinação, em porcentagem, analisados separadamente para as quatro épocas do ano, com um nível de confiança de 95%.

As barras azuis, referentes a percentuais de magnitude positivos, traduzem aumento da precipitação em determinada estação. As barras vermelhas, por seu lado, se referem a percentuais de magnitude negativos, traduzindo a tendência de queda da precipitação na respetiva estação pluviométrica.

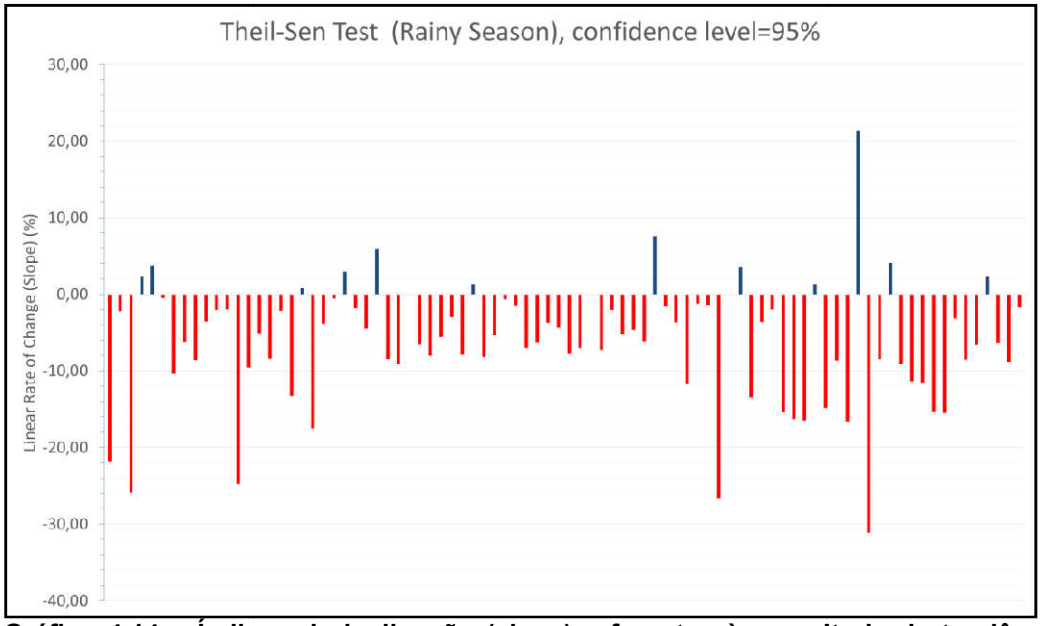


Gráfico 4.14 – Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação para a estação das chuvas, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)

Para a estação das chuvas a maior magnitude de queda foi registrada na estação Imperatriz (MA) – RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de -31,16% e a maior magnitude de tendência de aumento de precipitação foi registrada na estação pluviométrica Grajaú (MA) - RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de 21,42%.

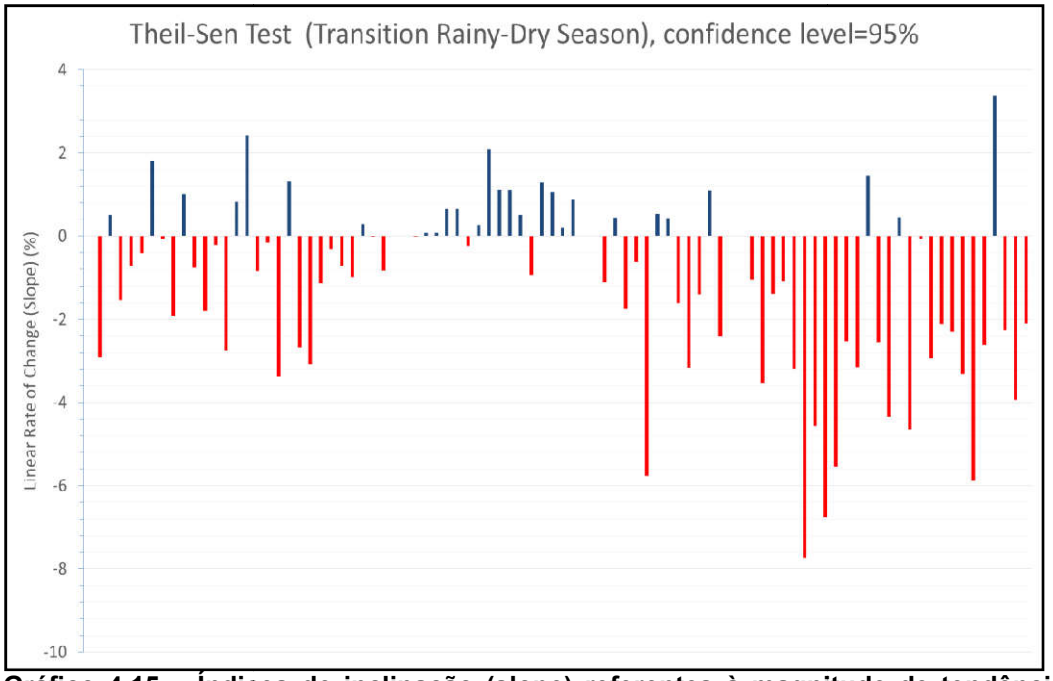


Gráfico 4.15 – Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação para a época de transição chuva-seca, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)

Para a época de transição chuva-seca a maior magnitude de tendência de queda foi registrada na estação Cantanhede (MA) – RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de -7,73% e a maior magnitude de tendência de aumento de precipitação foi registrada na estação pluviométrica São Mateus do Maranhão (MA) - RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de 3,36%.

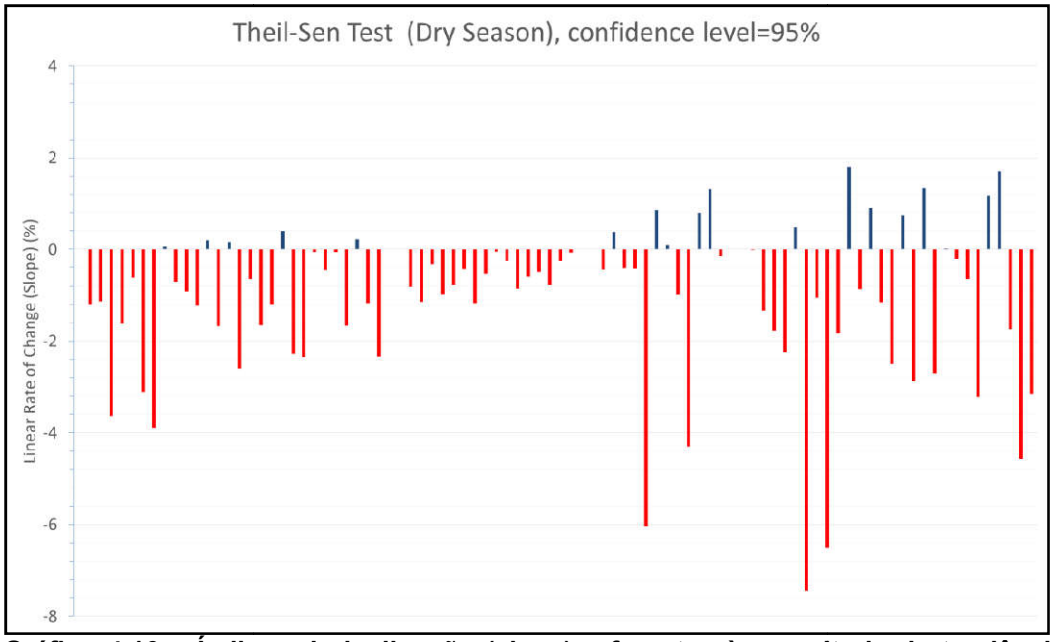


Gráfico 4.16 – Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação na estação da seca, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)

Para a estação da seca a maior magnitude de tendência de queda foi registrada na estação Cantanhede (MA) – RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de -7,44% e a maior magnitude de tendência de aumento de precipitação foi registrada na estação pluviométrica Coroata (MA) - RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de 1,80%.

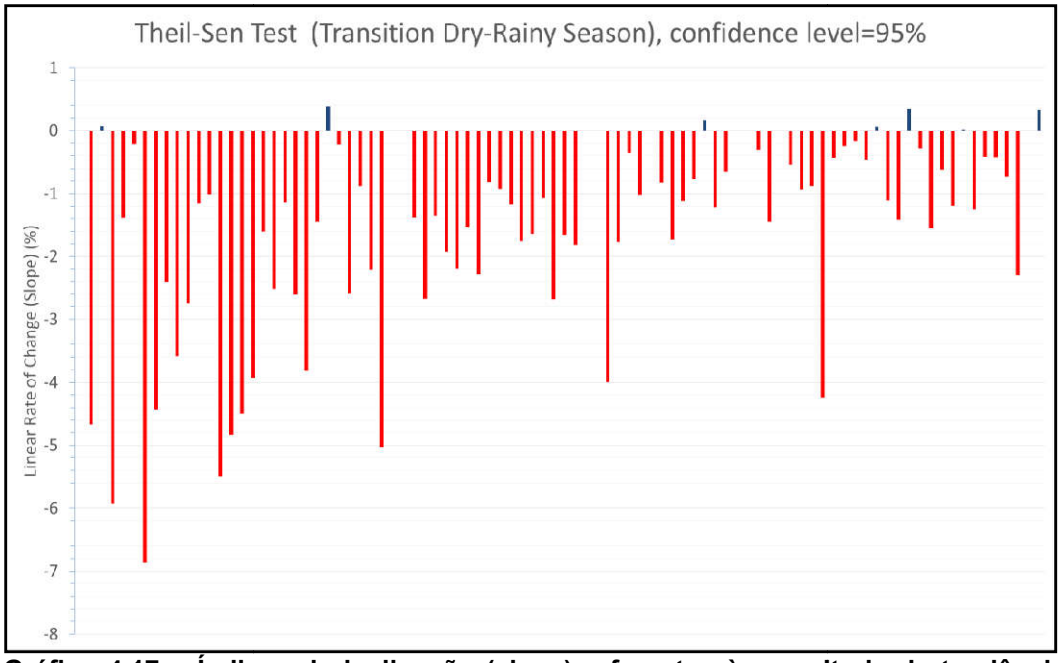


Gráfico 4.17 – Índices de inclinação (slope) referentes à magnitude de tendência (de queda e aumento) da precipitação na época de transição seca-chuva, das 83 estações pluviométricas observadas (Fonte: Autor, 2019)

Por fim, para a época de transição seca-chuva a maior magnitude de tendência de queda foi registrada na estação Arapoema (TO) – RH do Tocantins-Araguaia, com o valor de -6,86% e a maior magnitude de tendência de aumento de precipitação foi registrada na estação pluviométrica Pium (TO) - RH do Atlântico Nordeste Ocidental, com o valor de 0,39%.

4.6 Teste de Pettitt

O teste de ruptura de Pettitt indicou que, das 332 (83 x 4) séries históricas sazonais de precipitação analisadas, 17 apresentaram rupturas significativas ao longo do período de estudo (valor $p < 0,05$).

Entre as 17 séries históricas com ruptura significativa apenas uma registrou tendência de aumento da precipitação após ruptura, a estação pluviométrica Grajaú, situada na RH do Atlântico Nordeste Ocidental, sendo que esse comportamento de aumento da precipitação foi referente à época das chuvas. Todas as restantes séries históricas com rupturas significativas foram acompanhadas de tendência de queda da precipitação após ruptura, conforme se pode observar na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estações pluviométricas com ruptura significativa (p ≤ 0,05) e respetivo ano da ruptura para as quatro séries históricas sazonais de precipitação analisadas: estação das chuvas (outubro a abril), estação seca (maio a setembro), transição chuva-seca (abril/maio) e transição seca-chuva (setembro/outubro)

Série histórica sazonal	Região Hidrográfica	Estação pluviométrica	Ano da ruptura	Valor de p	Teste de Mann-Kendall Valor de Z	Tendência da série histórica	Teste de Pettitt Ruptura significativa (p ≤ 0,05)
Estação das Chuvas	Atlântico Nordeste Ocidental	GRAJAU	2001	0,000	3,89	Aumento da precipitação	sim
	Atlântico Nordeste Ocidental	IMPERATRIZ	1996	0,047	-3,36	Queda da precipitação	sim
	Parnaíba	TASSO FRAGOSO	2006	0,023	-3,30	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	ABREULANDIA	1992	0,047	-2,84	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	ARAGUACEMA	2007	0,013	-3,67	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	GOIATINS	1995	0,001	-4,01	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	PARAÍSO	2005	0,015	-2,87	Queda da precipitação	sim
Transição Chuvas-Seca	Nenhuma estação pluviométrica registrou ruptura significativa neste período						
Estação da Seca	São Francisco	CORIBE	1997	0,026	-2,232	Queda da precipitação	sim
Transição Seca-Chuvas	Atlântico Nordeste Ocidental	CAROLINA	2001	0,026	-3,33	Queda da precipitação	sim
	São Francisco	BARREIRAS	2001	0,015	-3,04	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	ARAGUACEMA	2003	0,009	-3,61	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	ARAPOEMA	2000	0,004	-3,70	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	BERNARDO SAYÃO	1994	0,039	-2,65	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	COLINAS DO TOCANTINS	1992	0,037	-2,85	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	GOIATINS	2000	0,004	-3,42	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	ITACAJÁ	1997	0,043	-3,05	Queda da precipitação	sim
	Tocantins-Araguaia	LIZARDA	2011	0,039	-2,56	Queda da precipitação	sim

(Fonte: Autor, 2019)

A RH que apresentou o maior número de estações com ruptura significativa foi a do Tocantins-Araguaia, com onze estações e a série histórica com maior número de rupturas foi a de transição seca-chuvas com nove estações. As rupturas significativas nas séries históricas analisadas ocorreram entre 1992 e 2011, sendo que 2001 foi o ano que registrou o maior número observado (3).

A série histórica referente à transição chuvas-seca foi a única que não registrou rupturas significativas em qualquer uma das 83 estações pluviométricas observadas.

No Apêndice C apresenta-se, para cada uma das 83 estações e para as 4 épocas anuais analisadas (estação das chuvas, estação seca e respetivas transições), os resultados em formato gráfico do teste de ruptura de Pettitt, realizado com recurso ao software R, versão 3.6.0, para sistema operativo Windows.

4.7 Correlação entre as séries históricas de precipitação e o desmatamento na região do MATOPIBA

Os resultados obtidos na análise estatística de tendência (teste não-paramétrico de Mann-Kendall) para asdiferentes épocas do ano (chuvas, seca, transição chuvas-seca e transição seca-chuvas), nas 83 estações pluviométricas selecionadas, apuraram tendências negativas mínimas de precipitação nas séries históricas de 67% (período de transição chuva-seca) e tendências negativas máximas de 88% (período de transição seca-chuva). Dito por outras palavras, no período analisado e para a maioria das estações pluviométricas, verificou-se uma ampla tendência de queda dos índices de precipitação em todas as épocas do ano.

Conforme descrito no Capítulo 2, para correlacionar as séries históricas de precipitação com as taxas anuais de desmatamento no MATOPIBA, consideraram-se áreas de abrangência (*buffer*) com centro geométrico formado pelas coordenadas (latitude e longitude) de cada estação pluviométrica selecionada, compondo-se áreas circulares de raio igual a 40 km. Cada *buffer* resultou em uma área aproximada de 5026 km^2.

Ao todo foram correlacionados os dados de mudança e uso do solo e de precipitação de 54 *buffers*/estações pluviométricas, conforme se apresenta nas Figuras 4.4 e 4.5, referentes respetivamente aos anos 1985 e 2017. Estes 54 *buffers* se distribuem, por sua vez, em áreas mais antropizadas e áreas menos antropizadas, conforme se pode observar na Tabela 4.3, seguindo os critérios estabelecidos no Capítulo 2.

A análise espacial de correlação que se pretendeu realizar nesta pesquisa teve como princípio uma caracterização e avaliação das variáveis precipitação e desmatamento a uma escala regional. Por esse motivo se escolheu um raio de 40km para definir cada uma das 54 áreas tampão (*buffer*) selecionadas.

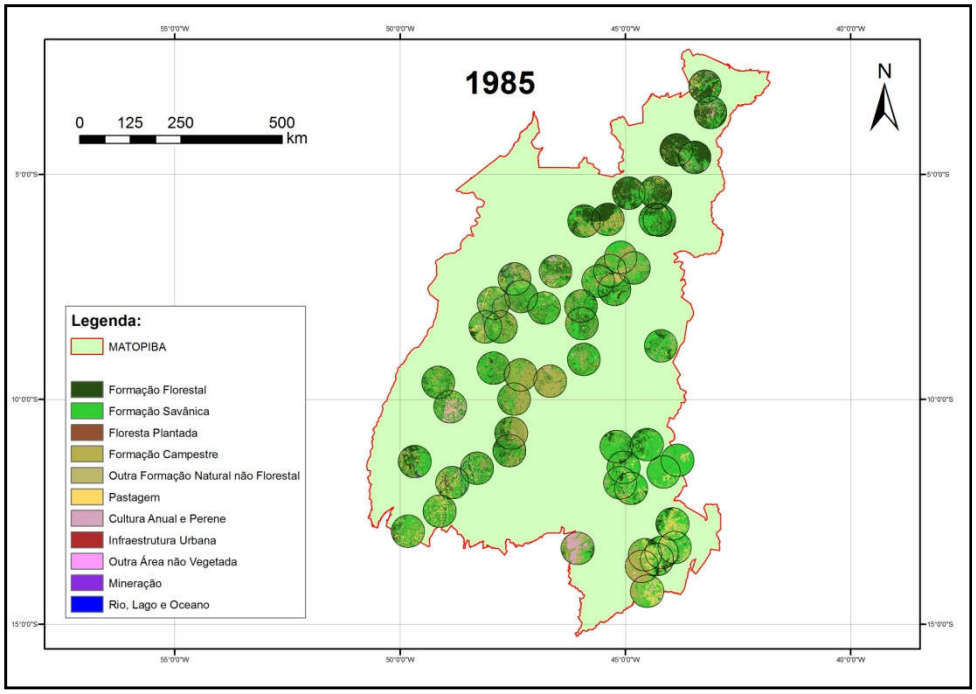


Figura4.4 – Distribuição espacial, para o ano 1985 (início da série histórica), dos 54 *buffers* selecionados para análise de correlação (Autor, 2019)

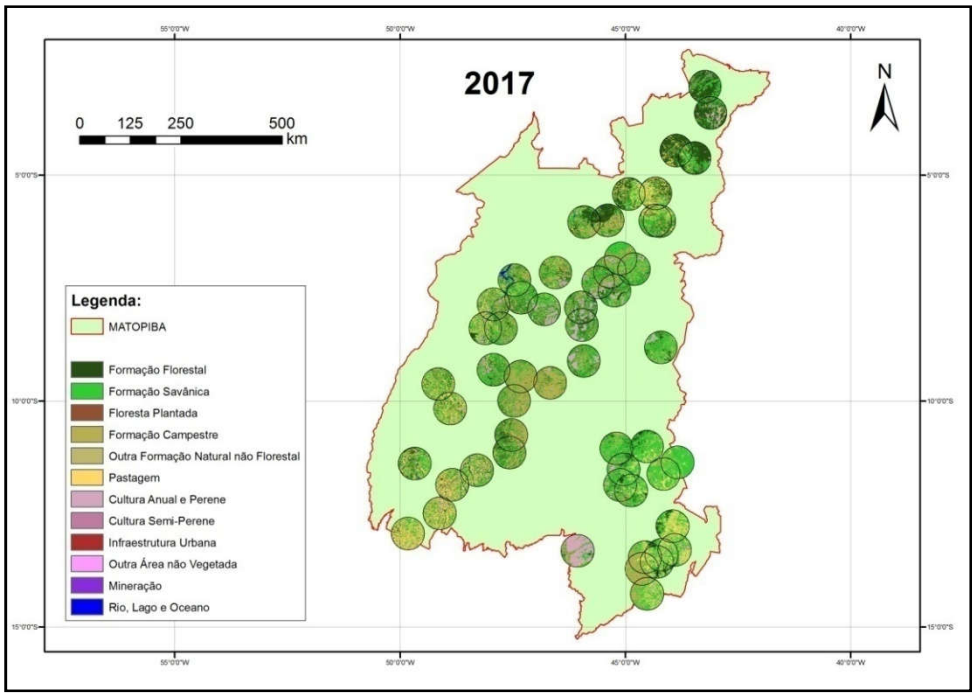


Figura 4.5 – Distribuição espacial, para o ano 2017 (fim da série histórica), dos 54 *buffers* selecionados para análise de correlação (Autor, 2019)

A análise visual dos mapas permite observar que em muitas situações os *buffers* selecionados se sobrepõem entre si. Esclarece-se que as classificações contidas em cada *buffer* foram quantificadas integralmente, não se descontando as áreas sobrepostas em relação a *buffers* interceptados.

Ou seja, para cada área de *buffer* (variável amostral com A=5.026,55 km^2) quantificaram-se as duas classificações definidas pelo Projeto Mapbiomas (formação florestal e formação savânica), repetindo-se a operação para os dois anos da análise - 1985 e 2017.

Em seguida, as áreas determinadas em km^2 foram convertidas em porcentagem, constituindo-se assim duas variáveis de mudança de uso e ocupação do solo para análise de correlação com as variáveis de tendência de precipitação.

Verifica-se pela Tabela 4.3 que os *buffers* mais antropizados apresentaram áreas de cobertura vegetal remanescentes em 2017 entre 21,18% (São Desidério) e 59,63% (Tasso Fragoso). Por sua vez, entre os *buffers* menos antropizados as áreas de cobertura vegetal remanescente em 2017 se situaram entre 60,00% (Carolina) e 89,82% (Barreirinhas).

Tabela 4.3 – *Buffers*/estações mais antropizadas (31), *buffers*/estações menos antropizadas (23) e os correspondentes percentuais de Cobertura Vegetal Remanescente em 2017

Status	Estação	Cobertura Vegetal Remanescente 2017	Status	Estação	Cobertura Vegetal Remanescente 2017
Mais Antropizada	Alto Parnaíba	24,16%	Menos Antropizada	Colinas	65,86%
Mais Antropizada	Campos Lindos	59,19%	Menos Antropizada	Mirador	65,92%
Mais Antropizada	Dueré	57,42%	Menos Antropizada	Barreirinhas	89,82%
Mais Antropizada	Itacajá	58,25%	Menos Antropizada	Aldeias Altas	88,19%
Mais Antropizada	Jaborandi	28,60%	Menos Antropizada	Barra do Corda	60,72%
Mais Antropizada	Mata Roma	26,26%	Menos Antropizada	Grajaú	64,52%
Mais Antropizada	Palmeirante	52,01%	Menos Antropizada	Pindorama do Tocantins	61,39%
Mais Antropizada	Riachão	54,10%	Menos Antropizada	Formosa do Rio Preto	76,44%
Mais Antropizada	Sambaíba	54,04%	Menos Antropizada	Mansidão	81,28%
Mais Antropizada	São Raimundo das Mangabeiras	58,98%	Menos Antropizada	Carolina	60,00%
Mais Antropizada	Tasso Fragoso	59,63%	Menos Antropizada	Goiatins	71,12%
Mais Antropizada	Tupiratins	56,01%	Menos Antropizada	Cristino Castro	74,12%
Mais Antropizada	São Desidério	21,18%	Menos Antropizada	São Félix de Balsas	61,59%
Mais Antropizada	Abreulândia	55,62%	Menos Antropizada	Angical	70,45%
Mais Antropizada	Paraíso do Tocantins	50,02%	Menos Antropizada	Balsas	60,57%
Mais Antropizada	São Valério	50,81%	Menos Antropizada	Barreiras	68,80%
Mais Antropizada	Gurupi	42,91%	Menos Antropizada	Codó	81,49%
Mais Antropizada	Alvorada	40,92%	Menos Antropizada	Cotegipe	67,26%
Mais Antropizada	Araguaçu	35,43%	Menos Antropizada	Pedro Afonso	68,08%
Mais Antropizada	Serra Dourada	52,33%	Menos Antropizada	Presidente Dutra	65,06%
Mais Antropizada	Correntina	42,80%	Menos Antropizada	Riachão das Neves	73,81%
Mais Antropizada	Lizarda	24,16%	Menos Antropizada	Ribeiro Gonçalves	62,09%
Mais Antropizada	Loreto	56,98%	Menos Antropizada	Santa Rita de Cássia	78,99%
Mais Antropizada	Cocos	47,22%			
Mais Antropizada	Santana	52,33%			
Mais Antropizada	Coribe	55,00%			
Mais Antropizada	Santa Maria da Vitória	58,78%		-	
Mais Antropizada	Graça Aranha	52,14%			
Mais Antropizada	Rio Sono	33,18%			
Mais Antropizada	Ponte Alta	52,38%			
Mais Antropizada	Novo Acordo	36,88%			

(Fonte: Autor, 2019)

Aplicada a metodologia descrita no Capítulo 2, resumiram-se na Tabela 4.4 os resultados mais relevantes, tanto da correlação aferida pelo teste de Pearson (os valores r) quanto dos correspondentes valores p ≤ 0,05, traduzindo sempre estes últimos correlações estatisticamente significativas. Os campos de p marcados com asterisco (*) referem-se a valores superiores a 0,05, ou seja, estatisticamente não significativos para efeitos de análise de correlação.

Tabela 4.4 – Resumo dos resultados da aplicação do teste de correlação de de Pearson para *buffers* em áreas mais antropizadas (31) e em áreas menos antropizadas (23). A vermelho estão destacados os valores de correlação de intensidade moderada e com valores de p ≤ 0,05

			Estação das Chuvas		Estação Seca		Transição Chuva-Seca		Transição Seca-Chuva		Série Histórica Anual	
Correlação	Buffer (Raio = 40 km; A = 5.026 km^2)	Nº Variáveis amostrais	(r) Pearson	valor p	(r) Pearson	valor p	(r) Pearson	valor p	(r) Pearson	valor p	(r) Pearson	valor p
Variação da Cobertura Vegetal % (1985-2017)	1) Estações Antropizadas	30	0,16	*	**0,37**	**0,039**	**0,53**	**0,002**	-0,32	*	0,23	*
	2) Estações Não Antropizadas	24	-0,06	*	**-0,57**	**0,004**	-0,32	*	0,08	*	-0,12	*
	1+2 (Juntas)	54	0,08	*	0,06	*	0,20	*	-0,19	*	0,10	*
Cobertura Vegetal Remanescente 2017 (%)	1) Estações Antropizadas	30	-0,06	*	**0,36**	**0,048**	0,04	*	0,14	*	0,05	*
	2) Estações Não Antropizadas	24	0,03	*	-0,26	*	0,01	*	0,35	*	-0,03	*
	1+2 (Juntas)	54	0,04	*	0,12	*	-0,07	*	0,16	*	0,07	*

(Fonte: Autor, 2019)

Podemos observar que os resultados mais expressivos de correlação entre a mudança de uso e ocupação do solo e as séries históricas de precipitação sazonais analisadas (destacados a vermelho na Tabela 4.4), tanto de valor *r* quanto de valores p estatisticamente significativos (p≤0,05), se concentraram essencialmente na estação seca, abrangendo os dois tipos de *buffers*, mais e menos antropizados.

Ainda em relação aos resultados obtidos na estação seca deve sublinhar-se que a direção de correlação (o sinal positivo ou direto e o sinal negativo ou inverso) foi totalmente coerente com o *buffer* selecionado.

Assim, para a estação seca, verificou-se que a correlação do desmatamento com a tendência nos índices de precipitação, em áreas mais antropizadas, obteve sempre sinal positivo (correlação direta) e em áreas menos antropizadas sempre sinal negativo (correlação inversa).

Relativamente à intensidade da correlação verificou-se que o valor *r* de Pearson mais elevado para a estação seca foi de -0,57, com valor de p igual a 0,004 (muito abaixo de 0,05), expressando assim uma correlação altamente significativa em termos estatísticos.

Em termos de interpretação esta correlação pode ser entendida da seguinte forma: para a estação seca, nas áreas menos antropizadas, quanto maior for o

percentual de área desmatada, menor é a tendência de queda nos índices de precipitação.

Ainda para a estação seca, mas agora em relação às áreas mais antropizadas, embora os valores de correlação obtidos no teste de Pearson tenham sido menores (*r*=0,37 para a Variação da Cobertura Vegetal entre 1985 e 2017 e *r*=0,36 para a Cobertura Vegetal Remanescente em 2017), os valores p calculados (respetivamente 0,039 e 0,048) continuaram a expressar uma significância estatística forte.

Neste caso, como se registra uma correlação direta, a interpretação dos resultados pode-se expressar da seguinte forma: na estação seca, para áreas mais antropizadas, quanto maior for a porcentagem de área desmatada, maior será a tendência de queda nos índices de precipitação. Dito por outras palavras, e para esta condição, o aumento do desmatamento sugere um impacto direto sobre as tendências de queda nos índices de precipitação.

A outra época do ano que se destacou na análise de correlação entre desmatamento e tendências de precipitação foi a de transição do período das chuvas para a estação seca, que ocorre habitualmente entre abril e maio. O valor de teste mais expressivo foi registrado na análise de correlação entre Variação de Cobertura Vegetal (1985 e 2017) e as tendências de precipitação em estações/*buffers* mais antropizadas.

A intensidade da correlação (*r* de Pearson) foi de 0,53, com valor de p igual 0,002 (muito abaixo de 0,05), expressando novamente uma significância estatística forte.

Relativamente a uma interpretação possível, esta correlação sugere que na época de transição do período das chuvas para a época da seca, para as áreas mais antropizadas, quanto maior for o percentual de área desmatada, maior será a tendência de queda nos índices de precipitação.

4.8 Discussão

Em primeiro lugar deve sublinhar-se a consistência nos resultados de tendência de precipitação obtidos na região do MATOPIBA, tanto nas séries históricas sazonais quanto na série histórica anual de precipitação média. Em todas as séries se confirma uma clara tendência de queda nos índices de precipitação para o período pesquisado de 33 anos (de 1985 a 2017).

A redução de 8,64% nos índices médios de precipitação para a série histórica anual de toda a região do MATOPIBA, calculada a partir das medições em 83 estações pluviométricas e as tendências de queda das precipitações observadas em todas as séries históricas sazonais, com percentuais de declínio de precipitação variando entre um mínimo de 67% (transição chuvas-seca) e um máximo de 88% (transição seca-chuvas), são reveladores da mudança nos padrões de chuva nesta região do Cerrado, que confina a leste com o bioma Caatinga e a norte e noroeste com o bioma Amazônia. Sublinhe-se ainda que a redução em 8,64% nos índices médios de precipitação em toda a região está em linha, em termos de ordem de grandeza, com os índices de queda de precipitação média analisados em modelo por Hoffmann e Jackson (2000) para as cinco regiões globais de savana. No estudo publicado por estes autores, o índice de queda de precipitação média anual, após a conversão de biomas de savana em áreas agrícolas, foi de 10%.

Por sua vez, os resultados de mudança de uso e ocupação do solo, tanto no bioma Cerrado como um todo, quanto na região do MATOPIBA em particular, expõem perdas líquidas sistemáticas e crescentes da vegetação nativa.

Como vimos, no caso do Cerrado, a taxa média de supressão de formação florestal e formação savânica entre 1985 e 2017 foi de 23%, acompanhada de um aumento da área para fins agropecuários de 51%. No caso do MATOPIBA, a taxa média de perda de cobertura vegetal nativa (floresta e savana) foi de 18% (94.000km^2), correspondente a um índice médio anual de desmatamento da ordem de 3% (2.900 km^2) em toda esta região de fronteira agrícola.

As modificações de fluxo de vapor de água (evaporação, ET, precipitação, etc.) devidas a mudanças no uso e ocupação do solo têm vindo a afetar o funcionamento da biosfera terrestre, influenciando o clima na sua escala local, regional e global. De acordo com Gordon, L. J., et al.(2005), globalmente, a redução líquida anual do fluxo de vapor água devida ao desmatamento de florestas nativas é da ordem de 3.000 km^3, aproximadamente 4% do fluxo total de vapor água da superfície terrestre.

As mudanças de uso e ocupação do solo têm um reconhecido efeito no sistema climático terrestre por meio de dois processos distintos: as modificações de fluxo dos GEE, como o CO_2, por alterações de armazenamento de carbono no solo e na vegetação (processos biogeoquímicos) e as variações no balanço de água e de energia, por meio de alterações no albedo, ET e rugosidade (processos biofísicos) (MAHMOOD et al, 2014; PERUGINI et al., 2017; KEENAN, T.F., et al., 2018). À escala global, e desde o período pré-industrial, os efeitos dos processos biogeoquímicos da mudança de cobertura do solo contribuíram com cerca de 30% das emissões de CO_2, sendo que o setor de emissões do solo e florestas como um todo, onde se incluem os fluxos de CH_4 e N_2O provenientes da agricultura, contribuiram com aproximadamente 24% do total de emissões antrópicas de GEE (IPCC, 2019).

Relativamente aos efeitos biofísicos, conforme já observado no Capitulo 3, o seu impacto líquido se associa a um aumento da temperatura local e global, bem como a alterações no balanço hídrico local, devido à influência dominante da ET e da rugosidade na superfície terrestre (PERUGINI et al., 2017; MAHMOOD et al 2014; IPCC, 2019).

No caso do bioma Cerrado, a conversão de áreas não antropizadas por monoculturas agrícolas tem o potencial de alterar os balanços energético e hídrico. O primeiro é modificado por meio do aumento do albedo e da temperatura superficial e o segundo pela diminuição da intercepção do dossel florestal, resultando em redução da ET (OLIVEIRA, P. T. S., et al., 2015).

Uma pesquisa publicada por Spera, S. A. et al. (2016), que abrangeu o bioma Cerrado, indicou tendências sazonais significativamente diferentes de ET em áreas não antropizadas e áreas compostas por vastas extensões de monoculturas agrícolas. Durante a estação das chuvas a ET não se alterou entre as duas áreas analisadas (antropizada e não antropizada). Contudo, as alterações nos valores de

ET na estação seca se relacionaram linearmente com mudanças na cobertura do solo: assim, a cada 10.000km^2 de Cerrado convertidos em terras agrícolas, a ET na estação seca foi reduzida em aproximadamente 1,7 km^3 (SPERA, S. A. et al., 2016).

Neste contexto, pode-se afirmar que os resultados obtidos nas cinco pesquisas citadas nos Capítulos 1 e 3, realizadas especificamente no bioma Cerrado ou em regiões de savana tropical, (HOFFMANN; JACKSON, 2000; CASAGRANDE; RECANATI; MELIÀ, 2018; OLIVEIRA, B. S., et al., 2018; GIAMBELLUCA, T. W., et al., 2009; CABRAL, O. M. R., et al., 2015; NÓBREGA, R. L. B., et al., 2017), corroboram as conclusões da pesquisa realizada por SPERA, S. A. et al. (2016).

Por sua vez, e relativamente à hipótese colocada na presente pesquisa, onde se afirma que existe uma correspondência entre as taxas anuais de desmatamento no MATOPIBA e as tendências anuais e sazonais de mudança nos regimes de precipitação desta fronteira agrícola, os resultados apresentados evidenciam significância estatística forte e correlação moderada entre variáveis (mudança de uso e ocupação do solo e as tendências de precipitação sazonal), tanto em áreas mais antropizadas quanto em áreas menos antropizadas.

Ademais, os resultados de correlação obtidos na presente pesquisa, em especial os alcançados na época de seca, evidenciam tendências muito semelhantes às observadas nos trabalhos de pesquisa publicados por Spera et al. (2016) revelando igualmente consistência e coerência com os resultados e conclusões apresentados nos restantes cinco trabalhos anteriormente citados, todos desenvolvidos no Cerrado.

Ainda que a intensidade das correlações testadas na região do MATOPIBA tenha demonstrado valores considerados moderados na escala de correlação de Pearson, é inequívoco que os ciclos hidrológicos de precipitação e ET são comprometidos pelo aquecimento global e local, e este, por sua vez, está associado a mudanças de uso e ocupação do solo (COE, M. T., et al, 2017).

No contexto das mudanças climáticas globais, em particular dos cenários pessimistas apresentados nos relatórios mais recentes do IPCC, e que tendem paulatinamente a se confirmar em futuros não muito distantes, a análise e compreensão dos resultados expostos na presente pesquisa conduzem naturalmente a discussão para outras esferas de atuação, como o do papel das organizações da sociedade civil, nacionais e internacionais, ligadas ao meio ambiente e às dinâmicas sociais, dos grandes produtores agrícolas e suas

respetivas cadeias de valor, dos legisladores depolíticas públicas, dos decisores políticos e dos órgãos de controle ambiental.

No início dos anos 2000, em resultado da forte expansão das culturas de soja, as organizações ambientais começaram a criticar os produtores de soja por possíveis riscos à integridade do bioma Amazônia. Como consequência, em julho de 2006 foi assinada a designada Moratória da Soja, que consistiu em um compromisso assumido pela Associação Brasileira deIndústrias de Óleo Vegetal (ABIOVE) e pela Associação Brasileira de Exportadores de Cereais (ANEC) de não comercializar ou financiar a soja produzida em áreas desmatadas no bioma Amazônia (ABIOVE, 2010).

Este documento, que representou uma inovação institucional em termos de governança ambiental no Brasil, foi aprimorada em 2017 com o lançamento da certificação socioambiental da cadeia da soja, promovida pela Associação Internacional de Soja Responsável (Roundtable on Responsible Soy (RTRS), na designação em inglês), fundamentando o chamado Manifesto do Cerrado (RTRS, 2017). Contudo, tem-se mantido um consistente e grave processo de conversão do bioma.

Como é referido por Strassburg et al. (2017), se permanecer no Cerrado o padrão de destruição observado entre 2003 e 2013, a devastação poderá implicar até 2050 em mudanças no funcionamento de todo o bioma, comprometendo a sua capacidade de oferecer serviços ecossistêmicos essenciais às populações locais e ao próprio agronegócio e a extinção de fauna e flora em uma ordem de grandeza nunca antes vista. Estas mudanças terão, consequentemente, impactos econômicos na cadeia produtiva associada ao agronegócio e também impactos sociais relacionados aos conflitos de utilização do recurso água.

Embora o intervalo de tempo da presente pesquisa termine em 2017 temos assistido no Brasil, desde o início de 2019, a um enfraquecimento operacional dos órgãos de fiscalização e controle ambientais, tanto na esfera estadual quanto federal (incluindo a extinção de secretarias responsáveis pelas agendas de clima e de extrativismo e desenvolvimento rural sustentável no Ministério do Meio Ambiente), a processos de legitimação de atividades ilegais por parte do poder executivo associados ao desmatamento de florestas nativas, tanto na Amazônia quanto no Cerrado, à invasão e ocupação de Terras Indígenas e Unidades de Conservação de uma forma generalizada, além de um grave contingenciamento orçamentário do

Ministério do Meio Ambiente e de outros organismos públicos vinculados ao setor ambiental. Diante do exposto, fica comprometido, e de modo praticamente irremediável, o alcance das metas assumidas pelo estado brasileiro sobre diminuição do desmatamento e, consequentemente, de redução das emissões de GEE para 2025 (37% abaixo dos níveis de 2005) e 2030 (43% abaixo dos níveis de 2005).

Uns dos impactos imediatos neste cenário atual de displicência e inoperância institucional são os dados mais recentes de desmatamento no Cerrado divulgados pelo INPE: entre agosto de 2018 e julho de 2019 o bioma perdeu mais 6.483 km^2, acompanhados de um aumento de 15% de destruição em Unidades de Conservação, em relação ao ano anterior.

Atualmente, muitos dos compromissos internacionais nos domínios da sustentabilidade se têm revelado pouco mais que declarações de intenção e apenas um reconhecimento de que as coisas precisam mudar, como fica muito evidente nos relatórios finais, pouco ambiciosos, das ultimas Conferências das Partes sobre Mudança do Clima. No caso do Brasil, como referem Rochedo, et al (2018), a redução do desmatamento seria, de longe, a opção de menor custo para assegurar a redução das emissões de GEE ratificadas no Acordo de Paris, contribuindo de forma responsável para a limitação do aquecimento global do planeta a 1,5ºC até ao final do século.

4.9 Considerações finais

A presente pesquisa teve como principal fundamento compreender as implicações das mudanças de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado e, a partir daí, contribuir para um melhor conhecimento sobre como essas mudanças podem estar afetando os padrões de precipitação de uma vasta região de expansão agrícola.

Embora as 54 estações pluviométricas selecionadas para definição das áreas tampão (*buffer*) sejam representativas em termos espaciais, constituam uma amostra robusta da região em estudo em termos de dados de precipitação e tenham seguido o critério previamente estabelecido de estarem integralmente contidas no

bioma Cerrado, pode-se observar esta opção como uma limitação da pesquisa pelo fato de não se abranger áreas de transição com os biomas Amazônia e Caatinga. Essa limitação suscita, contudo, a oportunidade de em trabalhos futuros, analisar a correspondência entre as variáveis desmatamento e precipitação em um contexto mais dinâmico e complexo de regimes anuais e sazonais de seca e de chuva.

Uma outra limitação da pesquisa, passível de resultar em uma oportunidade de trabalho em abordagens futuras sobre o tema, é a de separar as duas espécies de vegetação lenhosa analisadas (formação florestal e formação savânica), estabelecendo assim duas correlações distintas entre desmatamento e tendências de precipitação no bioma Cerrado.

Durante o desenvolvimento do trabalho, e particularmente nas fases de análise e consolidação de dados de precipitação e de correlação dos resultados, outras idéias foram surgindo tendo em vista uma possível continuidade e aprofundamento da pesquisa.

Assim, entre as idéias que surgiram ressalta-se a coleta de dados de temperaturas máximas e mínimas, com o propósito de correlacionar com os dados de precipitação e de mudança de uso e ocupação do solo, a verificação e validação dos dados de ET por meio de sensoriamento remoto, a realização de estudos hidrológicos de vazão e de nível nos rios principais das quatro RH estudadas, a modelação da relação chuva-vazão, considerando os cenários atuais de mudança de uso e ocupação dos solos e, por fim, mas não menos importante, a disponibilização dos produtos decorrentes da pesquisa aos organismos de gestão e de fiscalização e controle, tanto de meio ambiente quanto de recursos hídricos.

Para finalizar, sublinhe-se a necessidade de se avaliar em que medida os resultados obtidos, e também aqueles que foram citados em pequisas similares no bioma Cerrado, ainda se alinham com os objetivos estabelecidos pela Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC, Lei nº 12.187/2009) e seus Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas, em particular o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PPCerrado) e o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC).

Referências bibliográficas

Agência Nacional de Águas (ANA): SGH- Superintendência de Gestão da Rede hidrometeorológica. Diretrizes e análises recomendadas para a consistência de dados pluviométricos. Brasília: ANA, SGH, 2011. 18p.

Agência Nacional de Águas (ANA): Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada - Brasília: ANA, 2017. 86 p. il. ISBN 978-85-8210-051-6

BENINI, Rubens de Miranda (2017): Economia da Restauração Florestal. The Nature Conservancy, 2017. 136 p. ISBN: 978-85-60797-26-4

BONAN, G. B. (2008): Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests, 13 JUNE 2008 VOL 320 SCIENCE, Downloaded from http://science.sciencemag.org/ on March 28, 2019

BONAN, G. B. (2016): Forests, Climate, and PublicPolicy: A 500-YearInterdisciplinary Odyssey - Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2016. 47:97–121, Doi:10.1146/annurev-ecolsys-121415-032359

BURSZTYN, M. e RODRIGUES FILHO, S. (Orgs.), 2016: O CLIMA EM TRANSE vulnerabilidade da agricultura familiar - Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais, convênio FINEP/ Rede CLIMA 01.13.0353-00. http://redeclima.ccst.inpe.br/

BUSTAMANTE, MMC., Nardoto, GB., Pinto, AS., Resende, JCF.c, Takahashi, FSC. and Vieira, LCG. (2012): Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems - Braz. J. Biol., 2012, vol. 72, no. 3 (suppl.), p. 655-671

CABRAL, Osvaldo M.R., Humberto R. da Rocha , John H. Gash, Helber C. Freitas, Marcos A.V. Ligo (2015): Water and energy fluxes from a woodlandsavanna (cerrado) in southeast Brazil - http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.010

CANHOS, V. P. et al. Análise da vulnerabilidade da biodiversidade brasileira frente às mudanças climáticas globais, In: Parcerias estratégicas, 2008. n. 27, p. 113-139.

CASAGRANDE, E., Francesca Recanati, Paco Melià (2018): Assessing the Influence of Vegetation on the Water Budget of Tropical Areas - IFAC Papers On Line 51-5 (2018) 1–6

CQNUMC (2015): Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015 - FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 - ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT

COE, M. T., E. M. Latrubesse, M. E. Ferreira, M. L. Amsler (2011): The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil, Biogeochemistry - DOI 10.1007/s10533-011-9582-2

COE, Michael T., Paulo M. Brando, Linda A. Deegan, Marcia N. Macedo, Christopher Neill, and Divino V. Silvério (2017): The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future - Tropical Conservation Science Volume 10: 1–6, DOI: 10.1177/1940082917720671

COSTA, M.H. e FOLEY, J.A. Combined effects of deforestation and double atmospheric CO2 concentrations on the climate of amazonia. J. Clim. 12, 18–35, 2000.

CHRISTOFFERSEN, Bradley O. et al (2014): Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado - Agricultural and Forest Meteorology · June 2014 DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.02.008

CRITICAL ECOSSYSTEM PARTNERSHIP FUND (CEPF) (2017): Perfil do Ecossistema Hotspot de Biodiversidade do Cerrado, Versão Revisada, Fevereiro 2017

DEBORTOLI, Nathan S., Vincent Dubreuil, Beatriz Funatsu, Florian Delahaye, Carlos Henke de Oliveira, Saulo Rodrigues-Filho, Carlos Hiroo Saito, Raquel Fetter: Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010) - Climatic Change DOI 10.1007/s10584-015-1415-1

DEBORTOLI, Nathan S., Vincent Dubreuil, Marina Hirota, Saulo Rodrigues Filho, Diego P. Lindoso, et al.: Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. InternationalJournal of Climatology, Wiley, 2016, 37 (6), pp.2889-2900. ff10.1002/joc.4886ff. ffhalshs-01393069ff

DEBORTOLI, Nathan S.: O regime de chuvas na Amazônia Meridional e sua relação com o desmatamento. Brasília, 2013. 217 p. : il - Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável.Universidade de Brasília, Brasília.Em Cotutela com a Université Rennes 2.Laboratoire COSTEL, Climatet occupation du sol par télédétection

DECRETO Nº- 8.447, DE 6 DE MAIO DE 2015 – Dispõe sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba e a criação de seu Comitê Gestor. ISSN 1677-7042 – DiárioOficial da União (Seção 1), Nº 85, quinta-feira, 7 demaio de 2015

DUBREUIL, V.; Debortoli, N.; Funatsu, B.;· Nédélec, V.; Durieux, L.: Impact of land-cover change in the Southern Amazonia climate: a case study for the region of Alta Floresta, Mato Grosso, Brazil - Environ Monit AssessDOI 10.1007/s10661-011-2006-x (2011)

KAUFFMAN, J. BOONE e CASTRO, ELMAR ANDRADE,(1998): Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire - *Journal of Tropical Ecology* (1998) 14:263–283

FAO. 2018. *Climate change for forest policy-makers – An approach for integrating climate change into national forest policy in support of sustainable forest management – Version 2.0*. FAO Forestry Paper no.181. Rome, 68 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

FEDERICI, Sandro, Donna Lee, Martin Herold (2016): Forest Mitigation: A Permanent Contribution to the Paris Agreement? - October 2017, WORKING PAPER

FIELD, Christopher B. and RAUPACH, Michael R. (editors): The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world. Island Press, 2004 - ISBN 1-55963-526-6 (cloth: alk. paper) - ISBN 1-55963-527-4

FOLEY, Jonathan A., et al., 2005: Global Consequences of Land Use - *Science* **309**, 570 (2005); DOI: 10.1126/science.1111772

GIANNINI, Alessandra, BIASUTI, Michela, VERSTRAETE, Michel M. (2010): A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change - Global and Planetary Change 64 (2008) 119–128

GIZ (2019): Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos: Desafios e Oportunidades para o Brasil. Sumário para Tomadores de Decisão. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammnarbelt (GIZ) Gmbh. Brasília/DF: 2019. 56p

GIAMBELLUCA,Thomas W., Fabian G. Scholz, Sandra J. Bucci, Frederick C. Meinzer, Guillermo Goldstein, William A. Hoffmann, Augusto C. Franco, Martin P. Buchert (2009): Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density - Agricultural and Forest Meteorology 149 (2009) 1365-1376

GORDON, Line J., STEFFEN, Will, JONSSON, Bror F., FOLKE, Carl, FALKENMARK, Malin and JOHANNESSEN, Åse (2005): Human modification of global water vapor flowsfrom the land surface - 7612–7617 PNAS May 24, 2005 vol. 102 no. 21

GRACE, John, SAN JOSÉ, José, MEIR, Patrick, MIRANDA, Heloisa S. and MONTES, Ruben A. (2006): Productivity and carbon fluxes of tropical savannas - Journal of Biogeography (J. Biogeogr.) (2006) 33, 387–400

GUILLERMO SARMIENTO, GUILLERMO GOLDSTEIN and FREDERICK MEINZER (1985): ADAPTIVE STRATEGIES OF WOODY SPECIES INNEOTROPICAL SAVANNAS - Biol.Rev.(1985).60.pp. 315-355

HAUKE J, KOSSOWSKI T. 2011. Comparison of Values of Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients on theSame Sets of Data. Quaestiones Geographicae 30:87–93. doi: 10.2478/v10117-011-0021-1

HANAN, Niall P. and Michael J. Hill (Orgs.) (2012): Savannas in a Changing Earth System. The NASA Terrestrial Ecology Tree-Grass Project - The NASA Terrestrial Ecology Tree-Grass Project Outline for a Coordinated NASA Field Campaign for Earth Observation and Modeling in Mixed Tree-Grass Ecosystems

HERNÁNDEZ-MORCILLO, M; PLIENINGER, T, BIELING, C. (2013): An empirical review of cultural ecosystem service indicators; Ecological Indicators journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolind, http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.013

HOFFMANN, W. A.; JACKSON, R. B. Vegetation Climate Feedbacks in the Conversion of Tropical Savanna to Grassland. American Meteorological Society, v. 13, n. 9, p. 1593- 1602, 2000. ISSN 0894-8755.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2012) - Manual Técnico da Vegetação Brasileira, Sistema fitogeográfico - Inventário das formações florestais e campestres ISSN 0103-9598 Manuais técnicos em geociências

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2019: Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystem (SRCCL)

JOLY, C.A.; SCARANO, F.R.; SEIXAS, C.S.; METZGER, J.P.; OMETTO, J.P.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PADGURSCHI, M.C.G.; PIRES, A.P.F.; CASTRO, P.F.D.; GADDA, T.; TOLEDO, P. (Eds.) (2019). 1° Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos. Editora Cubo, São Carlos pp.351.https://doi.org/10.4322/978-85-60064-88-5

KEENAN, T.F.;WILLIAMS, C.A., 2018: The Terrestrial Carbon Sink - *Annual Review of Environment and Resources - Vol. 43:219-243 (Volume publication date October 2018) First published as a Review in Advance on September 26, 2018* *https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204*

KLINK, C. A.: Policy Intervention in the Cerrado Savannas of Brazil: Changes in Land Use and Effects on Conservation. In: CONSORTE –MCCREA, A. G.; SANTOS, E. F. (Orgs.) Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives. Editora CRC Press, 2013. 322p

LAHSEN, Myanna, BUSTAMANTE, Mercedes M. C. &DALLA-NORA, Eloi L. (2016) Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril, Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 58:6, 4-15, DOI: 10.1080/00139157.2016.1229537

LAWRENCE D.; VANDECARK. (2014): Effects of tropical deforestation on climate and agriculture - NATURE CLIMATE CHANGE | VOL 5 | JANUARY 2015 | www.nature.com/natureclimatechange - PUBLISHED ONLINE: 18 DECEMBER 2014 | DOI: 10.1038/NCLIMATE2430

LEI Nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Presidência da República - Casa Civil - Subchefia para Assuntos Jurídicos. (http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm)

LENZA, E.; KLINK, C. A. (2006): Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um cerrado sentido restrito de Brasília, DF - Revista Brasil. Bot., V.29, n.4, p.627-638, out.-dez. 2006

LOVEJOY,T. E. NOBRE, C.: Amazon Tipping Point. *Sci. Adv.* 4, eaat2340 (2018)

MAGRIN, G.O., MARENGO, J.A., BOULANGER, J.-P., BUCKERIDGE, M.S., CASTELLANOS, E., POVEDA, G., SCARANO, F.R. and VICUÑA, S. (2014): Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.

MAHMOOD, R.; Pielke, R. A.; Hubbard, K. G.; NIYOGI, D.; DIRMEYER, P. A.; MCALPINE, C.; CARLETON, A. M.; HALE, R.; GAMEDA, S.; BELTR'AN-PRZEKURAT, A.; BAKER, B.; MCNIDER, R.; LEGATES, D. R.; SHEPHERD, M. DU, J.; BLENKEN, P. D.; FRAUENFELD, O. W.; NAIR, U. S. FALL, S. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. International Journal of Climatology, v. 34, p. 929–953, 2014.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola (2018): PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIOBrasil 2017/18 a 2027/28Projeções de Longo Prazo - 9ª edição. Ano 2018

MapBiomas Project - Collection 3.0 of the Annual Land Use Land CoverMaps of Brazil, accessed on 12.02.2019 through the link:http://mapbiomas.org/pages/estatisticas (*MapBiomas Project - is a multi-institutional initiative to generate annual land use land cover maps based on automatic classification processes applied to satellite images. The complete project description can be found at http://mapbiomas.org.)*

Mapbiomas (2019a): MapBiomas General "Handbook" Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Collection4 Version 2.0, December, 2019

Mapbiomas (2019b): Cerrado – Appendix Collection 4 Version 1

MARENGO, J. A., Pedro L. Silva Dias (2006): Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hÍdricos, in "Águas doces no Brasil", Aldo da C. Rebouças, Benedito Braga, José Galiza Tundizi (Orgs.). ISBN: 85-86303-41-0

MARENGO, J. A.: Caracterização do Clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados de Modelos Globais de Clima do IPCC. INPE, 2007. 185p.

MARENGO, J. A.: Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI / José A. Marengo – Brasília: MMA, 2007. 2a edição. 212 p.: il. color ; 21 cm. (Série Biodiversidade, v. 26) Bibliografia ISBN 85-7738-038-6

MARENGO, J. A., Tercio Ambrizzi, Rosmeri P. da Rocha, Lincoln M. Alves, Santiago V. Cuadra, Maria C. Valverde, Roger R. Torres, Daniel C. Santos, Simone E. T. Ferraz (2009): Future change of climate in South America in the late twenty-firstcentury: intercomparison of scenarios from three regional climatemodels - Clim Dyn (2010) 35:1073–1097DOI 10.1007/s00382-009-0721-6

MENDES, T. de A. Desenvolvimento sustentável, política e gestão da mudança global do clima: sinergias e contradições brasileiras. 2014.672 f., Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília.

Ministério do Meio Ambiente (MMA): PPCerrado – Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado- PLANO OPERATIVO DO PPCERRADO 2016-2020, 3ª fase do PPCerrado (2016-2020) (2016)

Ministério do Meio Ambiente (MMA): Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas: Cerrado. Brasília: MMA, 2011. 200 p.

Ministério do Meio Ambiente (MMA): PPCerrado – Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado: 2ª fase (2014-2015). Brasília: DF, 2014. 132 p.

Ministério do Meio Ambiente (MMA) - Portaria nº 150 de 10 de maio de 2016 / Ministério do Meio Ambiente - Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) – Estratégia Geral, Volume I – Brasília: MMA, 2016

Ministério do Meio Ambiente (MMA) - Portaria nº 150 de 10 de maio de 2016 / Ministério do Meio Ambiente - Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) - Estratégias Setoriais e Temáticas, Volume II – Brasília: MMA, 2016

NOBRE, C. A.; BORMA, L. S. (2009): Tipping points for the Amazon Forest - Current Opinion in Environmental Sustainability 2009, 1:28–36, DOI 10.1016/j.cosust.2009.07.003

NÓBREGA, RLB, Guzha AC, Torres GN,Kovacs K, Lamparter G, Amorim RSS, et al. (2017): Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties,evapotranspiration and streamflow on theAmazonian agricultural frontier. PLoS ONE 12(6):e0179414. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414

NOOJIPADY, P.; MORTON, D. C.; MACEDO, D. C.; HUANG, C.; GIBBS, H. K.; BOLFE, E. L. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. Environmental Research Letters, v.12, p. 1-11, 2017.

OLIVEIRA, B. S., Elisabete Caria Moraes, Marcos Carrasco-Benavides, Gabriel Bertani and Guilherme Augusto Verola Mataveli (2018): Improved Albedo Estimates Implemented in the METRIC Model for Modeling Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration over Agricultural and Natural Areas in the Brazilian Cerrado - *Remote Sens.* 2018, *10*, 1181; doi:10.3390/rs10081181

OLIVEIRA, R. S.; BEZERRA, L.; DAVIDSON, E. A.; PINTO, F.; KLINK, C. A.; NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. Functional Ecology, v. 19, p. 574 – 581, 2005

OLIVEIRA, P. T. S., E. Wendland, M. A. Nearing, R. L. Scott, R. Rosolem, and H. R. da Rocha (2015): The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado - Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 2899–2910, 2015www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2899/2015/doi:10.5194/hess-19-2899-2015

OLIVEIRA, Paulo S. and MARQUIS, Robert J. (Orgs.) (2002): The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropicalsavanna /.p. cm.Includes bibliographical references.ISBN 0-231-12042-7 (cloth : alk. paper)—ISBN 0-231-12043-5(pbk. : alk. paper)

OVERBECK, Gerhard E., Eduardo Velez-Martin, Fabio R. Scarano,Thomas M. Lewinsohn, Carlos R. Fonseca, Sebastian T. Meyer, SandraC. Muller, Paula Ceotto, Letıcia Dadalt, Giselda Durigan, GisleneGanade, Martin M. Gossner, Demetrio L. Guadagnin, Katrin Lorenzen,Claudia M. Jacobi, Wolfgang W. Weisser and Valerio D. Pillar (2015): “Conservation in Brazil needs to includenon-forest ecosystems” - Diversity and Distributions, (Diversity Distrib.) (2015) 21, 1455–1460 - DOI: 10.1111/ddi.12380

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M. (Org.). Base científica das mudanças climáticas: Grupo de Trabalho 1 - Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014. 464p.

Plano ABC (2012): Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão decarbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS, 2012.173 p.ISBN 978-85-7991-062-0

PERUGINI, L.; CAPORASO, L.; MARCONI, S.; CESCATTI, A.; QUESADA, B.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; HOUSE, J. I.; ARNETH, A. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. Environmental Research Letters, v.12, p. 1-13, 2017.

POHLERT, T. Non-parametric trend tests and change-point detection. 2016.

POUSA, Raphael, Marcos Heil Costa, Fernando Martins Pimenta, Vitor Cunha Fontes, Vinícius Fonseca Anício de Brito, Marina Castro: Climate Change and Intense Irrigation Growth in Western Bahia, Brazil: The Urgent Need for Hydroclimatic Monitoring - DOI: 10.3390/w11050933

ROCHEDO, Pedro R. R., SOARES-FILHO, Britaldo, SCHAEFFER, Roberto, VIOLA, Eduardo, SZKLO, Alexandre, LUCENA, André F. P., KOBERLE, Alexandre, DAVIS, Juliana Leroy, RAJÃO, Raoni and RATHMANN, Regis (2018): The threat of political bargaining to climatemitigation in Brazil, Nature Climate Change - https://doi.org/10.1038/s41558-018-0213-y

RIBEIRO, J. F.; Walter, B. M. T. Fitosionomias do Bioma Cerrado in Sano, S. M.; Almeida S. P. (ed.). Cerrado: ambiente e flora. Brasília, Embrapa Cerrados, 1998. P87-166

RICE, J., Rodríguez Osuna., V., Zaccagnini, M. E., Bennet, E. Buddo, D., Estrada-Carmona, N., Garbach, K., Vogt, N., and Barral, M. P. Chapter 1: Setting the scene. In IPBES (2018): The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for the Americas. Rice, J., Seixas, C. S., Zaccagnini, M. E., Bedoya-Gaitán, M., and Valderrama, N. (Eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, pp. 1-774

RICHARDSON, Andrew D., Trevor F. KEENAN, Mirco Migliavacca, Youngryel Ryu, Oliver Sonnentag, Michael Toomey (2013): Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system - Agricultural and Forest Meteorology 169 (2013) 156–173, http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012

RIO, S. del, L. HERRERO, R. FRAILEB and A. PENAS (2011): Spatial distribution of recent rainfall trends in Spain(1961–2006) - INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY *Int. J. Climatol.* 31: 656–667 (2011), DOI: 10.1002/joc.2111

RODRIGUES FILHO, S.; SANTOS, A. S. Um Futuro Incerto. Mudanças Climáticas e a Vida no Planeta. 1. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2011. v. 1. 112p.

SACHS, I (2009): Caminhos para o desenvolvimento sustentável, 96p. Garamond, 2009 – ISBN: 85-86435-35-X

SALATI, E.; MARQUES, J. ; MOLION, L C.B. . Origem e Distribuição das Chuvas na Amazônia. Interciência, v. 3(4), p. 200-206, 1978.

SANTOS, A. J. B., G. T. D. A. SILVA, H. S. MIRANDA, A. C. MIRANDA and J. LLOYD (2003): Effects of fire on surface carbon, energy and water vapourfluxes over *campo sujo* savanna in central Brazil – *Functional Ecology* 2003 **17**, 711–719

SAMPAIO, G.; Dias, P. Leite da Silva: Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima - REVISTA USP • São Paulo • n. 103 • P. 41-54 • (2014)

SEN, Z., 2012. Innovative trend analysis methodology. J. Hydrol. Eng. 17 (9), 1042–1046

SOARES-FILHO, Britaldo, Raoni Rajão, Marcia Macedo, Arnaldo Carneiro, William Costa, Michael Coe, Hermann Rodrigues, Ane Alencar (2014): Cracking Brazil's Forest Code – Policy Forum, SCIENCE VOL 344 25 APRIL 2014

SOUTHWORTH, J., ZHU, L., BUNTING, E., RYAN, S.J., HERRERO, H., WAYLEN, P.R. and HILL, M.J. (2015): Changes in vegetation persistence across global savanna landscapes, 1982–2010, Journal of Land Use Science, 2015 http://dx.doi.org/10.1080/1747423X.2015.1071439

SPERA, STEPHANIE A. GILLIAN L . GALFORD, MICHAEL T .COE, MARCIA N. MACEDO and JOHN F. MUSTARD: Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. Global Change Biology (2016) 22, 3405–3413, doi: 10.1111/gcb.13298

SPRACKLEN, D.V., J.C.A. Baker, L. Garcia-Carreras and J.H. Marsham (2018): The Effects of Tropical Vegetation on Rainfall - Annu. Rev. Environ. Resour. 2018. 43:193–218, https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030136

SPRACKLEN, D. V., Arnold, S. R. & Taylor, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. Nature 489, 282–286 (2012).

STERLING, Shannon M., DUCHARNE, Agnès, POLCHER, Jan (2012): The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle - NATURE CLIMATE CHANGE, VOL 3 APRIL 2013, DOI: 10.1038/NCLIMATE1690

STRASSBURG, Bernardo B. N., BROOKS, Thomas, FELTRAN-BARBIERI, Alvaro Iribarrem, CROUZEILLES, Renato, LOYOLA, Rafael, LATAWIEC, Agnieszka E., Francisco J. B. Oliveira Filho, SCARAMUZZA, Carlos A. de M., SCARANO, Fabio R., SOARES-FILHO, Britaldo and BALMFORD, Andrew (2017): Moment of truth for the Cerrado hotspot - Nature Ecology & Evolution March 2017 DOI: 10.1038/s41559-017-0099

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência de aplicação. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS. 2009.

VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, GIGLIO, J. T., L., COLLATZ, G. J., KASIBHTLA, P. S., and ARELLANO JR., A. F. (2006): Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004 - Atmos. Chem. Phys., 6, 3423–3441, 2006

VILANOVA, M. R. N.: Tendências hidrológicas na região do alto rio Mogi-guaçu, sul de Minas Gerais. Revista Agrogeoambiental, v.6, n. 3, 2014.

ZUO, D. P., XU, Z. X., WU, W., ZHAO, J., ZHAO, F. F., 2014. Identification of streamflow response to climate change and human activities in the Wei River Basin, China. Water Resour. Manag., 28 (3), 833–851. http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0519-0.

WALTER, Bruno Machado Teles; Fitofisionomias do Bioma Cerrado: Síntese terminológica e relações florísticas, 2006. 389 p. Tese de Doutorado. Departamento de Ecologia do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília (UnB).Campos, J. O.

WMO. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. WCDP, n. 10, p. 341. Geneva, 1989.

Principais sites consultados:

MMA, 2019
https://www.mma.gov.br/clima.html

Observatório do Clima/SEEG, 2019:
http://seeg.eco.br/

INPE/CPTEC/Elnino:
http://enos.cptec.inpe.br/#

https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/central-and-south-america/

Mapbiomas:
https://mapbiomas.org/

Planaveg:
https://www.mma.gov.br/florestas/pol%C3%ADtica-nacional-de-recupera%C3%A7%C3%A3o-da-vegeta%C3%A7%C3%A3o-nativa.html#composi%C3%A7%C3%A3o

PPCerrado:
http://combateaodesmatamento.mma.gov.br/analises-no-cerrado

Política Nacional sobre Mudança do Clima:
https://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima.html

FAO/Floresta e Mudanças climáticas:
http://www.fao.org/forestry/climatechange/en/

IPCC/South America:
https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/central-and-south-america/

Convenção sobre Diversidade Biológica:
https://www.cbd.int/

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima:
https://www.un.org/en/climatechange/reports.shtml

Apêndice A

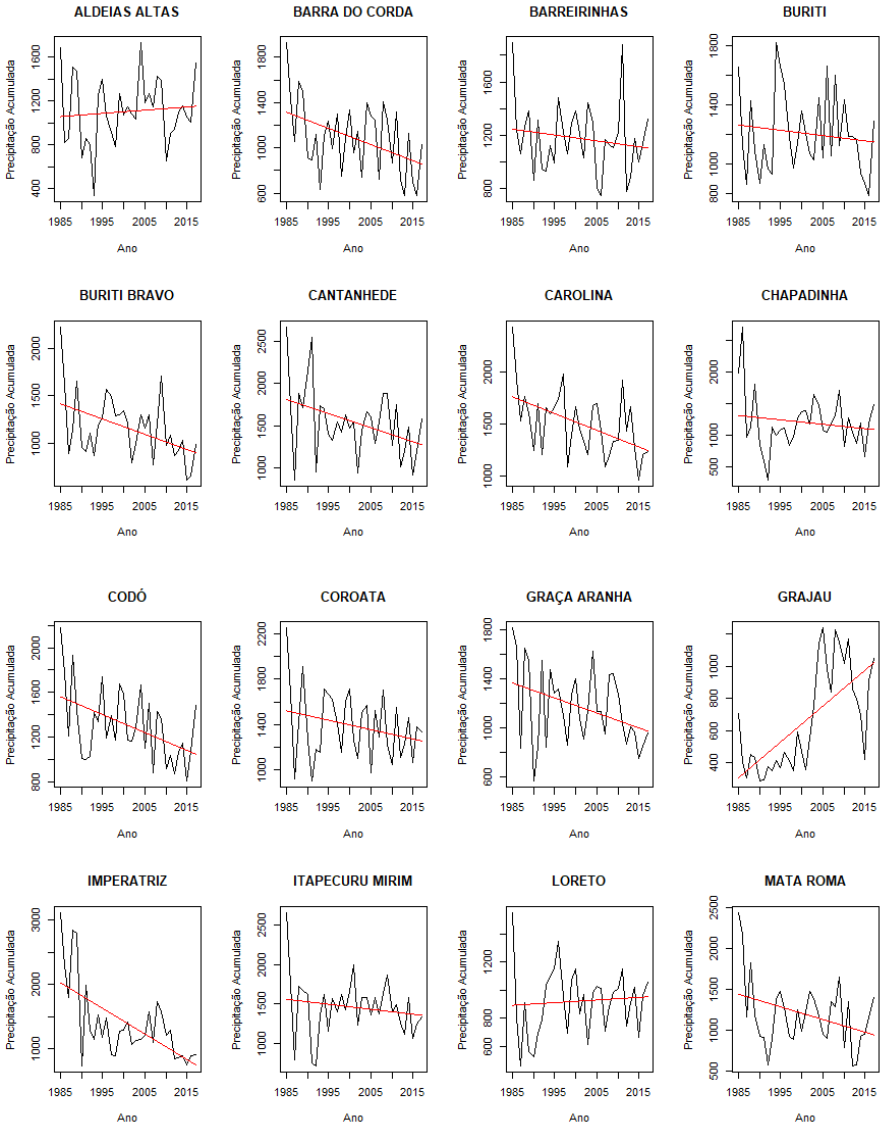
LISTA DAS 54 ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS ANALISADAS COM *BUFFER*

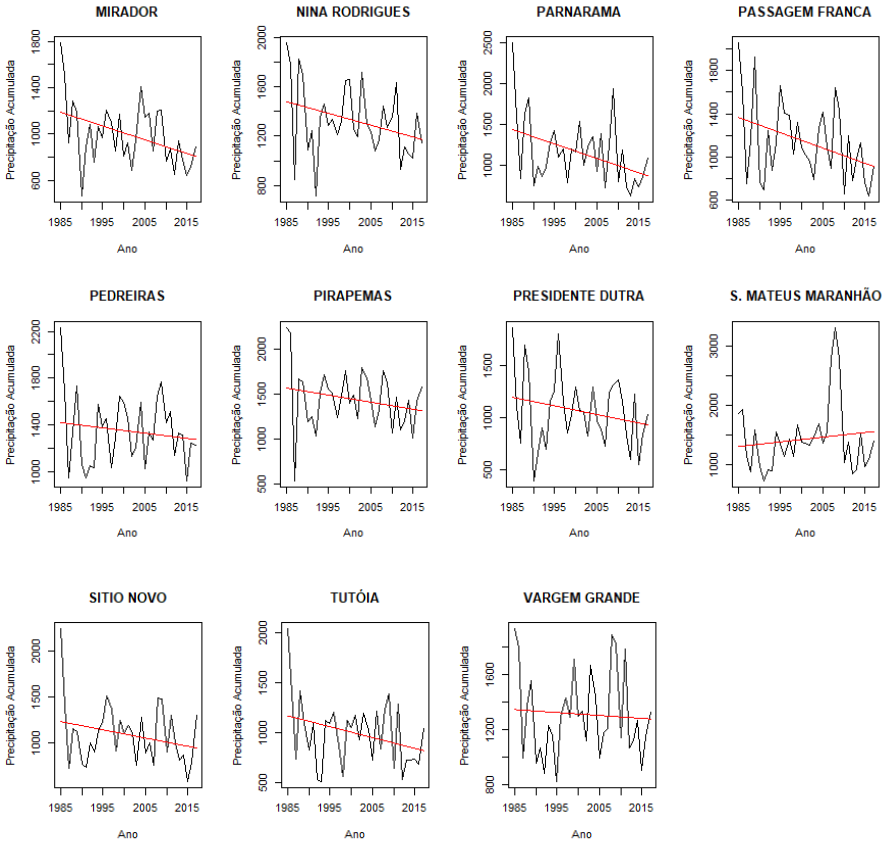
				UTM - WGS 84		
ESTADO	**MUNICÍPIO**	**ESTAÇÃO**	**ALTITUDE (m)**	**ZONA**	**X (m)**	**Y (m)**
TO	ABREULÂNDIA	ABREULÂNDIA	240	22S	702 434	8 935 564
MA	ALDEIAS ALTAS	ALDEIAS ALTAS	70	23S	670 182	9.48.8695
MA	ALTO PARNAÍBA	ALTO PARNAÍBA	220	23S	398 234	8 992 518
TO	ALVORADA	ALVORADA	293	22S	703 833	8 619 247
BA	ANGICAL	SÃO SEBASTIÃO	424	23S	513 366	8 675 716
TO	ARAGUAÇU	ARAGUAÇU	295	22S	626 979	8 570 192
MA	BALSAS	BREJO COMPRIDO	328	23S	391 031	9 123 464
MA	BARRA DO CORDA	PAPAGAIO	104	23S	456 377	9 336 534
BA	BARREIRAS	NOVA VIDA - MONTANTE	456	23S	486 930	8 689 354
MA	BARREIRINHAS	GONÇALO	303	23S	695 970	9 663 395
TO	CAMPOS LINDOS	CAMPOS LINDOS	290	23S	300 891	9 118 460
MA	CAROLINA	CAROLINA	169	23S	227 909	9 189 791
BA	COCOS	FAZENDA PORTO ALEGRE	520	23S	551 506	8 423 004
MA	CODÓ	CODÓ	35	23S	624 816	9 507 114
MA	COLINAS	COLINAS	122	23S	583 154	9 334 435
BA	CORIBE	COLÔNIA DO FORMOSO	441	23S	575 406	8 500 980
BA	CORRENTINA	ARROJADO	463	23S	546 664	8 512 751
BA	COTEGIPE	FAZENDA MACAMBIRA	421	23S	591 845	8 716 005
PI	CRISTINO CASTRO	CRISTINO CASTRO	240	23S	586 265	9 025 732
TO	DUERÉ	DUERÉ	191	22S	644 297	8 741 336
BA	FORMOSA DO RIO PRETO	FORMOSA DO RIO PRETO	489	23S	477 942	8 778 730
TO	GOIATINS	GOIATINS	185	23S	244 647	9 146 547
MA	GRAÇA ARANHA	GRAÇA ARANHA	100	23S	573 611	9 402 527
MA	GRAJAU	FAZENDA PIRANHAS	240	23S	398 125	9 332 379
TO	GURUPI	GURUPI	234	22S	734 679	8 688 942
TO	ITACAJÁ	ITACAJÁ	190	23S	195 452	9 071 329
BA	JABORANDI	GATOS	581	23S	539 105	8 484 070
TO	LIZARDA	LIZARDA	620	23S	316 425	8 938 672
MA	LORETO	MATO GROSSO	224	23S	487 938	9 243 476
BA	MANSIDÃO	BOQUEIRÃO	401	23S	625 970	8 744 486
MA	MATA ROMA	MATA ROMA	85	23S	709 682	9 599 012
MA	MIRADOR	PORTO DO LOPES	150	23S	573 042	9 335 953
TO	NOVO ACORDO	JATOBÁ(FAZENDA BOA NOVA)	200	23S	228 941	8 894 094
TO	PALMEIRANTE	PALMEIRANTE	166	23S	176 992	9 130 111
TO	PARAÍSO DO TOCANTINS	PARAÍSO DO TOCANTINS	390	22S	731 117	8 875 562
TO	PEDRO AFONSO	PORTO REAL	200	23S	178 185	8 969 881
TO	PINDORAMA DO TOCANTINS	PINDORAMA DO TOCANTINS	444	23S	218 560	8 767 286
TO	PONTE ALTA DO TOCANTINS	PONTE ALTA DO TOCANTINS	300	23S	222 630	8 810 425
MA	PRESIDENTE DUTRA	FLORES	103	23S	507 939	9 400 939
MA	RIACHÃO	MORRO VERMELHO	385	23S	328 347	9 208 519
BA	RIACHÃO DAS NEVES	CARIPARÉ	510	23S	495 425	8 727 413
PI	RIBEIRO GONÇALVES	RIBEIRO GONÇALVES	201	23S	473 034	9 164 643
TO	RIO SONO	MANSINHA	320	23S	244 498	8 953 714
MA	SAMBAÍBA	SAMBAÍBA	230	23S	461 783	9 210 637
BA	SANTA MARIA DA VITÓRIA	SANTA MARIA DA VITÓRIA	432	23S	586 734	8 518 427
BA	SANTA RITA DE CÍSSIA	IBIPETUBA	432	23S	551 981	8 783 334
BA	SANTANA	PORTO NOVO	442	23S	618 157	8 530 258
BA	SÃO DESIDÉRIO	FAZENDA PRAINHA (FAZ.ANTAS)	824	23S	384 860	8 528 059
MA	SÃO FÉLIX DE BALSAS	SÃO FÉLIX DE BALSAS	325	23S	520 705	9 217 249
MA	SÃO RAIMUNDO DAS MANGABEIRAS	FAZENDA TIGRE	295	23S	432 924	9 184 780
TO	SÃO VALÉRIO DA NATIVIDADE	FAZENDA LOBEIRA	243	22S	795 094	8 723 870
BA	SERRA DOURADA	SERRA DOURADA (FAZ. MURITIBA)	480	23S	613 159	8 588 163
MA	TASSO FRAGOSO	BABILÔNIA	360	23S	393 430	9 080 471
TO	TUPIRATINS	TUPIRATINS	125	22S	818 141	9 071 231

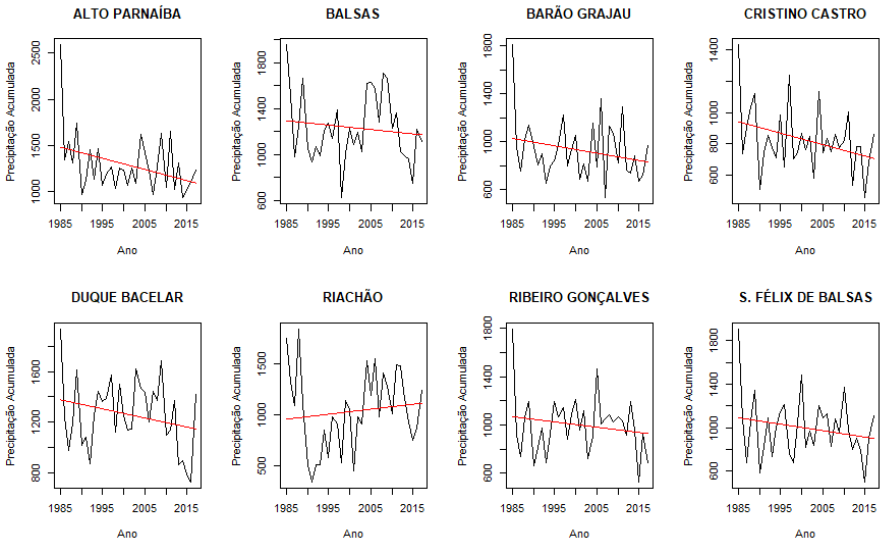
Apêndice B

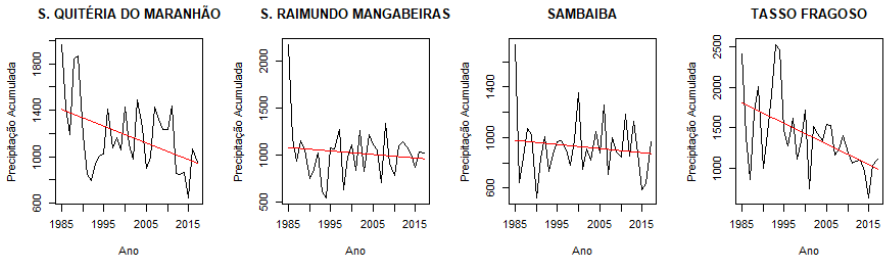
RESULTADOS GRÁFICOS DO TESTE DE TENDÊNCIA DE MANN-KENDALL

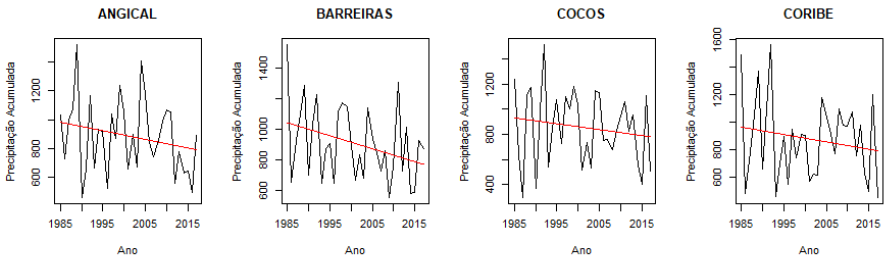
Estação das Chuvas

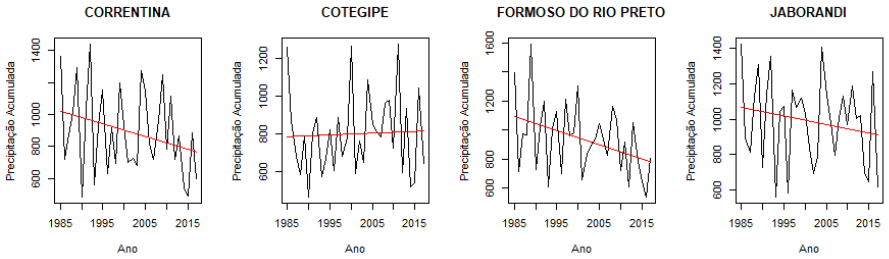


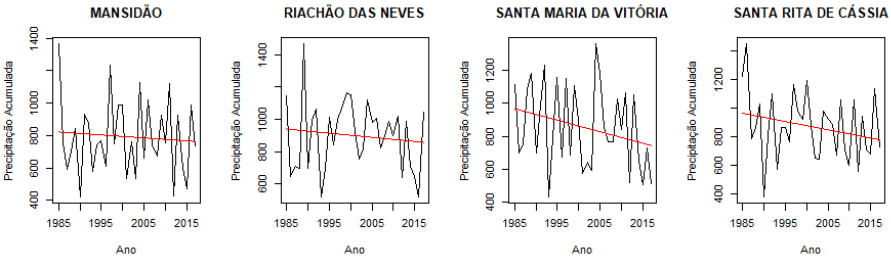

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

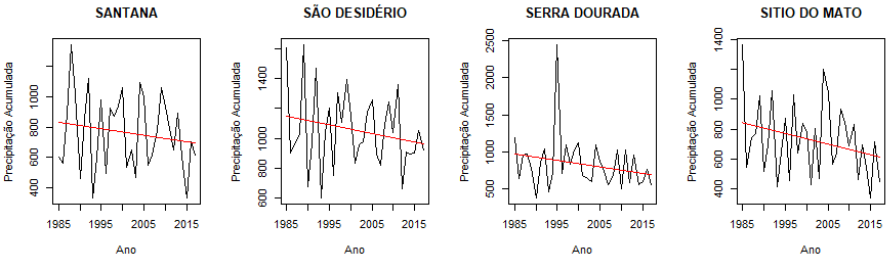

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

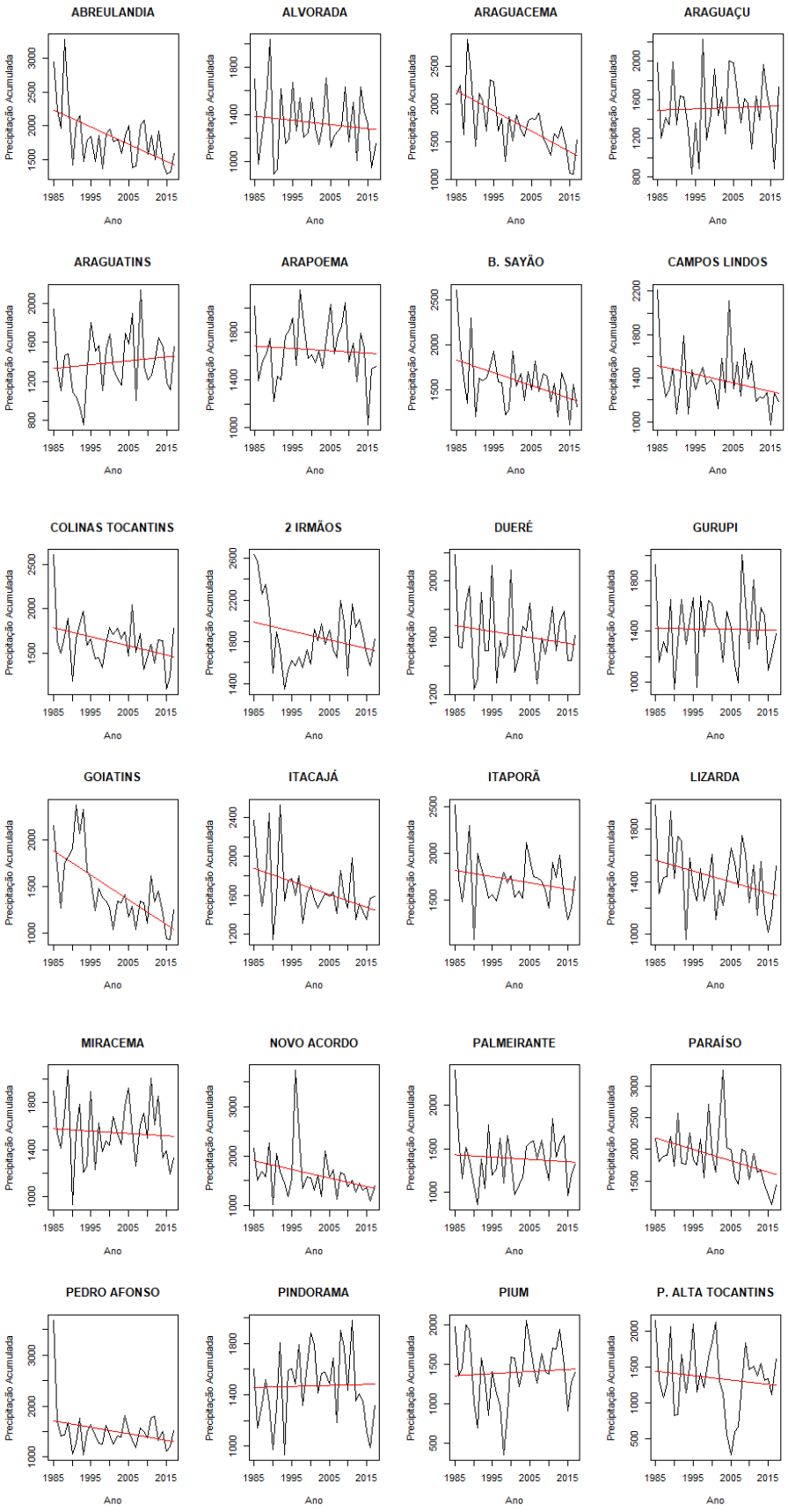

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano

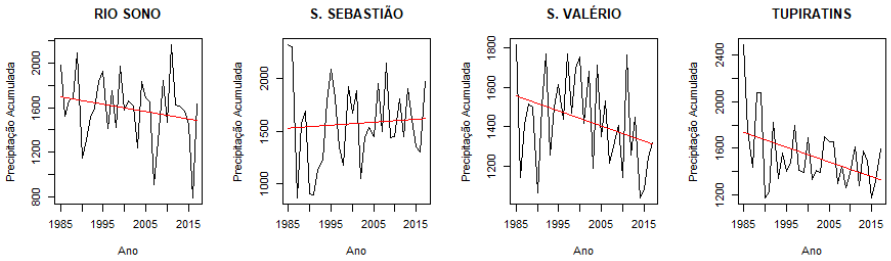

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano

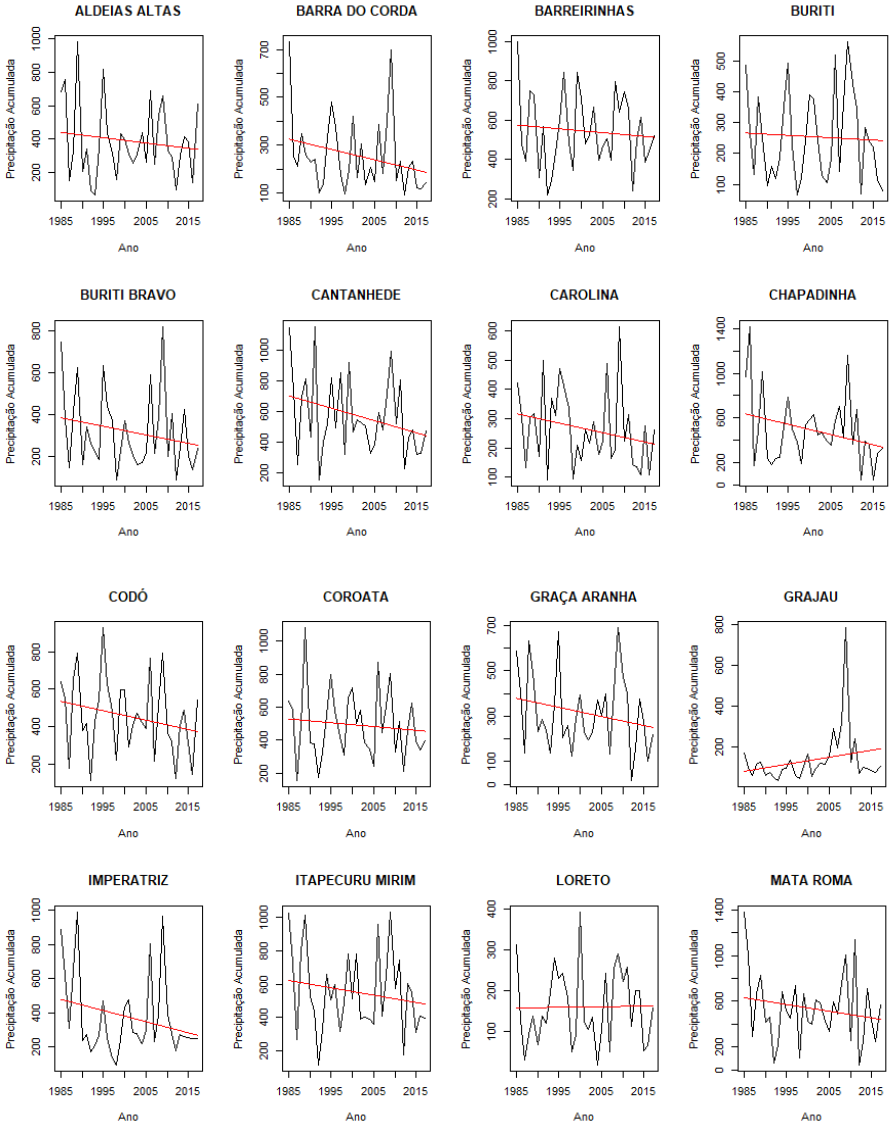

MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano

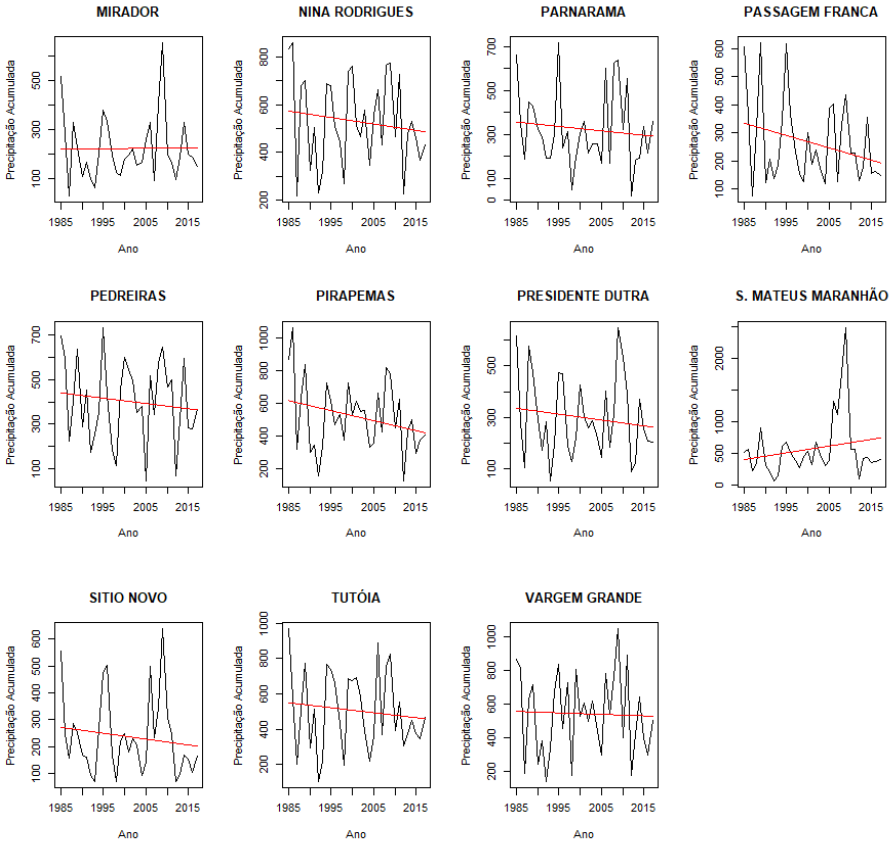

SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano

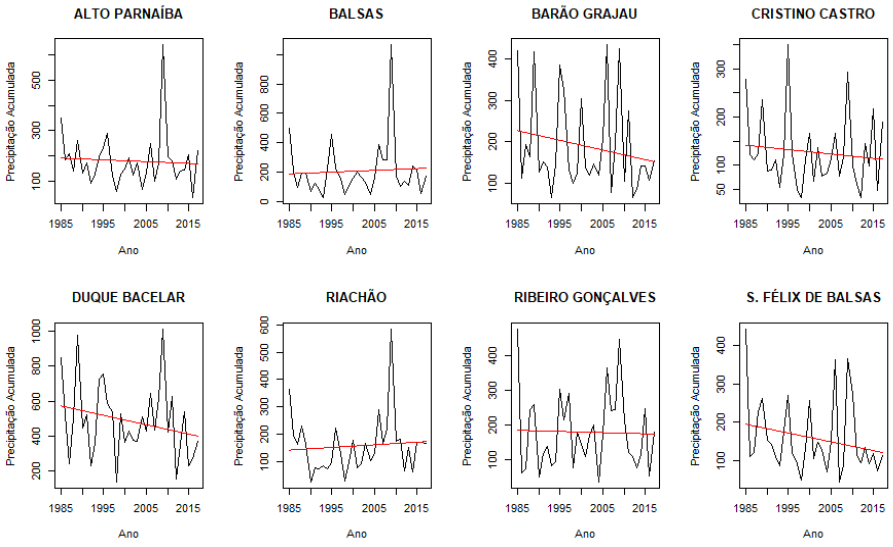

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

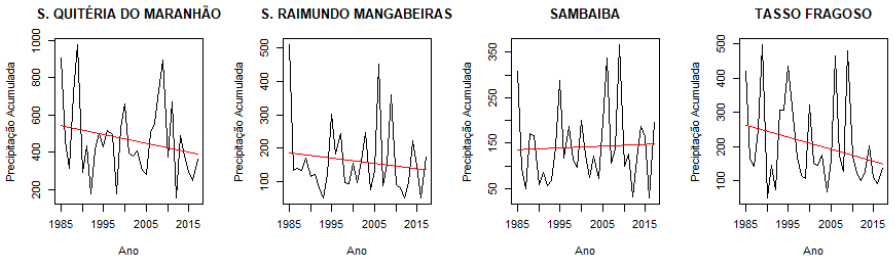


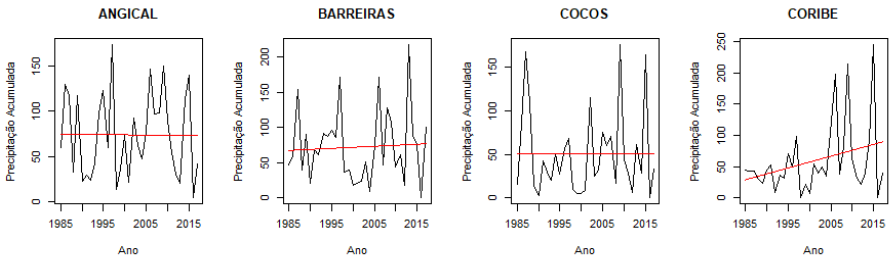
Transição chuva-seca

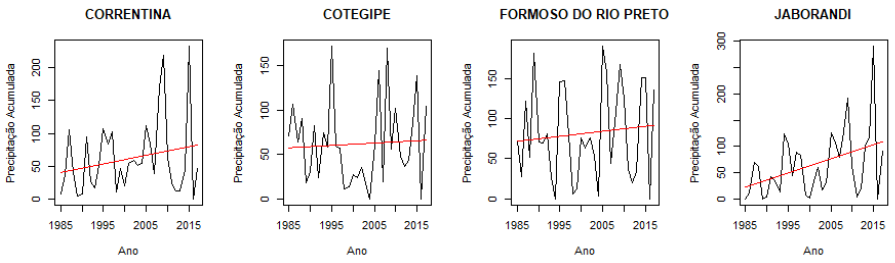


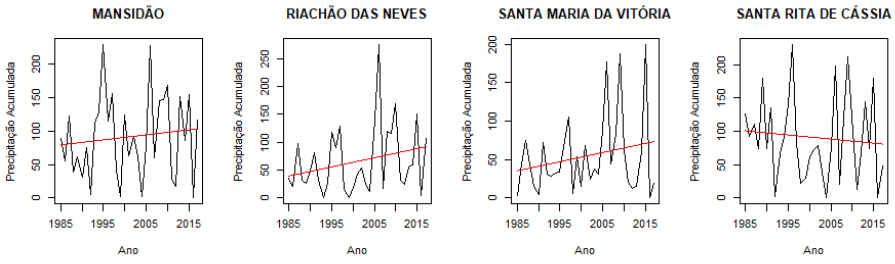

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

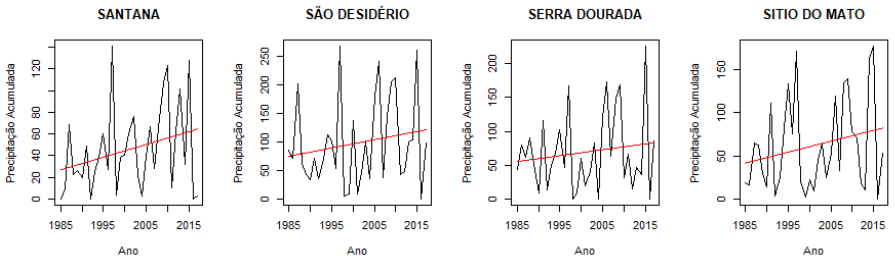

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

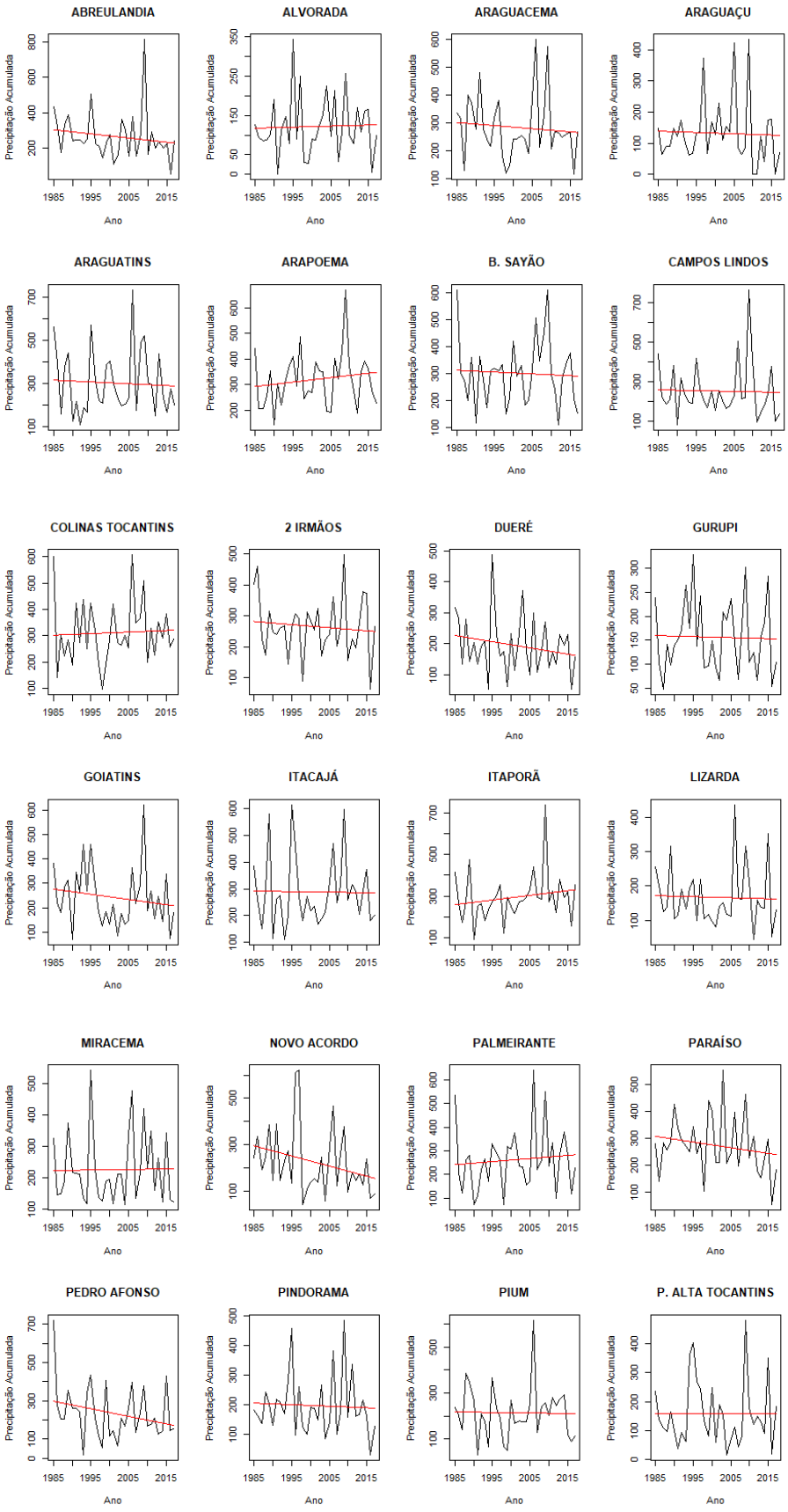

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano

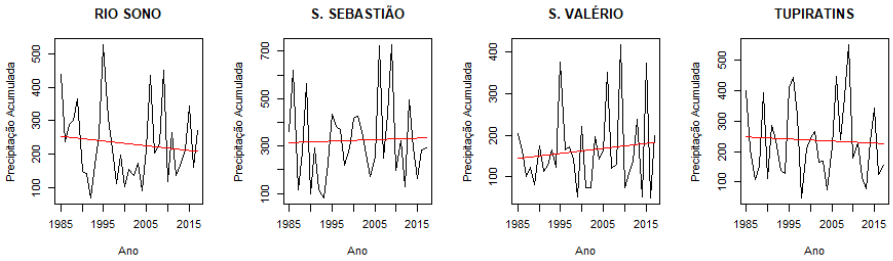

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano

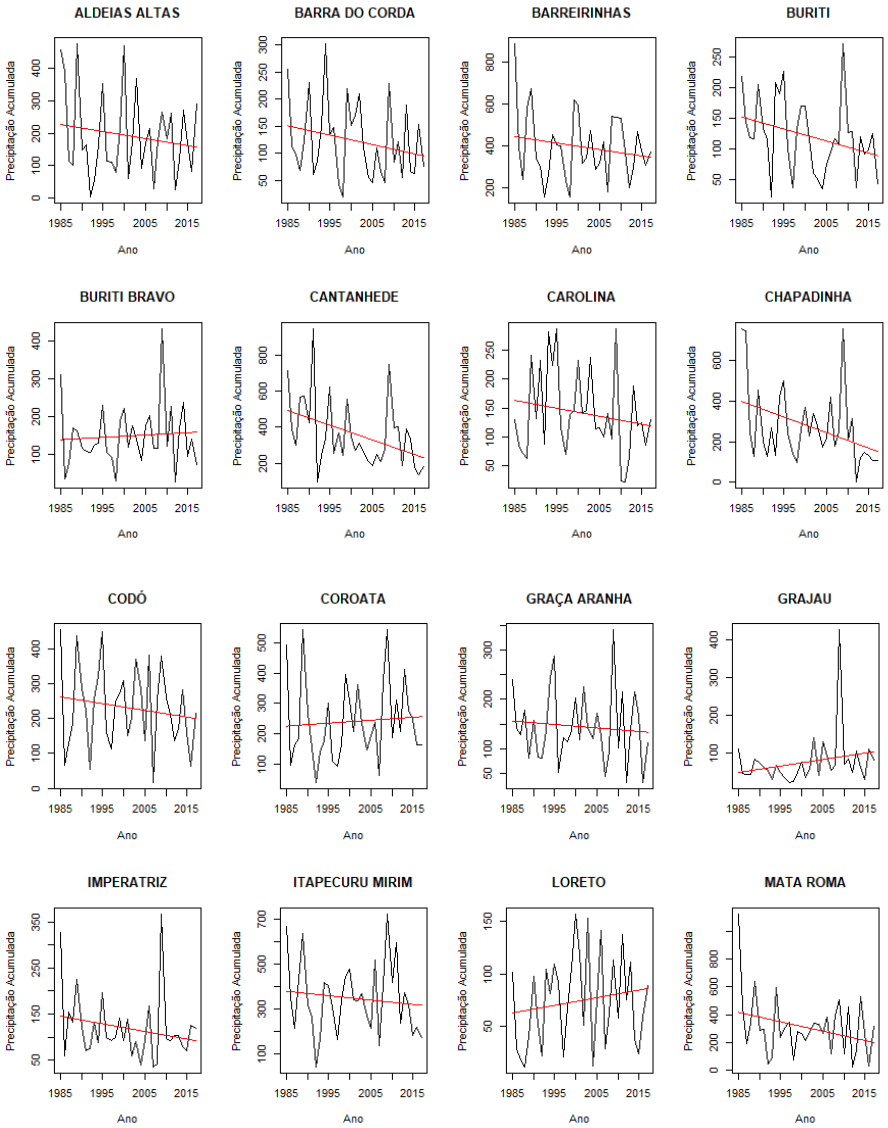

MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano

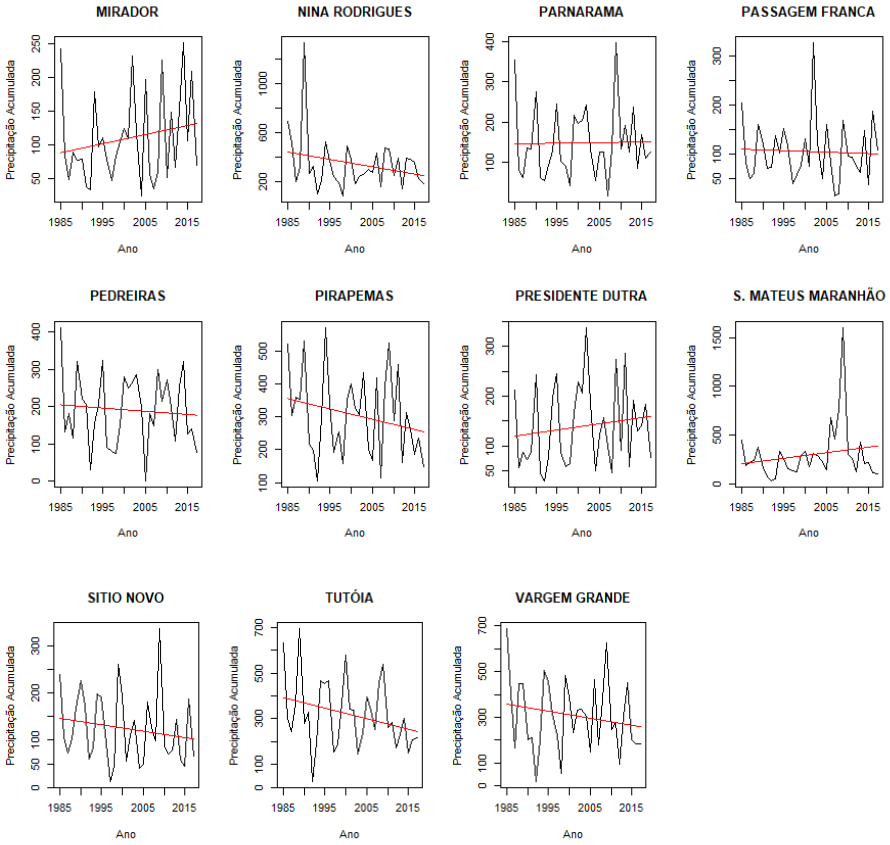

SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano

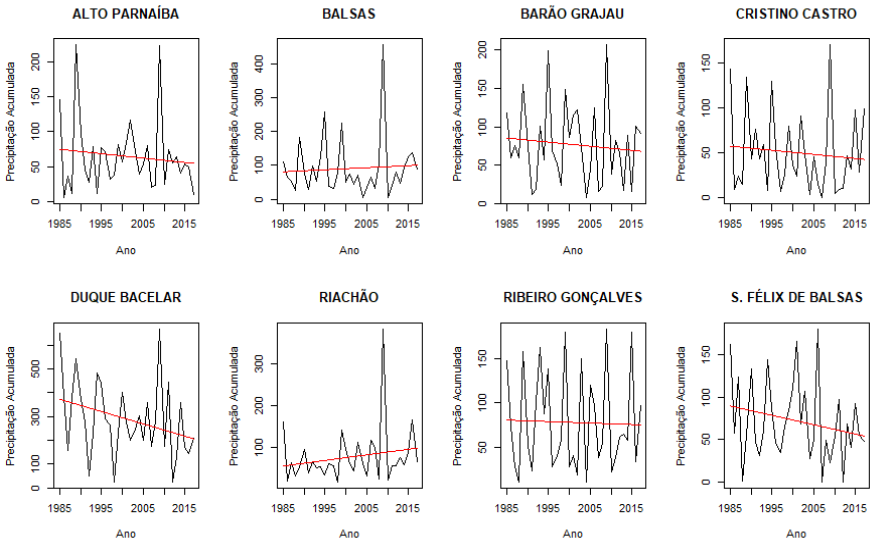

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

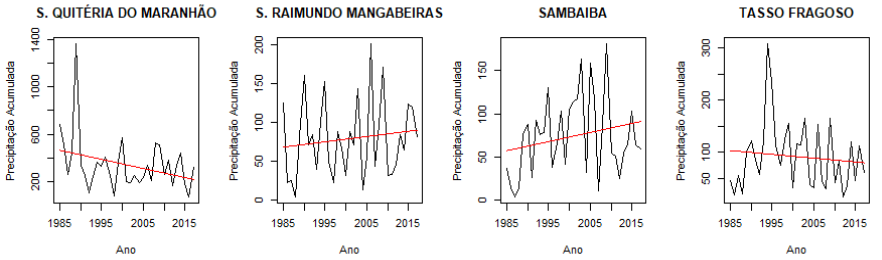


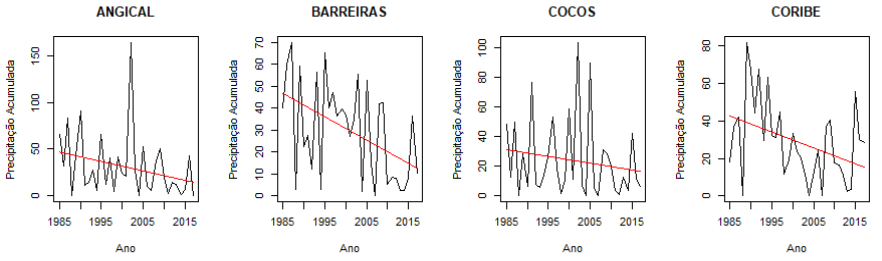
Estação Seca

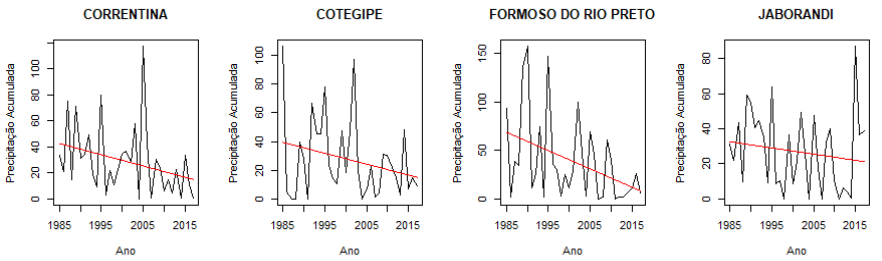


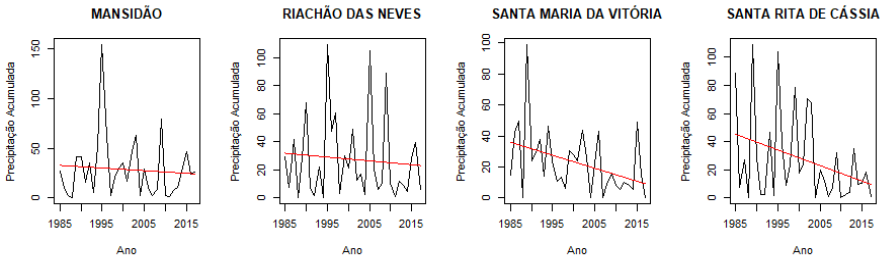

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

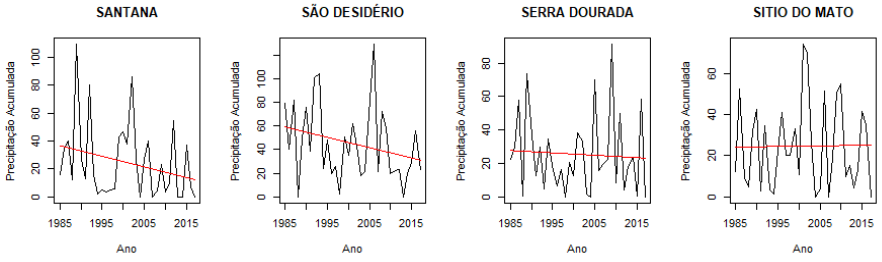

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

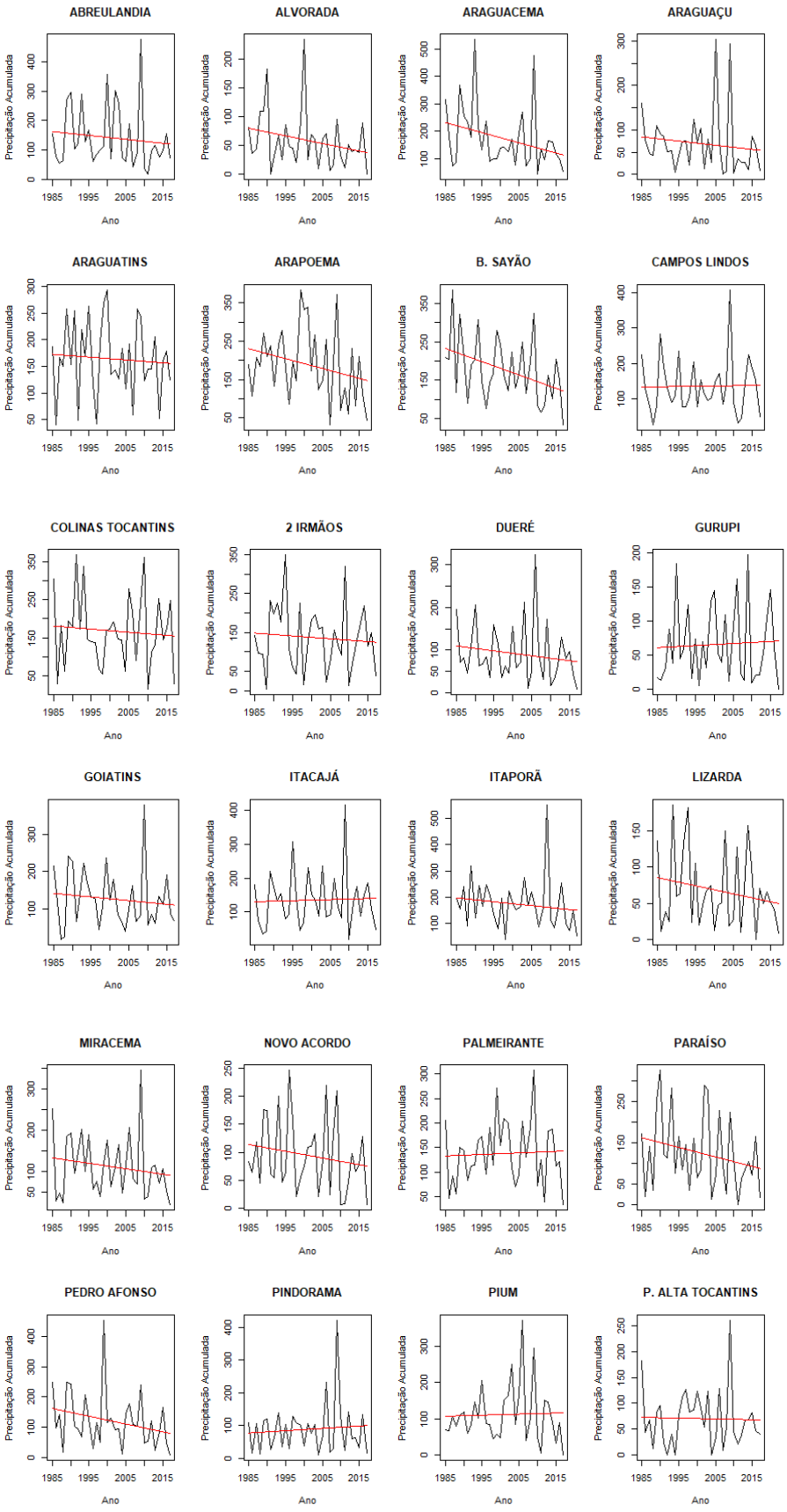

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

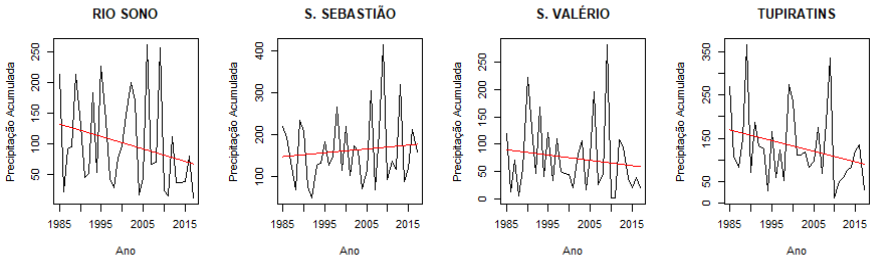

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

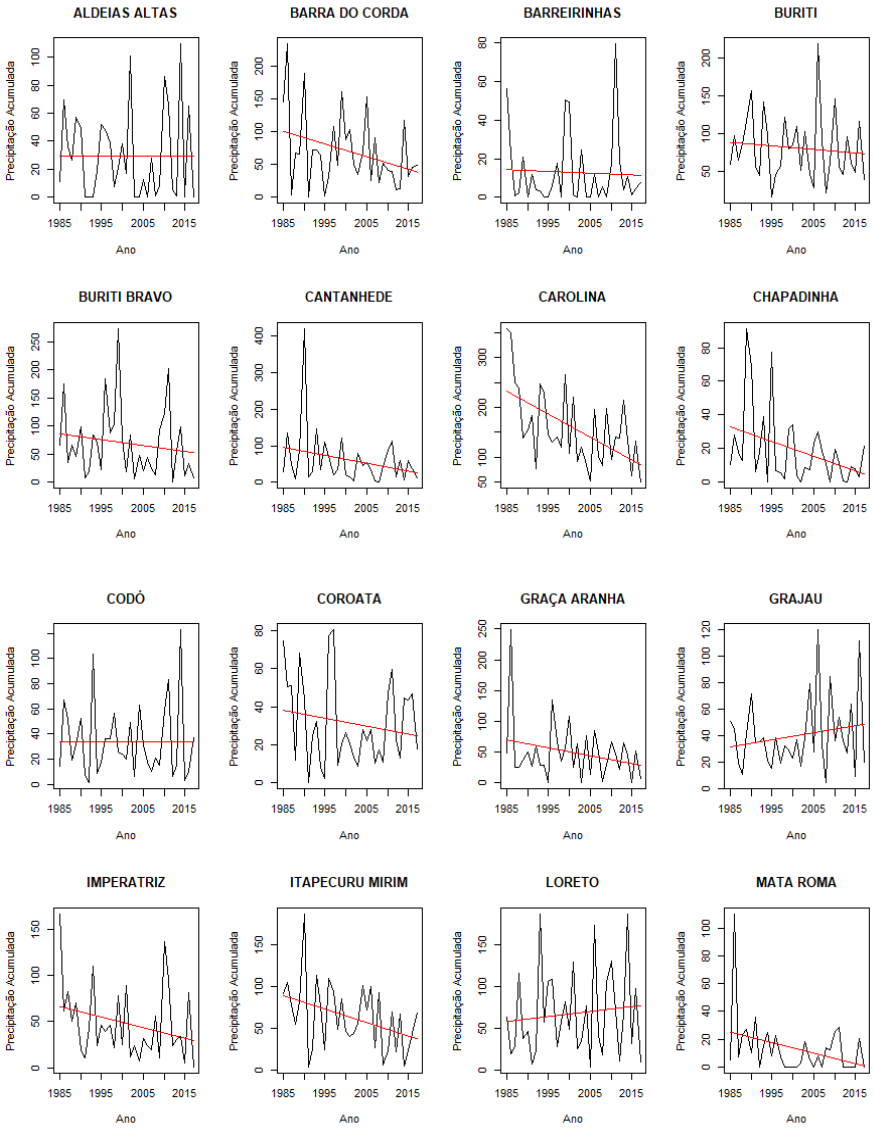

MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

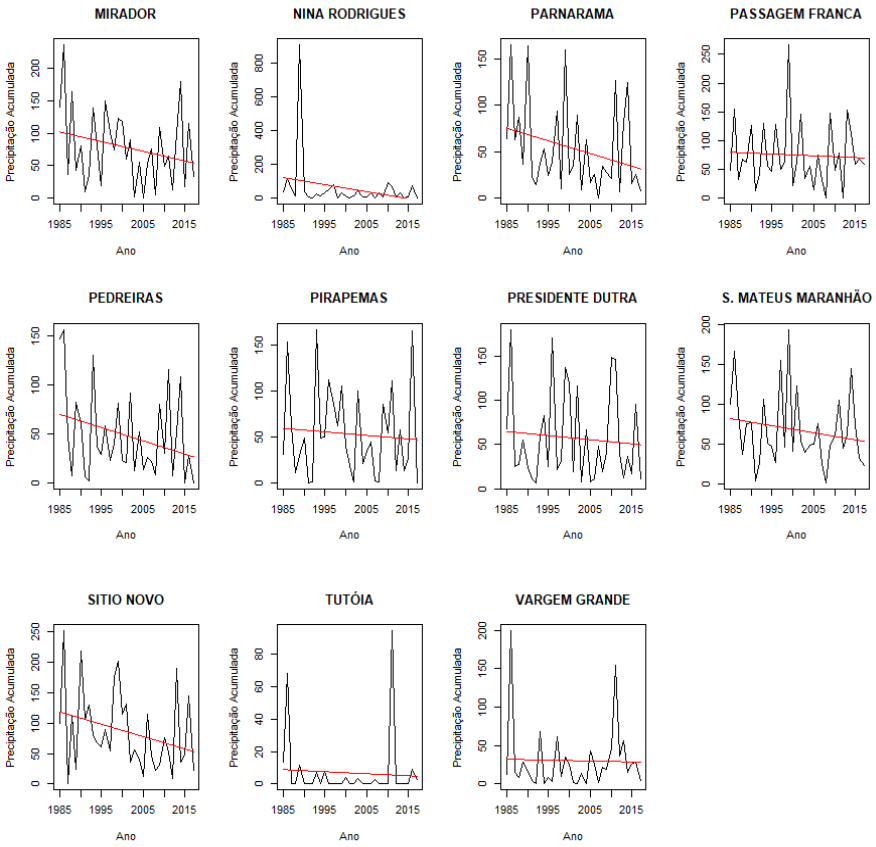

SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

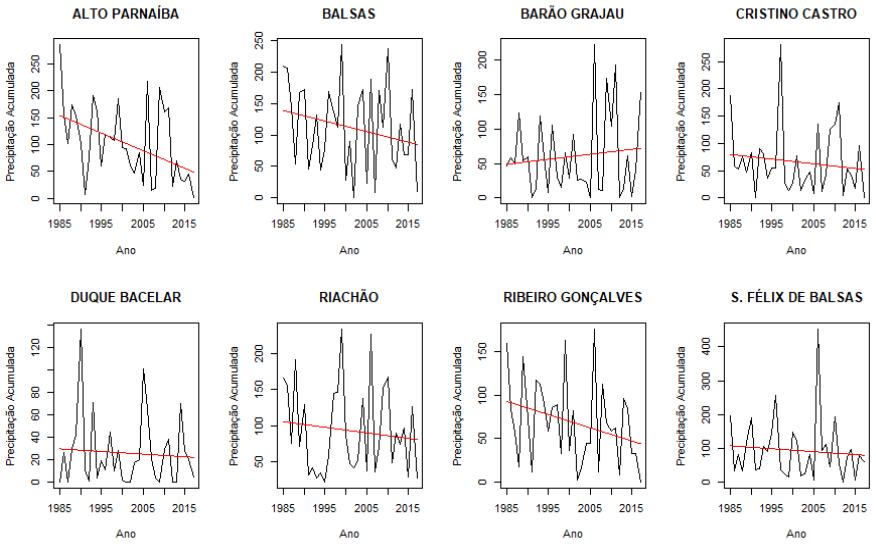

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

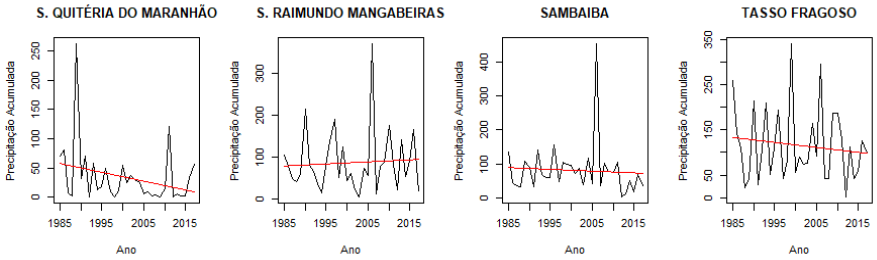


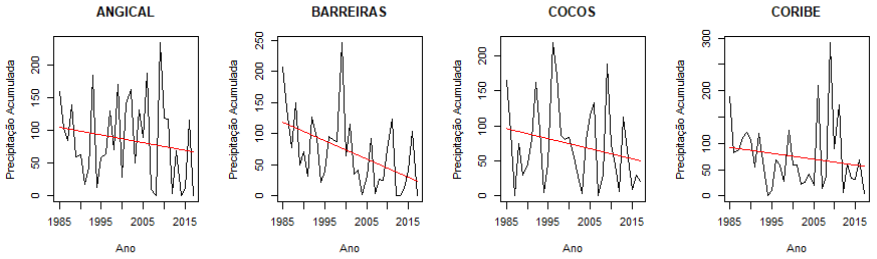
Transição seca-chuva

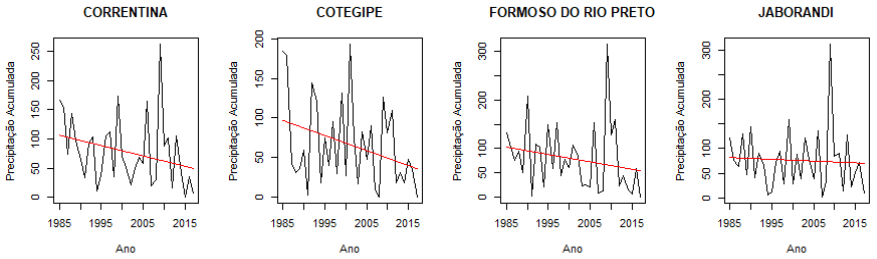


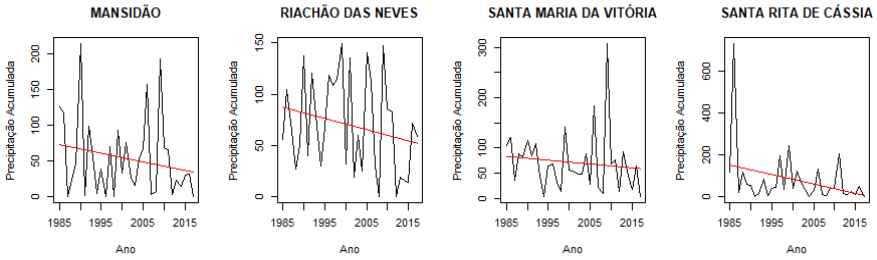

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

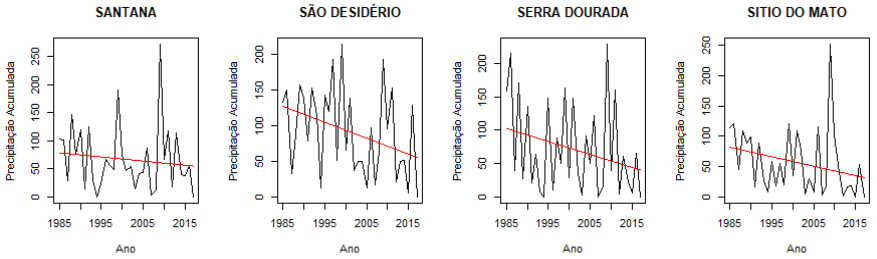

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

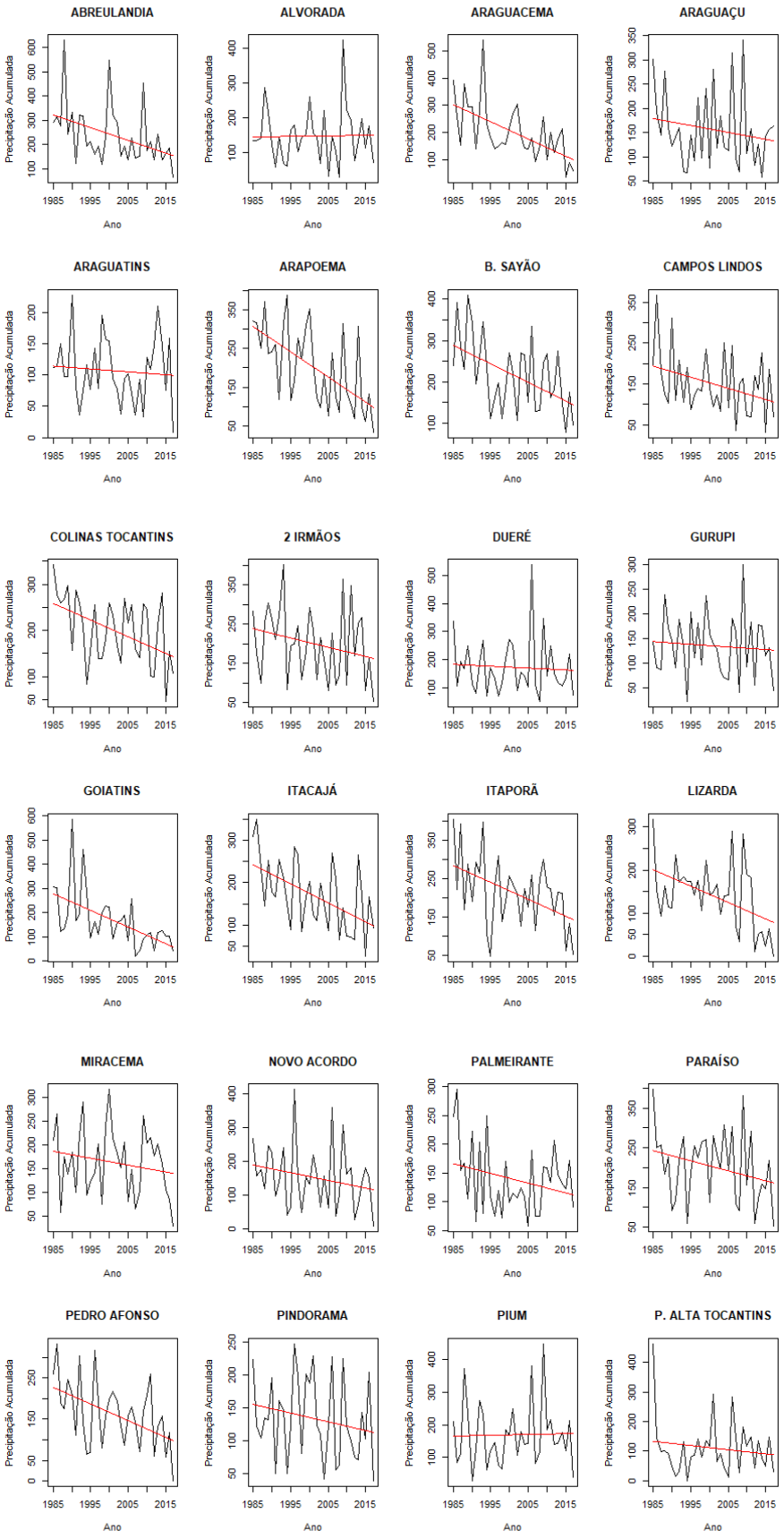

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

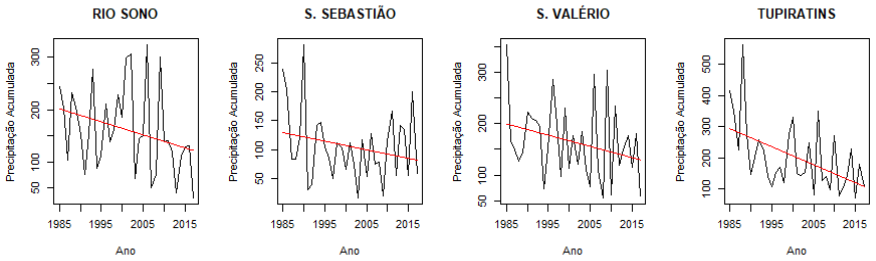

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

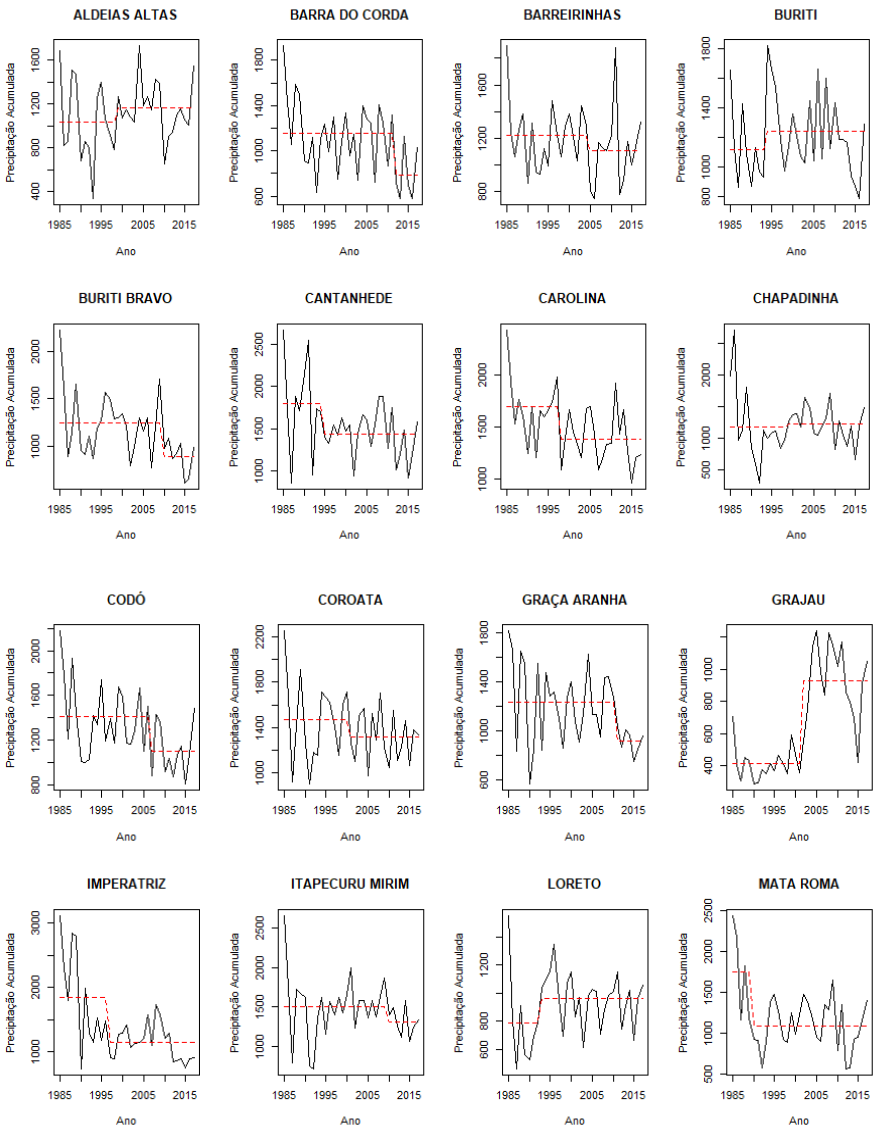

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

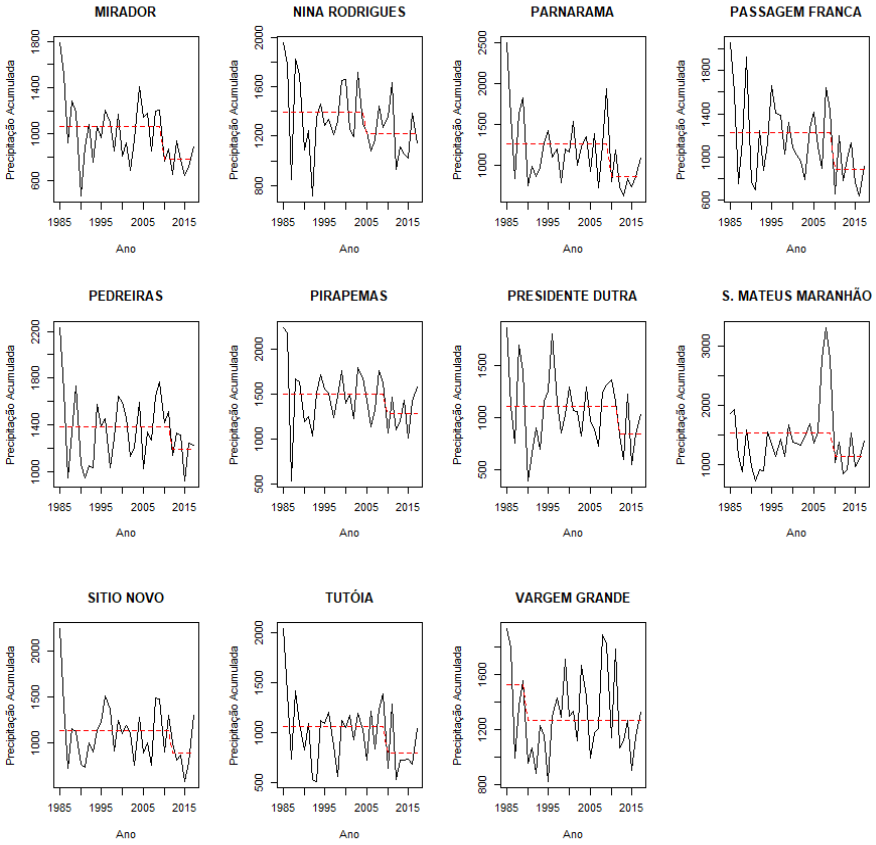

RIO SONO
S. SEBASTIÃO
S. VALÉRIO
TUPIRATINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

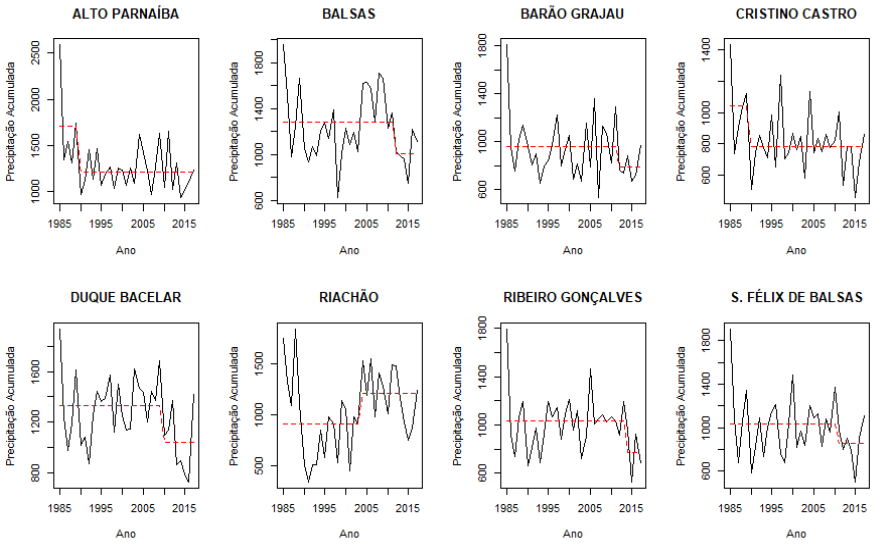
Apêndice C

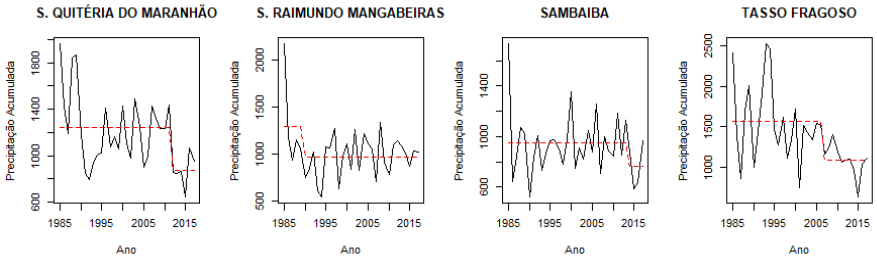
RESULTADOS GRÁFICOS DO TESTE DE RUPTURA DE PETTITT

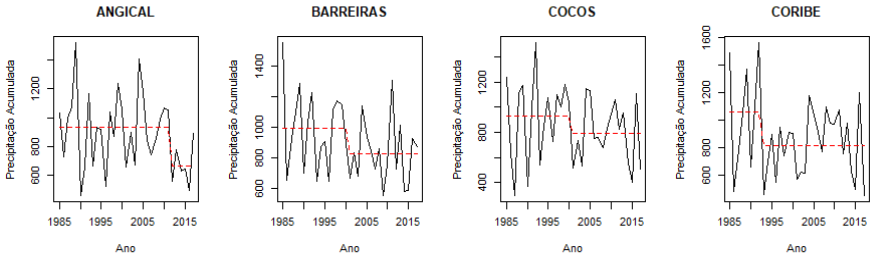
Estação das Chuvas

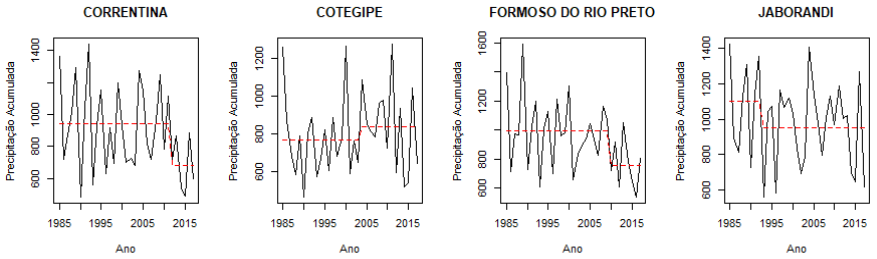


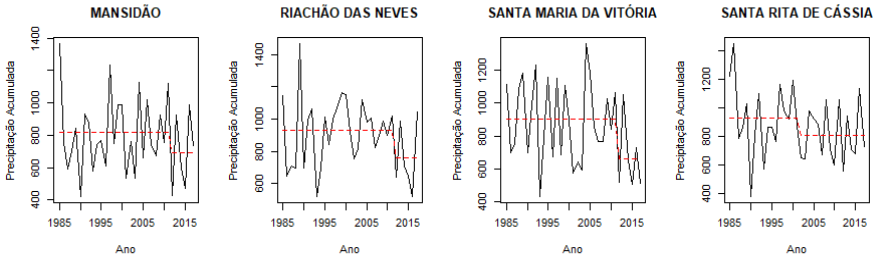

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

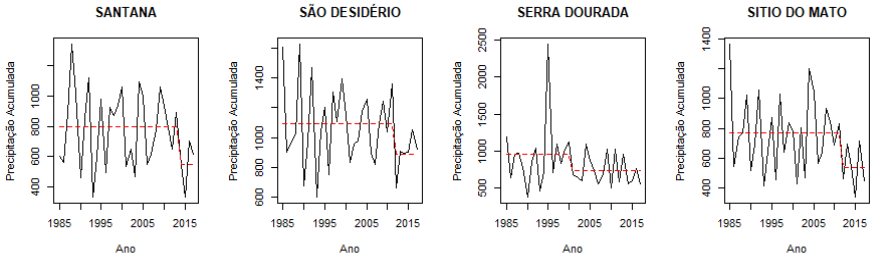

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

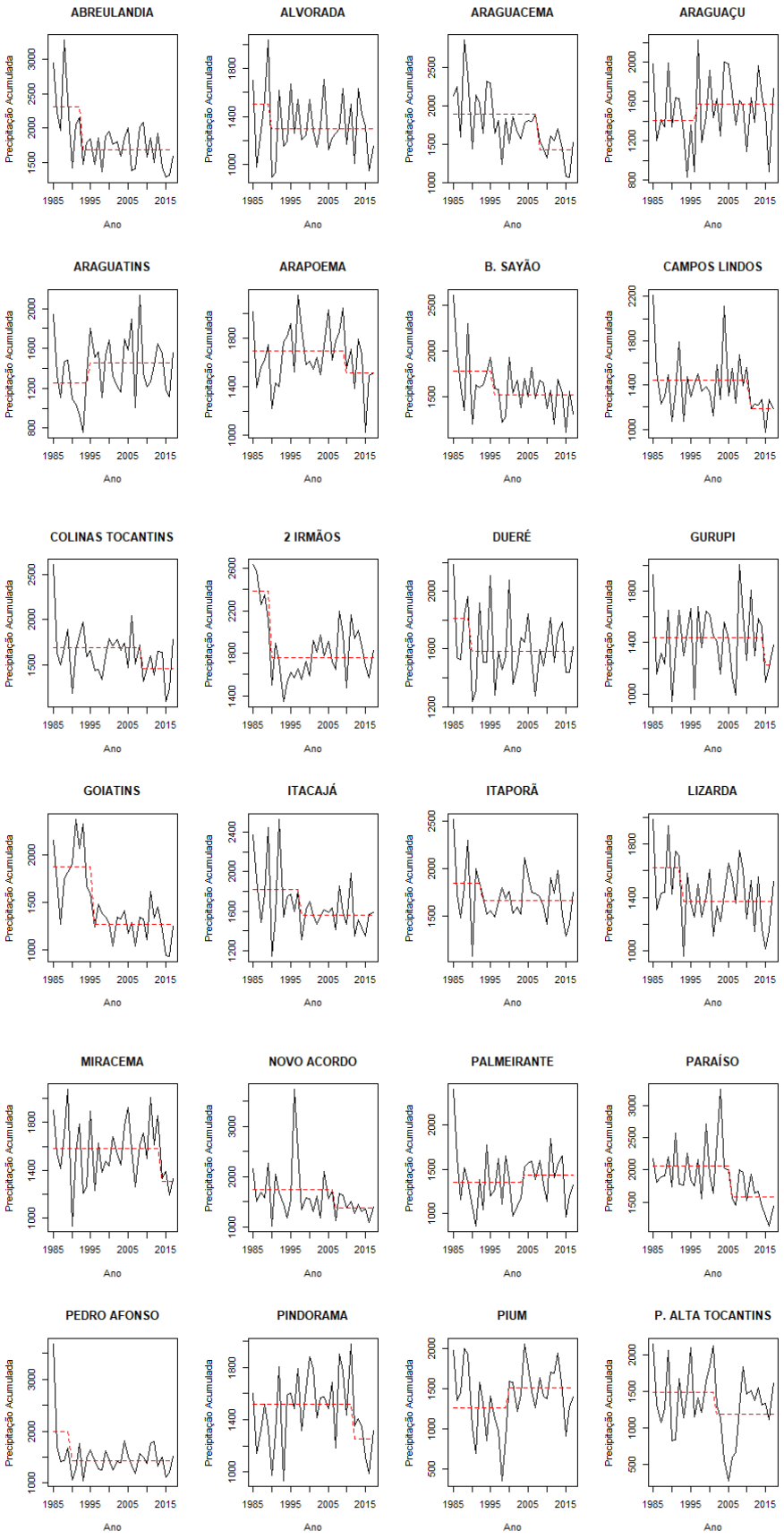

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano

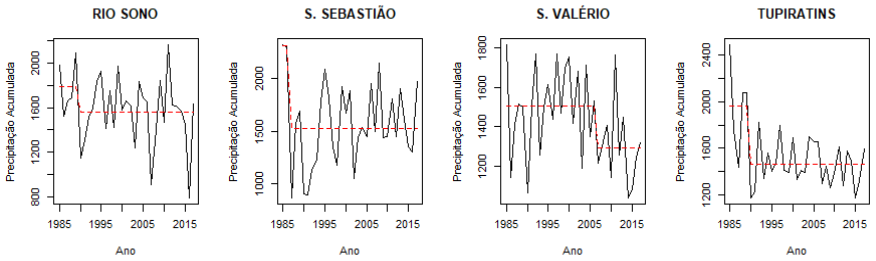

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano

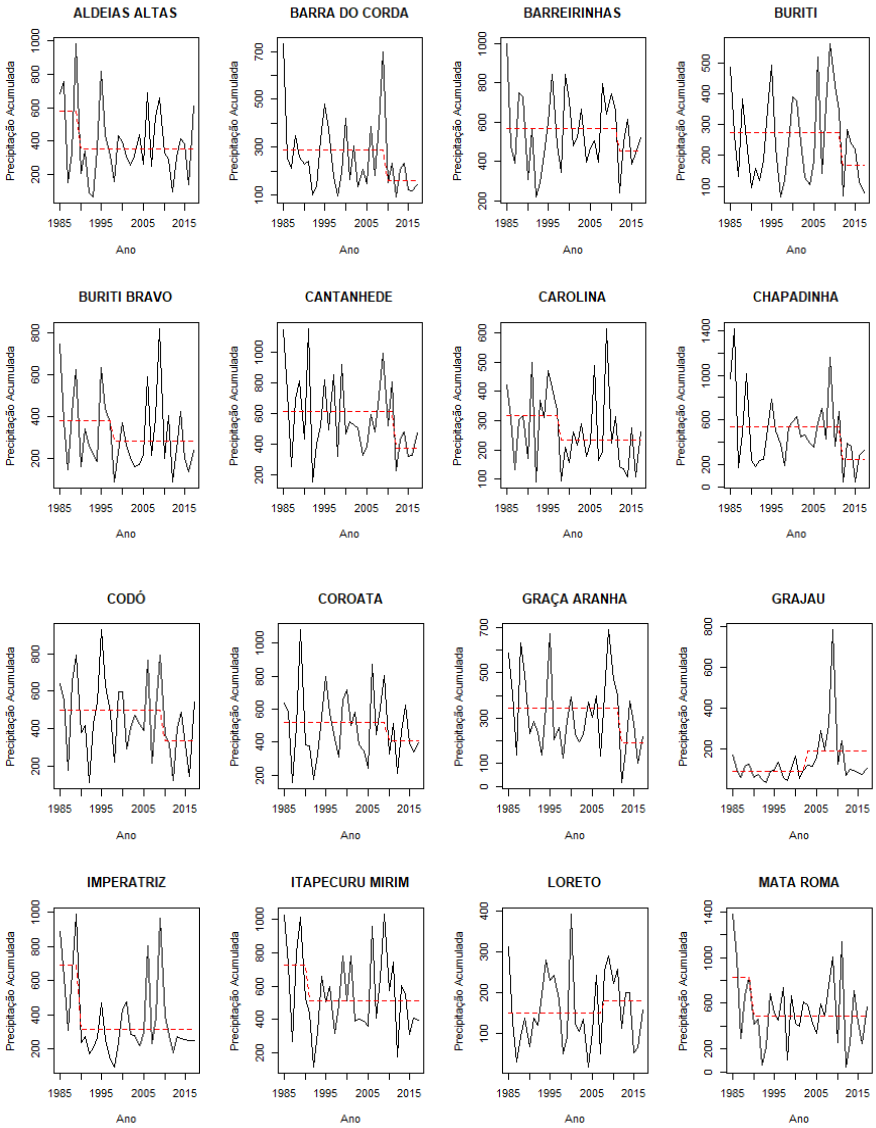

MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano

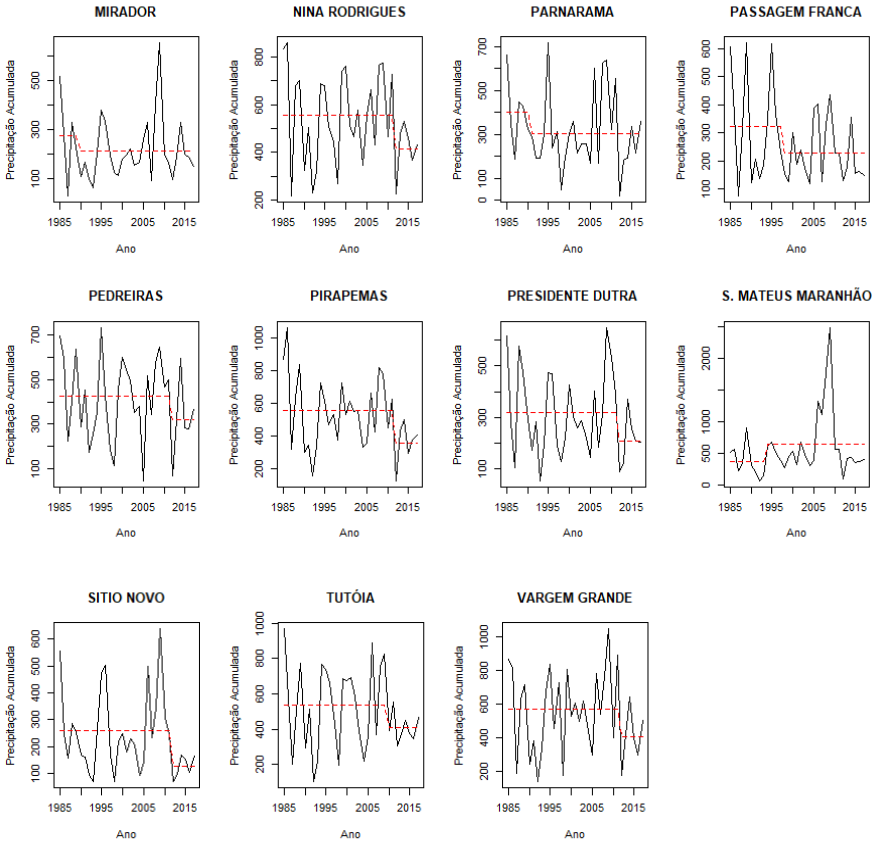

SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano

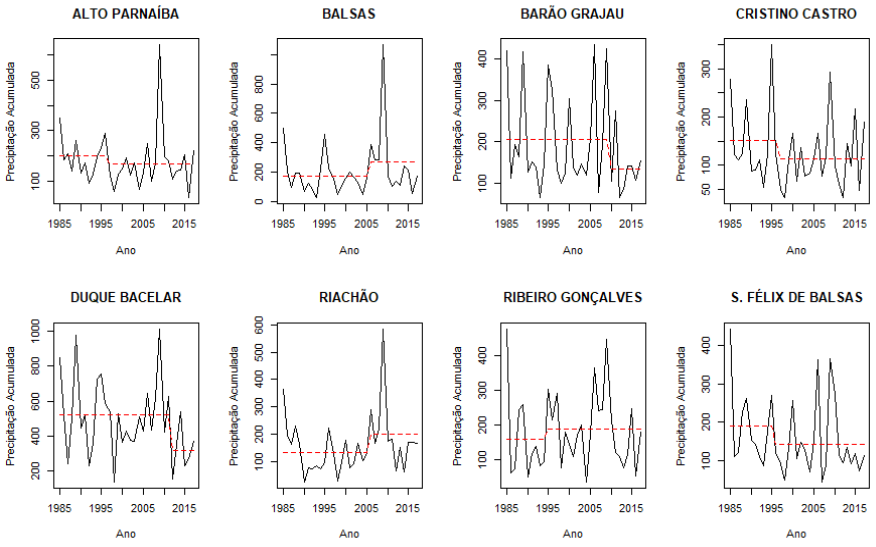

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

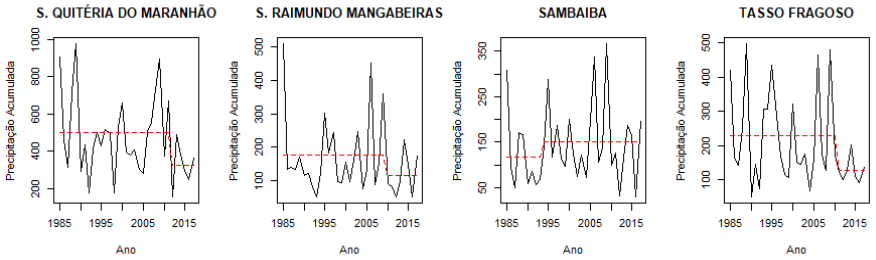


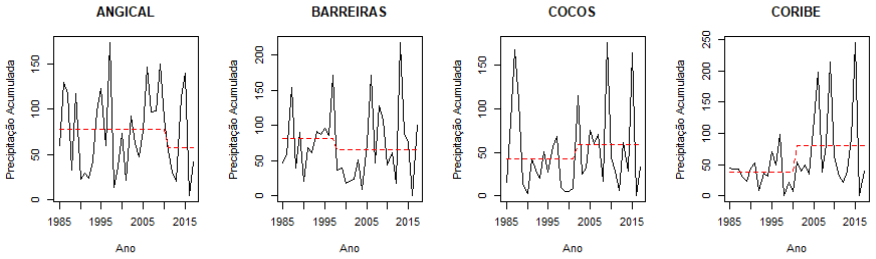
Transição chuva-seca

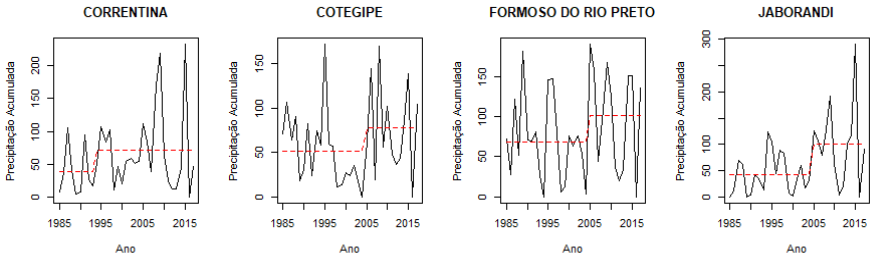


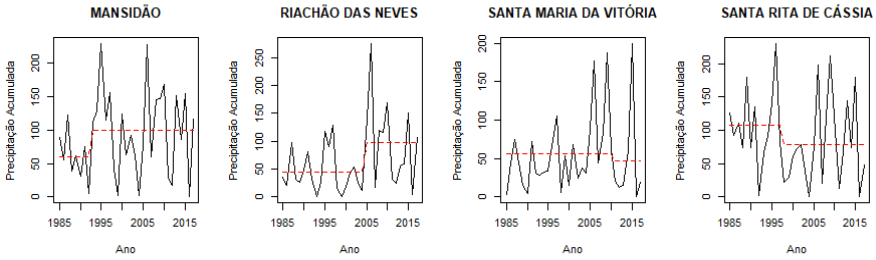

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

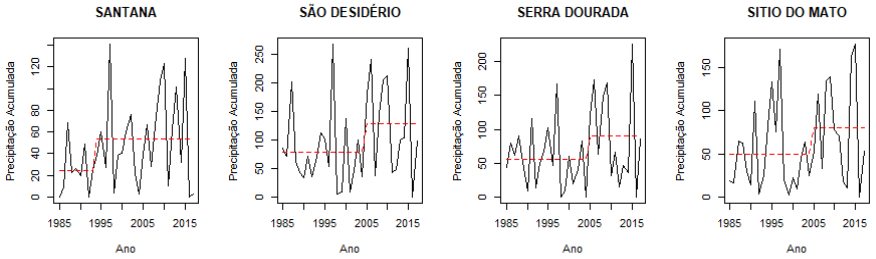

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

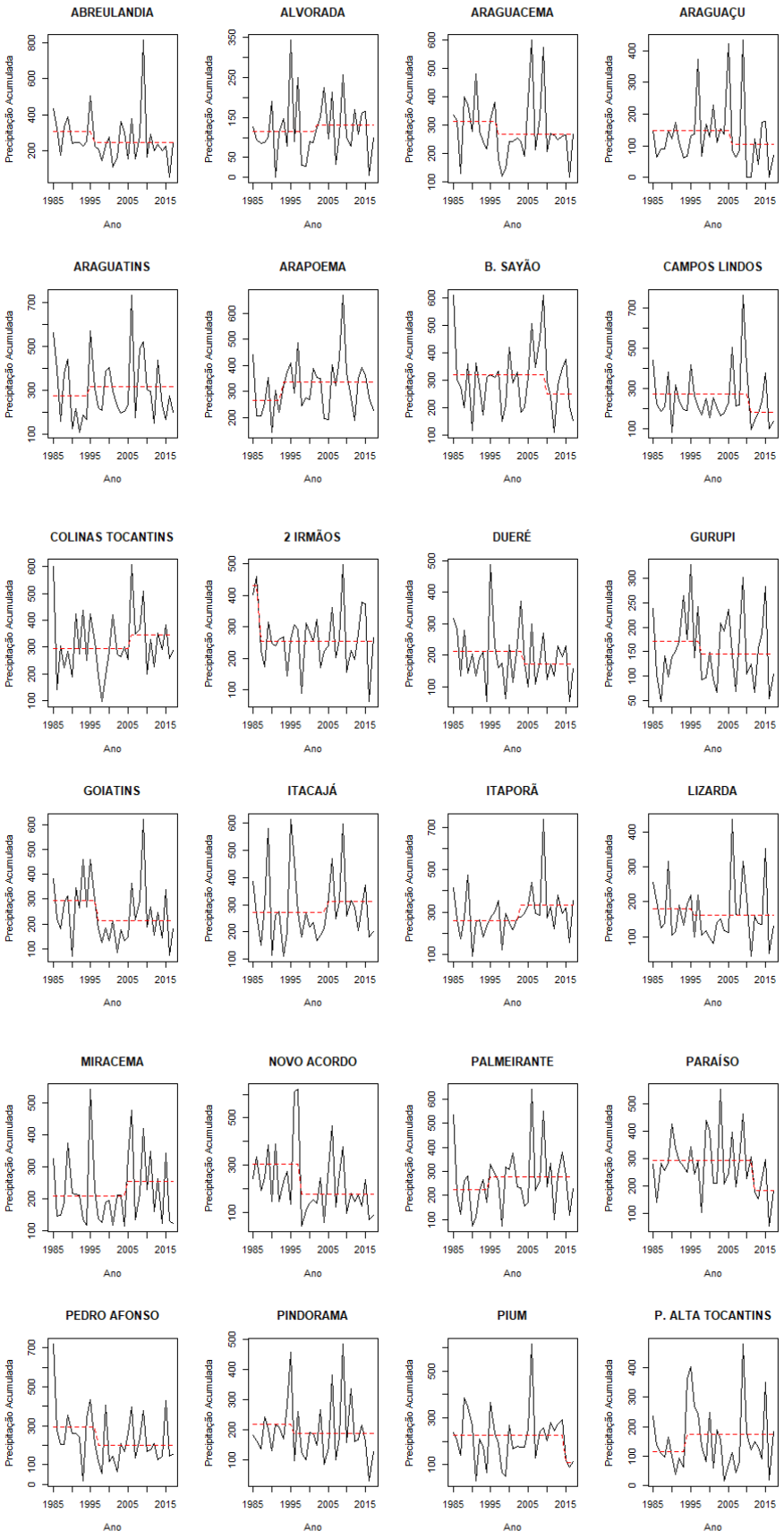

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

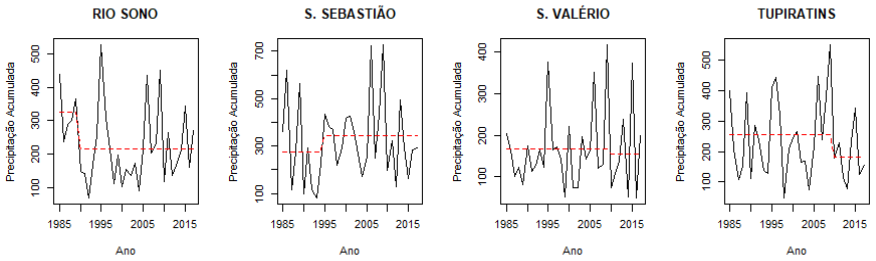

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

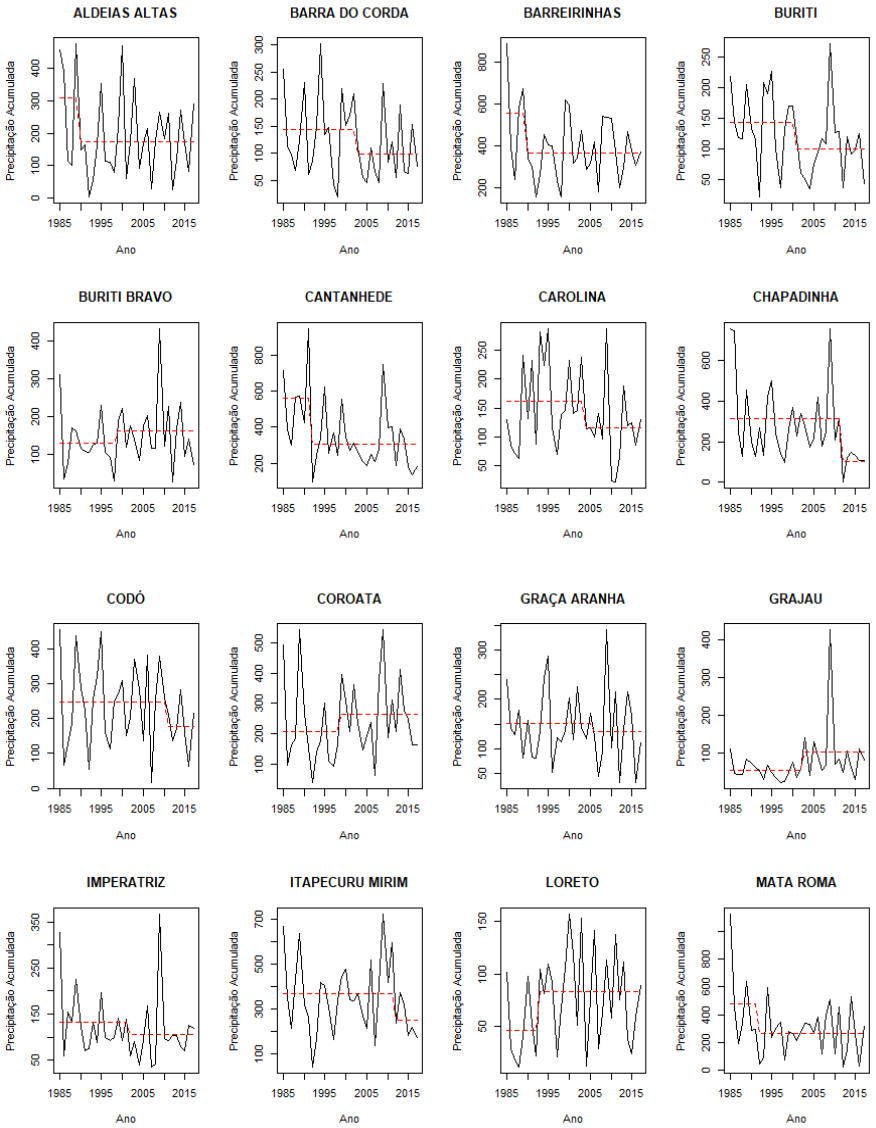

MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

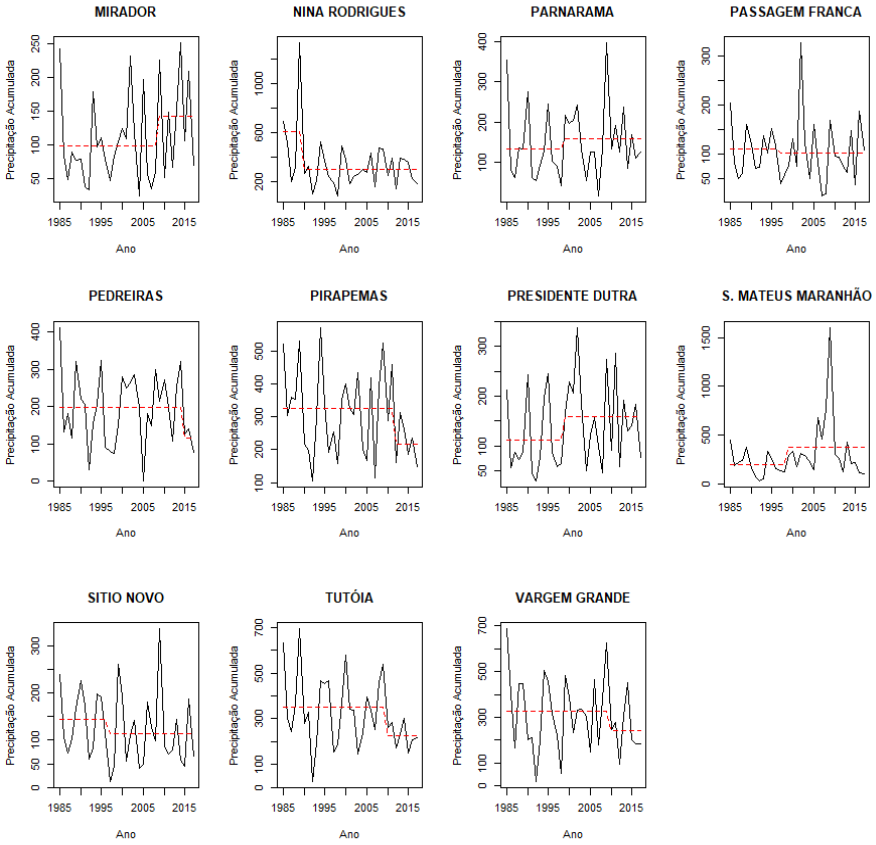

SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

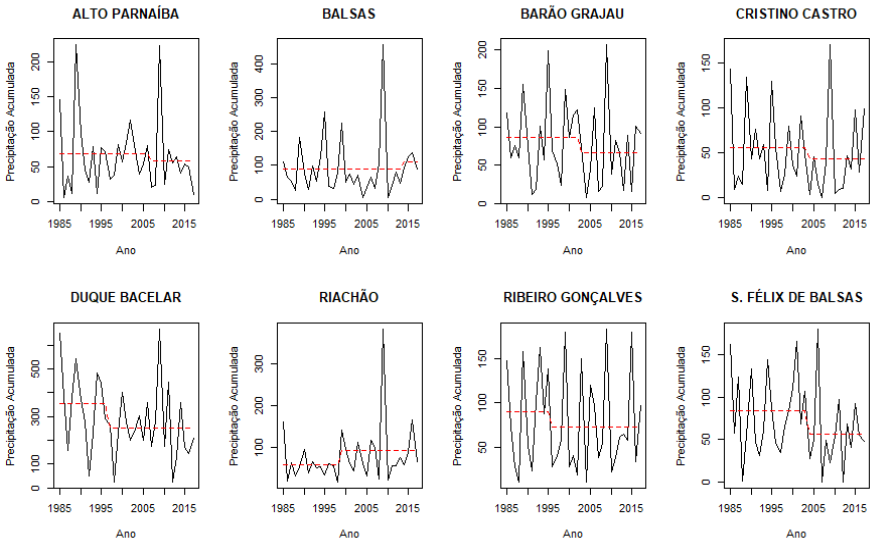

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

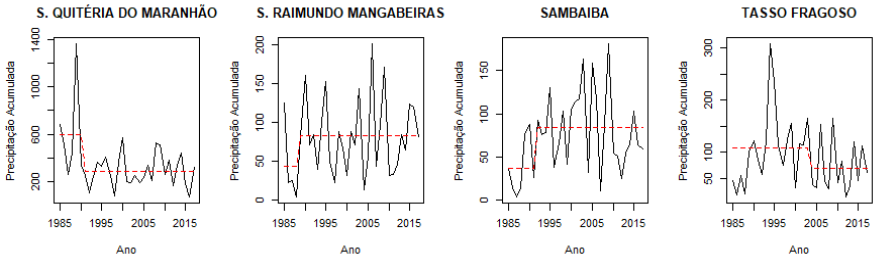


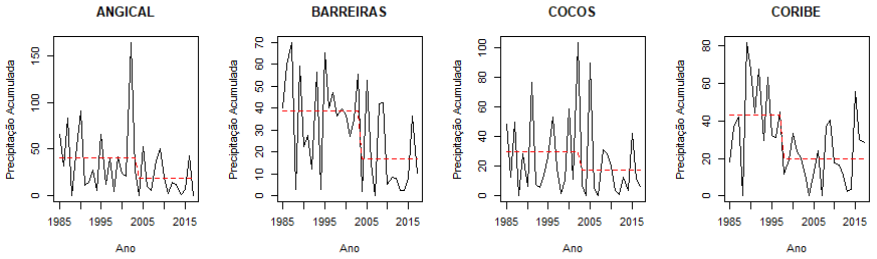
Estação Seca

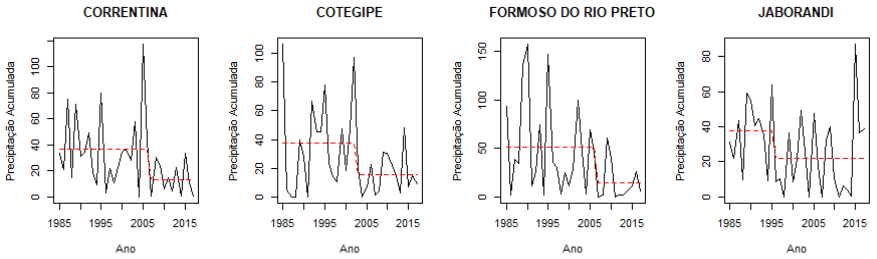


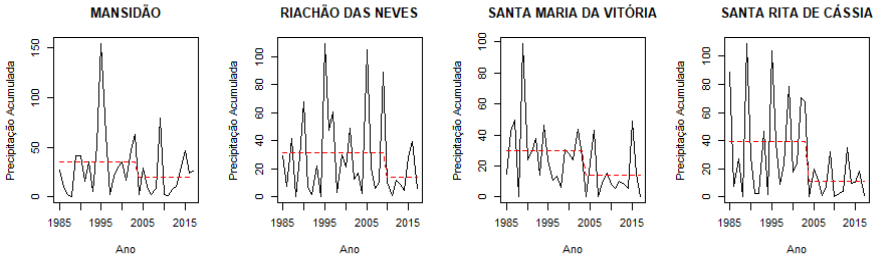

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

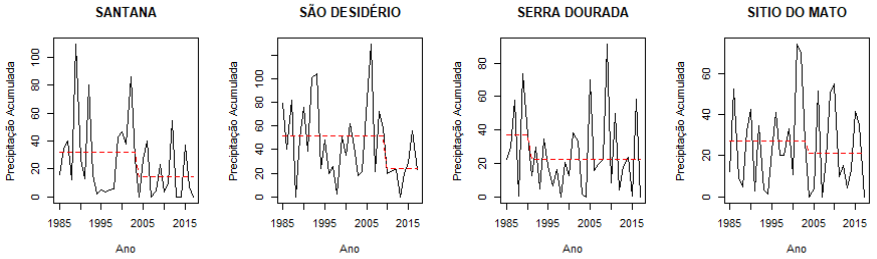

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

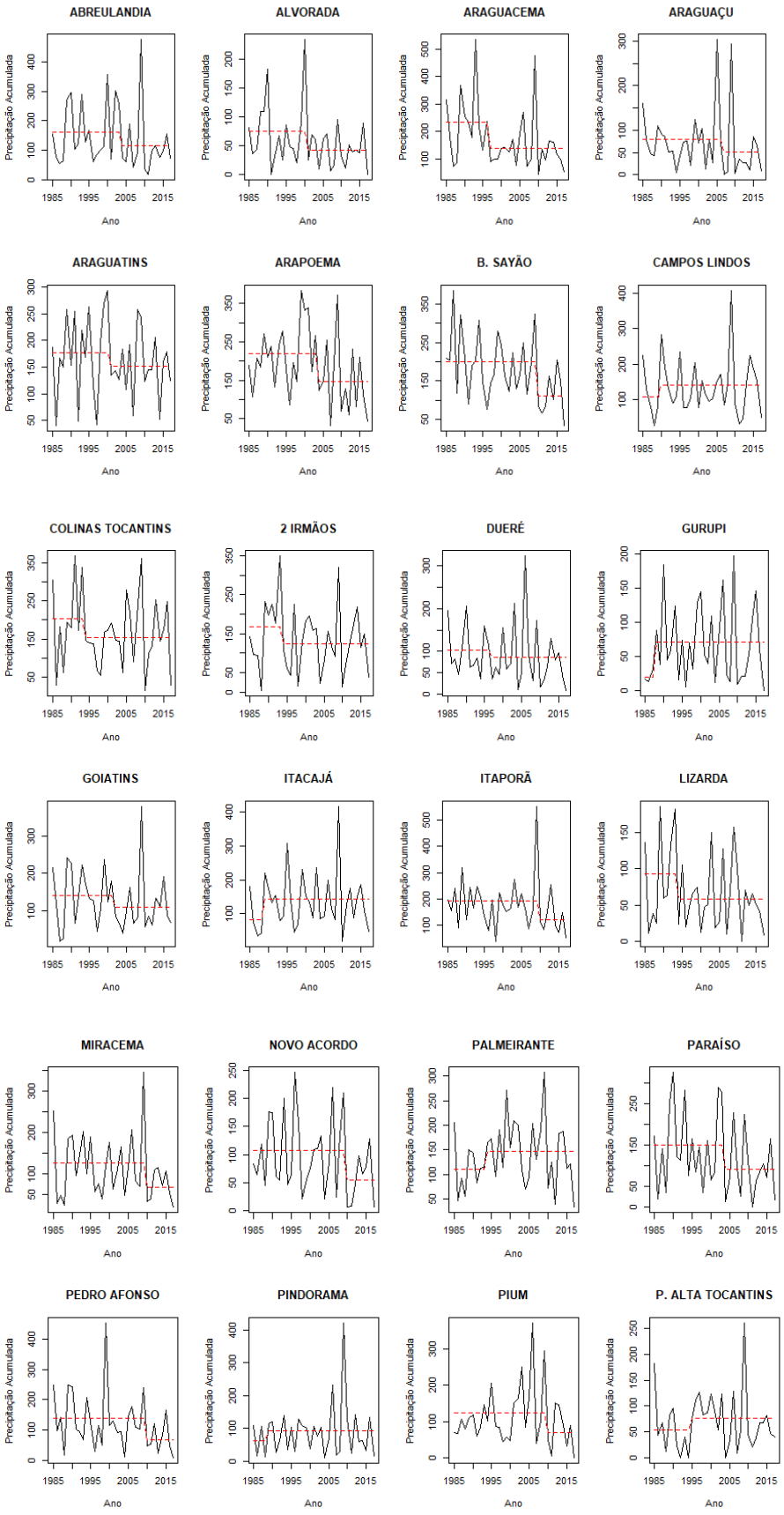

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

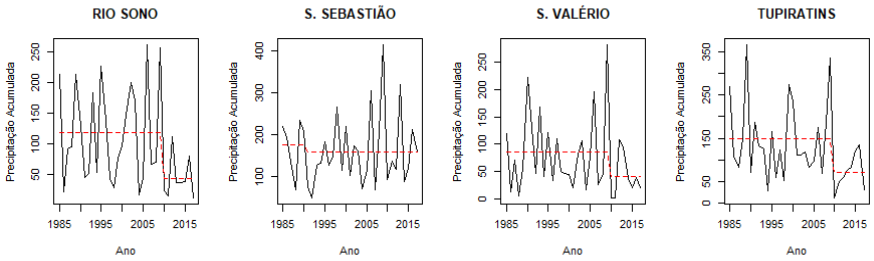

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

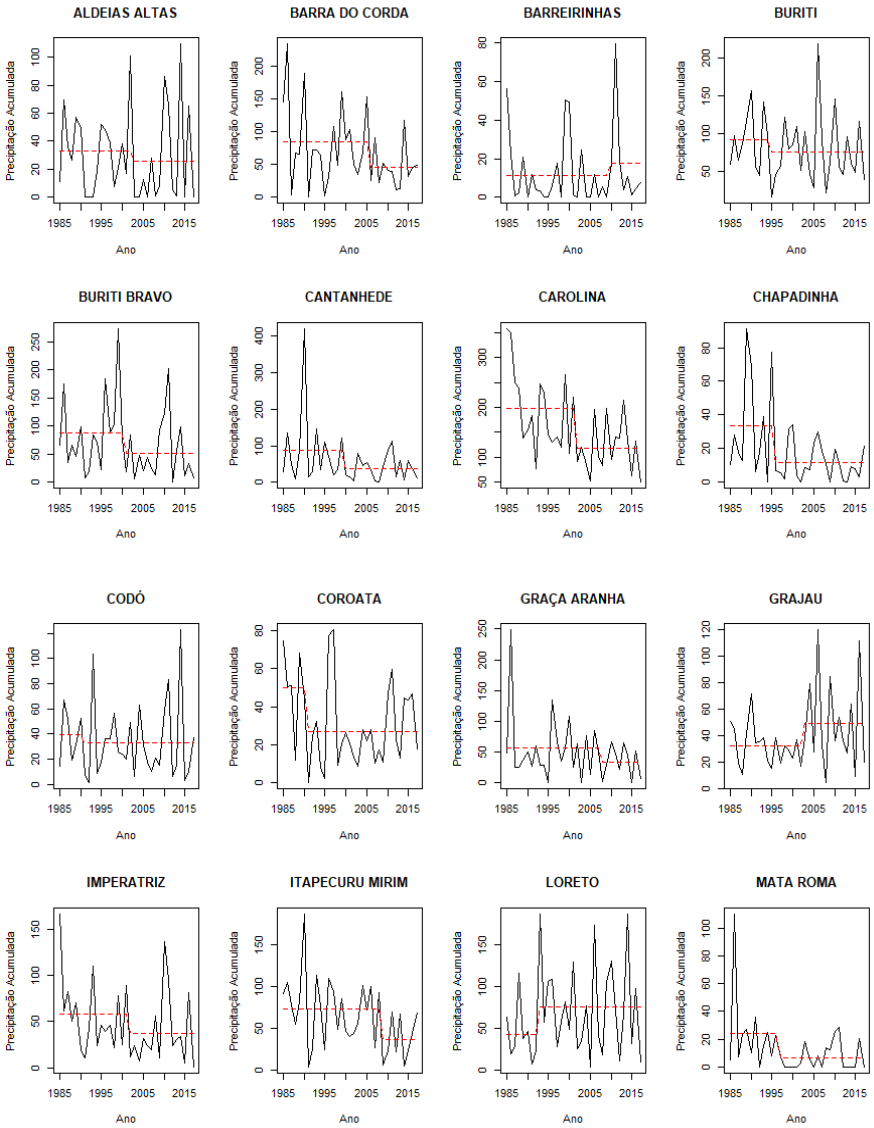

MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

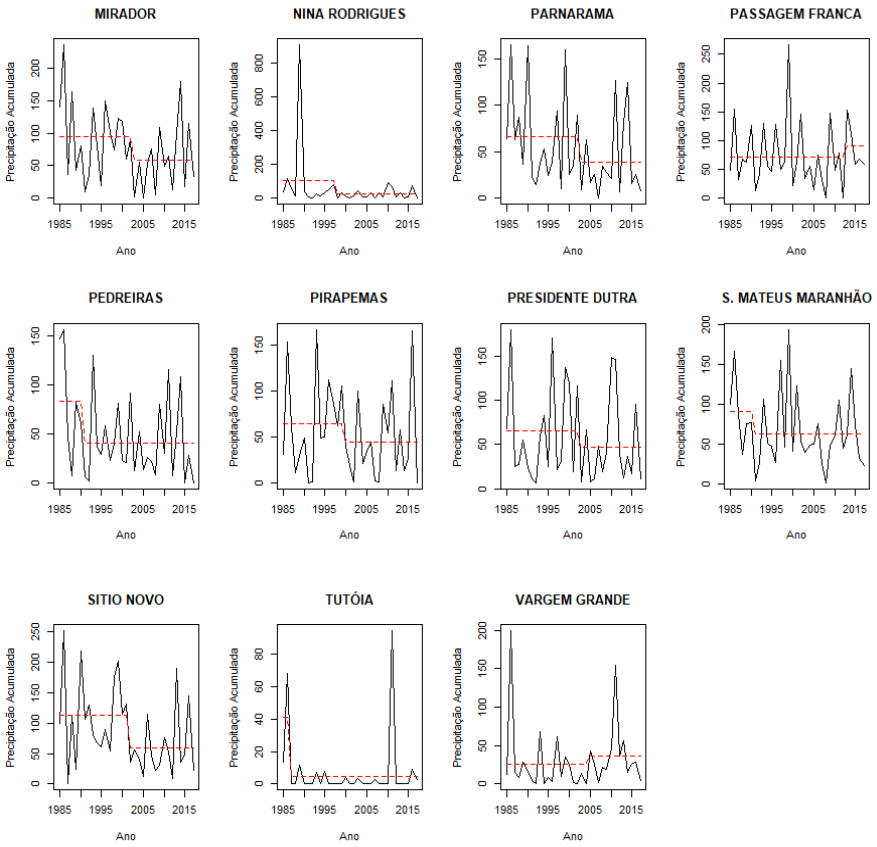

SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

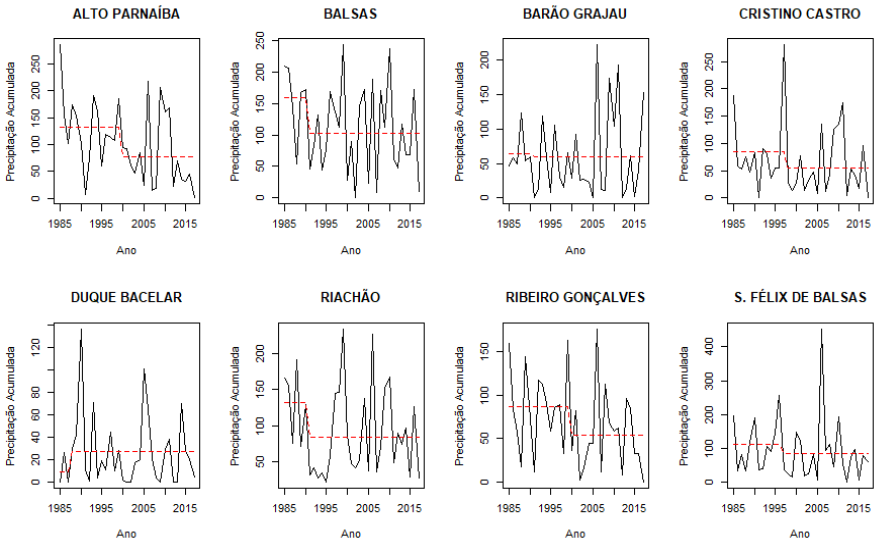

ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

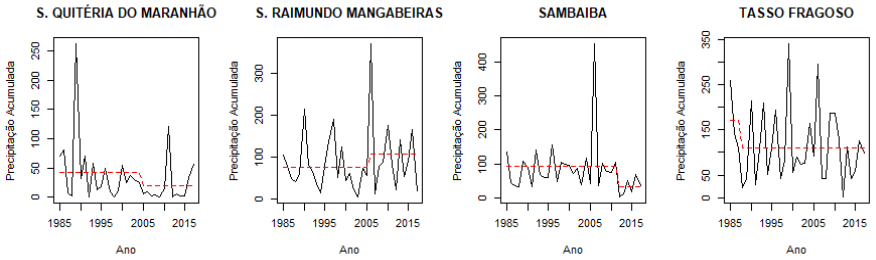


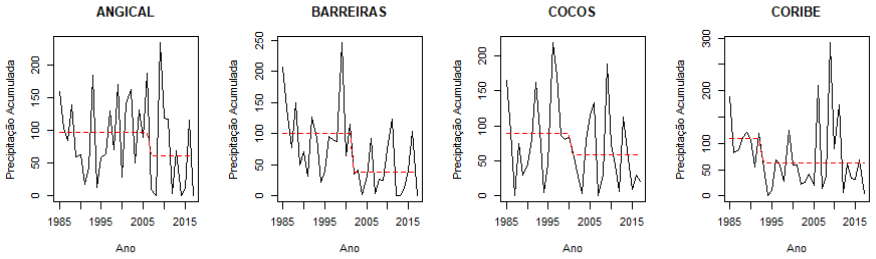
Transição seca-chuva

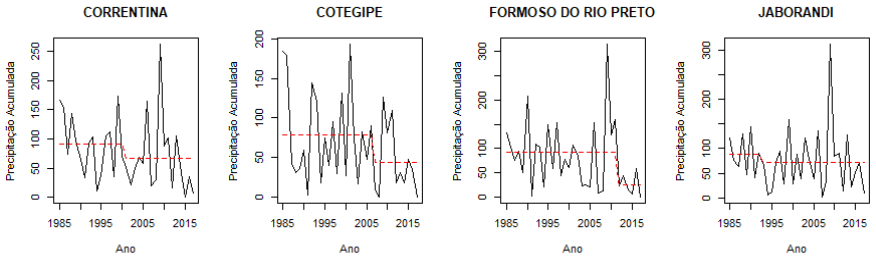


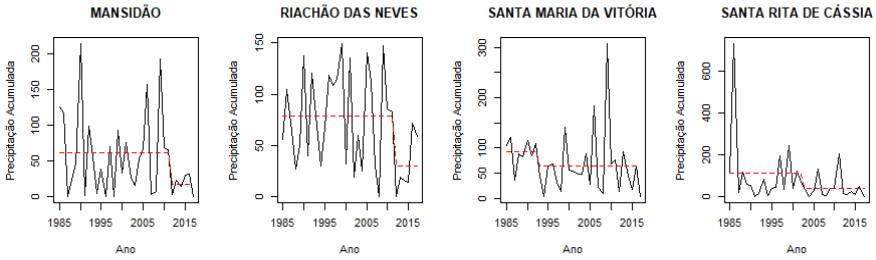

MIRADOR
NINA RODRIGUES
PARNARAMA
PASSAGEM FRANCA
PEDREIRAS
PIRAPEMAS
PRESIDENTE DUTRA
S. MATEUS MARANHÃO
SITIO NOVO
TUTÓIA
VARGEM GRANDE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

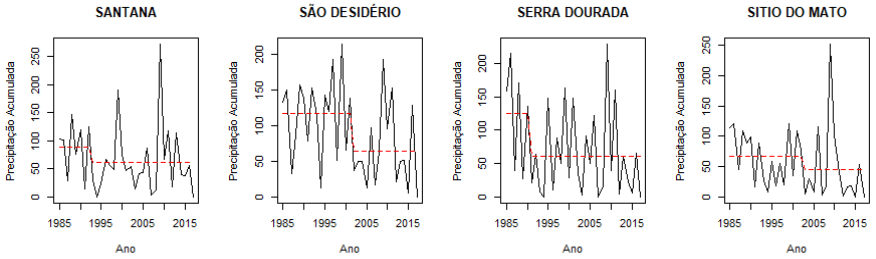

ALTO PARNAÍBA
BALSAS
BARÃO GRAJAU
CRISTINO CASTRO
DUQUE BACELAR
RIACHÃO
RIBEIRO GONÇALVES
S. FÉLIX DE BALSAS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

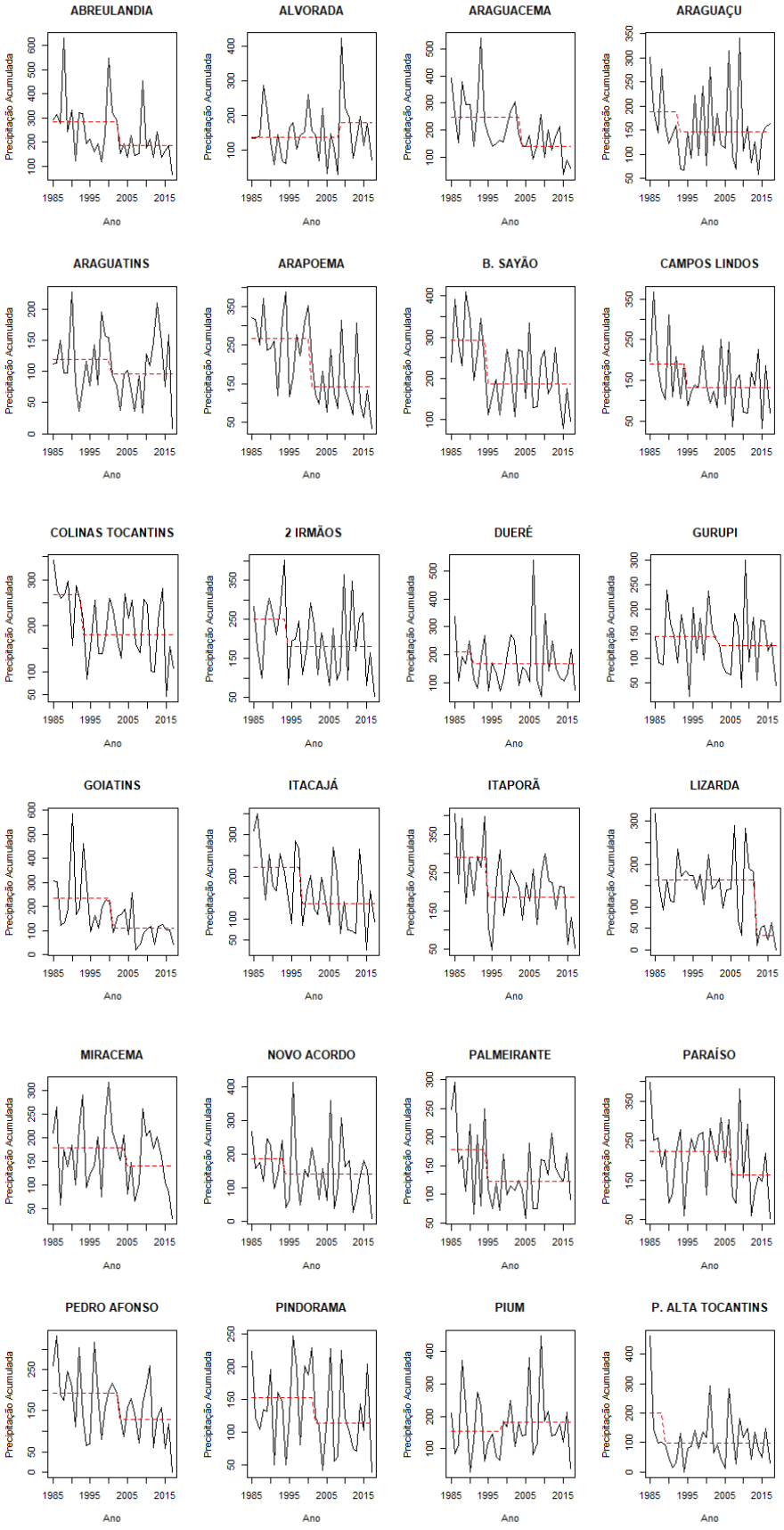

S. QUITÉRIA DO MARANHÃO
S. RAIMUNDO MANGABEIRAS
SAMBAIBA
TASSO FRAGOSO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015

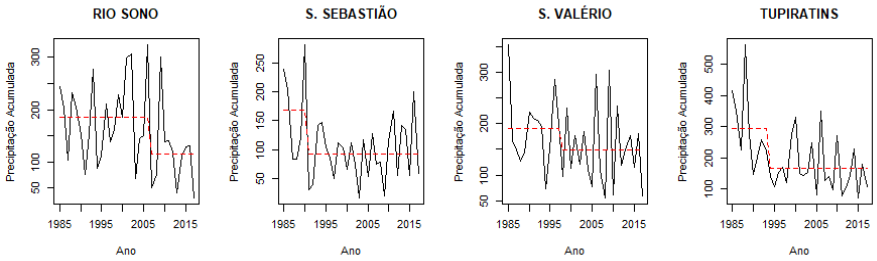

ANGICAL
BARREIRAS
COCOS
CORIBE
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


CORRENTINA
COTEGIPE
FORMOSO DO RIO PRETO
JABORANDI
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


MANSIDÃO
RIACHÃO DAS NEVES
SANTA MARIA DA VITÓRIA
SANTA RITA DE CÁSSIA
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


SANTANA
SÃO DESIDÉRIO
SERRA DOURADA
SITIO DO MATO
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


ABREULANDIA
ALVORADA
ARAGUACEMA
ARAGUAÇU
ARAGUATINS
ARAPOEMA
B. SAYÃO
CAMPOS LINDOS
COLINAS TOCANTINS
2 IRMÃOS
DUERÉ
GURUPI
GOIATINS
ITACAJÁ
ITAPORÃ
LIZARDA
MIRACEMA
NOVO ACORDO
PALMEIRANTE
PARAÍSO
PEDRO AFONSO
PINDORAMA
PIUM
P. ALTA TOCANTINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015


RIO SONO
S. SEBASTIÃO
S. VALÉRIO
TUPIRATINS
Precipitação Acumulada
Ano
1985
1995
2005
2015