

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do
cacau (*Theobroma cacao* L.) no estado do Pará**

Maiara Alonso Despontin

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Maiara Alonso Despontin
Engenheira Agrônoma

Zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau
(*Theobroma cacao* L.) no estado do Pará
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CÉSAR SENTELHAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Despontin, Maiara Alonso

Zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.) no estado do Pará / Maiara Alonso Despontin. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

93 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Cacau 2. Agroclimatologia 3. Sistema de informação geográfica 4. Balanço hídrico 5. Aptidão agrícola 6. Risco climático. I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço à ESALQ pelo crescimento pessoal, pelas amizades e pelos tropeços. Sem dúvida, responsável pela fase mais transformadora da minha vida.

Ao Prof. Paulo Cesar Sentelhas, o meu mais profundo agradecimento por todo profissionalismo e sabedoria com o qual me acolheu ao longo desses anos, especialmente durante a fase final. Sem suas palavras de incentivo e seu voto de confiança esse projeto não teria sido realizado.

À Ângela da secretaria do programa por estar sempre solícita a ajudar e pelas palavras de incentivo.

Aos colegas da Cúpula agradeço pelas conversas e carinho. Em especial agradeço à Fabiani, pelo auxílio no início do mestrado.

Ao amigo Yury (MBoi) agradeço pela amizade, pelo apoio nos momentos de tensão, pelas conversas e risadas.

À querida amiga Maria Helena, agradeço pelo encontro, por ser a mais parceira possível nesta caminhada.

Aos amigos Otávio e Cleverson, presentes que o mestrado me deu, agradeço pelo incentivo, pela força, pela amizade espontânea e sincera.

Aos pesquisadores da CEPLAC, Fernando Antônio Teixeira Mendes e Paulo Júlio da Silva Neto, agradeço pela hospitalidade e orientação durante o período em que passei em Belém.

Agradeço à organização Solidaridad Network, em especial à Joyce Brandão, pela parceria e pelo aporte financeiro que viabilizaram a execução deste projeto.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Com carinho especial, agradeço aos meus pais e minha irmã. Obrigada por serem a minha base, meu porto seguro e por compreenderem tão bem minhas inquietações. E agradeço ao amado companheiro Caio, por ser o melhor amigo que alguém pode ter. Quanto privilégio poder compartilhar a vida com vocês.

EPÍGRAFE

‘...
Tenho o privilégio de não
saber de quase tudo.
E isso explica o resto....’

Manoel de Barros

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO.....	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. A CULTURA DO CACAU – CONTEXTO HISTÓRICO.....	17
3.1.1. <i>A história do cacau na Amazônia</i>	18
3.2. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA CULTURA NO MUNDO	19
3.2.1. <i>Importância econômica da cultura no estado do Pará</i>	20
3.3. O CACAUEIRO - <i>THEOBROMA CACAO</i> L.	21
3.3.1. <i>Classificação Botânica</i>	22
3.3.2. <i>Exigências climáticas do cacau.</i>	24
3.3.2.1. Exigência Hídrica.....	25
3.3.2.2. Temperatura	26
3.3.2.3. Ventos.....	27
3.3.2.4. Radiação Solar	27
3.3.2.5. Considerações sobre o cultivo do cacau e os sistemas agroflorestais	27
3.4. O ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO.....	29
3.5. FERRAMENTAS PARA ELABORAÇÃO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO.....	31
3.5.1. <i>Balanço Hídrico Climatológico</i>	31
3.5.2. <i>Temperatura do ar</i>	32
3.5.3. <i>Sistema de Informações Geográficas – SIG</i>	33
3.5.4. <i>Geoestatística</i>	34
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.1. ESTADO DO PARÁ.....	35
4.2. DEFINIÇÃO DA BASE DE DADOS CLIMÁTICOS.....	36
4.3. DADOS CLIMÁTICOS E VARIÁVEIS GEOGRÁFICAS	37
4.4. PARÂMETROS PARA ESTABELECIMENTO DAS FAIXAS DE APTIDÃO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE RISCO CLIMÁTICO PARA A CULTURA DO CACAU	40
4.5. BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NORMAL E SEQUENCIAL.....	41

4.6. ESPACIALIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES AGROCLIMÁTICAS E ELABORAÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS	42
4.7. RISCO CLIMÁTICO.....	44
4.7.1. Critérios estabelecidos para análise de risco.....	45
4.7.2. Cálculo do índice de risco climático (IR_{CLIMA}).....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS (INMET E ANA) E INTERPOLADOS PELO SISTEMA <i>DAILYGRIDDED</i> (XAVIER ET AL., 2015) PARA O ESTADO DO PARÁ..	47
5.2. ESTIMAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR PARA A ELABORAÇÃO DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DO CACAU NO PARÁ.....	51
5.2.1. <i>Espacialização da temperatura média anual a partir dos modelos lineares em função das coordenadas geográficas e da altitude</i>	53
5.2.2. <i>Temperatura média mensal da região selecionada</i>	54
5.2.3. <i>Temperatura média anual do estado do Pará</i>	56
5.3. BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO.....	57
5.3.1. <i>Chuva</i>	57
5.3.2. <i>Evapotranspiração Potencial (ETP) e Real (ETR)</i>	58
5.3.3. <i>Deficiência hídrica (DEF) e Excedente hídrico (EXC)</i>	60
5.4. ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO DO CACAU PARA O ESTADO DO PARÁ.....	63
5.4.1. <i>Aptidão do estado do Pará para a cultura do cacau quanto ao critério temperatura média anual</i>	63
5.4.2. <i>Aptidão do estado do Pará para a cultura do cacau quanto ao critério de deficiência hídrica</i>	64
5.4.3. <i>Zoneamento agroclimático</i>	65
5.4.4 <i>Cenário 1: Zoneamento agroclimático considerando sistema agroflorestal</i>	69
5.5. RISCO CLIMÁTICO PARA O CULTIVO DE CACAU NO ESTADO DO PARÁ.....	72
5.5.1. <i>Estabelecimento dos critérios de aptidão para análise de risco climático para o cultivo do cacau</i>	72
5.5.2. <i>Cálculo do índice de risco climático (IR_{clima})</i>	76
6. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85

RESUMO

Zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.) no estado do Pará

Recentemente o Pará se tornou o líder em produção de cacau no país, sendo responsável por quase metade de toda produção brasileira. A cacauicultura no estado se destaca como uma das mais competitivas do mundo, por causa da alta produtividade média e baixo custo de produção. Esses fatores associados às características preservacionistas da produção de cacau em sistemas agroflorestais, fazem da cacauicultura paraense uma interessante alternativa para o desenvolvimento rural sustentável. O propósito deste projeto foi desenvolver um zoneamento de aptidão agroclimática e de risco climático para o cacau no estado do Pará. Para tanto, foi utilizada a série de dados climáticos do período de 1980-2013 proveniente do sistema *DailyGridded* (Xavier et al., 2015) para a confecção dos balanços hídricos normais (BHN). Os valores de evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) foram espacializados para obtenção da variabilidade temporal e espacial dessas variáveis. A interpolação da temperatura anual média (Ta) foi realizada a partir do método de regressão linear múltipla. Para extrapolação espacial das demais variáveis, bem como dos respectivos erros foi empregado o método da krigagem. Os mapas gerados de Ta e DEF foram cruzados para obtenção dos mapas finais do zoneamento agroclimático para o estado do Pará, seguindo os critérios apresentados pelo Brasil (2011). Segundo o zoneamento agroclimático, apenas 5,2% do estado é apto ao cultivo do cacau, sendo as demais áreas classificadas como marginais por deficiência hídrica (37,5%) e inaptas por intensa deficiência hídrica (57,3%). Esse resultado contrasta com a realidade do estado, que é o maior produtor de amêndoas de cacau no país. Já o zoneamento de risco climático, mostrou ser mais flexível, com cerca de 50% das localidades analisadas apresentando risco moderado a muito baixo. Ao se comparar, os resultados desses dois zoneamentos com as informações do zoneamento agrícola de risco climático (ZARC), apresentado pelo sistema Agritempo da EMBRAPA, observa-se que existem algumas disparidades de informações, sendo que o ZARC não está disponível para a maioria das localidades, o que mostra que o zoneamento do cacau é um tema que ainda precisa ser melhor estudado, especialmente com relação às interferências microclimáticas provenientes da diversificação de espécies em uma mesma área de cultivo, o que é uma prática comum da cacauicultura na região amazônica. Para realizar um estudo mais aprofundado sobre a aptidão do cacau para o estado do Pará, seria recomendável se considerar as respostas do cacau às interferências do microclima e estabelecer critérios mais adequados de tolerância à deficiência hídrica para os genótipos recentemente desenvolvidos.

Palavras-chaves: Cacau; Agroclimatologia; Sistema de informação geográfica; Balanço hídrico; Aptidão agrícola; Risco climático

ABSTRACT

Agroclimatic and climatic risk zoning for cocoa (*Theobroma cacao* L.) in the state of Pará

Pará has recently become the leader state in cocoa production, responsible for almost half of all Brazilian production. The state stands out as one of the most competitive in cocoa farming in the world, with high productivity and low costs. These factors associated with the preservation characteristics of cocoa production in agroforestry systems, make this an interesting agricultural alternative for sustainable rural development. The purpose of this project was to develop an agroclimatic and climatic risk zoning for cocoa in the state of Pará. For this purpose, it was utilized climatic data from the period 1980-2013 from the *DailyGridded* system (Xavier et al., 2015) for making the normal water balance. The outputs of the normal water balance, as potential (PET) and actual (AET) evapotranspiration, water deficit (WD), and water surplus (WS), were spatialized in order to recognize the temporal and spatial variability. For the interpolation of the temperature (Ta), it was used the multiple linear regression method. For spatial estimation of the other climatic variables and the errors, the ordinary kriging was used. The generated maps of Ta and WD were crossed in order to obtain the final maps of the agroclimatic zoning, according to the criterias presented by BRASIL (2011). The agroclimatic zoning showed that only 5.2% of the state is suitable for cultivation of cocoa. The remaining areas were classified as marginal due to water deficiency (37.5%) and unsuitable for cocoa production due to intense water deficiency (57.3%). This result contrasts with the reality of the state, which is the major producer of cocoa almond in the country. On the other hand, the climatic risk zoning is more flexible, therefore 50% of the municipalities analyzed in this work have low or moderate risk. The comparison of these results with the information from the climatic risk agricultural zoning (ZARC), presented by the Agritempo system of EMBRAPA, shows some disparities. Besides, ZARC is not available for the majority of localities, what demonstrates the necessity of further studies on cocoa zoning, specially related to the microclimatic interferences of other tree species being introduced to cocoa cultivation, which is common in the Amazon region. To carry out a more in-depth study on the suitability of cocoa production in the state of Pará, it recommended to consider the responses of cocoa to microclimate interferences and to establish more adequate criteria of water deficiency tolerance for newly developed genotypes.

Keywords: Cocoa; Agroclimatology; Geographic information system; Water balance; Agricultural feasibility; Climatic risk

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Inflorescência do cacau com diferentes estágios de florescimento. Foto: acervo pessoal da autora	24
Figura 2. Frutos do cacauzeiro aderidos ao caule. Foto: acervo pessoal da autora	24
Figura 3. Classificação climática de Köppen para o território brasileiro e para o estado do Pará. Fonte: Alvarez et al. (2013)	36
Figura 4. Locais selecionados para extração das variáveis climáticas no sistema <i>DailyGridded</i> (XAVIER et al., 2015).....	38
Figura 5. Etapas para elaboração do mapa final para cada variável climática, empregando-se os modelos de regressão linear múltipla e interpolação dos desvios.....	43
Figura 6. Etapas para elaboração dos mapas de zoneamento agroclimático para o cacau. DEF = deficiência hídrica e Ta = temperatura média do ar.....	44
Figura 7. Relação entre os dados de chuva observados do INMET e oriundos do sistema <i>DailyGridded</i> , na escala mensal	49
Figura 8. Relação entre os dados de chuva observados do ANA e oriundos do sistema <i>DailyGridded</i> , na escala mensal	50
Figura 9. Altitudes do estado do Pará e regiões adjacentes, a partir do modelo de elevação digital do terreno (MDET), gerado pelas imagens do SRTM.....	533
Figura 10. Variação espacial da temperatura média mensal no estado do Pará, estimada por meio dos modelos lineares e do modelo de elevação digital do terreno	555
Figura 11. Temperatura média anual normal para o estado do Pará	566
Figura 12. Chuva total anual normal para o estado do Pará	588
Figura 13. Evapotranspiração potencial anual normal para o estado do Pará	599
Figura 14. Evapotranspiração real anual normal para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal	60
Figura 15. Deficiência hídrica anual normal para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal	611
Figura 16. Excedente hídrico anual normal para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal	622
Figura 17. Extrato do balanço hídrico climatológico normal para as localidades de Porto de Moz, Altamira e São Félix do Xingu, no estado do Pará, considerando-se uma CAD = 125 mm. DEF(-1) representa a deficiência hídrica multiplicada por -1 e EXC representa o excedente hídrico	633

Figura 18. Aptidão agroclimática do estado do Pará para a cultura do cacau, considerando-se o atributo temperatura média anual.....	644
Figura 19. Aptidão agroclimática do estado do Pará para a cultura do cacau para o atributo deficiência hídrica anual	655
Figura 20. Aptidão agroclimática estado do Pará para a cultura do cacau considerando-se os atributos temperatura média e deficiência hídrica anuais	666
Figura 21. Cenário de deficiência hídrica anual para o estado do Pará, considerando-se redução de 30% na ETP e CAD 125mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal	750
Figura 22. Aptidão agroclimática do estado do Pará para a cultura do cacau considerando os atributos de deficiência hídrica para o cenário hipotético	75
Figura 23. Relação entre déficit hídrico normal (DEFn) e déficit hídrico médio (DEFm) para o estado do Pará, calculadas respectivamente pelos balanços hídricos normal e sequencial, para uma CAD de 125 mm	755
Figura 24. Risco climático do estado do Pará para a cultura do cacau	759

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área plantada, área colhida, produção e produtividade (kg ha^{-1}) de cacau na safra brasileira de 2018 (IBGE/SIDRA/LSPA, 2018)	20
Tabela 2. Coordenadas geográficas e altitude das localidades selecionadas para a elaboração do zoneamento agroclimático para cacau no estado do Pará e áreas adjacentes.	39
Tabela 3. Parâmetros utilizados para delimitação das áreas aptas, marginais e inaptas do zoneamento agroclimático. Fonte: Adaptado de Brasil (2011).	40
Tabela 4. Classificação dos níveis de risco climático para o cultivo do cacau em função do índice de risco climático (IR_{CLIMA})	46
Tabela 5. Comparação entre os dados meteorológicos observados (INMET) e virtuais, obtidos do <i>DailyGridded</i> , em quatro diferentes escalas temporais: diária; decendial; mensal e anual para o estado do Pará, considerando-se 30 localidades	48
Tabela 6. Coeficiente linear e angular dos modelos lineares para a estimativa da temperatura média mensal normal (T_a) para o estado do Pará, e seus respectivos de coeficientes de correlação e valores de F	522
Tabela 7. Classe de aptidão agroclimática para cacau no estado do Pará	677
Tabela 8. Classe de aptidão agroclimática para cacau no estado do Pará no cenário hipotético ...	6771
Tabela 9. Coordenadas geográficas, altitude e valores das deficiências hídricas provenientes do balanço hídrico normal e sequencial para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm.....	73
Tabela 10. Valores de deficiência hídrica média (DEF_m) correspondente aos valores de deficiência hídrica normal (DEF_n) para os limiares das classes de aptidão no zoneamento de risco agroclimático para a cultura do cacau no estado do Pará. Os balanços hídricos normal e sequencial foram elaborados para uma CAD de 125 mm.....	76
Tabela 11. Porcentagem de anos aptos (%), marginais ($AM\%$) e inaptos ($AI\%$) para o cultivo do cacau em diferentes localidades do estado do Pará e áreas adjacentes, e seus respectivos índices de risco climático (IR_{clima}) para critério de deficiência hídrica	77
Tabela 12. Comparação entre os resultados dos zoneamentos agroclimático e de risco climático para cacau no estado do Pará com os dados encontrados no Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO, 2018).	81

1. INTRODUÇÃO

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é considerado um dos cultivos perenes mais importantes do planeta (ALMEIDA; VALLE; 2007), sendo uma das principais *commodities* do cenário agrícola brasileiro e mundial. Suas amêndoas são principalmente destinadas à fabricação de chocolate, porém produtos cosméticos absorvem parte significativa da produção. Em 2012, a área de produção de cacau era de 8,2 milhões de hectares, propiciando meio de vida para mais de 6,2 milhões de famílias (FAO, 2014).

A produção de cacau está distribuída nas porções tropicais da América, Ásia e principalmente da África, cuja região equatorial concentra 75% da produção mundial. Esta concentração acarreta riscos geográficos ao suprimento de amêndoas, principalmente pelas adversidades climáticas oriundas de fenômenos como o El Niño Oscilação Sul (ENOS), o qual acarretou um déficit de 290.000 toneladas de cacau na safra 2011/2012 ao afetar severamente as chuvas na Costa do Marfim e Gana (ICCO, 2012).

O Brasil passou de segundo para sexto maior produtor de cacau do mundo. Tal queda se deu principalmente pelo ataque da “vassoura-de-bruxa”, doença fungica responsável por dizimar fazendas inteiras no sul da Bahia, que até então era o maior estado produtor do país (SILVA NETO et al., 2001). Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2018 indicaram uma produção nacional foi de 231.937 toneladas, com rendimento médio de 387 kg de amêndoa por hectare (IBGE/SIDRA/LSPA, 2018).

O estado do Pará é o atual maior produtor do país, contribuindo com quase metade da safra nacional. A região da transamazônica é responsável por 77% da produção estadual e apresenta um dos sistemas mais competitivos do mundo, com uma produtividade média de 869 kg ha⁻¹ (IBGE/SIDRA/LSPA, 2018). Em 2011, a cacauicultura se tornou segmento prioritário da política agrícola estadual, o qual possui parceria com a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), o Programa Estadual de Desenvolvimento da Cadeia Produtiva do Cacau, o qual proporciona apoio às ações a serem adotadas quanto à gestão das lavouras e aos novos plantios a serem implantados (FAPASA, 2015).

O cultivo tradicional do cacau representa um dos sistemas agroflorestais mais antigos da América tropical (LOBÃO et al., 2007). O cultivo do cacau nestes sistemas

agroflorestais possui estruturas e funções atribuídas à sustentabilidade das florestas naturais, sendo considerado um tipo de cultivo eficiente para proteção do solo tropical contra agentes de degradação (ALVIM, 1989). Esses sistemas são uma excelente estratégia para melhorar a qualidade de vida das comunidades rurais e atrair investimentos que promovam a biodiversidade em larga escala (LAMB et al., 2005).

Apesar da expansão da cultura cacaueteira no estado do Pará, ainda há carência de informações que possibilitem o avanço racional de seu cultivo, especialmente no que se refere às alternativas de culturas para seu sombreamento. Assim, ferramentas agrometeorológicas, como os zoneamentos de aptidão e de risco climático, como preconizado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), auxiliam na adoção de estratégias que definam as melhores regiões de cultivo para as diversas combinações de culturas em sistema agroflorestal, assim como na minimização das adversidades climáticas que possam prejudicar as lavouras, causando impactos locais e globais (MAPA, 2004). O zoneamento agroclimático é, portanto, uma ferramenta de extrema relevância para o planejamento agrícola, permitindo a adoção de estratégias mais precisas, otimizando os investimentos (SEDYIAMA et al., 2001).

Diante do que foi exposto, a hipótese deste estudo é de que o estado do Pará não apresenta condições climáticas favoráveis para a cacauicultura. A fim de fornecer um suporte para os novos plantios e ao planejamento da lavoura de cacau no estado do Pará, estado este que em 2017 teve mais de 2.000 km² desmatados, levando-o a liderar o índice de desmatamento da região amazônica (INPE, 2018), este projeto propõe-se a realizar um zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura no estado do Pará.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Este projeto tem como objetivo geral a elaboração do zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.) no estado do Pará.

2.2. Objetivos específicos

- Criar e ajustar banco de dados agrometeorológicos para o estado do Pará;
- Levantar e consistir banco de dados sobre os requerimentos climáticos da cultura do cacau;
- Elaborar os zoneamentos agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau no estado do Pará.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A cultura do cacau – Contexto histórico

Existem controvérsias sobre o início da domesticação do cacau. Alguns pesquisadores acreditam que esta ocorreu há mais de três mil anos, no México, sendo os Olmecas os pioneiros no cultivo e processamento de suas amêndoas (PORRO, 1997). Entretanto, outros autores sugerem que foram os maias os responsáveis pela introdução dos cacauzeiros na Mesoamérica, e tinham o cacau como um produto relevante em sua economia mesmo antes de 1.600 a.C. (SILVA NETO; LIMA, 2017).

A certeza é de que o cacau foi a espécie vegetal mais importante da Mesoamérica. Antes e durante a dominação espanhola, a cultura obtinha relevância econômica, social e religiosa maior do que o ouro. As amêndoas eram acumuladas como símbolo de riqueza e poder pelos imperadores indígenas e circulavam como moeda entre os povos nativos, eram utilizadas para transações comerciais e pagamentos de tributos, sendo também oferecidas como presente no caso de nascimento ou casamento (PORRO, 1997; SILVA NETO; LIMA, 2017).

Segundo historiadores, o preparo da bebida chocolate já era conhecida entre os povos mesoamericanos desde 1.500 a.C. A bebida tornou-se popular na Europa em 1519, após o imperador Montezuma servir chocolate em taça de ouro a Hernando Cortez e jogar a taça fora após o consumo, mostrando a maior valorização do cacau em relação ao ouro. Cortez foi o responsável por levar o chocolate para a Espanha, e a partir daí a bebida se disseminou e foi adaptada ao paladar europeu, inicialmente consumida como bebida e posteriormente como sólido, fazendo com que a demanda aumentasse exponencialmente a partir do século seguinte (SOMARRIBA; LANCHENAUD, 2013).

O México foi o primeiro país a fornecer cacau para os demais países consumidores. Por volta de 1750, a Venezuela se tornou líder mundial da produção de cacau, estendendo sua hegemonia por anos até o Equador assumir a liderança. No início do século XX a oferta de cacau no mundo atingiu 250 mil toneladas, provenientes, majoritariamente, da América do Sul e Central. Uma década após a segunda guerra mundial a África passou a produzir 2/3 de todo o cacau, e o continente Africano passou a ser o novo centro mundial de produção dessa cultura. De Gana, na época a responsável por 65% de toda a produção africana, o cacauzeiro foi introduzido

na Costa do Marfim, hoje o país líder no ranking mundial de produção de amêndoas. No início da década de 1980, o continente asiático começou a aparecer no mercado mundial, representado pela Malásia e Indonésia (MENDES, 2017).

3.1.1. A história do cacau na Amazônia

No Brasil, embora o cacauzeiro (*Theobroma cacao L.*) compusesse uma parcela significativa do revestimento florestal amazônico, e já fizesse parte da cultura indígena, as primeiras ações para sua exploração econômica na região amazônica só começaram a ganhar impulso durante o período colonial (MARTINS, 2013). A história tem registrada a década de 1670 como o início do ciclo do cultivo deliberado do cacau na região amazônica brasileira, especialmente em cercanias de Belém (ALMEIDA, 2017). A Amazônia, cuja economia do momento se apoiava em uma fraca agricultura de subsistência, enfrentava sérios problemas de relação com o mundo europeu, e as frotas de cacau facilitaram a internacionalização de outros produtos comerciáveis (ROSÁRIO, 1986).

ROSÁRIO et al. (1978) afirmam que, embora alguns estudiosos acreditem que foi apenas durante o ciclo da borracha que a sociedade amazônica se desenvolveu, foi o cacau o verdadeiro impulsionador da Amazônia no período de estruturação da vida urbana da região (século XVIII). Segundo dados históricos, a economia cacauzeira na região foi crescendo gradativamente até que se tornou o principal produto de exportação, correspondendo a 90,6% de todas as exportações no período de 1730 a 1744 (ROSÁRIO, 1986).

No início do século XIX, as plantações ingressaram em fase de decadência irreversível, resultado da queda acentuada na quantidade de frutos colhidos. Em meio a este cenário de declínio, a Goodyear descobriu a técnica para manipulação da borracha e o mercado da borracha quebrou a hegemonia da cacauicultura (MARTINS, 2013). É importante ressaltar que, apesar do desempenho da cacauicultura amazonense neste período, o desenvolvimento e a exploração da lavoura cacauzeira na Amazônia sempre se efetivaram de maneira rudimentar. A falta de preocupação governamental em estabelecer um programa de política cacauzeira comprometido com bases técnicas e racionais de exploração foi determinante para que a cacauicultura se desenvolvesse de maneira insustentável na região. O cultivo baseou-se no aproveitamento e beneficiamento do material vegetal provenientes de

cacaueiros que vegetavam espontaneamente na floresta, sem o menor cuidado com o melhoramento genético dessas plantas. Se tratava, portanto, de uma economia deficiente, efetuada sob regime extrativista (MARTINS, 2013).

Foram necessários mais de 100 anos para que o governo voltasse os olhos para a cultura novamente. A partir da década de 1970, com o advento do Plano de Diretrizes para Expansão da Cacaucultura Nacional (PROCACAU), a atividade começou a se reconstituir e ser desempenhada de maneira racional sob orientação técnica qualificada nos Estados amazônicos (SILVA NETO et al., 2001). Quando o Plano foi implantado, a produção da Amazônia não excedia 1.500 toneladas de amêndoas. Atualmente, o polo da Transamazônica configura-se como uma das maiores regiões produtoras do país. O estado do Pará sozinho produziu na safra de 2017 mais de 100 mil toneladas (IBGE/SIDRA, 2018) e detém o município com maior produtividade mundial, Medicilândia com a média de 1,1 toneladas por hectare (MARTINS, 2013).

3.2. Importância econômica da cultura no mundo

A produção de cacau é meio de vida para mais 6,2 milhões de famílias e cobre uma área de aproximadamente 8,2 milhões de hectares, concentrados principalmente nas regiões tropicais e subtropicais (FAO, 2014). Esta *commodity* é considerada como a planta perene mais importante do mundo, movimentando negócios na ordem de US\$ 120 bilhões (KPMG, 2012).

Segundo os dados estatísticos mais recentes disponíveis da *International Cocoa Organization* (ICCO, 2018), na safra 2016-2017 o mundo produziu mais de 4,7 milhões de toneladas de amêndoas de cacau. Deste montante, o continente africano é líder disparado, contribuindo com mais de 76% de toda produção mundial. Esta alta porcentagem se deve pela Costa do Marfim, o qual lidera o ranking da produção mundial. Estima-se que sua produção alcance 2 milhões de toneladas na safra de 2017-2018. Gana ocupa a segunda posição do ranking, com previsão de produzir até 880 mil toneladas nesta safra.

A produção americana contribui com 16,9% da produção mundial, o que correspondeu a 677 mil toneladas produzidas entre 2016-2017. Brasil e Equador são os representantes mais importantes do continente, com respectiva produção de 232 mil toneladas e 141 mil toneladas nesta safra. Ásia e Oceania produziram juntas 9,9%

da produção mundial na safra de 2016. A Indonésia ocupa a terceira posição no ranking dos países produtores e em 2016 produziu 320 mil toneladas (ICCO, 2018).

Com relação a demanda, tem-se os países desenvolvidos como os maiores consumidores de amêndoas. Isso se deve, principalmente, ao elevado custo do processamento das amêndoas secas de cacau para produção do chocolate como alimento. Além disso, o chocolate se tornou um produto típico da dieta da população de clima frio (MENDES, 2017). A Europa domina o mercado do cacau importando mais da metade de toda produção de amêndoas, principalmente pela participação da Holanda, Alemanha, Bélgica e França, os principais importadores de amêndoas.

3.2.1. Importância econômica da cultura no estado do Pará

O Brasil, que já foi o segundo maior produtor mundial de cacau hoje ocupa a sexta posição. De acordo com os dados do IBGE/SIDRA/LSPA de maio de 2018, a produção brasileira de cacau está dividida de acordo com os dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Área plantada, área colhida, produção e produtividade (kg ha^{-1}) de cacau na safra brasileira de 2018 (IBGE/SIDRA/LSPA, 2018).

Estado	Área plantada	Área colhida	Produção		Produtividade
	(ha)	(ha)	(t)	%	(kg ha^{-1})
Amazonas	2.178	1.818	1.339	0,6	737
Bahia	480.045	430.045	103.218	44,5	240
Espirito Santo	23.871	22.487	6.911	3,0	307
Mato Grosso	1.194	766	608	0,3	794
Pará	172.959	132.131	114.846	49,5	869
Rondônia	13.363	11.547	5.015	2,2	434
Brasil	693.610	598.794	231.937	100	387

O Pará se tornou, recentemente, o líder em produção no país, ultrapassando o estado da Bahia, produzindo hoje quase metade de toda produção brasileira de amêndoas.

A produção de cacau no estado é desempenhada basicamente por pequenos produtores e está estabelecida, predominantemente, em solos de média a alta fertilidade, o que confere à cacauicultura paraense o destaque como uma das mais

competitivas do mundo (MENDES; REIS, 2013), com produtividade média de 869 kg ha⁻¹ (IBGE/SIDRA/LSPA, 2018) e um baixo custo de produção (US\$ 800,00 t⁻¹), como foi observado no Território da Transamazônica, zona que concentra 77% da produção estadual (CEPLAC /SUEPA/SEPES, 2010).

Os fatores acima mencionados associados às características preservacionistas da cacauicultura em sistemas agroflorestais, fazem da cultura do cacau uma das mais interessantes alternativas agrícolas para o desenvolvimento rural sustentável no estado do Pará. Silva Neto e Lima (2017) afirmam que no Estado, esta atividade agrícola tem potencial para ser implantada em 300 mil hectares. O fortalecimento da cadeia produtiva do cacau e a implantação de novas lavouras já é uma estratégia do governo estadual (OLIVEIRA, 2016), o que exige ferramentas que possibilitem o avanço racional da cultura, minimizando os riscos climáticos e otimizando a recuperação de áreas degradadas pelo desmatamento.

3.3. O cacauero - *Theobroma cacao* L.

A classificação *Theobroma cacao* foi determinada por Linnaeus em 1753. A palavra *Theobroma* significa alimento dos deuses, pois os maias acreditavam que o cacauero possuía origem divina, e a palavra cacau é uma derivação de cacahuatl, sua versão na língua desse povo. Até mesmo a palavra chocolate indica ser de origem maia, com a junção do sufixo *atte* (água na língua maia) com a onomatopeia *choco*, referente ao barulho que soava ao mexer o recipiente com água e os ingredientes para a fabricação da bebida (SILVA NETO; LIMA, 2017).

Apesar deste gênero ser composto por 22 espécies (CUTRE CASAS, 1964), apenas o cacau e o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) são explorados comercialmente. Forasteiro e Criolo são os principais grupos dos quais descendem as variedades de cacau mais cultivadas (BARTLEY, 2005). O grupo Criolo, produtor das sementes mais saborosas que servem de matéria-prima para os bons chocolates (MARITA et al, 2001), deu origem às primeiras plantas domesticadas, entretanto, por possuir alta susceptibilidade à doenças seu cultivo não expandiu (SORIA, 1970). O grupo Forasteiro, devido ao seu vigor, resistência a doenças e precocidade (IWARO et al., 2001), representa 80% da produção mundial de amêndoas de cacau (MARITA et al., 2001).

Suas sementes fermentadas e secas, ou amêndoas, constitui a matéria-prima básica utilizada para extração de manteiga, pó de cacau, líquido, torta e destaque para a fabricação de chocolate. São aproveitadas as sementes e a polpa, a casca é descartada (ALMEIDA, 2017).

3.3.1. Classificação Botânica

O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.), espécie nativa da floresta tropical úmida do continente sul americano, é uma planta perene, angiosperma da classe das dicotiledôneas, ordem malvales e família Malvaceae, gênero *Theobroma*. (TOXOPEUS, 1972; MOTAMAYOR et al., 2002; CLEMENT et al., 2010; ALMEIDA, 2017). Sua característica de perenicidade garante que a vida do cacauzeiro em condições silvestres pode ultrapassar 100 anos, enquanto que a vida econômica de uma plantação pode variar de 25 a 50 anos (TOXOPEUS, 1972).

É uma planta umbrófila de porte arbóreo, podendo atingir 20 metros de altura em condições silvestres e até 8 metros em condição de cultivo. Seu caule é ereto e emite ramos laterais em uma altura variável de 1,0 a 1,5 metros, desses ramos surgem outros de crescimento vertical (ramos ortotrópicos ou chupões) e de crescimento horizontal (ramos plagiotrópicos ou palmas) (TOXOPEUS, 1972; MOTAMAYOR et al., 2002; CLEMENT et al., 2010).

Seu sistema radicular pivotante possui profundidade de até 2 m, e tem a finalidade de fixação, embora possa garantir a sobrevivência do cacauzeiro em períodos de longa estiagem ao alcançar águas subterrâneas. Em relação às raízes secundárias, 80% estão concentradas até 30 cm de profundidade e podem se distanciar horizontalmente até 6 m da planta (SOUZA et al., 2009).

As folhas são pecioladas e possuem intumescimentos nos pecíolos, chamados de pulvínulos. As folhas novas são tenras com coloração variando do vermelho ao branco, o que irá depender da quantidade de antocianina que possui, substância que é responsável por proteger as folhas contra ação direta dos raios solares. As folhas adultas são verdes (SOUZA et al., 2009). Em condições normais, é considerada a relação de 10 a 12 folhas desenvolvidas e funcionais, para atender à demanda de fotoassimilados de cada fruto saudável (PASTORELLY et al., 2006).

Seu sistema reprodutivo ocorre por meio da cauliflora, com inflorescências formadas ao longo do caule (Figura 1) e nas ramificações primárias e secundárias

mais desenvolvidas, chamadas de almofadas florais. Suas flores são hermafroditas e pentâmeras, ovários com 30 a 70 óvulos e anteras com capacidade de produzir cerca de 14 mil grãos de pólen em uma única flor (ALMEIDA, 2017). Segundo Lanchenaud e Mossu (1985), em condição experimental a pleno sol, o cacaueteiro chega a produzir até 125 mil flores planta⁻¹ ano⁻¹, entretanto menos de 5% resultam em frutos, no caso de polinização livre.

A estrutura das flores é complexa pois prolongamentos das pétalas envolvem as anteras e um círculo de estaminoides inférteis envolvem o ovário, formando assim duas barreiras físicas entre o estigma e os estames, exigindo a participação de insetos para proceder com a polinização. Apesar de alguns insetos como formigas, afídeos e tripses poderem promover a polinização acidental, a polinização do cacaueteiro limita-se ao concurso de algumas espécies de micromoscas da família Ceratopogonidae, gênero *forcipomyia* (CHAPMAN & SORIA, 1983).

O elevado grau de fecundação cruzada caracteriza a espécie como planta alógama, cujas taxas de cruzamento natural variam de 50 a 100%. Fato este que contribui para que populações formadas a partir de sementes obtidas sem controle de polinização apresentem elevada heterogeneidade (TOXOPEUS, 1972), ou para que populações locais, mesmo que tenham evoluído em condições de isolamento, representem um grupo mais ou menos heterogêneo formado por indivíduos heterozigóticos.

O fruto do cacaueteiro é indeiscente, do tipo bacóide, drupissarcídio (FIGUEIREDO, 1986), pentalocular, com grande variação de tamanho, forma, coloração, rugosidade, espessura da casca e serosidade (Figura 2). O tamanho do fruto pode variar de 10 a 32 cm de comprimento, de forma arredondada a alongada, e pode apresentar variação significativa com relação ao peso (100 até 2.000 g). Quando jovem, o fruto tem coloração do verde ao vermelho, e quando maduro as cores variam do amarelo ao alaranjado (SOUZA et al., 2009). O desenvolvimento desde a fertilização da flor até a maturação do fruto ocorre de 5 a 6 meses após a polinização, permanecendo aderido ao caule até ser colhido (FIGUEIREDO, 1986).



Figura 1. Inflorescência do cacau com diferentes estágios de florescimento. Foto: acervo pessoal da autora



Figura 2. Frutos do cacaueiro aderidos ao caule. Foto: acervo pessoal da autora

3.3.2. Exigências climáticas do cacau.

Como foi explanado anteriormente, a maior parte dos cultivos situam-se na faixa equatorial entre as latitudes de 15° N a 15° S, portanto, em regiões onde ocorrem variações climáticas relativamente pequenas durante o ano, especialmente em termos de temperatura do ar, radiação solar e fotoperíodo (SCERNE; CARVALHO, 1983). A temperatura do ar e a precipitação pluviométrica são os dois elementos climáticos que mais influenciam o crescimento e a produção do cacaueiro (SOUZA et al., 2009).

Com relação à altitude, normalmente os cacauzeiros são encontrados abaixo dos 300 m, porém em regiões de baixa latitude como na Colômbia, Venezuela e Uganda, são encontrados plantios em altitudes que vão de 900 a 1.300m (ALVIM, 1977).

3.3.2.1. Exigência Hídrica

O cacauzeiro é extremamente exigente em água. A quantidade e distribuição anual da pluviosidade afeta diretamente a quantidade e distribuição a produção das lavouras de cacau (SOUZA et al., 2009). Devido à variabilidade espacial e temporal, a quantidade de precipitação pluviométrica constitui um dos principais fatores de risco para a cacauicultura. Portanto, deve ser rigorosamente observado o regime de chuva, principalmente a sua distribuição ao longo dos meses para a implantação de novas áreas produtivas (SCERNE; CARVALHO, 1983).

Segundo Hardy (1961), a quantidade anual de chuva para o cacau deve ser superior a 1.200 mm anuais (SOUZA et al., 2009), sendo a quantidade ótima entre 1.800 a 2.500 mm ao ano (SILVA NETO; LIMA, 2017). Em regiões com precipitação pluviométrica menor do que 1.200 mm é necessário que a cultura seja irrigada (ALVIM, 1977). É importante que o regime pluviométrico seja bem distribuído ao longo do ano, sendo que a quantidade mínima mensal não deve ser inferior a 100 mm (GRAMACHO et al., 1992; SOUZA et al., 2009), e não deve possuir estação seca bem definida, em que as chuvas mensais fiquem abaixo de 60 mm. Períodos secos com mais de 3 meses são prejudiciais. Como o tipo de solo influencia na drenagem da água, é difícil estipular valores máximos de precipitação pluviométrica exigidos pelo cacau (BRAUDEAU, 1970), uma vez que este é encontrado desenvolvendo-se em regiões com até 5000 mm anuais.

Para elaboração do zoneamento agrícola do estado de São Paulo, realizado em 1974, foi estipulado que a deficiência hídrica anual deve ser inferior a 40 mm para que não ocorra restrição hídrica para o cultivo do cacauzeiro. No caso de deficiências mais pronunciadas, até 100 mm, correspondendo a acentuada restrição hídrica, a planta de cacau apresenta restrições no desenvolvimento e a formação dos frutos é defeituosa (SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1974).

Em 2011, o governo brasileiro lançou por meio da portaria nº 436, uma nota técnica sobre o zoneamento agrícola de risco climático para a cultura de cacau no

Estado do Pará. Neste documento foram estipulados os parâmetros de aptidão com relação à deficiência hídrica para a cultura, sendo que abaixo de 250 mm de deficiência hídrica as áreas foram consideradas como aptas (BRASIL, 2011). Para estes dois estudos, a capacidade de água disponível no solo foi considerada de 125mm.

3.3.2.2. Temperatura

Os processos de crescimento vegetativo e reprodução das espécies vegetais estão diretamente relacionados com a temperatura do ar (ALMEIDA; VALLE, 2007). Nas grandes áreas produtoras de cacau no mundo, a temperatura média esta compreendida entre o limite máximo de 30°C (SOUZA et al., 2009) e mínimo de 18°C (MULLER; VALLE, 2007; SCERNE; CARVALHO, 1983).

Alvim (1977) ao comparar os valores térmicos de áreas importantes cultivadas com cacau, encontrou médias anuais de temperatura variado de 22,4 a 26,7°C e as médias mensais variam de 18,8°C na região mais fria (Pariquera-Açú) a 27,9°C na região mais quente (Manaus). O mesmo autor explica que, embora a literatura cite frequentemente os limites inferiores de temperatura vistos anteriormente, não há evidencia experimental de que o cacau não possa suportar temperaturas abaixo desse limite. Como por exemplo, cita-se o caso de pequenas áreas em São Paulo, submetidas a temperaturas médias de 22,5°C e onde as mínimas absolutas, frequentemente, vão de 4 a 6°C, situando a temperatura mínima mensal média em 10°C (ALVIM, 1977). Hardy (1961), analisando dados obtidos da Costa Rica, de Gana e do Brasil, estabeleceu o limite máximo de 28°C como aquele necessário para assegurar a abertura das gemas e formação de frutos novos.

Souza et al. (2009) estipularam que as temperaturas médias ideais para o cultivo do cacau devem ser entre 21,5°C e 29,5°C, sendo que médias entre 22°C e 28°C são fundamentais para garantir boa florada e frutificação. A temperatura média mensal deve estar acima dos 15,5°C e a mínima diária não deve ser inferior de 10°C, já que vários processos fisiológicos do cacau são inibidos com temperatura abaixo de 15°C (HARDY, 1961; URQUHART, 1961).

3.3.2.3. Ventos

O cacau é uma das espécies vegetais mais sensíveis à ação dos ventos (SCERNE; CARVALHO, 1983; SOUZA et al., 2009). Nos locais onde os ventos alcançam velocidade superior a $2,5\text{ m s}^{-1}$, é recomendada a utilização de quebra-ventos com a finalidade de reduzir a evapotranspiração dos cacauais, e a queima e dilaceração das folhas. Cacauais expostos a ventos fortes dificilmente atingem desenvolvimento normal (SILVA NETO; LIMA, 2017; SCERNE; CARVALHO, 1983).

Alvim (1977) cita exemplo de dois lugares no estado do Espírito Santo que, embora apresentam a mesma quantidade de chuva anual, as velocidades médias de ventos são diferentes (4 e 1 m s^{-1}). No local com maior velocidade do vento ocorrem altos índices de desfolha, enquanto que no local onde a velocidade do vento é menor não são registrados danos mecânicos causados pelo vento.

3.3.2.4. Radiação Solar

Os limites de radiação solar favorável para o bom desenvolvimento da planta e alta produtividade do cacau ainda é um assunto polêmico. Alguns pesquisadores afirmam que o cacau é uma espécie tolerante a sombra, e não uma planta de sombra. Apesar desse conhecimento, sabe-se que cacauais vivem mais tempo quando cultivados sob sombreamento. Muller e Biehl (1993) demonstraram que uma planta sem estresse luminoso permanece com uma mesma folha por até 450 dias, porém os cacauais sob estresse perderam folhas com 250 dias. No estado do Espírito Santo, áreas cujo sombreamento permanente foi eliminado entraram em decadência em poucos anos (SOUZA et al., 2009).

Ainda não há uma recomendação segura sobre o plantio de cacau a pleno sol, portanto, é aconselhável seguir as recomendações tradicionais de cultivo, as quais recomendam a prática do sombreamento provisório e definitivo do cacau.

3.3.2.5. Considerações sobre o cultivo do cacau e os sistemas agroflorestais

Nas diversas regiões produtoras, o estabelecimento da cultura do cacau acontece basicamente de duas maneiras, após a eliminação parcial da vegetação

original (cabruca) ou em seguida ao desmatamento completo (derruba total). O sistema “derruba total” tem sido o mais utilizado na região Amazônica, pois tem desempenhado melhores resultados de produtividade. Esse processo consiste na eliminação da vegetação primária ou secundária para posterior formação dos sombreamentos provisórios e definitivos (SILVA NETO; LIMA, 2017).

Por ser uma espécie de sub-bosque, o sucesso do cacau depende da associação com outras espécies, consistindo naturalmente em um sistema agroflorestal (SCHROTH et al., 2004; SCHROTH; MOTA, 2014; SILVA NETO; LIMA, 2017). O sombreamento tem a função de amenizar os fatores ambientais adversos, entretanto não deve ser excessivo para não propiciar maior umidade ao ambiente, o que oferece condições favoráveis à proliferação de doenças. A escassez de sombra permite a incidência direta de raios solares sobre as copas dos cacauzeiros, condicionando a planta ao estresse metabólico e conseqüente maior demanda de água e nutrientes do solo.

O sistema agroflorestal, onde há essa integração com espécies arbóreas, explorando o tempo e o espaço, é uma prática tradicional de cultivo agrícola que muito tem sido estudada e realçada como um sistema mais sustentável do que os monocultivos (NAIR, 1991; STIGTER, 2013). Isto porque este tipo de sistema, desde que bem planejado, pode fornecer benefícios tanto para o ambiente produtivo, quanto ao produtor rural, por proporcionar diversificação de renda e aumentar sua resiliência (NAIR, 1991). Ao ambiente, estes sistemas promovem serviços ecossistêmicos como alta capacidade de ciclagem de nutrientes, aumento da capacidade de armazenamento de água no solo, além de apresentarem, quando comparados com a monocultura, maior diversidade tanto de flora quanto de fauna (TSCHARNTKE et al., 2011; WALDRON et al. 2012), pois sua estrutura diversificada promove habitats para insetos polinizadores e predadores de pragas (SCHROTH; HARVEY, 2007; TSCHARNTKE et al., 2011), mantendo a lavoura mais saudável com menor necessidade de insumos químicos. Além disso, os sistemas agroflorestais contribuem com o estoque de carbono (SCHROTH et al., 2013) e já tem sido estudado para integrar o cenário do mercado de carbono, o que proporcionará renda extra aos produtores rurais envolvidos com a atividade cacauzeira.

O termo ‘agro-reflorestamento’, traduzido do inglês ‘re-agro-forestation’ foi utilizado pela primeira vez por Michon et al. (2000) para designar o processo de reflorestamento a partir da implantação de sistemas agroflorestais de cacau das áreas

degradadas pelo processo de corte e queima de florestas para o uso tradicional da terra por pequenos agricultores da Indonésia, os quais são similares aos processos praticados na Amazônia (WWF, 2014). O reflorestamento baseado nas agroflorestas de cacau para a formação de corredores ecológicos com o intuito de unir áreas de floresta, oferece oportunidade para promover a biodiversidade, atingir o desenvolvimento sustentável das áreas degradadas, garantindo o sustento econômico dos produtores rurais (ASARE et al., 2014).

3.4. O zoneamento agroclimático

Para expressarem plenamente seu potencial genético, as plantas necessitam ser cultivadas sob ótimas condições de clima e de solo. Cada cultura tem suas exigências climáticas, especialmente em termos térmicos e hídricos, o que varia entre os estágios fenológicos. Portanto, uma dada região somente será considerada apta para determinada cultura se garantir que essas exigências sejam atendidas (OMETTO, 1981; PEREIRA et al., 2002). Geralmente, essas condições não são encontradas em todas as regiões, fazendo com que sejam necessários estudos sobre a variabilidade temporal e espacial das condições meteorológicas durante o ano ou ciclo da cultura, bem como o conhecimento das variáveis que regem o clima da região escolhida para o plantio de determinada cultura (SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1974; OMETTO, 1981; SCERNE & CARVALHO, 1983).

O zoneamento agroclimático é um instrumento que identifica as áreas com maior aptidão para a produção de uma dada cultura, por meio da combinação das características da região de interesse com as exigências da cultura a ser estudada (OMETTO, 1981). Já o zoneamento agrícola considera os aspectos sociais, edáficos, climáticos e econômicos da região de estudo, constituindo uma ferramenta de fundamental importância ao planejamento do setor agropecuário (CUNHA; ASSAD, 2001; PEREIRA et al., 2002).

O zoneamento agroclimático considera a aptidão climática de determinada região para a cultura de interesse. Este tipo de instrumento é essencial para um planejamento agrícola racional, pois permite a definição mais precisa das condições de aptidões térmicas e hídricas da cultura, mitigando os riscos associados à atividade agrícola. Deve ser o primeiro estudo a ser considerado no planejamento da

implantação das lavouras (PEREIRA et al., 2002). A utilização do zoneamento agroclimático minimiza os riscos e viabiliza o acesso ao seguro e crédito rurais concedidos pelo governo (SEDYIAMA et al., 2001).

Normalmente, este tipo de zoneamento considera 3 classes de aptidão, sendo: Apta, referente aos locais sem restrição hídrica ou térmica para a cultura; Restrita ou Marginal, cujos locais apresentam ou restrição hídrica ou térmica; e por último a Inapta, a qual abrange os locais onde as condições climáticas não são favoráveis ao cultivo (SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1974; PEREIRA et al., 2002).

Em culturas perenes como o cacau, a escolha correta do local de plantio é ainda mais relevante para o sucesso produtivo da lavoura, o que faz do zoneamento agroclimático uma ferramenta valiosa na gestão agrícola e na formação de políticas públicas pelo governo. Entretanto, deve-se considerar que este tipo de ferramenta avalia apenas as condições macroclimáticas e, como qualquer instrumento utilizado na agricultura, necessita de uma avaliação e de ajustes para a situação de cada região, e deve ser revisado constantemente, conforme surgirem novas tecnologias e variedades (PEREIRA et al., 2002).

Assim como a aptidão climática, a determinação do risco climático também consiste em uma ferramenta agrometeorológica, desenvolvida a partir de dados climáticos e de sistema de informação geográfica, que pode fornecer diversas informações sobre os riscos que a cultura de interesse está sujeita. O risco é quantificado por meio de análises probabilísticas, permitindo identificar as épocas mais favoráveis para o plantio e para a realização de determinadas práticas de manejo (STIGTER, 2010; SILVA et al., 1998).

Ferramentas agrometeorológicas, como o zoneamento agroclimático e determinação de risco climático, têm sido fomentadas por estratégias de governos em parceria com entidades público-privadas para direcionar os plantios em determinadas regiões, sendo critério para liberação de financiamentos e créditos aos produtores rurais. No Brasil, o zoneamento agrícola de risco climático é um instrumento de política agrícola, que está sendo gradativamente ampliado e utilizado, consolidando-se como uma ferramenta técnica científica de auxílio à gestão de riscos climáticos na agricultura (MAPA, 2018).

Nestes estudos, são consideradas as características de clima, solo e ciclos de cultivares, a partir de uma metodologia validada pela Empresa Brasileira de Pesquisa

Agropecuária (Embrapa) e adotada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Atualmente este programa já contempla 40 culturas, porém muitos estudos ainda precisam serem feitos para se abranger todo o território nacional e a grande diversidade de sistemas de cultivo (EMBRAPA, 2015).

Para o cultivo de cacau em regime de sequeiro no estado do Pará, foi realizado o zoneamento de risco climático para os municípios do estado que constam no Zoneamento Ecológico-Econômico-ZEE da Área de Influência das Rodovias BR-163 (Cuiabá-Santarém) e BR-230 (Transamazônica) no estado do Pará - Zona Oeste (BRASIL, 2011). Neste estudo foram classificadas como aptas 19 municípios do recorte geográfico estudado, não foram abrangidas todas as áreas produtivas do estado.

3.5. Ferramentas para elaboração do zoneamento agroclimático

A temperatura do ar e a disponibilidade hídrica são as variáveis climáticas que mais afetam o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas, sendo estas as mais adotadas para realização de um zoneamento agroclimático.

A temperatura do ar pode ser obtida por medições ou estimada por meio de equações de regressão linear múltipla (XAVIER et al., 2016; BRUNINI et al., 2001; PEREIRA et al., 2002). Para a quantificação da disponibilidade hídrica normalmente é empregado o balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955).

3.5.1. Balanço Hídrico Climatológico

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) consiste em uma sequência de cálculos que permitem avaliar as entradas e saídas de água de um volume de solo vegetado em escalas diárias, semanais, decendiais ou mensais (PEREIRA et al., 2002). Assim, o BHC revela disponibilidade hídrica da região avaliada e sua utilização é indispensável na definição da aptidão agrícola da região estudada (CAMARGO et al., 1974).

O BHC desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) estima o armazenamento de água do solo ao longo do tempo, tendo como dados de entrada: temperatura média do ar, usada para estimar a evapotranspiração potencial;

precipitação pluviométrica; e capacidade de água disponível do solo (CAD). A CAD é calculada pela diferença entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), multiplicada pela profundidade efetiva do sistema radicular. Entretanto, para a determinação do BHC em macroescala, os autores sugerem a seleção da CAD de acordo com a estrutura da cultura escolhida, e não pelo tipo de solo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). No caso do cacauzeiro a CAD recomendada é a de 125 mm (THORNTHWAITE; MATHER, 1957, apud SCERNE; SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1974; CARVALHO, 1983; BRASIL, 2011).

A evapotranspiração potencial (ETP), a qual expressa a quantidade de água que deixa o sistema por meio da evaporação da água do solo e transpiração de uma cultura de referência (gramado), sob condições ótimas de manejo e sem restrição hídrica, é empregada no cálculo do balanço hídrico. Os valores desta variável podem ser obtidos por diferentes métodos, no entanto, Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram um método de cálculo que depende apenas da temperatura média do ar e do fotoperíodo. Uma vez contabilizada a ETP, seu balanço com a precipitação pluviométrica fornece ao final as estimativas da evapotranspiração real (ETR), do armazenamento de água no solo (ARM), da deficiência hídrica (DEF) e do excedente hídrico (EXC) (BERNARDO, 1989; PEREIRA et al., 1997).

O balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) pode ser elaborado de duas formas, sendo uma delas o BHC normal, quando se empregam dados médios para sua elaboração, e o BHC sequencial, quando se empregam dados de uma série de anos (PEREIRA et al., 2002). O BHC sequencial tem inúmeras utilidades na agricultura, podendo auxiliar no manejo da irrigação, nas estimativas de produtividade e na determinação do risco climático das culturas agrícolas (JENSEN, 1968).

3.5.2. Temperatura do ar

Determinar a temperatura média do ar é fundamental para o planejamento agrícola e uma importante etapa do zoneamento agroclimático. Métodos de estimativa da temperatura do ar foram desenvolvidos para determinar esta variável em locais onde este tipo de dado não existe, como no caso do Brasil (BRUNINI et al., 2001; PEREIRA et al., 2002). Sabendo que a altitude e a latitude influenciam na temperatura

do ar do local, a estimativa da temperatura pode ser realizada por meio de cálculos de regressão linear múltipla a partir dos dados vizinhos, considerando os dados de latitude, longitude e altitude como variáveis independentes (PILAU et al., 2007; CASTRO, 2008; SEDIYAMA et al., 2011).

Pensando na baixa disponibilidade de dados climáticos para o Brasil, devido ao número reduzido de estações em locais remotos e à falta de série de dados consistentes, Xavier et al. (2015) desenvolveram grades de dados das variáveis climáticas estimadas para todo o Brasil durante o período de 1980-2013. Geradas à partir de dados das estações meteorológicas e pluviômetros espalhados pelo Brasil, essas grades estão na resolução de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ e apresentam as variáveis: precipitação pluviométrica; evapotranspiração potencial; temperatura mínima e máxima do ar; radiação solar; umidade relativa média e velocidade do vento (XAVIER et al., 2015).

3.5.3. Sistema de Informações Geográficas – SIG

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) constituem ferramentas eficientes para a manipulação e visualização dos dados ao integrar dados geográficos com variáveis, sendo utilizado em diversas áreas (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

Utilizando relações existentes entre a variável que se deseja estimar com as coordenadas geográficas e regressões calculadas por meio das interpolações é possível, através do SIG, obter valores estimados para todas as localidades onde não há medições (CÂMARA; MEDEIROS, 1998). Além das análises, o SIG permite a visualização simples e fácil dos dados espacialmente distribuídos, facilitando o trabalho e a representação dos dados obtidos por meio dos mapas.

A capacidade de executar múltiplos procedimentos com dados básicos e de gerar informações georreferenciadas tornaram o SIG uma ferramenta fundamental na realização de zoneamentos agroclimáticos (CECÍLIO et al., 2003), principalmente por possibilitar a extração das altitudes a partir de um modelo de elevação digital do terreno, como é o caso das imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), desenvolvido em 2000 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA). A EMBRAPA Monitoramento por satélite disponibiliza a forma digital e homogênea da base numérica de dados da topografia para o Brasil, obtidos pelo SRTM (MIRANDA, 2007 apud CASTRO, 2008).

3.5.4. Geoestatística

A geoestatística proporciona a realização de estimativas dentro de um contexto de distribuição no tempo e espaço, com correlação espacial das variáveis (LANDIM; STURARO, 2002). Essa estimativa de valores para locais que não possuem dados medidos é fundamental para a realização de estudos climáticos. Para tanto, deve ser escolhida a técnica de interpolação mais adequada a cada situação para evitar erros e obter valores uniformes (CASTRO, 2008). Para Xavier et al. (2010), sempre que houver necessidade de estimar uma variável numérica a partir de pontos amostrais medidos na vizinhança, deve-se utilizar a interpolação.

Dentro do ambiente de SIG, a krigagem é o método de estimativa básico mais utilizado. Esse método utiliza estimativa por médias móveis, de valores de variáveis distribuídos no espaço a partir de valores adjacentes, os quais são considerados interdependentes e os pesos são obtidos através de uma função denominada variograma (LANDIM; STURARO, 2002).

Como a estatística clássica não considera a correlação espacial e a localização relativa das amostras, é necessário que haja complementação dos dados com a geoestatística. Entretanto, a estatística clássica utiliza parâmetros para reduzir erros e por isso, as duas estatísticas devem ser empregadas para maior confiabilidade desses dados (CASTRO, 2008).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Estado do Pará

O estado do Pará está situado geograficamente entre os meridianos de longitude 46°O e 58°O e entre os paralelos de latitude 3°N e 10°S, centro da região Norte, tendo como limites o Suriname e o Amapá a norte, o oceano Atlântico a nordeste, o Maranhão a leste, Tocantins a sudeste, Mato Grosso a sul, Amazonas a oeste e Roraima e a Guiana a noroeste. É o segundo maior estado em extensão, com mais de 1,2 milhão de km², e o estado mais populoso da região Norte, com uma população acima de 7,3 milhões de habitantes, o que corresponde a uma densidade populacional de 5,66 habitantes por km².

O território paraense se caracteriza pelo relevo baixo e plano, com 58% do território abaixo dos 200 metros de altitude. As altitudes superiores a 500 metros estão nas serras de Carajás, Caximbo e Acari. Os principais rios do estado são os rios Amazonas, Tapajós, Tocantins, Xingu, Jari e o Pará (IBGE, 2018).

Assim como todas as regiões tropicais do globo, a região Amazônica é caracterizada pela abundância de radiação solar recebida durante o ano todo, o que acarreta em pouca variação da temperatura do ar na faixa equatorial (SILVA NETO; LIMA, 2017). Segundo a classificação de Köppen apresentada por Alvarez et al. (2013), o território paraense é caracterizado por apresentar clima tropical chuvoso (Af e Am) (Figura 3), com médias anuais de temperatura acima dos 26°C e quantidade de chuva média anual acima de 1.600 mm.

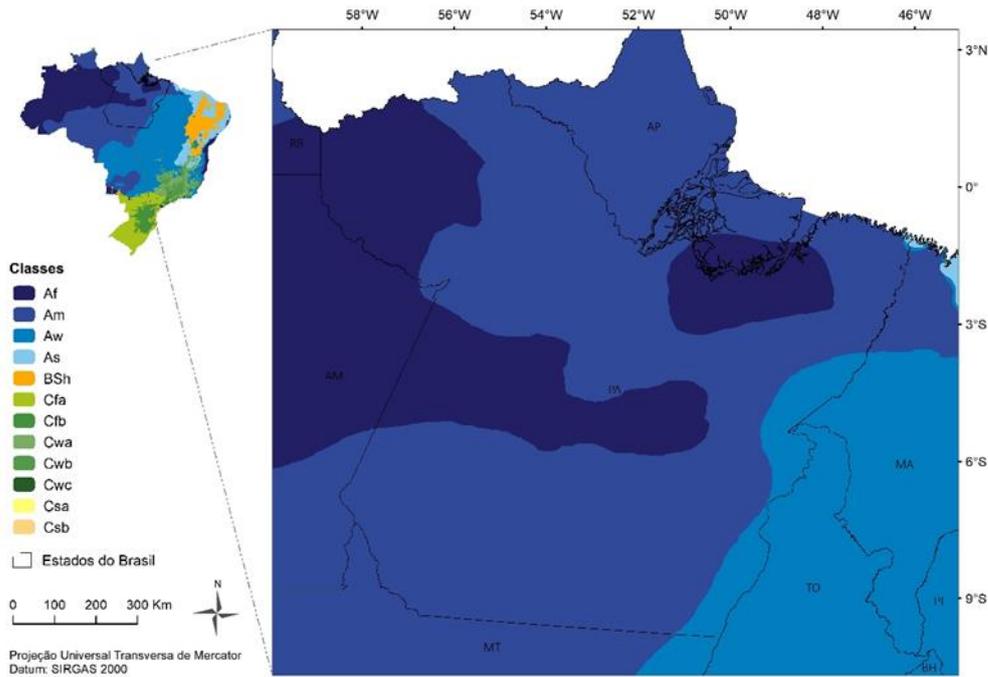


Figura 3. Classificação climática de Köppen para o território brasileiro e para o estado do Pará. Fonte: Alvarez et al. (2013)

4.2. Definição da base de dados climáticos

O primeiro passo para o desenvolvimento do projeto foi a obtenção do banco de dados para elaboração do balanço hídrico climatológico, e o posterior desenvolvimento do zoneamento agroclimático do cacau para o estado do Pará.

No Pará, assim como em muitas regiões do Brasil, além de não existir uma rede bem distribuída de estações meteorológicas, as estações existentes não possuem séries históricas consistentes e, ainda, podem apresentar falhas (XAVIER et al., 2015). Em face desta realidade, técnicas mais avançadas têm permitido o uso de dados interpolados dispostos em grades, os quais possuem grande resolução espacial. Recentemente, Xavier et al. (2016) desenvolveram um sistema de dados em grade das variáveis climáticas estimadas para todo o território brasileiro, com série histórica do período de 1980 até 2013. Esse sistema foi gerado à partir de dados das estações meteorológicas e pluviômetros espalhados pelo Brasil, o que permitiu gerar uma grade de dados na resolução de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ para as seguintes variáveis: precipitação pluviométrica; evapotranspiração potencial; temperatura mínima e

máxima do ar; irradiância solar global; umidade relativa média; e velocidade do vento (XAVIER et al., 2016).

No entanto, para que estes dados em grades possam integrar estudos de caracterização agroclimática e ferramentas agrícolas, é necessário realizar uma avaliação para comprovar o desempenho do sistema *DailyGridded* (XAVIER et al., 2015), uma vez que os dados fornecidos estão em grades. No presente estudo, para a validação dos dados estimados com os observados, foram coletadas séries climáticas históricas de 30 anos para 30 coordenadas geográficas, sendo 15 provenientes de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) contendo todos os dados climáticos citados acima, e 15 estações da Agência Nacional das águas (ANA), apenas com os dados de chuva. A partir dessas respectivas coordenadas geográficas foram extraídos os dados climáticos no sistema *DailyGridded*.

Os dados observados e estimados foram comparados em quatro escalas temporais: diária, decenal, mensal e anual. Para comparação entre os dados, foram avaliados os seguintes índices estatísticos:

- Erro médio (EM);
- Erro absoluto médio (EMA);
- Raiz quadrada do erro médio (RQEM);
- Correlação de Pearson (r);
- Coeficiente de determinação (R^2);
- Índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985);
- Índice de confiança (c) (CAMARGO; SENDELHAS, 1997).

4.3. Dados climáticos e variáveis geográficas

A tabela com as coordenadas geográficas das estações foi adicionada ao SIG (Sistema de Informação Geográfica) software *ArcGIS® 10.5* e, por meio da ferramenta *Tools – Add XY*, foram plotados seus respectivos pontos no mapa. Para compor um banco de dados climatológicos a partir de 60 locais bem distribuídos, foram estabelecidas mais 30 coordenadas no estado do Pará e próximos a ele (Figura 4).

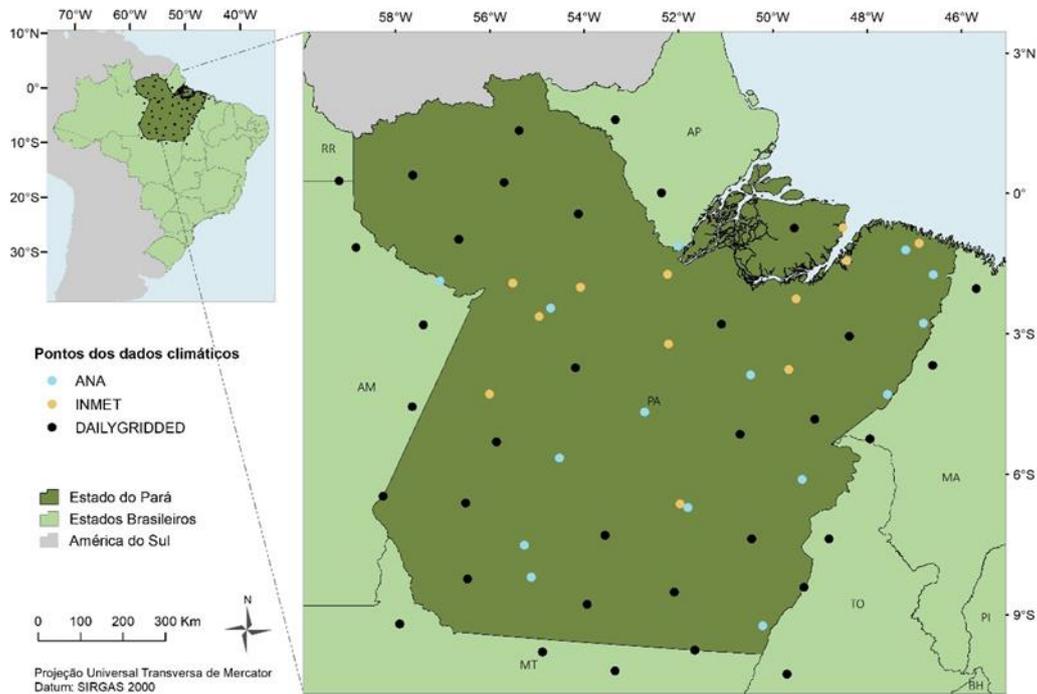


Figura 4. Locais selecionados para extração das variáveis climáticas no sistema *DailyGridded*.

Para cada coordenada geográfica foi extraída sua respectiva altitude por meio do modelo de elevação digital do terreno proveniente das imagens do SRTM, obtidas no site da Embrapa Monitoramento por Satélite. Essas imagens estavam no formato GEOTIF (16 bits) com resolução de 90 metros e projeção geográfica WGS 84, sendo preciso realizar a conversão da coordenada geográfica para o *datum* geodésico SIRGAS 2000 (Sistema de referência geocêntrico para as Américas de 2000). Esta transformação foi realizada através da ferramenta *Data Management Tools – Projections and Transformations – Project*.

A planilha completa com as 60 coordenadas geográficas (Tabela 2) foi transformada em *layer*, o que proporcionou a extração das altitudes por meio da ferramenta *Spatial Analyst Tools – Extractions – Extract Values To Point*.

- Nome do município;
- Coordenadas geográficas: Latitude, Longitude;
- Altitude;
- Série de dados diários de precipitação pluviométrica e temperatura, entre os anos de 1980 e 2013.

4.4. Parâmetros para estabelecimento das faixas de aptidão do zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau

Com base no exposto na revisão bibliográfica considerou-se que, embora a radiação solar, umidade relativa do ar e os ventos interfiram nos mecanismos fisiológicos do cacau, estas variáveis climáticas não impõem limitações ecológicas ao seu cultivo, e podem ser amenizadas pelo manejo do sombreamento e pelo uso de quebra-ventos. A temperatura e a quantidade de chuva se apresentam, portanto, como as duas variáveis meteorológicas mais importantes para o crescimento e produção do cacau (SOUZA et al., 2009).

No presente trabalho, os parâmetros adotados para a definição das diferentes faixas de aptidão climática para a cacauicultura em regime de sequeiro, foram semelhantes aos definidos para o zoneamento agrícola de risco climático para a cultura no estado do Pará (BRASIL, 2011). Os parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para delimitação das áreas aptas, marginais e inaptas do zoneamento agroclimático. Fonte: Adaptado de Brasil (2011).

Classificação	Ta (°C)
Apta	$21 \leq Ta \leq 28$
Marginal	$18 \leq Ta < 21$
Inapta	> 28
Inapta	< 18
Classificação	DEFn (mm)
Apta	≤ 250
Marginal	$250 < DEF \leq 350$
Inapta	> 351

4.5. Balanço Hídrico Climatológico Normal e Sequencial

O Balanço Hídrico Climatológico Normal (BHC) foi calculado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), em uma planilha EXCEL® desenvolvida por Rolim et al. (1998). Como os dados obtidos do sistema em grades estavam em escala diária, realizou-se a transformação dos dados para se obter os dados das médias mensais de temperatura e precipitação pluviométrica.

As variáveis de entrada para cada coordenada geográfica na planilha do BHC foram:

- Temperatura média mensal do ar (T_a ; °C);
- Precipitação pluviométrica média mensal (P ; mm);
- Latitude (grau decimal);
- CAD (mm).

O valor adotado para a CAD foi de 125 mm, como indicam vários autores (THORNTWAITE; MATHER, 1957; SCERNE; CARVALHO, 1983).

A planilha desenvolvida por Rolim et al. (1998) fornece os resultados em termos médios mensais e totais anuais. Para o seu desenvolvimento são calculadas as seguintes variáveis:

- Fotoperíodo (N ; horas);
- Índices de calor da região (I e a);
- Evapotranspiração Potencial (ETP; mm);
- Cálculo da diferença entre precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial (P -ETP; mm);
- Negativo acumulado (NEG.ACUM; mm);
- Água Armazenada no solo (ARM; mm);
- Alteração no armazenamento de água no solo (ALT; mm);
- Evapotranspiração real (ETR; mm);
- Deficiência hídrica (DEF; mm);
- Excedente hídrico (EXC; mm).

Já o balanço hídrico sequencial para cada localidade foi elaborado na escala mensal, considerando-se a série de 1980 a 2013, obtendo-se os valores anuais de todas as variáveis do BHC, demonstrando, assim, a variabilidade interanual dessas (PEREIRA et al., 2002).

4.6. Espacialização das informações agroclimáticas e elaboração dos mapas temáticos

A espacialização dos dados climáticos foi realizada por meio do aplicativo computacional *ArcGIS® 10.5 for Desktop*, sendo utilizada as extensões especiais de ferramentas *Spatial Analyst Tools* e *Geoestatistical Analyst Tools*.

As médias mensais das variáveis climáticas (Ta, P, ETP, ETR, DEF e EXC) foram sistematizadas em planilhas com o nome do local, bem como suas coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude). Estas planilhas foram inseridas no software e por meio da ferramenta *Tools – Add XY* as coordenadas geográficas foram plotadas no mapa com a projeção geográfica e *datum South America Datum 1969*, conforme a metodologia proposta por SANTOS et al. (2015).

Para a espacialização da variável temperatura média (Ta) foi realizada a regressão linear múltipla para cada mês do ano médio, sendo consideradas como variáveis independentes a latitude, a longitude e a altitude de cada coordenada geográfica, de acordo com a equação a seguir:

$$y = a + b1 * LAT + b2 * LONG + b3 * ALT$$

em que: a é o coeficiente linear da equação de regressão; b1, b2 e b3 são os coeficientes angulares; LAT é latitude em graus decimais; LONG é longitude em graus decimais; ALT é altitude em metros.

A regressão linear múltipla foi processada por meio das etapas *Spatial Statistics Tools – Modeling Spatial Relationships – Ordinary Least Square* e especializadas por meio da álgebra dos mapas. Este cálculo foi realizado pela ferramenta *Spatial Analyst Tools – Raster Calculator* a partir dos arquivos *raster* de latitude, longitude e altitude, das equações de regressão e dos dados para cada coordenada geográfica.

Os mapas em arquivo *raster* da latitude, longitude e altitude (SRTM) compuseram a base de dados em SIG para a elaboração dos mapas das variáveis climáticas. Os arquivos de latitude e longitude foram gerados a partir da ferramenta *Spatial Analyst – Interpolation – Trend*. Para a elaboração correta das interpolações, a resolução destes arquivos foi estabelecida como a mesma utilizada pelo SRTM (90 m).

Os dados de chuva e as variáveis provenientes do balanço hídrico foram espacializadas por meio da ferramenta de interpolação geoestatística Krigagem Ordinária. De acordo com Isaaks e Srivastava (1989) apud Ishihara et al. (2014), esse é o método mais recomendável para situações com tendência regionalizada, como é o caso da região amazônica. Além disso, a escolha do melhor modelo interpolador se baseou no desempenho de cada variável climática. A geoestatística foi elaborada pela ferramenta *Geoestatistical Wizard – Krigagem*.

Buscando amenizar os erros presentes nos mapas, foram calculados os desvios das diferentes variáveis. Os desvios foram gerados pela diferença entre valor observado e o valor estimado. Os desvios padrões foram interpolados pela ferramenta *Geoestatistical Analyst – Geoestatistical Wizard – Krigagem*. Os mapas de desvio de cada variável foram adicionados aos mapas da regressão da respectiva variável pela ferramenta *Raster Calculator*, como mostrado pela Figura 5, de modo a minimizar os possíveis erros (YAMADA, 2011).

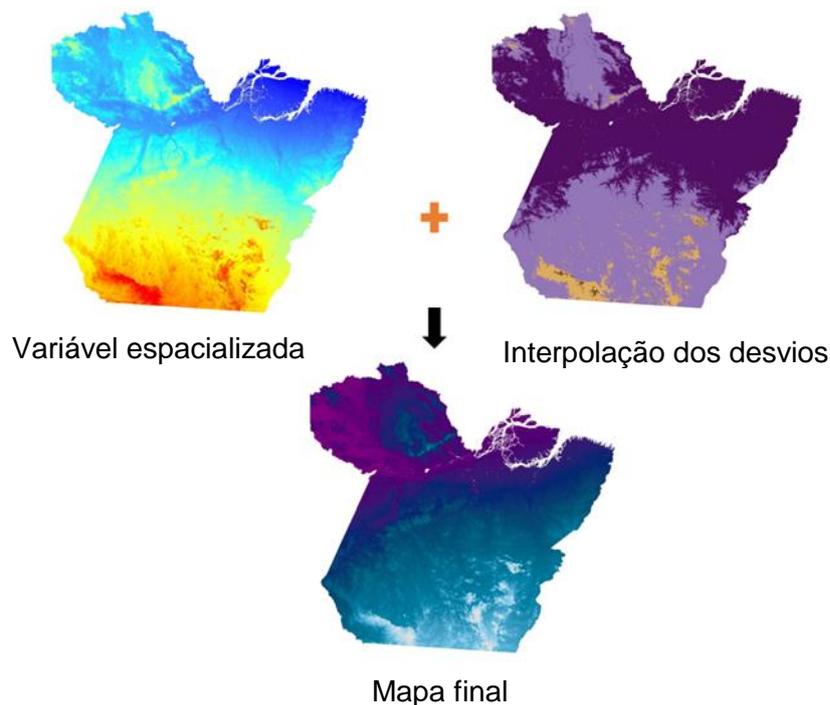


Figura 5. Etapas para elaboração do mapa final para cada variável climática, empregando-se os modelos de regressão linear múltipla e interpolação dos desvios

A classificação dos mapas das variáveis dentro dos critérios estabelecidos para o zoneamento agroclimático do cacau foi realizada por meio da ferramenta *Spatial Analyst – Reclass*.

O mapa final do zoneamento agroclimático foi elaborado pela sobreposição dos mapas das variáveis temperatura média e deficiência hídrica já reclassificados, conforme esquema apresentado na Figura 6.

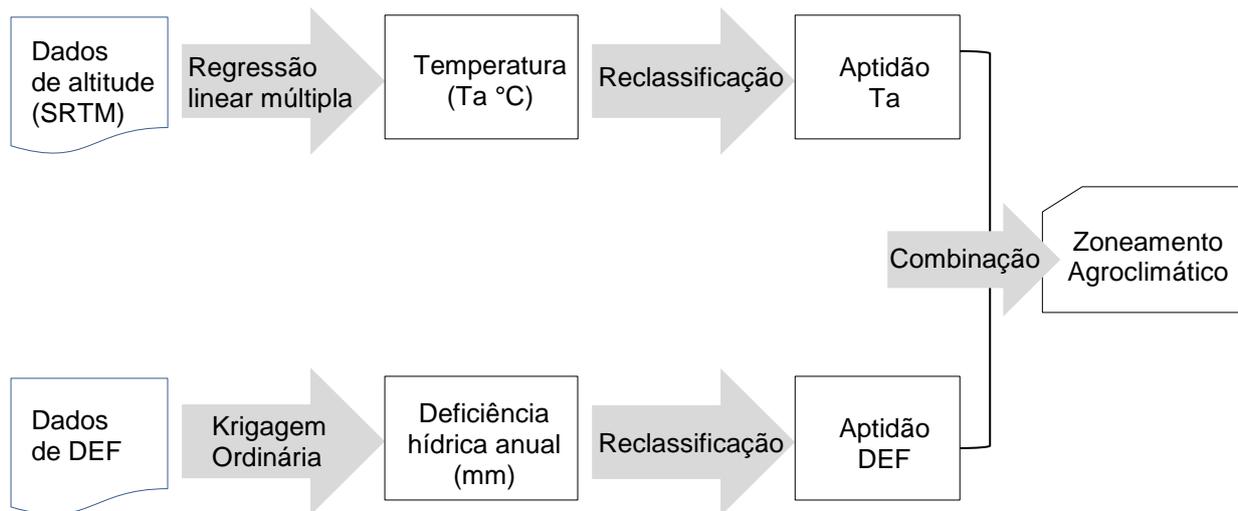


Figura 6. Etapas para elaboração dos mapas de zoneamento agroclimático para o cacau. DEF = deficiência hídrica e Ta = temperatura média do ar

Com a finalidade de identificar a possível variação no zoneamento agroclimático quando considerado as variações microclimáticas que os sistemas agroflorestais podem fornecer ao ambiente, foi realizado um estudo para um cenário hipotético no qual foi estipulado a redução de 3°C na temperatura e a redução de 30% da evapotranspiração potencial (ETP). Como o estado do Pará apresenta alta temperatura média anual, o mapa de aptidão para temperatura não foi modificado. Os mapas de deficiência hídrica e o zoneamento agroclimático para esta situação foram desenvolvidos da mesma maneira que os desenvolvidos para a situação real.

4.7. Risco Climático

O zoneamento agroclimático, realizado de maneira clássica determina a aptidão das áreas para plantio da cultura de interesse sob a ótica do macroclima. Portanto, estudo elaborados a nível de BH sequencial, como o caso do zoneamento

de risco climático se fazem necessários para aprofundar o conhecimento sobre a aptidão dos locais para determinadas culturas.

Neste projeto, o estudo do risco climático para o cacau foi realizado para todas as coordenadas geográficas utilizadas para o zoneamento agroclimático.

Para análise de risco climático foram realizadas as seguintes etapas:

- Cálculo do Balanço Hídrico Sequencial (BHSequencial)
- Ajuste dos critérios do zoneamento agroclimático
- Cálculo do Índice de Risco Climático (IR_{clima})

4.7.1. Critérios estabelecidos para análise de risco

O risco climático exige que os critérios estabelecidos para a elaboração do zoneamento agroclimático sejam adaptados ao nível do balanço hídrico sequencial. O balanço hídrico sequencial de cada localidade foi elaborado com base na planilha desenvolvida por Rolim et al. (1998). O balanço sequencial permitiu a extração dos dados de déficit hídrico médio (DEFm), o qual difere da deficiência hídrica do balanço hídrico normal (DEFn) por ser a média real proveniente dos DEF calculados ano a ano. Por meio da regressão linear simples entre os dados de DEFm e DEFn, foi possível estabelecer os critérios de DEFm para o zoneamento de risco climático.

4.7.2. Cálculo do índice de risco climático (IR_{CLIMA})

O cálculo índice de risco climático para a cultura do cacau (IR_{CLIMA}) proporciona um maior grau de segurança com relação aos resultados, já que emprega informações da série histórica, ano a ano, e não os dados médios. Para obtenção deste índice, foram avaliadas as porcentagens de anos com condições aptas (%AA), inaptas (%AI) e marginais (%AM) para o cultivo do cacau, a partir dos critérios de zoneamento ajustados para o BH sequencial. Para cada uma dessas porcentagens foi atribuído um peso (p), sendo que este foi maior para as condições aptas (5), intermediário para a condição marginal (3) e menor para a inaptidão (1). O cálculo do IR_{CLIMA} foi realizado pela seguinte equação:

$$IR_{CLIMA} = (\%AA * 5 + \% AM * 3 + \%AI * 1) / 100$$

A partir desse índice foi possível identificar o risco para cada uma das localidades avaliadas. Esse risco foi dividido em cinco classes, desde muito alto até muito baixo (Tabela 4), conforme proposição de Yamada (2011).

Tabela 4. Classificação dos níveis de risco climático para o cultivo do cacau em função do índice de risco climático (IR_{CLIMA})

Intervalo de índice IR_{CLIMA}	Classificação do risco nomenclatura	Caracterização da área de acordo com índice
0 - 1,5	Muito Alto	Ambientes onde a produtividade do cacau será muito baixa na maioria dos anos, com predomínio de anos inaptos
1,6 - 2,0	Alto	
2,1 - 3,0	Moderado	Ambientes que predominam anos em que condições de aptidão são marginais
3,1 - 4,0	Baixo	Melhores condições para o cultivo do cacau
4,1 - 5,0	Muito Baixo	

Os índices climáticos para cada coordenada geográfica foram interpolados pelo método da Krigagem Ordinária com a finalidade de produzir o mapa de risco climático para o estado.

Após a análise do risco climático, foi realizada a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com os dados oficiais do zoneamento de agrícola de risco climático (ZARC) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2011), disponibilizados pelo Sistema Agritempo da EMBRAPA (AGRITEMPO, 2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Comparação entre os dados meteorológicos observados (INMET e ANA) e interpolados pelo sistema *DailyGridded* (XAVIER et al., 2015) para o estado do Pará

Como apresentado na Tabela 5, foi possível observar que os dados em grade possuem boa correlação com os dados observados do INMET, principalmente nas escalas decendial e mensal. As variáveis temperatura máxima, chuva e radiação solar global destacam-se por terem apresentado os índices d , r , R^2 acima de 0,90, indicando alto grau de associação, exatidão e desempenho dos dados. Apesar dos altos valores de erros na chuva, o índice de concordância d , que indica a exatidão dos valores estimados, foi maior que 0,95. O que pode ser explicado pela variabilidade espaço-temporal dessa variável. A temperatura mínima também apresentou um ótimo desempenho e correlação com os valores observados.

Tabela 5. Comparação entre os dados meteorológicos observados (INMET) e virtuais, obtidos do *DailyGridded*, em quatro diferentes escalas temporais: diária; decendial; mensal e anual para o estado do Pará, considerando-se 30 localidades

Variáveis	Escala	Índices Estatísticos						
		EM	EAM	RQEM	d	r	R ²	c
Chuva (mm)	diário	-0,147	2,255	5,554	0,951	0,916	0,839	0,871
	decendial	-1,666	11,072	22,415	0,999	0,997	0,995	0,996
	mensal	-4,267	20,923	40,318	0,988	0,969	0,939	0,958
	anual	-49,524	140,900	280,609	0,959	0,922	0,852	0,885
T máx (°C)	diário	-0,054	0,123	0,355	0,993	0,985	0,970	0,978
	decendial	-0,056	0,102	0,287	0,994	0,985	0,970	0,979
	mensal	-0,054	0,093	0,273	0,995	0,985	0,970	0,980
	anual	-0,051	0,080	0,238	0,990	0,980	0,958	0,970
T mín (°C)	diário	0,139	0,280	0,792	0,939	0,897	0,805	0,843
	decendial	0,141	0,268	0,759	0,964	0,890	0,792	0,858
	mensal	0,141	0,255	0,743	0,972	0,887	0,786	0,862
	anual	0,154	0,250	0,717	0,915	0,875	0,767	0,800
Qg (MJ m ⁻² d ⁻¹)	diário	-1,766	1,972	2,319	0,933	0,954	0,910	0,890
	decendial	-1,777	1,809	1,967	0,907	0,966	0,933	0,876
	mensal	1,750	1,787	1,921	0,907	0,963	0,927	0,873
	anual	-1,708	1,750	1,809	0,756	0,954	0,909	0,721
Vel vento (m s ⁻¹)	diário	0,013	0,547	0,702	0,614	0,476	0,227	0,292
	decendial	0,000	0,492	0,635	0,837	0,423	0,179	0,354
	mensal	0,022	0,471	0,612	0,829	0,411	0,169	0,340
	anual	0,047	0,460	0,592	0,442	0,310	0,106	0,137
UR (%)	diário	-1,012	3,684	5,029	0,902	0,842	0,709	0,759
	decendial	-0,902	3,239	4,535	0,900	0,839	0,703	0,754
	mensal	0,022	0,471	0,612	0,829	0,411	0,169	0,340
	anual	-1,037	2,991	4,072	0,805	0,775	0,583	0,624

EM: erro médio; EAM: erro absoluto médio; RQEM: raiz quadrado do erro médio; d: índice de concordância; r: correlação de Pearson; R²: coeficiente de determinação; c: índice de confiança.

A estimativa da umidade relativa apresentou boa correlação entre os dados nas escalas diárias e decendiais (Tabela 5). Por ser uma variável de difícil medição e estimatção, a velocidade do vento é a variável com os piores índices estatísticos, dada sua grande variabilidade espacial e temporal. Além disso, essas duas variáveis

foram as que apresentaram o maior número de dias com falhas nas medições e, portanto, tendo menos números observados para a análise.

Com relação aos dados de chuva provenientes ANA (Figura 8), a comparação com o sistema *DailyGridded* apresentaram índices estatísticos semelhantes à comparação realizada para os dados de chuva do INMET (Figuras 7). As escalas decenal e mensal foram as que apresentaram as maiores correlações entre os dados estimados e observados, apresentando elevado desempenho ($r = 0,92$ e $c = 0,89$ para escala decenal; $r = 0,95$ e $c = 0,93$ para escala mensal). Embora os valores de erro tenham sido altos (RQEM= 22,15 e 45,80 mm), os valores do índice d (0,96 e 0,97) demonstram a alta exatidão dos valores estimados pelo sistema *DailyGridded*.

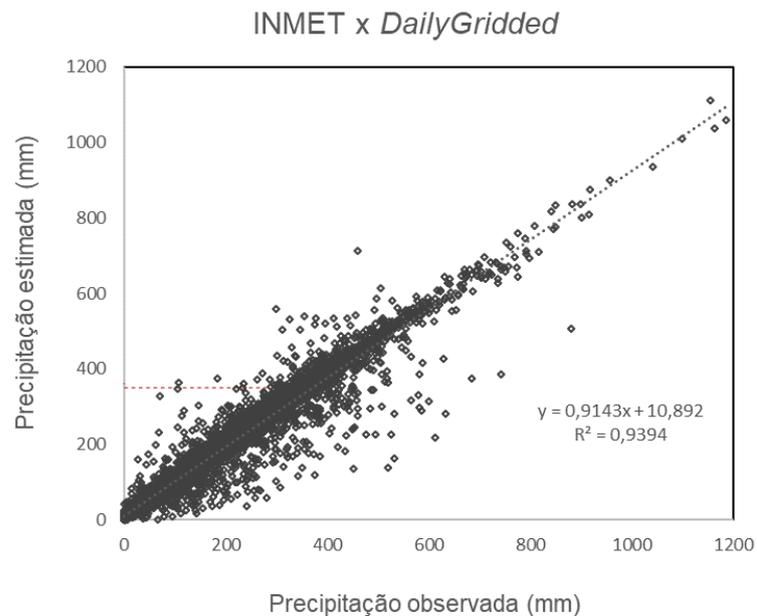


Figura 7. Relação entre os dados de chuva observados do INMET e oriundos do sistema *DailyGridded*, na escala mensal

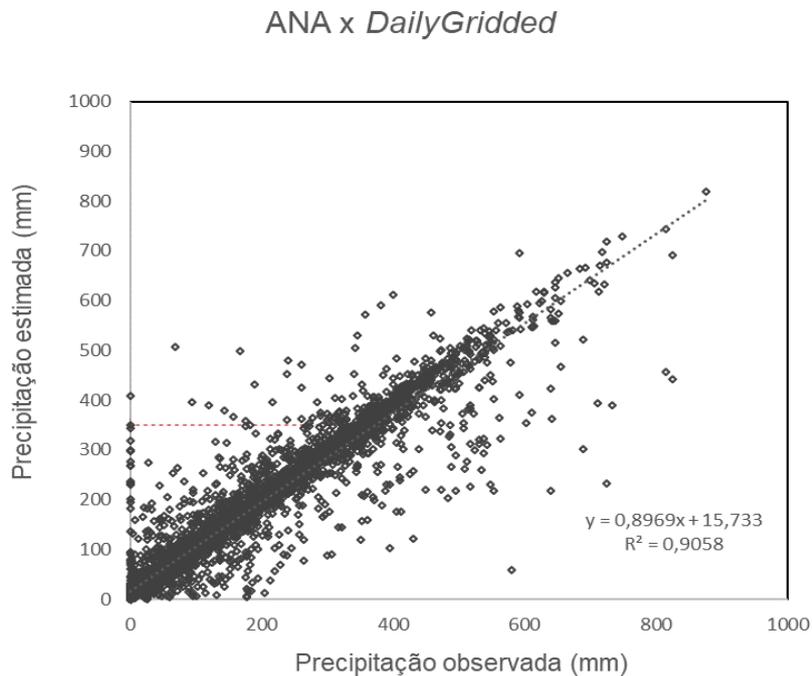


Figura 8. Relação entre os dados de chuva observados do ANA e oriundos do sistema *DailyGridded*, na escala mensal

Os resultados mostraram uma alta correlação entre os dados climáticos estimados pelo *DailyGridded* com os dados observados do INMET e da ANA. Em especial para as escalas decenal e mensal, com erros baixos e com boa exatidão e bom desempenho (Tabela 5, Figuras 7 e 8).

Os resultados permitem concluir que os dados climáticos de estações virtuais do sistema *DailyGridded* para o estado do Pará são passíveis de serem empregados em estudos agroclimáticos, como o zoneamento agroclimático e de risco climático.

Diante disso, o sistema *DailyGridded* foi o escolhido para compor a base de dados utilizada para elaboração dos zoneamentos propostos neste estudo.

5.2. Estimacão da temperatura do ar para a elaboraco do zoneamento agroclimático do cacau no Pará

Para que os dados de temperatura fossem espacializados para todo o território paraense foi necessário a elaboraco de modelos lineares para a estimacão dessa variável. Os modelos lineares gerados para a estimacão da temperatura média mensal a partir das coordenadas geográficas (longitude e altitude) e altitude, apresentaram em média valores de coeficiente de correlaco (r) baixos, menores do que 0,3 na média. Estes resultados corroboram com o estudo realizado por Ferreira et al. (2006), o qual também apresentou baixos coeficientes de correlaco quando estimando as temperaturas médias mensais para o estado do Pará.

No entanto, os resultados podem ser considerados adequados, uma vez que os desvios das estimativas foram considerados na espacializaco desta variável. As equacões desenvolvidas para a estimativa estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Coeficiente linear e angular dos modelos lineares para a estimativa da temperatura média mensal normal (Ta) para o estado do Pará, e seus respectivos de coeficientes de correlação e valores de F(%)

Mês	Parâmetros de regressão					R ²	F(%)	Modelo de regressão linear múltipla
	a	b1	b2	b3				
Jan	27,75	0,0301	0,0109	-0,0009	0,40	0,0000	$T = 27,75 + 0,0301 * LAT + 0,0109 * LONG - 0,0009 * ALT$	
Fev	27,41	-0,0029	0,0113	-0,0008	0,14	0,0373	$T = 27,41 - 0,0029 * LAT + 0,0113 * LONG - 0,0008 * ALT$	
Mar	27,55	-0,0084	0,0125	-0,0008	0,12	0,0705	$T = 27,55 - 0,0084 * LAT + 0,0125 * LONG - 0,0008 * ALT$	
Abr	28,17	-0,0335	0,0222	-0,0007	0,15	0,0359	$T = 28,17 - 0,0335 * LAT + 0,0222 * LONG - 0,0007 * ALT$	
Mai	29,78	-0,0182	0,0483	-0,0010	0,23	0,0026	$T = 29,78 - 0,0182 * LAT + 0,0483 * LONG - 0,0010 * ALT$	
Jun	29,06	0,0340	0,0311	-0,0015	0,28	0,0005	$T = 29,06 + 0,0340 * LAT + 0,0311 * LONG - 0,0015 * ALT$	
Jul	28,40	0,0406	0,0187	-0,0015	0,24	0,0021	$T = 28,40 + 0,0406 * LAT + 0,0187 * LONG - 0,0015 * ALT$	
Ago	27,83	0,0121	-0,0006	-0,0010	0,08	0,2011	$T = 27,83 + 0,0121 * LAT - 0,0006 * LONG - 0,0010 * ALT$	
Set	27,48	-0,0066	-0,0141	-0,0006	0,03	0,7049	$T = 27,48 - 0,0066 * LAT - 0,0141 * LONG - 0,0006 * ALT$	
Out	26,37	0,0568	-0,0420	-0,0011	0,31	0,0002	$T = 26,37 + 0,0568 * LAT - 0,0420 * LONG - 0,0011 * ALT$	
Nov	27,22	0,0957	-0,0247	-0,0013	0,57	0,0000	$T = 27,22 + 0,0957 * LAT - 0,0247 * LONG - 0,0013 * ALT$	
Dez	27,98	0,0966	-0,0024	-0,0013	0,65	0,0000	$T = 27,98 + 0,0966 * LAT - 0,0024 * LONG - 0,0013 * ALT$	
Ano	27,92	0,0247	0,0059	-0,0010	0,2663	0,0879	$T = 27,92 + 0,0247 * LAT - 0,0059 * LONG - 0,0010 * ALT$	

a: coeficiente linear; bn: coeficientes angulares; R²: coeficiente de determinação; F(%) de significância; T: temperatura em graus celsius; LAT: latitude em graus decimais; LONG: longitude em graus decimais; ALT: altitude em metros.

O estado do Pará possui baixa variação de temperatura média ao longo do ano, assim como nas suas diferentes regiões, o que resultou nos baixos coeficientes de correlação. No Pará, a baixa variabilidade térmica é influenciada pela proximidade com o oceano e com o paralelo em que se encontra localizado (FERREIRA et al., 2006). Além disso, a baixa variação de altitude também contribui para a mínima variação térmica que se observa no estado.

5.2.1. Espacialização da temperatura média anual a partir dos modelos lineares em função das coordenadas geográficas e da altitude

As imagens obtidas por meio do SRTM são essenciais para o método de estimação da temperatura do ar por meio dos modelos lineares apresentados na Tabela 6. A resolução das imagens do modelo de elevação digital do terreno (MDET) é de 90 x 90 m, ou seja, cada pixel destas imagens representam uma área de 8.100m², menor do que 1 ha. Os mapas gerados por meio das equações de regressão possuem a mesma resolução que estas imagens.

O mapa do MDET é apresentado na Figura 9, na qual se pode observar as altitudes para o estado do Pará e região. As altitudes caracterizam um relevo no estado do Pará de baixo a plano, com mais de 50% do estado se encontrando com altitudes de até 200 m.

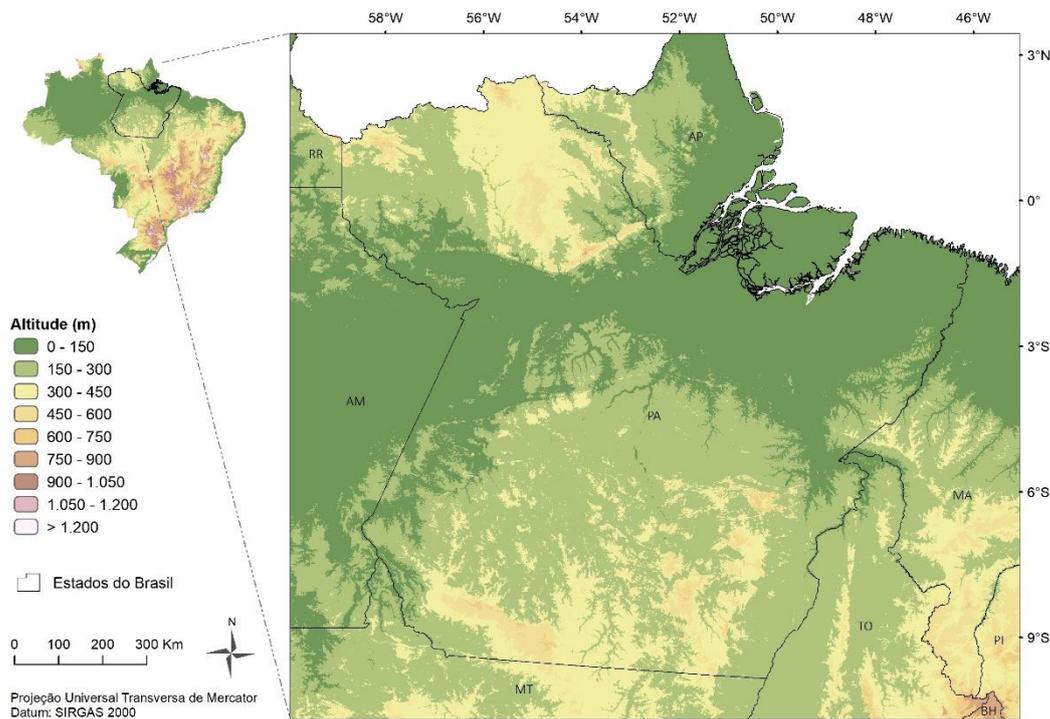


Figura 9. Altitudes do estado do Pará e regiões adjacentes, a partir do modelo de elevação digital do terreno (MDET), gerado pelas imagens do SRTM

5.2.2. Temperatura média mensal da região selecionada

Os resultados encontrados pela regressão linear múltipla apresentaram variação máxima de 4,5 °C entre as temperaturas médias do mês mais quente (setembro e outubro) e o mês mais frio (fevereiro), considerando-se uma média geral de todo o estado.

Os resultados apresentados na Figura 10 demonstram o nível de detalhamento proporcionado pela técnica de espacialização da temperatura por meio dos modelos de regressão linear múltipla associados ao MDET. Muitos estudos têm utilizado esta técnica para a caracterização térmica de regiões (PINTO; ALFONSI, 1974; FERREIRA et al., 2006; YAMADA, 2011). Esta técnica permite caracterizar a temperatura do ar de uma maneira mais realista quando comparada às técnicas de geoestatística como krigagem, inverso do quadrado da distância, entre outras.

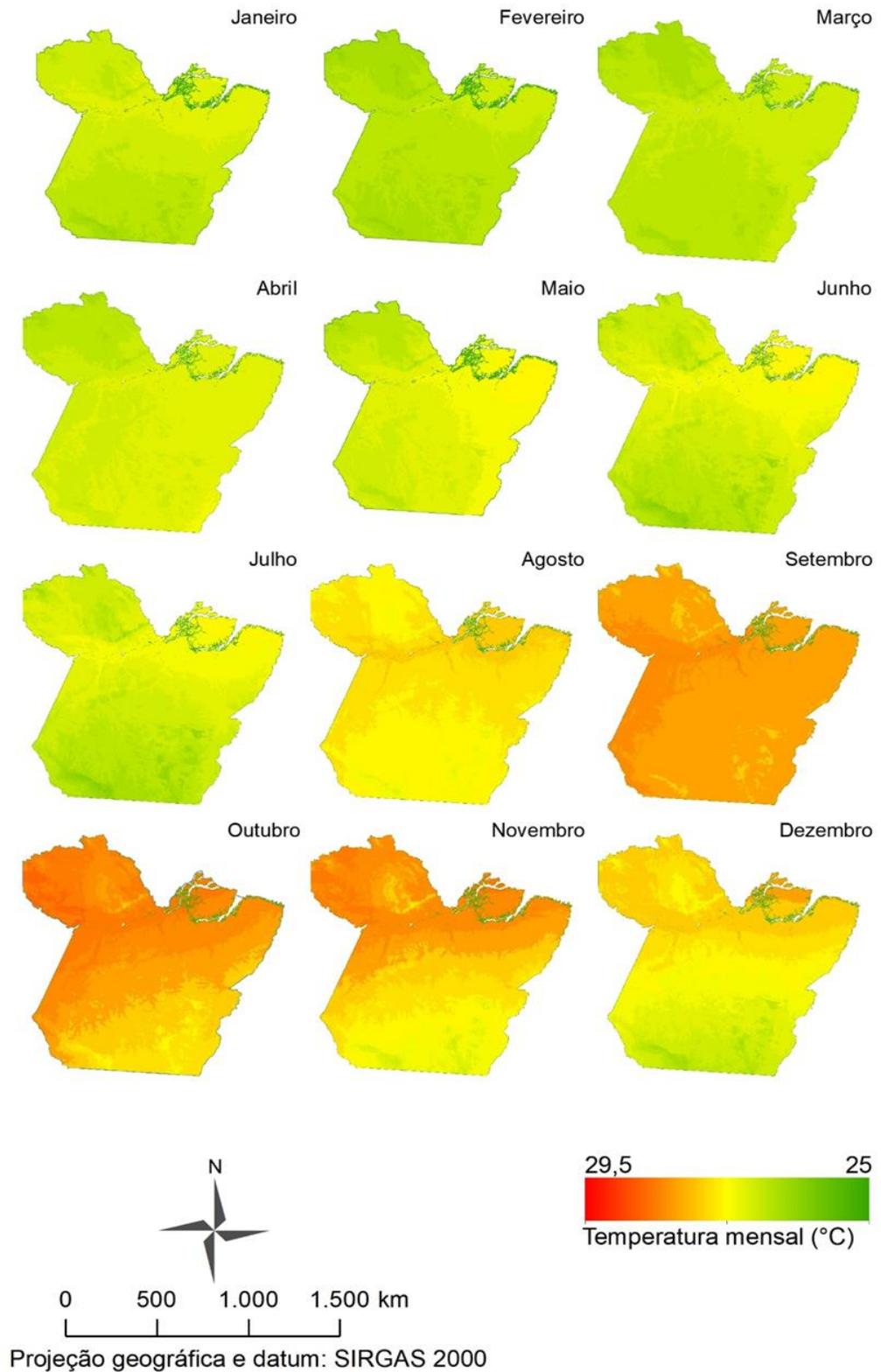


Figura 10. Variação espacial da temperatura média mensal no estado do Pará, estimada por meio dos modelos lineares e do modelo de elevação digital do terreno

5.2.3. Temperatura média anual do estado do Pará

Embora as temperaturas médias mensais sejam de grande importância para estudos agrometeorológicos, os estudos de zoneamentos para aptidão agrícola para culturas de ciclo perene se baseiam na temperatura média anual da região de interesse.

A Figura 11 apresenta o mapa da temperatura média anual do estado do Pará. É possível observar a pouca variação da temperatura média anual normal com uma variação de apenas 1,1 °C entre as áreas de maior e menor temperatura. Basicamente, a temperatura varia com a altitude. Os resultados corroboram a classificação climática de Köppen apresentada por Alvarez et al. (2013), a qual indica temperaturas acima dos 26°C para o estado do Pará.

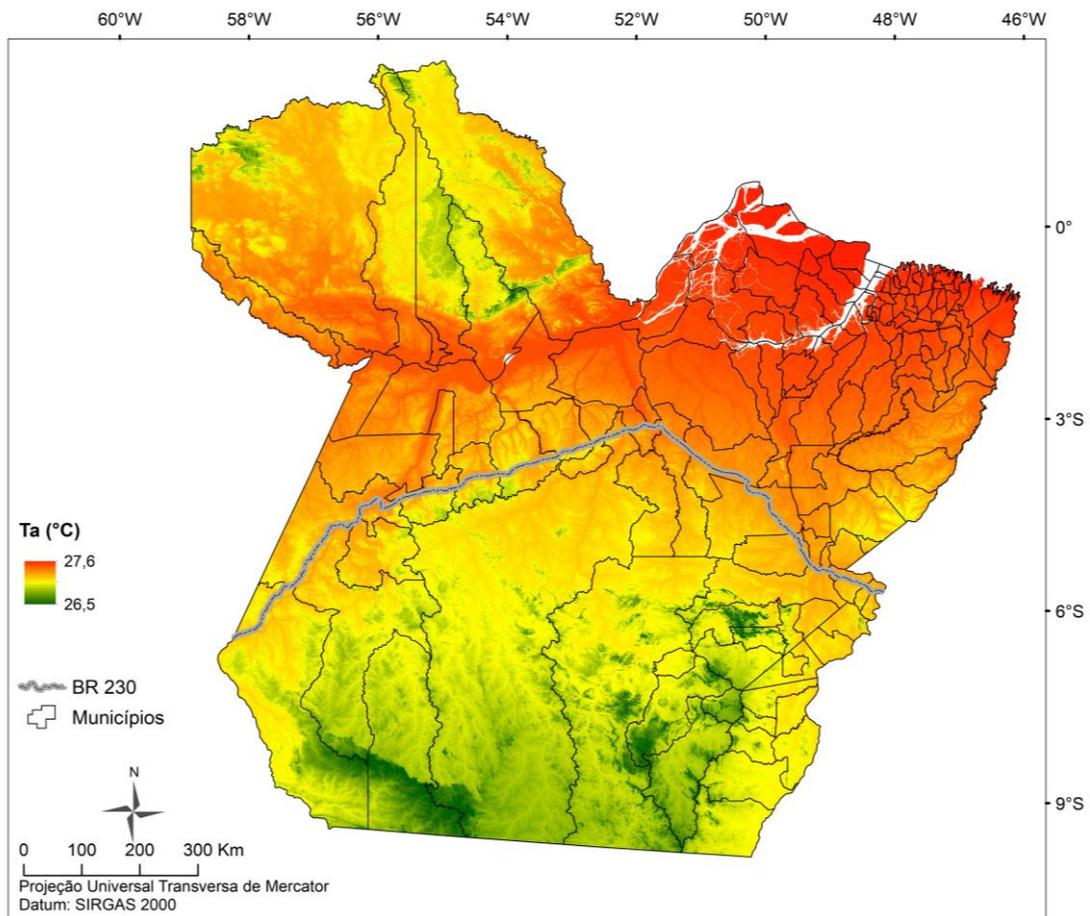


Figura 11. Temperatura média anual normal para o estado do Pará

5.3. Balanço Hídrico Climatológico

Os mapas de P, ETP, ETR, DEF e EXC foram obtidos por meio do método de interpolação geoestatística krigagem, técnica que tem sido muito utilizada para determinação dos atributos do clima (LOUREIRO; FERNANDES, 2012) e foi escolhida por melhor se adequar aos dados obtidos. A seguir são apresentados os mapas para cada variável agroclimática, gerados pelo emprego da álgebra dos mapas entre o mapa da variável e o mapa do seu desvio, como exemplificado na Figura 5.

5.3.1. Chuva

A região Amazônica é caracterizada por apresentar clima tropical úmido, com abundância de chuva ao longo do ano. Os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados pela classificação climática da região. O estado apresenta chuva anual normal variando de 1.545 a 1900 mm nas regiões leste, sudeste e central, a mais de 2900 mm ao norte/nordeste do estado.

Os resultados obtidos corroboram com diversos estudos realizados para a região (ALVAREZ et al., 2013; ISHIHARA et al., 2014). Os menores índices pluviométricos foram observados na porção sudeste do estado, estes índices podem estar relacionados com o cenário atual de desmatamento, uma vez que estas áreas situam-se no chamado arco do desmatamento da Amazônia como explicam Ishihara et al. (2014) em um estudo realizado para a região, no qual encontraram dados significantes sobre o decréscimo da tendência de chuva nesta área.

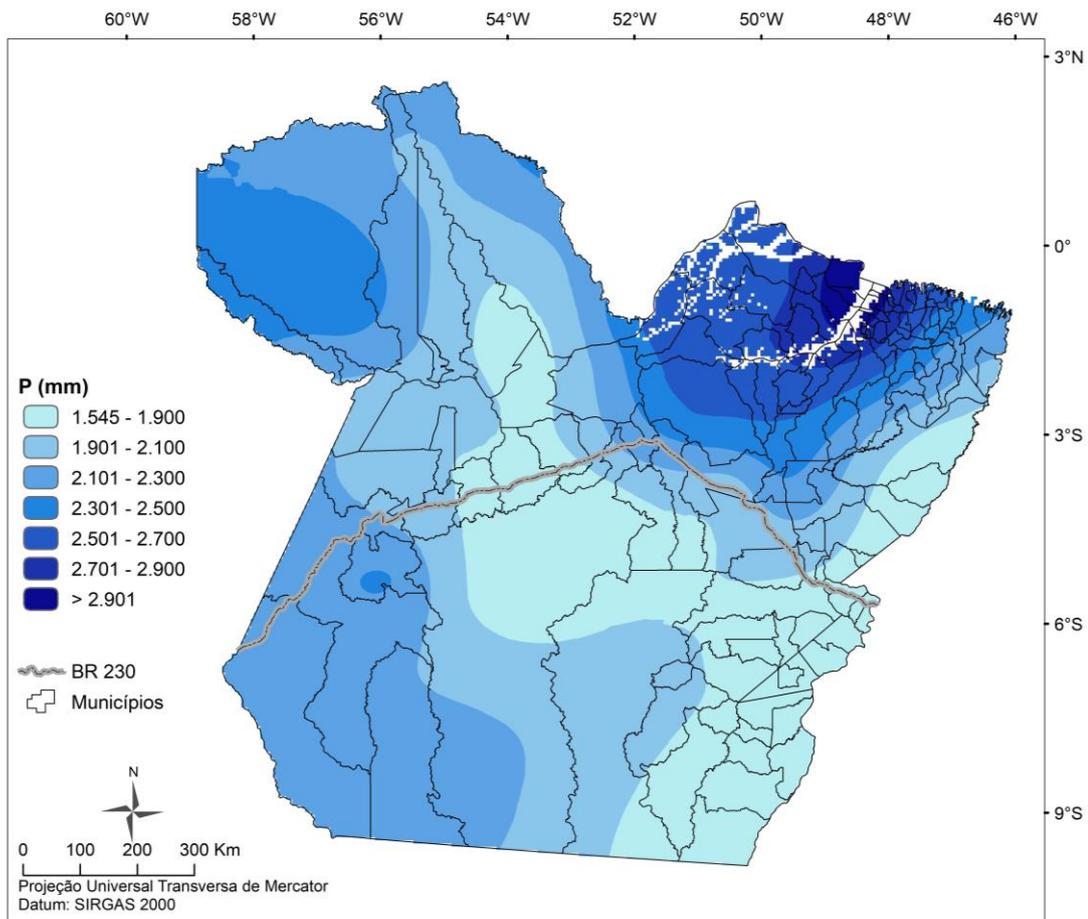


Figura 12. Chuva total anual normal para o estado do Pará

5.3.2. Evapotranspiração Potencial (ETP) e Real (ETR)

A estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) é fundamental para a quantificação da demanda hídrica da atmosfera de uma determinada região. A evapotranspiração real, por sua vez, expressa o quanto efetivamente o sistema usou de água, sendo esta uma saída do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955). A diferença entre ETP e ETR constitui o quanto o sistema deixou de usar de água por conta da diminuição da disponibilidade de água no solo, ou seja, a deficiência hídrica (DEF), a variável mais importante para o zoneamento de culturas perenes e semi-perenes.

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, os mapas da ETP e da ETR para o estado do Pará. Pode-se observar a relação direta da ETP com a temperatura do ar, já que a primeira é calculada em função da segunda, levando-se em conta, ainda, a variação do fotoperíodo, que na região é muito pequena (PEREIRA et al., 2002). Os

maiores valores de ETP foram encontrados nas áreas com as maiores temperaturas, exceto por uma pequena área na região centro-oeste. A ETP anual normal variou de 1.573 mm até pouco mais de 1.900 mm (Figura 13).

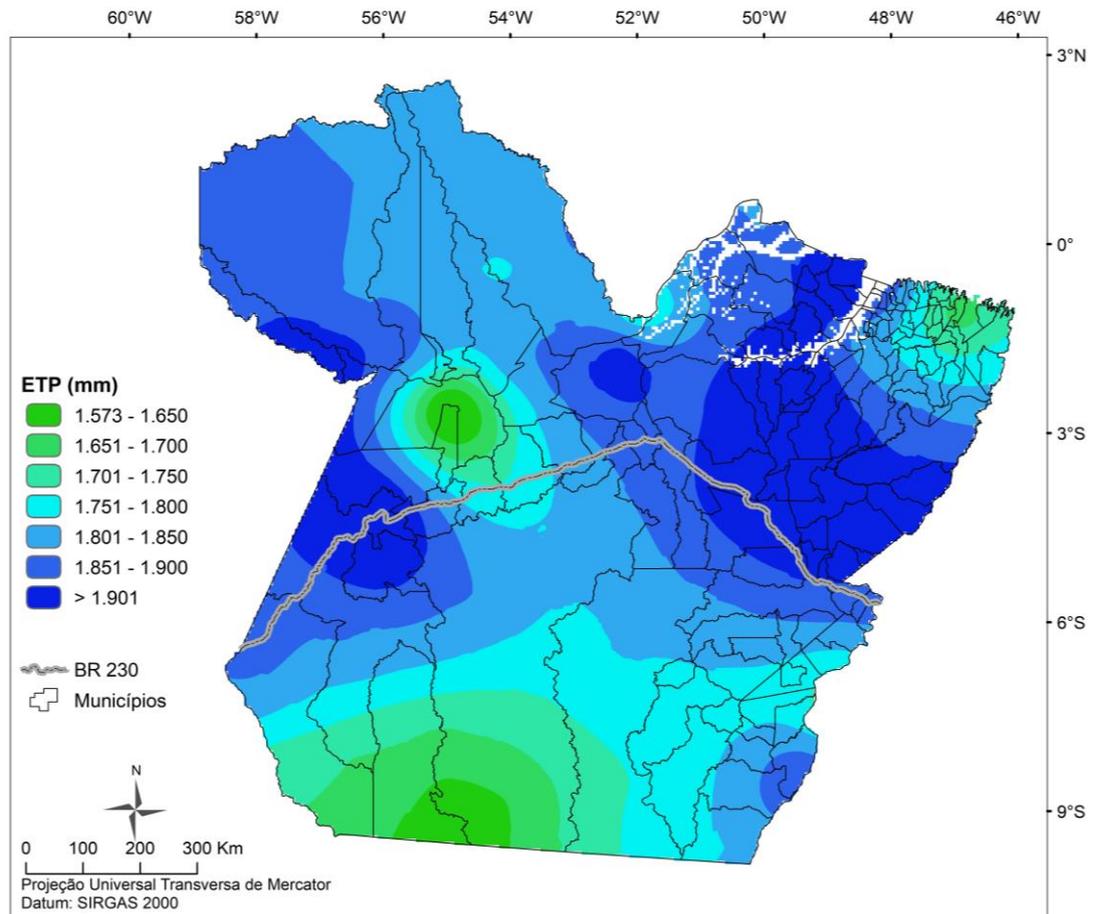


Figura 13. Evapotranspiração potencial anual normal para o estado do Pará

Para a ETR anual (Figura 14), os valores encontrados para o estado do Pará variam entre 1.165 mm até pouco mais de 1.700 mm. Nota-se que a ETR obedece ao padrão de variação das variáveis que a condicionam, ou seja, a ETP e, principalmente, a chuva. Assim, os maiores valores de ETR são observados nos locais que apresentam as maiores taxas de chuva e de evapotranspiração potencial.

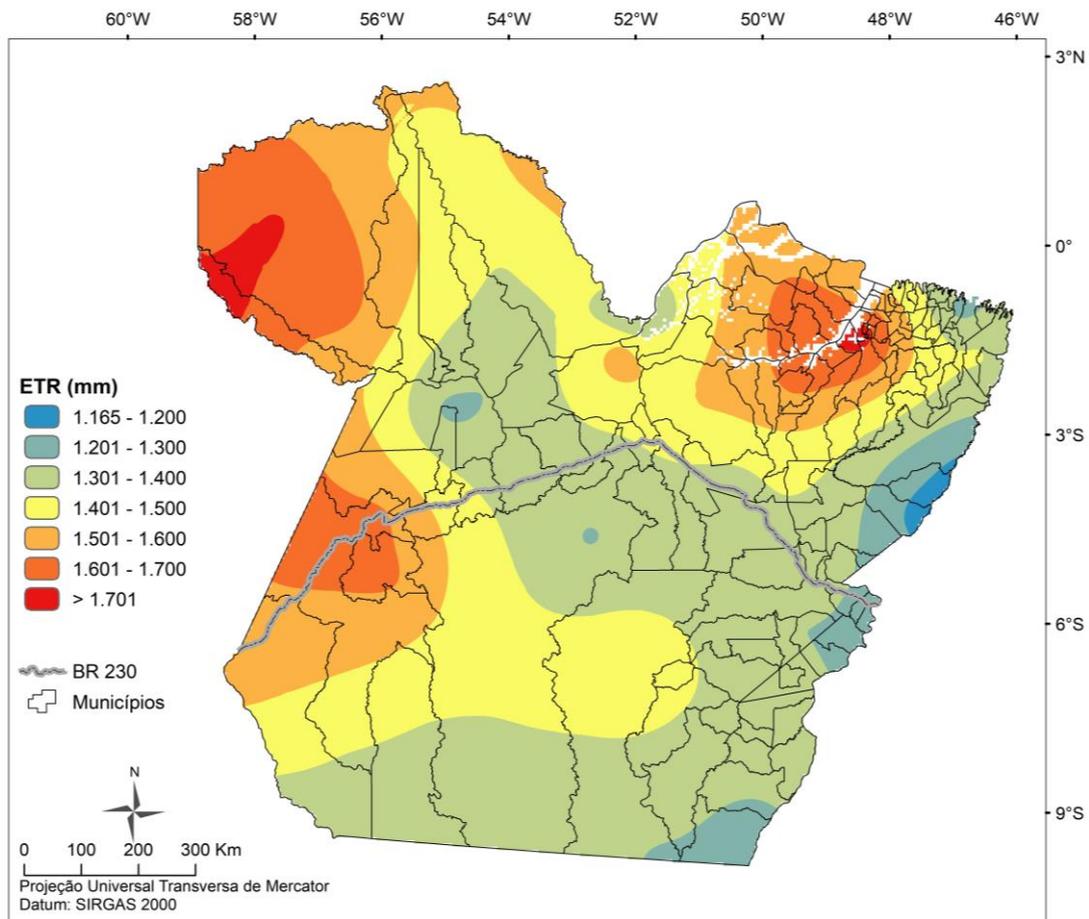


Figura 14. Evapotranspiração real anual normal para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal

5.3.3. Deficiência hídrica (DEF) e Excedente hídrico (EXC)

As variáveis deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), provenientes do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), são diretamente dependentes das variáveis P e ETP, uma vez que o DEF somente ocorre quando $(P - ETP) < 0$ e o EXC apenas se manifesta quando $(P - ETP) > 0$ e o $ARM = CAD$ (PEREIRA et al., 2002).

Com variação de mais de 500 mm de DEF anual ao longo do estado, os maiores valores encontrados se localizam na porção leste do estado paraense, chegando até 707 mm por ano, enquanto que os menores valores de DEF ocorrem na na parte oeste e noroeste do estado, com menos de 300 mm por ano (Figura 15). Estes resultados corroboram com os baixos valores de precipitação pluviométrica encontrados para essa região. Moraes et al. (2005) encontraram resultados

semelhantes para a variação do DEF no estado do Pará, sendo constatado que embora haja chuvas abundantes durante a estação chuvosa, ocorre deficiência hídrica em todas as localidades do estado durante o período menos chuvoso.

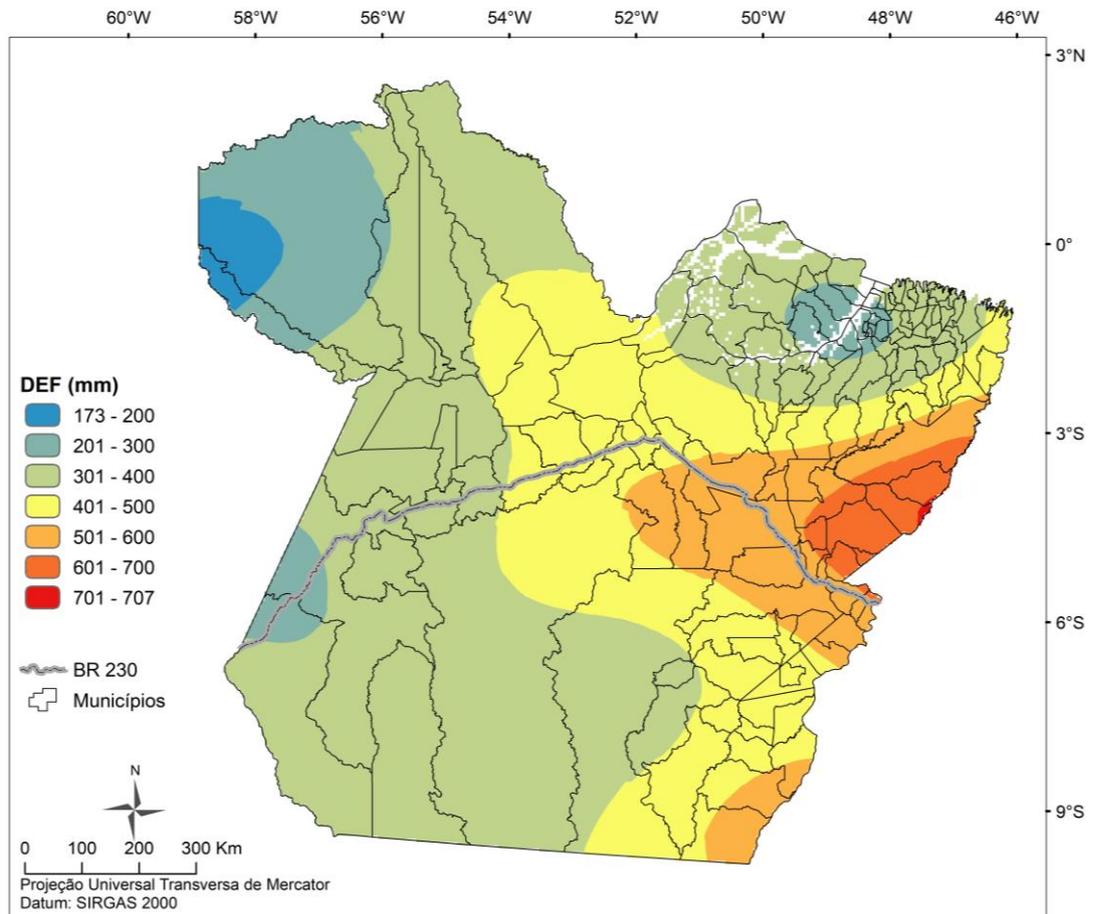


Figura 15. Deficiência hídrica anual normal para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal

Para a variável EXC (Figura 16), foi encontrada uma variação maior de 500 mm entre as regiões do estado, havendo uma estreita relação dos valores de EXC anual com a variação espacial das chuvas (Figura 12). Os maiores valores EXC foram encontrados nas regiões com os maiores índices pluviométricos anuais, ou seja, nas regiões norte/nordeste do estado.

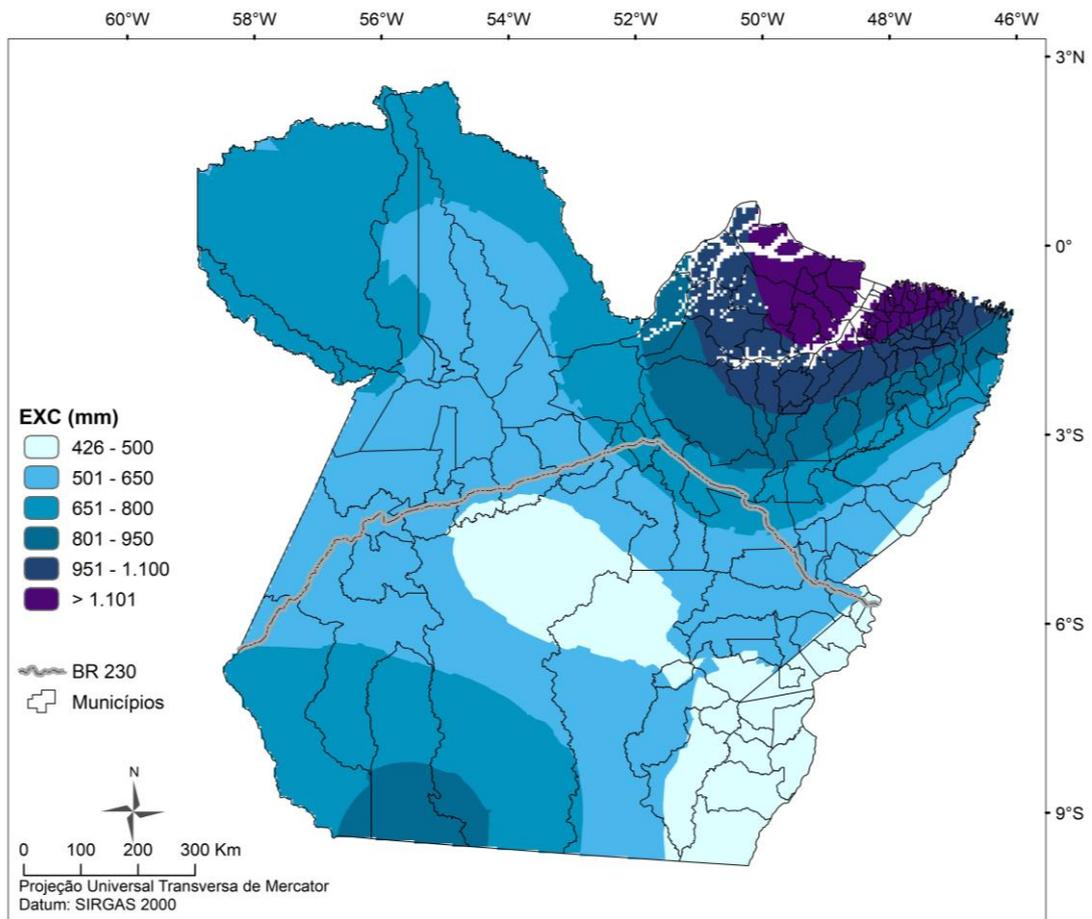


Figura 16. Excedente hídrico anual normal para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal

A Figura 17 representa as variações temporais, em escala mensal, do extrato do balanço hídrico de 3 coordenadas geográficas utilizadas para compor a base de dados climáticos, sendo uma ao norte do estado (Porto de Móz), uma ao centro do estado (Altamira) e outra ao sul do estado (São Félix do Xingu). Nota-se a ocorrência de mais de 5 meses com ocorrência de deficiência hídrica, com meses cujo DEF ultrapassa 100mm, para as 3 localidades avaliadas.

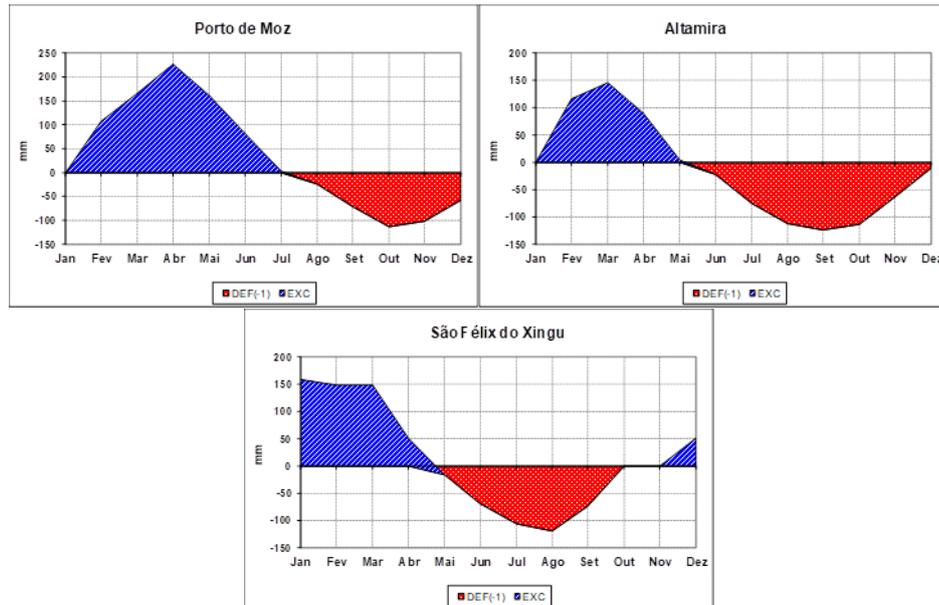


Figura 17. Extrato do balanço hídrico climatológico normal para as localidades de Porto de Moz, Altamira e São Félix do Xingu, no estado do Pará, considerando-se uma CAD = 125 mm. DEF(-1) representa a deficiência hídrica multiplicada por -1 e EXC representa o excedente hídrico

5.4. Zoneamento Agroclimático do cacau para o estado do Pará

Os mapas de aptidão para cada variável meteorológica considerada no zoneamento do cacau (Ta e DEF) foram elaborados de modo a se identificar os fatores limitantes para a cultura em cada região do estado. Esses mapas são, portanto, a base para a elaboração do zoneamento agroclimático, o qual é fruto da sobreposição desses.

5.4.1. Aptidão do estado do Pará para a cultura do cacau quanto ao critério temperatura média anual

Como já era esperado, o estado do Pará apresenta temperatura média anual superior ao limite mínimo de 21°C e abaixo do limite máximo de 28°C, considerados como ideais para a cultura do cacau. Portanto, o estado paraense é inteiramente apto ao desenvolvido do cacau, quanto ao critério temperatura média anual (Figura 18).

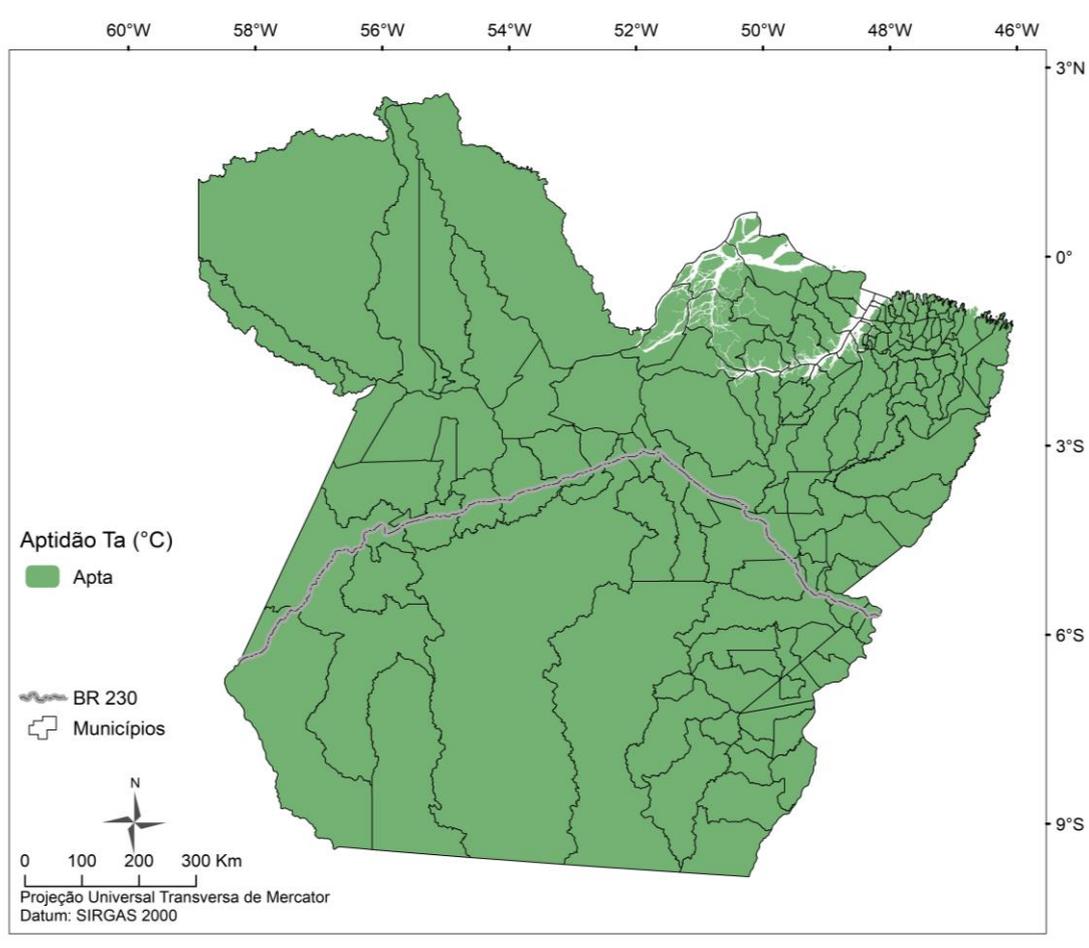


Figura 18. Aptidão agroclimática do estado do Pará para a cultura do cacau, considerando-se o atributo temperatura média anual

5.4.2. Aptidão do estado do Pará para a cultura do cacau quanto ao critério de deficiência hídrica

Com relação ao critério de deficiência hídrica, o zoneamento da cultura no estado demonstrou que mais da metade de todo o estado do Pará é inapto ao desenvolvimento do cacau em condição de sequeiro, como pode ser observado na Figura 19. O cacau somente encontra condição de aptidão quanto ao DEF no extremo noroeste do estado. Nas regiões sudoeste e em parte do Noroeste, as condições são marginais, ou seja, o cacau pode vir a ser cultivado, porém com possibilidade de menores produtividades em alguns anos em decorrência dos elevados déficits hídricos observados nessas áreas. Já nas regiões leste, sudeste e centro-norte do estado, as condições são de inaptidão (Figura 19), já que as deficiências hídricas superam o limite tolerado pela cultura, levando a um alto risco de

baixas produtividades em decorrência da intensidade do período de estiagem que ocorre nessas áreas (Figura 15).

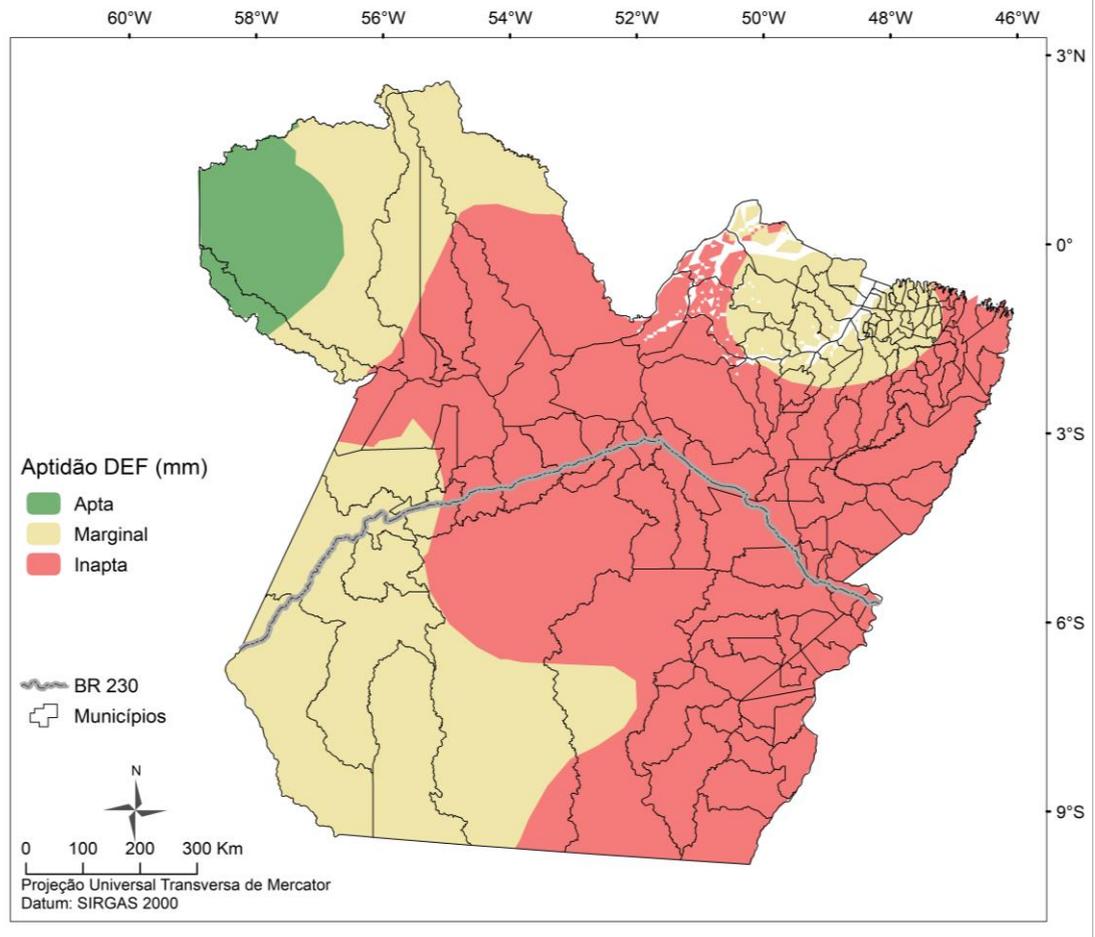


Figura 19. Aptidão agroclimática do estado do Pará para a cultura do cacau para o atributo deficiência hídrica anual

5.4.3. Zoneamento agroclimático

Os mapas de aptidão para as variáveis Ta e DEF foram sobrepostos com a finalidade de gerar o zoneamento agroclimático para o cultivo de cacau no estado do Pará, conforme os critérios de aptidão estabelecidos (Figura 20).

Os resultados obtidos demonstram que apenas 5% do território do Pará, em parte dos municípios de Oriximiná e Faro no noroeste do estado, não oferecem restrição quanto ao cultivo do cacau em regime de sequeiro, sendo essa área classificada como apta para a cultura (Tabela 10). As áreas classificadas como marginais por deficiência hídrica ocupam 37,5% do estado, como é possível se

observar na Figura 20. As áreas classificadas como inaptas para o cultivo do cacau em regime de sequeiro ocupam mais da metade do estado (57,3%).

O resultado do zoneamento agroclimático do cacau no estado do Pará apresentou resultados muito curiosos, uma vez que o Pará está situado na região Amazônica, local de origem do cacau, sendo o atual estado campeão em produção das amêndoas de cacau, com municípios que apresentam recorde mundial de produtividade. No entanto, este estudo apresentou que mais da metade do estado é classificado como inapto ao cultivo da cultura em regime de sequeiro devido ao critério de deficiência hídrica adotado e recomendado pelo MAPA (2011).

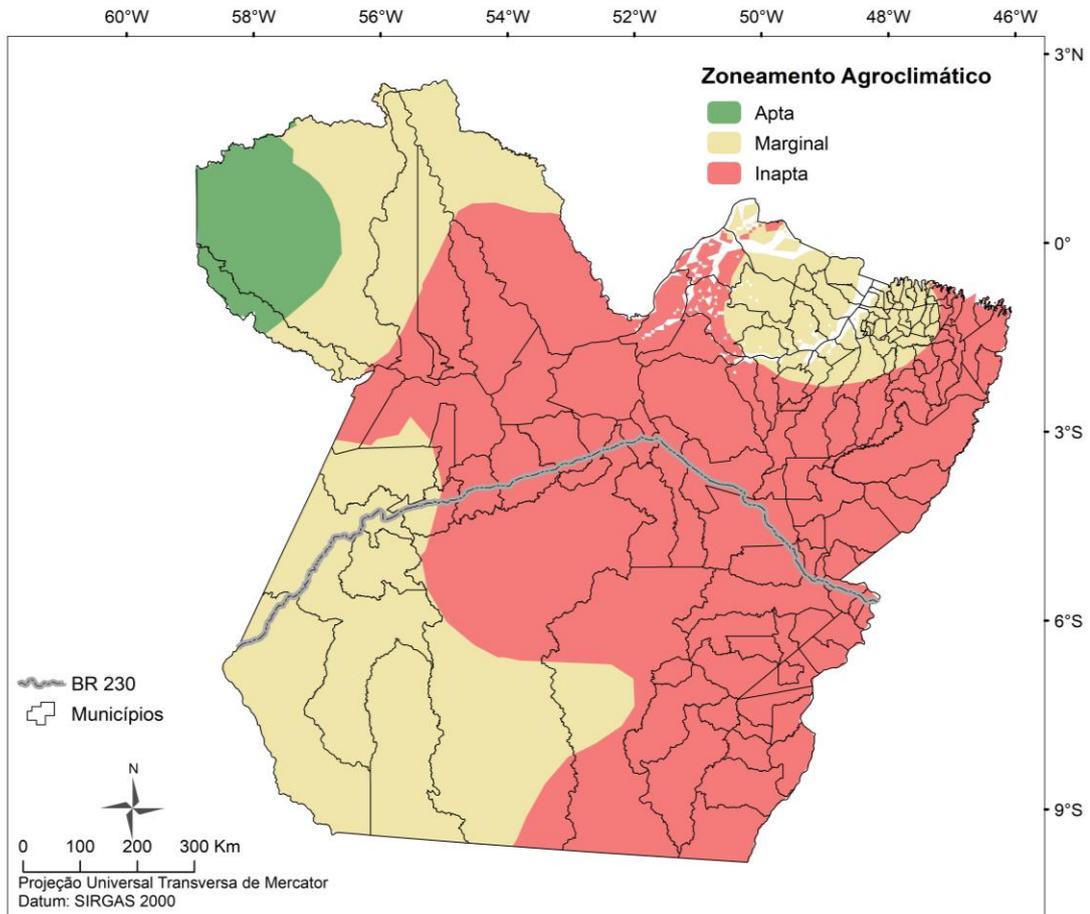


Figura 20. Aptidão agroclimática estado do Pará para a cultura do cacau considerando-se os atributos temperatura média e deficiência hídrica anuais.

Tabela 7. Classe de aptidão agroclimática para cacau no estado do Pará

Classe	Área km²	%
Apta	63.738,57	5,2
Marginal por deficiência hídrica	463.485,89	37,5
Inapta por deficiência hídrica	707.925,99	57,3
Total	1.235.150,46	100

Esse resultado pode ser explicado pelo zoneamento agroclimático considerar que a cultura a ser estudada será implantada em sistema de monocultivo, não levando em consideração as interações existentes nos sistemas produtivos diversificados, como é o caso no cacau na região amazônica.

Como foi visto na revisão de literatura, o cacau é um cultivo que precisa ser conduzido com outras espécies para se desenvolver plenamente. Essa associação de cultivos se caracteriza como um sistema agroflorestal. O termo 'sistema agroflorestal ou SAF' caracteriza sistemas de produção agrícolas que possuem em sua estrutura componentes arbóreos ou arbustivos, os quais podem ser arrançados no tempo e no espaço, e combinados com a produção animal (BUDOWSKI, 1981; NAIR, 1989; YOUNG, 1990).

Nos trópicos, esses cultivos diversificados atuam na conservação do solo, garantem maior resiliência contra adversidades climáticas e, ainda, podem contribuir para o aumento dos índices de produtividade (STIGTER, 2010). A estratificação das estruturas e formas diferentes nos sistemas agroflorestais acarretam em transformação das condições microclimáticas, deste modo, ao mesmo tempo em que modifica a disponibilidade de recursos naturais, fornece barreiras físicas contra os eventos extremos como ventos e chuvas fortes, por exemplo.

Desde que implantados e manejados corretamente, os sistemas agroflorestais podem proporcionar vários benefícios já demonstrados na literatura. Há maior eficiência na captura da radiação solar e redução na amplitude da temperatura, especialmente próximo ao solo, o que reduz a velocidade de decomposição da matéria orgânica e reduz também a evapotranspiração. Ocorre maior ciclagem de nutrientes, dado ao aumento da quantidade de biomassa que retorna ao solo (folhas,

frutas e flores e galhos que caem) e à presença de trama densa e diversa de raízes ocupando diferentes níveis de profundidade, reduzindo perdas de nutrientes e de solo (VANDERMEER, 1989). Por consequência, o solo se torna mais poroso, melhorando a infiltração e armazenamento de água (WALLACE, 1996).

Mesmo com a competição pela água, inerente aos sistemas agrícolas com integração de diferentes espécies, existem situações em que sistemas diversificados podem beneficiar a presença da água no ambiente (HUXLEY, 1999). Cultivos convencionais, como os extensos monocultivos, frequentemente não são capazes de aproveitar toda a água disponível da chuva por causa das perdas por evaporação do solo, escoamento superficial ou percolação. Os monocultivos mais eficientes utilizam no máximo 40% da água da chuva (ONG et al., 1992).

Em sistemas agroflorestais, com a constante cobertura do solo e a exploração das camadas mais profundas nas escalas temporais e espaciais, o aproveitamento no uso da água ocorre de maneira mais eficiente em comparação com as culturas solteiras (ONG et al, 1996). A cobertura do solo tem influência direta na umidade do solo e no microclima, fatores fundamentais para influenciar a evaporação do solo e a transpiração das plantas. Assim, estratégias para manipular esses fatores podem ser usadas para reduzir as perdas por evaporação do solo e assim aumentar a água disponível (LIN, 2010). Jackson e Wallace (1999) encontraram que a radiação foi reduzida até 65% em um sistema de agroflorestal, reduzindo o poder evaporativo do sistema.

A cobertura vegetada do solo e a consequente criação de quebra ventos, promovem redução na evaporação nos sistemas diversificados com a presença de espécies arbórea (VANDERMEER, 1989). Árvores e suas raízes tendem a melhorar a estrutura do solo aumentando a quantidade de agregados estáveis do solo, evitando a compactação e favorecendo a infiltração, o que reduz a quantidade de água estagnada na superfície (BUDOWSKI, 1981).

As árvores também beneficiam o teor de água no sistema pela interceptação da chuva pelo dossel. Grande porção de água interceptada não é retida pelas folhas e escorre através da estrutura da árvore, recarregando a umidade do solo. Ao estudarem a dinâmica um sistema agroflorestal com leucena, Monteith et al. (1991) encontraram variação de até 30% na interceptação da água da chuva entre áreas com quantidades diferentes de espécies arbóreas.

Em um estudo realizado com integração de árvores e culturas anuais em terraços, com o objetivo de avaliar o conteúdo de água no solo e a evaporação do mesmo, Siriri et al. (2011) constataram que evaporação do solo foi maior nos terrenos com monocultivo, sendo até 53% maior nos monocultivos de milho, enquanto as áreas integradas com árvores apresentaram evaporação de 29 a 40% menor. O estudo mostrou que a integração de espécies arbóreas no sistema pode ter efeito benéfico para reduzir a evaporação e aumentar a quantidade de água armazenada.

5.4.4 Cenário 1: Zoneamento agroclimático considerando sistema agroflorestal

Como é possível observar na Figura 21, a redução de 30% na quantidade de evapotranspiração potencial no balanço hídrico modifica substancialmente o mapa de deficiência hídrica (Figura 15). Enquanto na situação real os valores ao longo do estado variaram mais de 500 mm, no cenário hipotético a variação não ultrapassa 400mm.

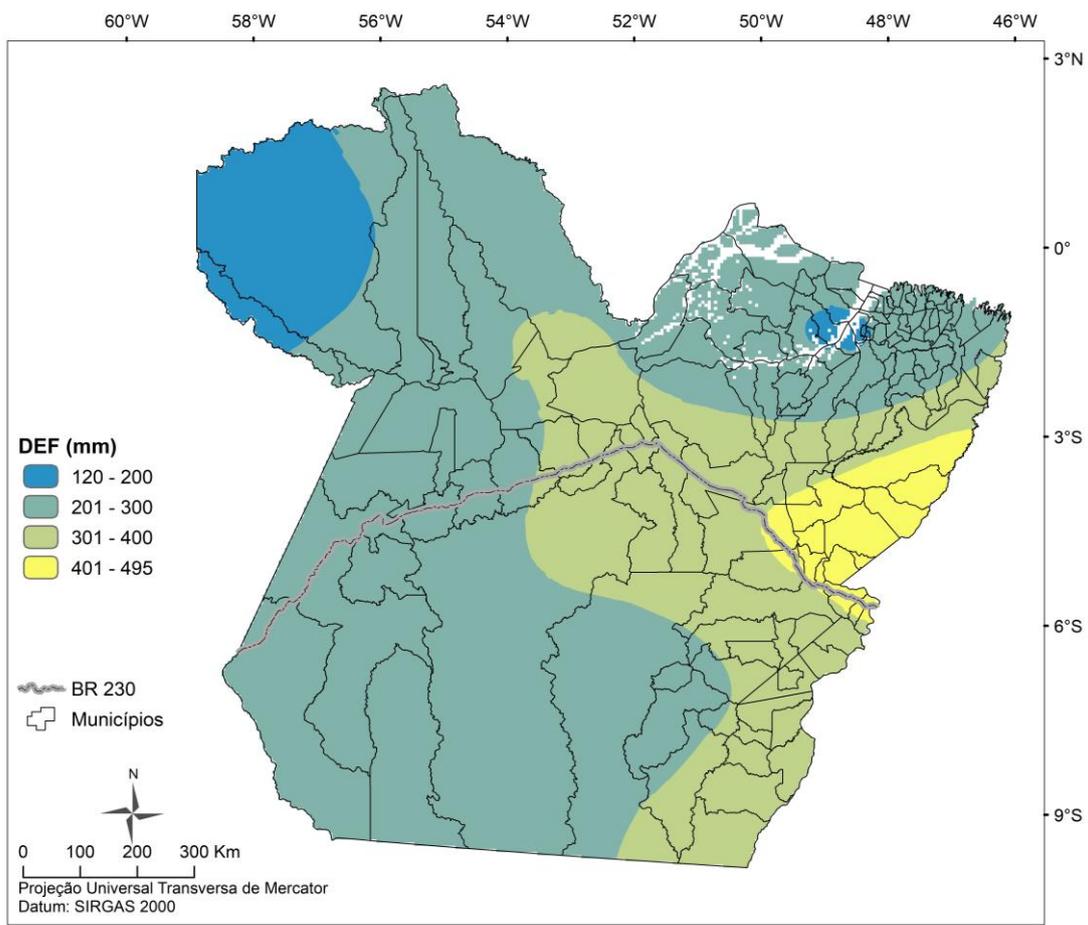


Figura 21. Cenário de deficiência hídrica anual para o estado do Pará, considerando redução de 30% na ETP e CAD 125mm na elaboração do balanço hídrico climatológico normal

Por consequência desta variação, o mapa de zoneamento agroclimático para o cenário hipotético se modifica, conforme apresentado na Figura 22. Nota-se o expressivo aumento da área apta, a qual passou de 5,2% para 46,4% da área do estado (Tabela 8), também de maneira notória houve a redução da área considerada como inapta ao cultivo de cacau em regime de sequeiro, mantendo-se apenas em 2 porções localizadas a leste do estado.

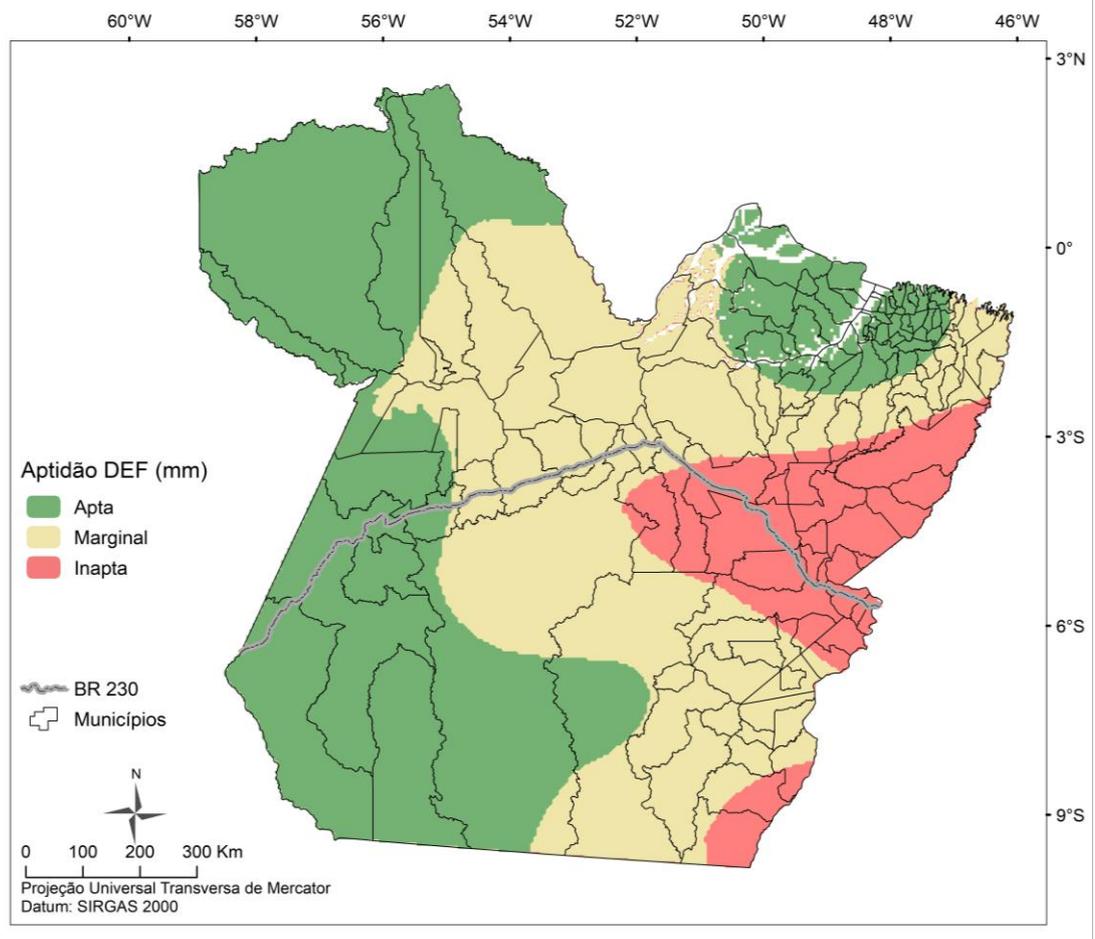


Figura 22. Aptidão agroclimática do estado do Pará para a cultura do cacau considerando os atributos de deficiência hídrica para o cenário hipotético

Tabela 8. Classe de aptidão agroclimática para cacau no estado do Pará para o cenário 1.

Classe	Área km ²	%
Apta	573.575,86	46,4
Marginal por deficiência hídrica	504.368,70	40,8
Inapta por deficiência hídrica	157.205,90	12,7
Total	1.235.150,46	100

Os resultados encontrados neste cenário possibilitam a reflexão sobre a importância de entender a variação microclimática que os sistemas produtivos diversificados oferecem ao ambiente, e em como o cultivo dentro destes sistemas podem fornecer ambientes mais favoráveis quando comparados aos sistemas de monocultivo. É imprescindível que hajam novos estudos sobre as variações destes microclimas e de zoneamentos agroclimáticos levando em consideração essas variações. Deste modo, será possível traçar novas perspectivas para cultivo em ambientes inicialmente considerados inapropriados e também fomentar estudos sobre cultivares resistentes às novas situações.

5.5. Risco climático para o cultivo de cacau no estado do Pará

A avaliação do risco climático para o cultivo do cacau foi realizada para as mesmas localidades utilizadas para a elaboração do zoneamento agroclimático. Foi necessário gerar o BH sequencial das localidades para definir os critérios do risco climático.

5.5.1. Estabelecimento dos critérios de aptidão para análise de risco climático para o cultivo do cacau

A Tabela 9 apresenta a comparação entre os resultados de deficiência hídrica obtidos pelo BHnormal (DEFn) e os obtidos pelo BH sequencial (DEFm).

Tabela 9. Coordenadas geográficas, altitude e valores das deficiências hídricas provenientes do balanço hídrico normal e sequencial para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm

Município	UF	LONG	LAT	ALT	DEFn	DEFm
		Graus decimais		m	mm	mm
Alenquer	PA	-55,37	1,34	397	369,76	361,27
Almeirim	PA	-54,12	-0,43	282	402,99	385,50
Altamira a	PA	-54,52	-5,65	218	394,30	374,26
Altamira b	PA	-52,72	-4,67	166	520,18	482,59
Altamira c	PA	-55,12	-8,19	253	304,88	361,48
Altamira d	PA	-52,21	-3,21	97	487,49	422,30
Altamira e	PA	-53,55	-7,30	267	319,64	285,00
Altamira f	PA	-53,93	-8,77	322	345,63	344,26
Anajás	PA	-49,54	-0,74	15	270,26	274,42
Apiacas	MT	-57,91	-9,19	257	333,18	336,37
Araguaina	TO	-48,81	-7,37	203	410,54	480,49
Bannach	PA	-50,45	-7,37	424	413,36	429,17
Barreirinha	AM	-57,41	-2,80	10	345,89	252,81
Belém	PA	-48,43	-1,43	18	88,47	143,25
Belterra	PA	-54,95	-2,63	140	294,72	425,00
Bom Jardim	MA	-46,61	-3,67	128	779,99	724,32
Cametá	PA	-49,50	-2,25	7	343,56	336,66
Capanema	PA	-47,18	-1,20	26	333,96	395,07
Cidelândia	MA	-47,94	-5,24	111	662,03	585,68
Conceição do Araguaia	PA	-49,34	-8,41	164	563,80	531,63
Dom Eliseu	PA	-47,56	-4,29	261	752,25	682,78
Eldorado dos Carajás	PA	-49,38	-6,11	127	541,33	517,17
Faro	PA	-57,05	-1,87	7	394,51	312,57
Guarantã do Norte	MT	-54,88	-9,79	325	305,50	378,74
Itaituba a	PA	-56,00	-4,28	20	362,60	273,16
Itaituba b	PA	-56,51	-6,61	297	316,57	287,75
Itaituba c	PA	-56,47	-8,23	494	309,85	304,52
Jacareacanga	PA	-58,26	-6,47	96	302,29	234,50
Jacundá	PA	-49,11	-4,82	114	575,35	480,34

Tabela 9. Coordenadas geográficas, altitude e valores das deficiências hídricas provenientes do balanço hídrico normal e sequencial para o estado do Pará, considerando-se uma CAD de 125 mm (Continuação)

Município	UF	LONG	LAT	ALT	DEFn	DEFm
		Graus decimais		m	mm	mm
Laranjal do Jari	AP	-53,34	1,57	268	287,41	280,32
Maues	AM	-57,65	-4,56	100	265,30	182,14
Mazaguo	AP	-52,36	0,01	236	344,86	315,88
Monte Alegre	PA	-54,08	-2,00	63	506,53	503,67
Novo Progresso	PA	-55,26	-7,51	235	313,75	337,40
Novo Repartimento	PA	-50,69	-5,14	265	522,10	421,82
Óbidos a	PA	-55,51	-1,91	25	410,83	387,54
Óbidos b	PA	-55,70	0,24	334	295,94	273,32
Oriximiná a	PA	-56,66	-0,98	204	209,09	224,93
Oriximiná b	PA	-57,63	0,39	206	181,33	160,72
Pacajá	PA	-50,46	-3,87	102	597,31	492,65
Paragominas	PA	-46,80	-2,77	58	543,10	536,26
Portel	PA	-51,09	-2,79	75	405,94	332,34
Porto de moz	PA	-52,23	-1,73	14	368,68	311,59
Santana do araguaia	PA	-50,21	-9,23	196	553,89	555,00
Santarém	PA	-54,71	-2,44	47	338,79	441,54
São Félix do Xingu a	PA	-51,96	-6,63	192	331,31	331,55
São Félix do Xingu b	PA	-51,80	-6,70	201	337,58	334,48
São Félix do Xingu c	PA	-52,09	-8,51	521	385,79	379,25
Soure	PA	-48,51	-0,73	10	412,49	392,26
Tomé-Açú	PA	-48,38	-3,05	53	514,95	462,78
Tracuateua	PA	-46,90	-1,06	23	407,75	483,33
Trairão	PA	-55,86	-5,31	119	297,50	260,03
Tucuruí	PA	-49,66	-3,76	16	578,75	452,89
Uruara	PA	-54,19	-3,72	309	373,08	390,37
Urucara	AM	-58,83	-1,16	85	133,53	124,37
Vila Rica	MT	-51,65	-9,75	387	481,08	498,45
Viseu	PA	-46,60	-1,73	21	341,05	394,88
Vitória do Jari	AP	-52,00	-1,12	12	498,84	280,77

Os valores dos critérios do zoneamento agroclimático, relativos ao DEF foram corrigidos a partir da relação entre os valores normais (DEFn) com os valores sequenciais (DEFm), apresentada na Figura 23.

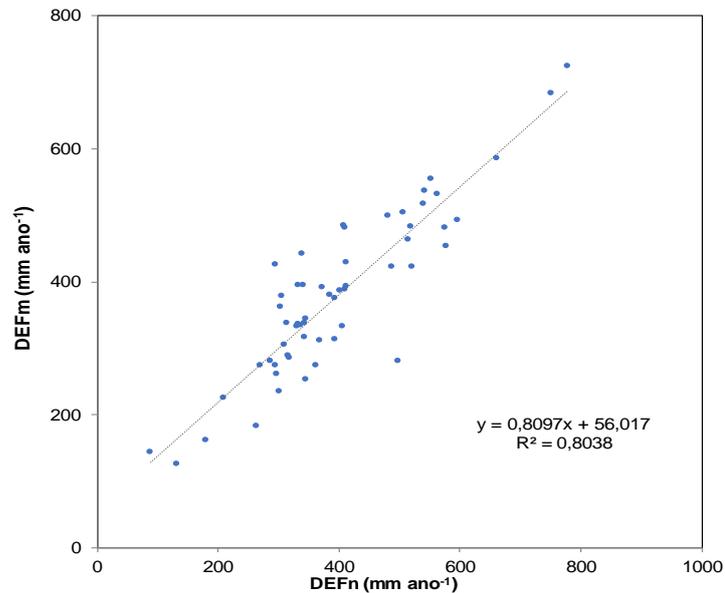


Figura 23. Relação entre déficit hídrico normal (DEFn) e déficit hídrico médio (DEFm) para o estado do Pará, calculadas respectivamente pelos balanços hídricos normal e sequencial, para uma CAD de 125 mm

A relação entre a deficiência hídrica normal e média resultou em um $R^2 = 0,80$. A partir da equação apresentada na Figura 22 foram obtidos os valores de DEFm correspondentes aos valores de DEFn, adotados como critério de aptidão para o zoneamento agroclimático (Tabela 10). A partir desse novo critério, as áreas aptas ao cultivo do cacau são aquelas que apresentam um DEFm menor ou igual a 258 mm, o que corresponde a um DEFn = 250 mm.

Tabela 10. Valores de deficiência hídrica média (DEFm) correspondente aos valores de deficiência hídrica normal (DEFn) para os limiares das classes de aptidão no zoneamento de risco agroclimático para a cultura do cacau no estado do Pará. Os balanços hídricos normal e sequencial foram elaborados para uma CAD de 125 mm

Classificação	DEFn (mm)	DEFm(mm)
Apta	≤ 250	≤ 258
Marginal	$250 < DEF \leq 350$	$258 < DEF \leq 339$
Inapta	> 351	> 339

5.5.2. Cálculo do índice de risco climático (IR_{clima})

Os novos critérios para definição do grau de aptidão foram aplicados no resultado do balanço hídrico sequencial dos anos de 1980 a 2013 para todas as localidades analisadas. Para cada local calculou-se a porcentagem de anos aptos, marginais e inaptos aos cultivos do cacau, com base nos critérios da Tabela 10, sendo posteriormente calculados os índices de risco climático (IR_{clima}), como apresentados na Tabela 11.

Considerando o critério de deficiência hídrica (Tabela 10), nota-se na Figura 24 que aproximadamente 22% das localidades analisadas apresentaram um índice de risco de muito baixo a baixo. Todos esses locais estão situados entre as regiões classificadas como aptas e marginais no zoneamento agroclimático realizado para a cultura (Figura 20). Os locais que apresentaram o risco climático classificado como moderado corresponderam a aproximadamente 40% das localidades e estão situados tanto em áreas classificadas como marginais para a cultura de sequeiro como em áreas classificadas como inaptas.

Todas as localidades classificadas com risco climático como muito alto estão situadas nas áreas em que o zoneamento agroclimático indicou inaptidão para o cultivo do cacau em condição de sequeiro (Tabela 11).

Tabela 11. Porcentagem de anos aptos (%), marginais (AM%) e inaptos (AI%) para o cultivo do cacau em diferentes localidades do estado do Pará e áreas adjacentes, e seus respectivos índices de risco climático (IR_{clima}) para critério de deficiência hídrica

Município	UF	%AA	%AM	%AI	IR_{clima}	Classificação IR_{clima}
Belém	PA	76,5	23,5	0,0	4,5	Muito Baixo
Jacareacanga	PA	67,6	23,5	8,8	4,2	Muito Baixo
Maués	AM	64,7	32,4	2,9	4,2	Muito Baixo
Oriximiná b	PA	64,7	26,5	8,8	4,1	Muito Baixo
Urucara	AM	64,7	32,4	2,9	4,2	Muito Baixo
Altamira e	PA	41,2	44,1	14,7	3,5	Baixo
Anajás	PA	38,2	35,3	26,5	3,2	Baixo
Barreirinha	AM	47,1	32,4	20,6	3,5	Baixo
Itaituba a	PA	38,2	32,4	29,4	3,2	Baixo
Itaituba b	PA	44,1	35,3	20,6	3,5	Baixo
Laranjal do Jari	AP	44,1	26,5	29,4	3,3	Baixo
Óbidos b	PA	44,1	35,3	20,6	3,5	Baixo
Oriximiná a	PA	55,9	26,5	17,6	3,8	Baixo
Trairão	PA	44,1	44,1	11,8	3,6	Baixo
Vitória do Jari	AP	41,2	32,4	26,5	3,3	Baixo
Alenquer	PA	20,6	23,5	55,9	2,3	Moderado
Altamira a	PA	17,6	17,6	64,7	2,1	Moderado
Altamira f	PA	14,7	26,5	58,8	2,1	Moderado
Apiacas	MT	8,8	41,2	50,0	2,2	Moderado
Cametá	PA	20,6	41,2	38,2	2,6	Moderado
Faro	PA	38,2	23,5	38,2	3,0	Moderado
Itaituba c	PA	20,6	55,9	23,5	2,9	Moderado
Mazagão	AP	29,4	23,5	47,1	2,6	Moderado
Novo Progresso	PA	5,9	52,9	41,2	2,3	Moderado
Portel	PA	20,6	26,5	52,9	2,4	Moderado
Porto de mozo	PA	32,4	26,5	41,2	2,8	Moderado
São Félix do Xingu a	PA	29,4	23,5	47,1	2,6	Moderado
São Félix do Xingu b	PA	29,4	23,5	47,1	2,6	Moderado

Tabela 11. Porcentagem de anos aptos (%), marginais (AM%) e inaptos (AI%) para o cultivo do cacau em diferentes localidades do estado do Pará e áreas adjacentes, e seus respectivos índices de risco climático (IR_{clima}) para critério de deficiência hídrica (Continuação)

Município	UF	%AA	%AM	%AI	IR _{clima}	Classificação IR _{clima}
Almeirim	PA	5,9	29,4	64,7	1,8	Alto
Altamira b	PA	8,8	8,8	82,4	1,5	Alto
Altamira c	PA	2,9	38,2	58,8	1,9	Alto
Altamira d	PA	8,8	11,8	79,4	1,6	Alto
Bannach	PA	5,9	17,6	76,5	1,6	Alto
Capanema	PA	2,9	26,5	70,6	1,6	Alto
Guarantu do Norte	MT	2,9	26,5	70,6	1,6	Alto
Novo Repartimento	PA	5,9	14,7	79,4	1,5	Alto
Óbidos a	PA	5,9	23,5	70,6	1,7	Alto
São Félix do Xingu c	PA	11,8	26,5	61,8	2,0	Alto
Soure	PA	8,8	32,4	58,8	2,0	Alto
Uruara	PA	14,7	20,6	64,7	2,0	Alto
Viseu	PA	11,8	11,8	76,5	1,7	Alto
Araguaina	TO	0,0	2,9	97,1	1,1	Muito Alto
Belterra	PA	5,9	11,8	82,4	1,5	Muito Alto
Bom Jardim	MA	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto
Cidelândia	MA	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto
Conceição do Araguaia	PA	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto
Dom Eliseu	PA	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto
Eldorado dos Carajás	PA	0,0	2,9	97,1	1,1	Muito Alto
Jacundá	PA	0,0	2,9	97,1	1,1	Muito Alto
Monte Alegre	PA	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto
Pacajá	PA	0,0	2,9	97,1	1,1	Muito Alto
Paragominas	PA	2,9	8,8	88,2	1,3	Muito Alto
Santana do araguaia	PA	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto
Santarém	PA	5,9	8,8	85,3	1,4	Muito Alto
Tomé-Açú	PA	2,9	5,9	91,2	1,2	Muito Alto
Tracuateua	PA	2,9	5,9	91,2	1,2	Muito Alto
Tucuruí	PA	0,0	8,8	91,2	1,2	Muito Alto
Vila Rica	MT	0,0	0,0	100,0	1,0	Muito Alto

A espacialização do risco climático, apresentado pela Figura 24, permite avaliar visualmente como os dados se comportaram, possibilitando também a comparação entre o risco climático com o zoneamento agroclimático (Figura 20). É possível notar que os dados corroboram, uma vez que as áreas classificadas com risco climático de alto a muito alto estão dentro das áreas classificadas como inaptas pelo zoneamento agroclimático. A porção noroeste do mapa de zoneamento classificada como apta ao cultivo de cacau de sequeiro está classificada como muito baixo a baixo risco climático. Observa-se maior abrangência da faixa classificada como risco climático moderado do que as áreas consideradas marginais no estudo do zoneamento.

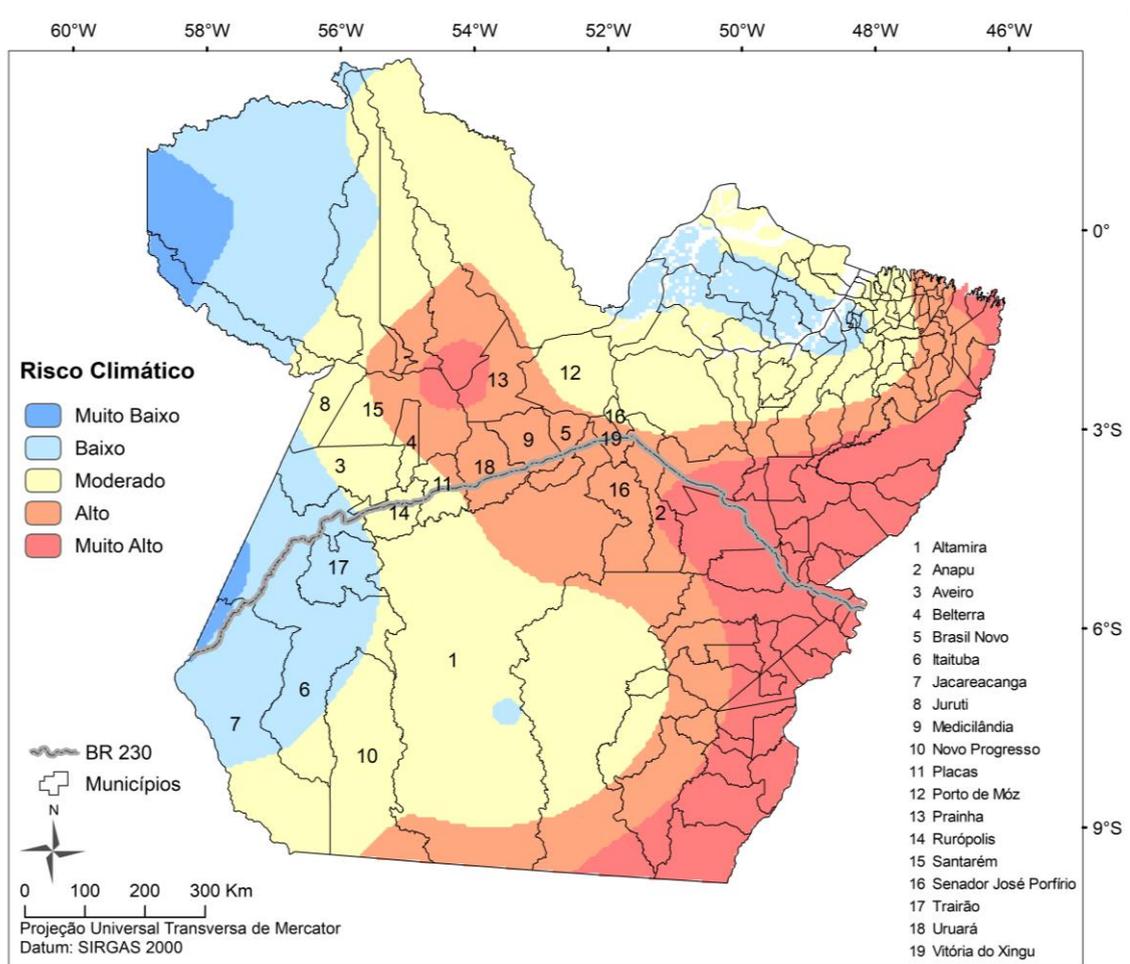


Figura 24. Risco climático do estado do Pará para a cultura do cacau e destaque para os municípios classificados como aptos pelo sistema Agritempo da EMBRAPA (AGRITEMPO, 2018)

Como era de se esperar, uma vez que avalia o comportamento ao longo da série história de dados, a análise de risco climático apresentou maior flexibilidade em termos de aptidão do que o zoneamento agroclimático clássico.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo de risco climático com o zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) realizado para a área de Influência das rodovias BR-163 (Cuiabá-Santarém) e BR-230 (transamazônica) no estado do Pará (BRASIL, 2011), disponíveis no sistema Agritempo da EMBRAPA (AGRITEMPO, 2018) (Figura 24 e Tabela 12), é possível observar a relação entre os dois estudos. O município de Trairão foi o único município classificado como apto pelo ZARC que apresenta todo território classificado como baixo risco. Itaituta, Jacareacanga e Aveiro são os municípios que neste estudo apresentaram boa parte de seu território em áreas classificadas como baixo risco climático. Os municípios de Belterra, Juruti, Novo Progresso, Placas, Porto de Móz e Rurópolis possuem maior parte de seu território em áreas classificadas como risco climático moderado (Figura 24).

O município de Altamira possui uma enorme extensão, essa é a razão por terem sido avaliados 6 pontos no mesmo município para a elaboração deste estudo, no mapa de risco (Figura 24) é possível observar que maior parte de sua área está classificada como risco climático moderado. No entanto, os municípios de Anapu, Brasil Novo, Prainha, Medicilândia, Senador Porfírio, Vitória do Xingu e Uruará, apesar de serem considerados aptos a cacauicultura de sequeiro no ZARC (BRASIL, 2011) apresentaram alto risco climático neste estudo.

As diferenças encontradas entre os dois estudos podem ser explicadas pela variação entre as metodologias adotadas e pela utilização de diferentes bases de dados. Além disso, o zoneamento de risco climático considerou aptos para o cultivo em regime de sequeiro, os municípios que apresentaram no mínimo 20% de sua área com condições climáticas dentro dos critérios de risco estabelecidos em 80% dos anos avaliados (BRASIL, 2011).

Com relação ao zoneamento agroclimático para o cenário com sistema agroflorestal (Figura 22), é curioso notar que há maior relação deste estudo com os resultados do risco climático, áreas consideradas aptas abrangem as áreas classificadas com risco climático baixo e muito baixo. Nota-se também relação do cenário de zoneamento considerando sistema diversificado com o resultado apresentado pelo ZARC, pois todos os municípios classificados como aptos à

cacaucultura de sequeiro estão localizados em áreas consideradas aptas ou marginais no zoneamento hipotético.

A tabela 12 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo zoneamento agroclimático e pelo risco climático para cada coordenada geográfica analisada neste trabalho, bem como indica os municípios classificados como aptos apresentados no Sistema Agritempo (AGRITEMPO, 2018).

Tabela 12. Comparação entre os resultados dos zoneamentos agroclimático e de risco climático para cacau no estado do Pará com os dados encontrados no Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO, 2018).

Município	UF	Classificação IR _{clima}	Zoneamento Agroclimático	Sistema Agritempo
Alenquer	PA	Moderado	Marginal	N/A
Almeirim	PA	Alto	Inapta	N/A
Altamira a	PA	Moderado	Inapta	Apta
Altamira b	PA	Alto	Inapta	
Altamira c	PA	Alto	Marginal	
Altamira d	PA	Alto	Inapta	
Altamira e	PA	Baixo	Marginal	
Altamira f	PA	Moderado	Marginal	
Anajás	PA	Baixo	Marginal	N/A
Bannach	PA	Alto	Inapta	N/A
Belém	PA	Muito Baixo	Marginal	N/A
Belterra	PA	Muito Alto	Inapta	Apta
Cametá	PA	Moderado	Inapta	N/A
Capanema	PA	Alto	Inapta	N/A
Dom Eliseu	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Eldorado dos Carajás	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Faro	PA	Moderado	Marginal	N/A
Itaituba a	PA	Baixo	Marginal	Apta
Itaituba b	PA	Baixo	Marginal	
Itaituba c	PA	Moderado	Marginal	
Jacareacanga	PA	Muito Baixo	Marginal	Apta
Jacundá	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Monte Alegre	PA	Muito Alto	Inapta	N/A

Tabela 12. Comparação entre os resultados dos zoneamentos agroclimático e de risco climático para cacau no estado do Pará com os dados encontrados no Sistema de Monitoramento Arometeorológico (AGRITEMPO, 2018) (Continuação)

Município	UF	Classificação IR _{clima}	Zoneamento Agroclimático	Sistema Agritempo
Novo Progresso	PA	Moderado	Marginal	Apta
Novo Repartimento	PA	Alto	Inapta	N/A
Óbidos a	PA	Alto	Inapta	N/A
Óbidos b	PA	Baixo	Marginal	
Oriximiná a	PA	Baixo	Marginal	N/A
Oriximiná b	PA	Muito Baixo	Apta	
Pacajá	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Paragominas	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Portel	PA	Moderado	Inapta	N/A
Porto de moz	PA	Moderado	Inapta	Apta
Santana do araguaia	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Santarém	PA	Muito Alto	Inapta	Apta
São Félix do Xingu a	PA	Moderado	Inapta	
São Félix do Xingu b	PA	Moderado	Inapta	N/A
São Félix do Xingu c	PA	Alto	Inapta	
Soure	PA	Alto	Marginal	N/A
Tomé-Açú	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Tracuateua	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Trairão	PA	Baixo	Marginal	Apta
Tucuruí	PA	Muito Alto	Inapta	N/A
Uruara	PA	Alto	Inapta	Apta
Viseu	PA	Alto	Inapta	N/A

N/A: Não avaliado.

6. CONCLUSÕES

O zoneamento agroclimático para a cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.) indicou que mais da metade do estado do Pará é classificado como inapta para a cacauicultura em condição de sequeiro, especialmente por causa do critério adotado de deficiência hídrica. Esse resultado contrasta com a realidade do estado, o qual é o atual campeão em produtividade de amêndoas de cacau no país.

A possível razão para a discrepância encontrada reside no fato deste tipo de estudo não considerar as interferências microclimáticas provenientes da diversificação de espécies em uma mesma área de cultivo, como é o caso da cacauicultura na região amazônica. Para realizar um estudo mais aprofundado sobre a aptidão do cacau para o estado do Pará deve-se considerar as respostas do cacau diante das interferências do microclima e estabelecer critérios mais adequados de tolerância à deficiência hídrica.

A análise de risco climático indicou o risco do cultivo do cacau ao longo de uma série de anos, oferecendo mais detalhes a respeito da aptidão da cultura. Esta análise permitiu confirmar o resultado obtido no zoneamento agroclimático, porém, mostrando uma maior flexibilidade em termos de aptidão do que o zoneamento agroclimático clássico.

Recomenda-se que outros estudos sejam realizados para que se possa aprimorar o zoneamento do cacau no estado do Pará, devendo-se dar prioridade à definição de critérios mais aprimorados para a cultura cultivada em sistema agroflorestal e para os novos genótipos desenvolvidos mais recentemente.

REFERÊNCIAS

- AGRITEMPO. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. Disponível em: < <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/produtos.jsp?siglaUF=PA> >. Acesso em: 25 jul. 2018.
- ALMEIDA, A.A.F.; VALLE, R.R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 425-488, 2007.
- ALMEIDA, C.M.V.C. Avanços no melhoramento genético do cacauzeiro na Amazônia brasileira. In: MENDES, F.A.T. (Ed.). **A cacauicultura na Amazônia: história, genética, pragas e economia**. Belém: CEPLAC/SUEPA, 2017, p.55-100.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVIM, P.T. Cacao. In: ALVIM P.T.; KOZLOWSKI, T.T. (Eds.), **Ecophysiology of Tropical Crops**, Academic Press, London. 1977, p. 279-313.
- ALVIM, R. O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) em sistemas agrossilviculturais. **Agrotropica**, v. 1, n. 2, p. 89-103, 1989.
- ASARE, R.; AFARI-SEFA, V.; OSEI-OWUSU, Y.; PABI, O. Cocoa agroforestry for increasing forest connectivity in a fragmented landscape in Ghana. **Agroforest Syst**, v. 88, p. 1143-1156, 2014.
- BARTLEY, B.G.D. **The genetic diversity of cacao and its utilization**. CABI Publishing, Wallingford, UK, 2005. 341p
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 596p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Portaria nº 406, de 22 de novembro de 2011. Aprovar o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de cacau no Estado do Pará. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2011.
- BRAUDEAU, J. El cacao. Tradução de A.M. H. Cardona. Barcelona: Editorial Blume, 297 p. Tradução de: **Le cacaoyer**. 1970.
- BRUNINI, O. ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E.D.; SAWAZAKI, E.; DUARTE, A.P.; PATTERNIANI, E.Z. Riscos climáticos para a cultura do milho no estado de São Paulo. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n.3, p. 519-528, 2001.

- BUDOWSKI, G. Applicability of agroforestry systems. In MACDONALD, L.H. (Ed.). **Agro-forestry in the African humid tropics**. Tokyo: United Nations University, 1981.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS J.S. de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Eds.). **Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura**, Brasília: EMBRAPA- CPA, 1998. p. 1-11.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes modelos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p. 89-97, 1997.
- CAMARGO, Â.P; PINTO, H.S; PEDRO, JR.M.J. Aptidão climática de culturas agrícolas. São Paulo: Secretaria da Agricultura. **Zoneamento Agrícola do Estado de São Paulo**, São Paulo, CATI, v.1, p. 109-49, 1974.
- CASTRO, F.S. Zoneamento agroclimático para a cultura do pinus no Estado do Espírito Santo. 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2008.
- CBI. Centre for the Promotion of Imports from Developing Countries. Trade Statistics: Cocoa in Europe: 2016. The Netherlands; 2016.
- CECÍLIO, R.A. Zoneamento climático associado ao potencial de cultivo das culturas de café, cana de açúcar e amendoim nas sub-bacias do alto e médio São Francisco em Minas Gerais. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE SENSORIAMENTO REMOTO, Belo Horizonte, 2003, p. 39-45.
- CHAPMAN, R.K.; SORIA, S.J. Comparative *Forcipomya* (Diptera, Ceratopogonidae) pollination of cacao in Central America and Southern Mexico. **Revista Theobroma**, v. 13, n. 2, p. 129-139, 1983.
- CLEMENT C.R.; DE CRISTO-ARAÚJO, M.; D'EECKENBRUGGE, G.C. Origin and domestication of native Amazonian crops. **Diversity**, v. 2, p. 72-106, 2010.
- CUNHA, R.G.; ASSAD, E.D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 377- 385, 2001.
- CUTRECASAS, J. Cacao and its allies; a taxonomic revision of the genus *Theobroma*. **Contributions from the United States National Herbarium**, v. 35, p. 379-614, 1964.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. ZARC. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2015.

- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nation**. Banana Market Review and Banana Statistics 2012-2013. Rome, 2014.
- FAPASA. **Boletim Agropecuário do Estado do Pará 2015**. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará. Belém, n. 1, 2015.
- FERREIRA, W.P.M.; VALADARES, G.S.; HOTT, M.C. Estimativa da temperatura média mensal do ar para o Estado de Minas Gerais e do Pará, utilizando-se modelos originais de elevação. **Engenharia na Agricultura**, v.14, p.293-303, 2006.
- FIGUEIREDO, S.F.L. Conservação da viabilidade da semente de cacau. II. Tipificação do fruto e descrição da semente e da germinação. **Revista Theobroma**, v. 16, n. 2, p. 75-88, 1986.
- GRAMACHO, I.C.P.; MAGNO, A.E.S.; MANDARINO, E.P. & MATOS, A. **Cultivo e beneficiamento do cacau na Bahia**. Ilhéus, CEPLAC, 1992. 124p.
- HARDY, F. **Manual de cacau**. Turrialba: IICA, il. Edicion español. Embrapa Amazônia Oriental; Embrapa Semiárido. 1961. 439 p.
- HUXLEY, P.A. **Tropical agroforestry**. Oxford: Blackwell Science. 1999, 371 p.
- IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola, 2018**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default_publica_completa.shtm>. Acesso em: 15 de junho de 2018.
- ICCO (International Cocoa Organization). **Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics**, v. 44, n. 2, Cocoa year 2017/18. ICCO, 2018.
- ICCO (International Cocoa Organization). **The world cocoa economy: past and present**. International Cocoa Organization. 2012.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite (Projeto PRODES). São José dos Campos, SP, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>> Acesso em: 05 jun. 2018.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.H. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- ISHIHARA, J. H.; FERNANDES, L. L.; DUARTE, A. A. A M.; DUARTE, A. R. C. L. M.; PONTE, J. X.; LOUREIRO, G. E. Quantitative and spatial assessment of precipitation in the Brazilian Amazon (Legal Amazon) (1978 to 2007). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 29-39, 2014.

- IWARO AD, SINGH V, BARATH S, JUGMOHAN N. Germplasm evaluation at the International Cocoa Genebank. Trinidad for resistance to Phytophthora pod rot. In: **Annual Report 2000 of the Cocoa Research Unit**, University of the West Indies, Trinidad, 2001, p.34- 40.
- JACKSON, N.A.; WALLACE, J.S. Soil evaporation measurements in an agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, p. 203-215, 1999.
- JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. v.2, p.1-22.
- KPMG. **International Cooperative. Chocolate of tomorrow: State of the market**. Haymarket Network Ltd, 2012.
- LAMB, D.; ERSKINE, P.D.; PARROTTA, J.A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. **Science**, New York, v. 310, p. 1628-1632, 2005.
- LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto didático 06, 2002. 19 p.
- LANDIM, P.M.B; STURARO, J.R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. DGA, IGCE, UNESP. RioClaro-SP, 2002.
- LIN, B.B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, p. 85-94, 2010.
- LOBÃO, D. E. Agroecossistema Cacaueiro da Bahia: cacau-cabruca e fragmentos florestais na conservação de espécies arbóreas. 2007, 98 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV). Jaboticabal/SP, 2007.
- LOUREIRO, G. E.; FERNANDES, L. L. Variação da precipitação por método de interpolação geoestatística. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 77-87, 2013.
- MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). Portaria nº 411 de 4 de novembro de 2010. Aprova o zoneamento agrícola para a cultura do açaí no estado do Acre, safra 2011. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 5 nov. 2010.
- MAPA: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Brasília, DF, c2018. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/zoneamento-agrícola> >. Acesso em: 15 de jun. 2018.
- MARITA J.M.; NIENHUIS J.; PIRES J.L.; AITKEN W.M. Analysis of genetic diversity in Theobroma cacao with emphasis on witches' broom disease resistance. **Crop Science**, n. 41, p. 1305-1316, 2001.

- MARTINS, A. C. de S. Introdução. In: SILVA NETO, P.J. da; MATOS, P. G. G. de; MARTINS, A. C. de S.; SILVA, A. de P. (Eds.). **Manual técnico do cacau para a Amazônia brasileira**. Belém, PA: CEPLAC, 2013, p. 12-19.
- MENDES, F.A.T. Aspectos econômicos do gênero *Theobroma*. In: MENDES, F.A.T. **A cacauicultura na Amazônia: história, genética, pragas e economia**. Belém, PA, CEPLAC/SUEPA, 2017, p. 203-231.
- MONTEITH, J.L.; ONG, C.K.; CORLETT, J.E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest ecology and management**, v.45, p. 31-44, 1991.
- MORAES, B.C.; COSTA, J.M.N.; COSTA, A.C.L.; COSTA, M.H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Revista Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.
- MOTAMAYOR J.C.; LOPEZ, P.A.; ORTIZ, C.F.; MORENO, A.; LANAUD, C. Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. **Heredity**, v. 89, p. 380 –386, 2002.
- MÜLLER, M. W.; VALLE, R. R. Ecofisiologia do cultivo do cacau. In: VALLE, R. R. (Ed.). **Ciência, tecnologia e manejo do cacau**. Ilhéus, CEPLAC: CEPEC: SEFIS, 2007, p. 17-41.
- MÜLLER, M.W.; BIEHL, B. Mudanças na capacidade fotossintética de folhas de cacau (*Theobroma cacao* L.) influenciados pela intensidade de luz durante o período de vida. In: 11th INTERNATIONAL COCOA RESEARCH CONFERENCE. Yamassoukro, Côte d'Ívoire, 1993, p 634-643.
- NAIR, P. K. R. **Agroforestry systems in the tropics**. Dordrecht: Kluwer Academic, 664p. Forestry Sciences, 31. 1989.
- NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. Kluwer, Dordrecht. 1991, 499 p.
- OLIVEIRA, L. P. **Programa de Desenvolvimento da Cadeia Produtiva do Cacau no Pará - PRÓCACAU- 2011/2019**. Belém, Pará: SEDAP, (Edição Revisada do PRODECACAU, 2011/2019). 2016, 56 p.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ceres. 1981, 435p.
- ONG, C. K.; BLACK C. R.; MARSHALL, F. M.; CORLETT, J. E. Principles of resource capture and utilization of solar radiation and water. In: ONG, C. K.; HUXLEY, P. (Eds.). **Tree-crop interactions: a physiological approach**. Wallingford: CAB International, 1996. p.73-158.
- ONG, C. K.; ODONGO, J. C. W.; MARSHALL, F.; BLACK, C. R. Water use of agroforestry systems in semi-arid India. In.: CALDER, I.R.; HALL, R.L.; ADLARD,

- P.G. (Eds.). **Growth and Water Use of Plantations**. Wiley, Chichester, UK. 1992, p. 347-358.
- PASTORELLY D. et al. **Manual del cultivo de cacao**. Asociación Nacional de Exportadores de Cacao (ANECACAO). Guayaquil. Ecuador, 2006, 80p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Condicionamento Climático da Produtividade Potencial. In: **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002, 478p.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PILAU. G.F.; MARIN. F.R.; CAMARGO. M.B.P.; ASSAD. E.D.; PINTO. H.S.; BARBARISI.B.F. Zoneamento agroclimático da heveicultura para as regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v.15, n.2, p. 161-168, 2007.
- PINTO, H.S.; ALFONSI, R.R. Estimativa das temperaturas médias, máximas e mínimas mensais no Estado do Paraná, em função da altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.52, p.1-28, 1974.
- PORRO, A. Cacao e chocolate: dos hieroglifos à cozinha ocidental. **Anais do Museu Paulista**, v. 5, n. 1, p. 279-284, 1997.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.
- ROSÁRIO, J.U. **Amazônia, processo civilizatório**: apogeu do Grão-Pará. Belém: Universidade Federal do Pará, 1986, 155p.
- ROSÁRIO, M.; PERRUCHO, T.; FOWLER, R. L.; SALES, J. C. **Cacau**: história e evolução no Brasil e no mundo. Ilhéus, Bahia. CEPLAC/Divisão de comunicação, 1978.
- SANTOS, A. R. et al. **Espacialização de Dados Meteorológicos no ArcGIS 10.3**: Passo a passo. Alegre: CAUFES, 2015, 64p.
- SCERNE, R.M.C.; CARVALHO, C.J.R. **Climatologia e Ecofisiologia do cacau**. Belém, CEPLAC/DEPEA/COPEs. 56p.1983.
- SCHROTH, G.; BEDE, L.C.; PAIVA, A.O., CASSANO, C.R.; AMORIM, A.M.; FARIA, D.; LÔBO, R.N. Contribution of agroforests to landscape carbon storage. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 20, p. 1175-1190, 2013.

- SCHROTH, G.; DA MOTA, M.S.S. Agroforestry: complex multi-strata agriculture. In: van Alfen, N. (ed.). **Encyclopedia of agriculture and food systems**, vol 1. Elsevier, San Diego, p. 195–207. 2014.
- SCHROTH, G.; GUSTAVO, A.B.; DA FONSECA, G.A.B; HARVEY, C.A.; GASCON, C.; VASCONCELOS, H.L.; IZAC A-MN. **Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes**. Island Press, Washington, 2004, 523p.
- SCHROTH, G.; HARVEY, C.A. Biodiversity conservation in cacao production landscapes: an overview. **Biodivers Conserv**, v. 16, n. 8, p.2237–2244, 2007.
- SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Zoneamento Agrícola do estado de São Paulo**. Campinas: CATI, 2 volumes e 1 suplemento, 1974.
- SEDIYAMA, G. C. MELO JÚNIOR, J. C. F.; SANTOS, A. R.; RIBEIRO, A. COSTA, M. H.; HAMAKAWA, P. J.; COSTA, J. M. N.; COSTA, L. C. Zoneamento Agroclimático do Cafeeiro (*Coffea arabica* L.) Para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 501-509, 2001.
- SENTELHAS, P.C.; MONTEIRO, J.E.B.A. Agrometeorologia dos Cultivos: Informações para uma Agricultura Sustentável. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (Ed.) **Agrometeorologia dos Cultivos: O Fator Meteorológico na Produção Agrícola**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, v. 1, 2009, p. 3-12.
- SILVA NETO, P.J.; LIMA, E.L. Aspectos gerais da cultura do cacauero. In: MENDES, F.A.T. **A cacauicultura na Amazônia: história, genética, pragas e economia**. Belém, PA, CEPLAC/SUEPA, 2017, p. 9-54.
- SILVA NETO, P.J.S.; MATOS, P.G.G.; MARTINS, A.C.S.; SILVA, A. P. **Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira**. Belém: CEPLAC, 2001, 125p.
- SILVA, S. C.; BRITES, R. S.; ASSAD, E. D. Identificação de risco climático para a cultura de arroz de sequeiro no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n.7, p.1005- 1011, 1998.
- SIRIRI, D.; WILSON, J.; COE, R.; TENYWA, M.M.; BEKUNDA, M.A.; ONG, C.K. Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. **Agroforestry Systems**, v. 87, p. 45-58, 2013.
- SOMARRIBA, E.; LACHENAUD, P. Successional cocoa agroforests of the Amazon-Orinoco-Guiana shield. **Forests Trees and Livelihoods**, v. 22, n. 1, p. 51-59, 2013.
- SORIA, J.N. Principal varieties of cocoa cultivated in tropical America. **Cocoa Growers' Bull**, v. 19, p. 12-21, 1970.

- SOUZA, C.A.S.; AGUILAR, M.A.G.; DIAS, L.A. dos S. Cacau. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (ed.). **Agrometeorologia dos cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 333-350.
- STIGTER, K. **Applied agrometeorology**. New York. NY: Springer. 2010.
- STIGTER, K. Applied agrometeorology. Springer, Berlin. 2010, 1101 p.
- THORNTWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.
- THORNTWAITE, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. New Jersey. Drexel Institute of Technology, Laboratory of climatology. **Publications in Climatology**, v. 10, n. 3, p. 185-311, 1957.
- TOXOPEUS, H. Cocoa Breeding: a consequence of mating system, heterosis, and population structure. In: Conference on Cocoa and Coconuts in Malaysia, **Proceedings**. Kuala Lumpur: IS. 1972, p. 3-12.
- TSCHARNTKE, T.; CLOUGH, Y.; BHAGWAT, S.A.; BUCHORI, D.; FAUST, H.; HERTEL, D.; HOLSCHER, D.; JUHRBANDT, J.; KESSLER, M.; PERFECTO, I.; SCHERBER, C.; SCHROTH, G.; VELDKAMP, E.; WANGER, T.C. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes – a review. **Journal of Applied Ecology**, v. 48, p. 619-629, 2011.
- URQUHART, D.H. **Cocoa**. Longman, Green and Co. Ltd., London. 1961. 293 p.
- VAN ZYL, J.J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, p. 559-565, 2001.
- VANDERMEER, J. H. **The ecology of intercropping**. Cambridge: Cambridge University, 1989. 237 p.
- WALLACE J.S. The water balance of mixed tree-crop systems. In: ONG C.K., HUXLEY P (Eds). **Tree-crop interactions**. CAB international, Wallingford, 1996, p. 189–233.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, p. 184-194, 1981.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, D.C., n.90 (c5), p.8995-9005, 1985.

- WWF. Agroflorestas na paisagem amazônica: Guia de campo para implantação de sistemas agroflorestais nos vales dos rios tarauacá, envira e purus. **Cartilha**. WWF/Brasil, 2014.
- XAVIER, A.C.; CECÍLIO, R.A.; LIMA, J.S.S. Módulos em Matlab para interpolação espacial pelo método de krigagem ordinária e do inverso da distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 1, p. 67-76, 2010.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016
- YAMADA, E.S.M. Zoneamento agroclimático da *Jatopha curcas* L. como subsídio ao desenvolvimento da cultura no Brasil visando à produção de biodiesel. Piracicaba, 2011. 135p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2011.
- YOUNG, A. **Agroforestry for soil conservation**. Nairobi: ICRAF, 1990, 276 p.