



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DANILO BATISTA NOGUEIRA

**APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA DO MILHO DE SEQUEIRO EM DIFERENTES
CENÁRIOS DE PLUVIOMETRIA NO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2019

DANILO BATISTA NOGUEIRA

APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA DO MILHO DE SEQUEIRO EM DIFERENTES
CENÁRIOS DE PLUVIOMETRIA NO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo da Agricultura Irrigada.

Orientador: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva.

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Paula Nunes da Silva.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N711a Nogueira, Danilo Batista.
Aptidão edafoclimática do milho de sequeiro em diferentes cenários de pluviometria no estado do Ceará / Danilo Batista Nogueira. – 2019.
102 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva.
Coorientação: Prof. Dr. Ana Paula Nunes da Silva.
1. Aptidão agrícola. 2. ENOS. 3. Veranico. 4. Geoprocessamento. I. Título.

CDD 630

DANILO BATISTA NOGUEIRA

APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA DO MILHO DE SEQUEIRO EM DIFERENTES
CENÁRIOS DE PLUVIOMETRIA NO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo da Agricultura Irrigada.

Aprovada em 25/05/2019

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profº. Dr. Thales Vinicius Araújo Vianna (Examinador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profº. Dr. Luís Henrique Bassoi (Examinador externo)
Embrapa Instrumentação - São Carlos, SP

A Deus.

Aos meus pais Lucides Sousa Nogueira e Antônia Gorete Batista das Chagas Nogueira por todo amor, esforço e incentivo para que continuasse os estudos. A minha irmã Denise Batista Nogueira pelo carinho e o apoio que nunca me negaste. Aos meus avós paternos e maternos, tios e tias, primos e primas, amigos e amigas que sempre acreditaram em mim e depositaram força e estímulo a minha formação.

Ao meu avô Valdir Sousa Nogueira (in memoriam) pelo exemplo de caráter, sabedoria, simplicidade e virtude.

AGRADECIMENTOS

Nunca conquistei nada facilmente e não seria a partir de agora que este jargão iria mudar. Em meio a euforia, apreensão e alívio, sentimentos dignos de uma final de maratona, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram em mais esta etapa da minha vida, foi uma longa jornada de aprendizagem, desafios e construção de novas barreiras a serem vencidas. Sem mais delongas expresse meus sentimentos de gratidão:

A Deus, pelo dom da vida e por me dar discernimento para acertar em minhas decisões, e capacidade de aprender com os erros cometidos. Muito obrigado.

Aos meus pais **Lucides Sousa Nogueira** e **Antônia Gorete Batista das Chagas Nogueira**, por todo amor, carinho e dedicação. Sem o incentivo, apoio e educação dada por vocês, eu não teria chegado até aqui.

A minha irmã **Denise Batista Nogueira**, pela ajuda essencial em muitas ocasiões desta jornada e também pelo carinho, incentivo e confiança depositada na minha capacidade de superação.

A minha namorada **Amanda Medeiros Araújo de Oliveira**, por todo amor, paciência e superações vividas ao longo deste tempo em que estamos juntos.

Aos meus familiares que mesmo não entendendo o porquê de tanta correria e jornadas de estudos intermináveis, nunca deixaram de me apoiar, incentivar e compreender os momentos de ausência.

Ao meu amigo e companheiro de trabalho **Aelton Biasi Giroldo**, por toda orientação, conselhos, ajuda e esforço para que este trabalho fosse executado. Sem sua ajuda não teria conseguido extrair nem metade das informações contidas nesta pesquisa. Meus mais sinceros agradecimentos.

Aos meus amigos irmãos **Marcio Regys Rabelo de Oliveira** e **Alfredo Mendonça de Sousa**, que me ajudaram muito em momentos cruciais do mestrado.

A Prof^a. Dr^a. **Patrícia Verônica Pinheiro Sales Lima** pelas colaborações, sugestões e o acompanhamento durante a elaboração deste trabalho, desde as etapas iniciais de qualificação até a concepção final da dissertação, foi fundamental para que, aqui, eu pudesse lograr sucesso.

Ao Prof. Dr. **Alexsandro Oliveira da Silva** e a Prof^a. Dr^a. **Ana Paula Nunes da Silva**, por toda atenção, disponibilidade, estímulo, compreensão e excelente orientação.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. **Thales Vinicius Araújo Vianna** e Prof. Dr. **Luís Henrique Bassoi** pelas contribuições sugeridas para o aperfeiçoamento do trabalho.

Aos órgãos de públicos de pesquisa FUNCEME, INMET, IBGE e CONAB, pela disponibilidade dos dados utilizados nesta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola - UFC, pelos ensinamentos transmitidos e por contribuírem de forma significativa na minha formação.

Ao IFCE Campus de Crateús na representação de todo corpo técnico administrativo e dos docentes do Centro de Ciências Agrárias, pelo incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos irmãos do Complexo 222/221, **José Israel Pinheiro, Alfredo Mendonça, Valsergio Barros, Edilson Bieh, Edibergue Santos, Dayme Araujo, Annom Amógia, Antônio Neto, Ramon Cruz e Tiago Rodrigues**. Grandes amizades que sempre confiaram no meu potencial e que influenciaram de maneira significativa no meu crescimento pessoal.

Aos irmãos da USC Espanha **Anielly Freitas, Nildson Rodrigues e Carlos Vinicius**, grandes amizades cuja distancia nunca irá separar.

De maneira geral agradeço a todos os amigos que de alguma forma contribuíram ao longo dessa jornada.

“Essentially, all models are wrong, but some are useful.”

George E.P. Box

*“Not everything that can be counted counts.
And not everything that counts can be counted.”*

William Bruce Cameron

RESUMO

O milho é um dos cereais mais produzidos e utilizados em todo o mundo, sendo uma importante cultura de interesse econômico e social para vários países devido ao seu valor nutritivo, a versatilidade do sistema de produção e o alto potencial produtivo. Em condições de semiárido, a produção do milho está diretamente associada a pluviometria e características dos solos, sendo estes fatores bastante limitantes nestas regiões. No entanto, seguindo algumas práticas de manejo baseadas em informações e análises sobre a geolocalização e a variabilidade espaço-temporal de séries climáticas e de condições edáficas, os agricultores desta região poderão diminuir os riscos e obter o maior retorno potencial do milho. Assim, o presente estudo teve como objetivos gerais: (1) analisar a variabilidade espaço-temporal da ocorrência de veranicos em uma região semiárida e definir como estes veranicos e os fenômenos de El Niño e La Niña de longa duração impactaram a produtividade histórica do milho e (2) estudar a aptidão edafoclimática do milho de sequeiro, em uma região semiárida com diferentes cenários de regimes pluviométricos (anos secos, regulares e chuvosos). Para a definição da frequência das diferentes classes de veranicos (com 5-10; 11-15; 16-20; 21-25; 25-30 e >30 dias sem chuva) foi feito uma análise do comportamento pluviométrico dentro de oito diferentes regiões pluviometricamente homogêneas (RPH) do estado do Ceará, utilizando 245 estações meteorológicas com uma série histórica de no mínimo 20 anos. A partir destes dados, juntamente com as informações históricas de temperatura do local foi elaborado o balanço hídrico climatológico decenal para cada estação, nos 3 cenários de regimes pluviométricos. Estas informações foram utilizadas na definição do calendário agrícola do milho e na elaboração dos mapas de riscos climáticos, que posteriormente foram utilizados na álgebra de mapas juntamente com mapas temáticos de classificação dos solos, uso e ocupação, declividade e hipsometria, produzindo assim cartas de Zoneamento Edafoclimático para o milho. Conforme resultados obtidos, o maior número de veranicos foi encontrado nas regiões mais interioranas do sertão semiárido, concentrado no primeiro e no último mês da estação chuvosa sendo que a produtividade do milho atinge valores significativos com veranicos de até 15 dias sem chuva. Para o caso de cultivo do milho em sequeiro, recomenda-se um plantio voltado mais para o final de fevereiro, isto em anos de condições hídricas neutras ou chuvosas de precipitação, uma vez que em condições de anos secos e/ou El Niños de longa duração aumentam o número de veranicos com mais de 20 dias sendo impraticável a condução do milho em sequeiro.

Palavras-chave: Aptidão agrícola. ENOS. Veranico. Geoprocessamento.

ABSTRACT

The corn is one of the most produced and used cereals in the world, being an important crop of economic and social interest for several countries due to its nutritional value, the versatility of the production system and the high productive potential. In semiarid conditions, the maize production is directly associated with rainfall and soil characteristics, since these environmental factors are very limiting in these regions. But by following a few management practices referenced in information and analysis about the geolocation and the spatiotemporal variability of climatic series and soil conditions, dryland growers can decrease their risk and get the highest potential return of corn. Thus, the present study had as general objectives: (1) to analyze the spatiotemporal variability of the dry spell occurrence in a semiarid region and to define how these dry spell and the phenomena of El Niño and La Niña of long duration impacted the historical productivity of maize and (2) to study the edaphoclimatic suitability of dryland corn, in a semiarid region with different rainfall regime (dry, neutral and wet years). For the definition of the frequency of the different classes of dry spell (with 5-10, 11-15, 16-20, 21-25, 25-30 and > 30 days without rain) an analysis of rainfall behavior was made within eight different pluviometrically homogeneous regions (RPH) of the state of Ceará, using 245 meteorological stations with a historical series of at least 20 years. From these data together with the historical information of temperature the decade climatologic water balance for each station was elaborated, in the 3 scenarios of rainfall regime. This information was used in the definition of the agricultural calendar of corn planting and in the elaboration of climate risk maps, which were later used in map algebra together with thematic maps of soil classification, use and occupation, slope and hypsometry, thus producing maps of Agroecological Zoning for corn. As results obtained, the highest number of dry spells was found in the most inland regions of the semiarid, outback concentrated in the first and last months of the rainy season, and the corn yield reached significant values with dry spells of up to 15 days without rain. In the case of maize cultivation on dry farming is recommended for the end of the first month of the rainy season, this in years of neutral or wet rainfall regime of precipitation, since in conditions of dry years and/or El Niños long duration increase the number of dry spells with more than 20 days and the conduction of dryland corn is impracticable.

Keywords: Agricultural aptitude. ENSO. Dry spell. Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da área plantada e da produtividade da cultura do milho no Brasil.....	15
Figura 2 – Mapa da estimativa de produtividade do milho na safra 18/19, com classificação dos níveis tecnológicos.....	15
Figura 3 – Estádios fenológicos de uma planta de milho, com suas respectivas durações	18
Figura 4 – Mapa hipsométrico da área de estudo, mostrando as RPH (polígonos em preto) com a indicação dos meses mais chuvosos de cada uma e classificação climática de Koppen.....	28
Figura 5 – Variação do ONI ao longo dos anos na região 3.4, indicando os eventos de El Niño (linha vermelha) e La Niña (linha azul) de longa duração.....	31
Figura 6 – Comparação do número de ocorrência das diferentes classes de veranicos (5-10 (A); 11-15 (B); 16-20 (C); 21-25 (D); 26-30 (E) e >30 (F) dias sem chuva) nas oito RPH.....	32
Figura 7 – Comparação do número de ocorrência de veranicos nos quatro meses da estação chuvosa entre as oito diferentes regiões da área de estudo.....	34
Figura 8 – Comparação do número de ocorrência de veranicos nos diferentes cenários de precipitação pluviométrica entre as oito diferentes regiões da área de estudo.....	35
Figura 9 – Comparação do número de ocorrência de veranicos em cenários de El Niño de longa duração (ENLD), La Niña de longa duração (LNLD) e anos neutros (NEUT), entre as oito diferentes RPH.....	36
Figura 10 – Produtividade do milho no Ceará, associada a diferentes classes de veranicos.....	38
Figura 11 – Produtividade do milho explicada pela ocorrência dos veranicos e de anomalias de temperatura na superfície do Pacífico nas diferentes RPH do Ceará.....	38
Figura 12 – Fluxograma metodológico.....	51

Figura 13 – Espacialização das unidades geomorfológicas do Ceará e classificação climática de Köppen.....	52
Figura 14 – Distribuição geoespacial dos postos de coleta de dados nas oito diferentes regiões pluviometricamente homogêneas conforme classificação de Xavier (2001)	53
Figura 15 – Classificação de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (SBCS) para o 1º nível categórico (EMBRAPA, 2018)	57
Figura 16 – Mapas temáticos do Estado utilizados na elaboração do zoneamento edafoclimático.....	58
Figura 17 – Distribuição dos postos meteorológicos usados como representantes de cada região pluviometricamente homogênea.....	64
Figura 18 – Caracterização da variação sazonal das condições do BHS em cenário chuvoso.....	65
Figura 19 – Caracterização da variação sazonal da precipitação, ETr e ETc em cenário chuvoso.....	68
Figura 20 – Caracterização da variação sazonal das condições do BHS em cenário regular.....	69
Figura 21 – Caracterização da variação sazonal da precipitação, ETr e ETc em cenário regular.....	71
Figura 22 – Caracterização da variação sazonal das condições do BHS em cenário seco..	72
Figura 23 – Caracterização da variação sazonal da precipitação, ETr e ETc em cenário regular.....	74
Figura 24 – Calendário agrícola sugerido para as oito diferentes RPH's em cenários de anos chuvosos.....	76
Figura 25 – Calendário agrícola sugerido para as oito diferentes RPH's em cenários de anos regulares.....	78
Figura 26 – Calendário agrícola sugerido para as oito diferentes RPH's em cenários de anos secos.....	80
Figura 27 – Mapas das médias de temperatura nos diferentes cenários.....	83

Figura 28 – Mapas de zoneamento agroclimático (A) e mapas de zoneamento edafoclimático (B) em condições de cenário chuvoso.....	84
Figura 29 – Mapas de zoneamento agroclimático (A) e mapas de zoneamento edafoclimático (B) em condições de cenário regular.....	85
Figura 30 – Mapas de zoneamento agroclimático (A) e mapas de zoneamento edafoclimático (B) em condições de cenário seco.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção (em milhões de toneladas) de milho nas safras 15/16, 16/17 e 17/18 e a projeção da safra 18/19.....	13
Tabela 2 – Consumo (em milhões de toneladas) de milho nas safras 15/16, 16/17 e 17/18 e a projeção da safra 18/19.....	14
Tabela 3 – Valores de Kc decendiais para a cultura de milho.....	55
Tabela 4 – Critérios utilizados na avaliação de aptidão climática do milho.....	56
Tabela 5 – Critérios utilizados, intervalo de dados e classe de adequação para o milho.	59
Tabela 6 – Valores da padronização dos critérios.....	59
Tabela 7 – Descrição das notas para atribuição da importância absoluta de cada indicador.....	60
Tabela 8 – Escala de Saaty para comparações de pares de fatores de influência.....	61
Tabela 9 – Índice de Inconsistência Aleatória (IA).....	63
Tabela 10 – Matriz de decisão com o pesos dos critérios em função das classes de adequação.....	82
Tabela 11 – Descrição das zonas de aptidão agroclimática em relação a área total do terreno.....	86
Tabela 12 – Descrição das zonas de aptidão edafoclimáticas em relação a área total do terreno.....	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
1.1	Importância Econômica do Milho.....	13
1.2	Ecofisiologia do milho e os elementos climáticos.....	17
2	ANÁLISE DE VERANICOS EM UMA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUTIVIDADE DO MILHO.....	23
2.1	Introdução.....	25
2.2	Material e métodos.....	28
2.2.1	<i>Área de Estudo.....</i>	<i>28</i>
2.2.2	<i>Coleta de dados.....</i>	<i>29</i>
2.2.3	<i>Definição dos veranicos e análise dos dados.....</i>	<i>30</i>
2.2.4	<i>Cenários de precipitação.....</i>	<i>30</i>
2.2.5	<i>Classificação dos anos de El Niño e La Niña de longa duração.....</i>	<i>30</i>
2.2.6	<i>Modelagem da frequência de veranicos e as variáveis respostas.....</i>	<i>31</i>
2.3	Resultados e Discussão.....	32
2.3.1	<i>Frequência das diferentes classes de veranicos em escala anual.....</i>	<i>32</i>
2.3.2	<i>Frequência dos veranicos em escala mensal.....</i>	<i>33</i>
2.3.3	<i>Frequência dos veranicos nos diferentes cenários pluviométricos.....</i>	<i>35</i>
2.3.4	<i>Frequência dos veranicos segundo ocorrência de fenômenos El Niño e La Niña de longa duração.....</i>	<i>36</i>
2.3.5	<i>Produtividade do milho e ocorrência dos veranicos.....</i>	<i>37</i>
3	ZONEMANETO AGROECOLÓGICO DO MILHO DE SEQUEIRO NO ESTADO DO CEARÁ.....	46
3.1	Introdução.....	48
3.2	Material e métodos.....	51
3.2.1	<i>Caracterização da área de estudo.....</i>	<i>52</i>
3.2.2	<i>Obtenção e tratamento dos dados.....</i>	<i>52</i>
3.2.3	<i>Zoneamento Agroclimático.....</i>	<i>54</i>
3.2.4	<i>Padronização dos Critérios.....</i>	<i>57</i>
3.2.5	<i>Análise Multicritério.....</i>	<i>60</i>
3.3	Resultados e Discussão.....	64
3.3.1	<i>Cenário Chuvoso.....</i>	<i>65</i>

3.3.2	<i>Cenário Regular</i>	68
3.3.3	<i>Cenário Seco</i>	72
3.3.4	<i>Calendário Agrícola</i>	75
3.3.5	<i>Análise Hierárquica de Processos (AHP)</i>	81
3.3.6	<i>Mapas de Zoneamento Agroclimático e Zoneamento Edafoclimático</i>	82
4	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Importância Econômica do Milho

Com o constante crescimento da população mundial e conseqüentemente aumento da demanda por alimentos, se faz necessário que medidas de segurança alimentar como a autossuficiência na produção agrícola seja encarada como prioridade entre os países, buscando elevar a produção, principalmente da matéria prima utilizada na base dos demais sistemas de produção agropecuária.

Atualmente o milho (*Zea mays L.*) está entre os três cereais mais produzidos no mundo, sendo uma importante *commoditie* utilizada principalmente na alimentação animal, na geração de bioenergia e na alimentação humana, com produção contínua e em larga expansão para atender a demanda do mercado. Segundo projeção feita por Wijewardana *et al.* (2016), é prevista um aumento de 45% na demanda mundial de milho entre os anos de 1997 a 2020.

O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) aponta que nos últimos dois anos a produção mundial ultrapassou o patamar de 1 bilhão de toneladas numa área plantada de mais de 175 milhões de hectares (USDA, 2019). Hoje, os EUA é o principal produtor e consumidor de milho no mundo, enquanto o Brasil é o terceiro maior produtor, conforme representado as Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 Produção (em milhões de toneladas) de milho nas safras 15/16, 16/17 e 17/18 e a projeção da safra 18/19.

Países	Produção (Milhões de toneladas)			
	Safras			Projeção
	15/16	16/17	17/18	18/19
EUA	345,5	384,78	371,10	371,52
China	224,6	263,61	259,07	256,00
Brasil	67	98,50	82,00	94,50
U.E.	58,4	61,88	62,10	60,40
Demais	267,8	313,64	301,34	317,49
Mundo	963,3	1.122,41	1.075,61	1.099,91

Fonte: Levantamento USDA (2019).

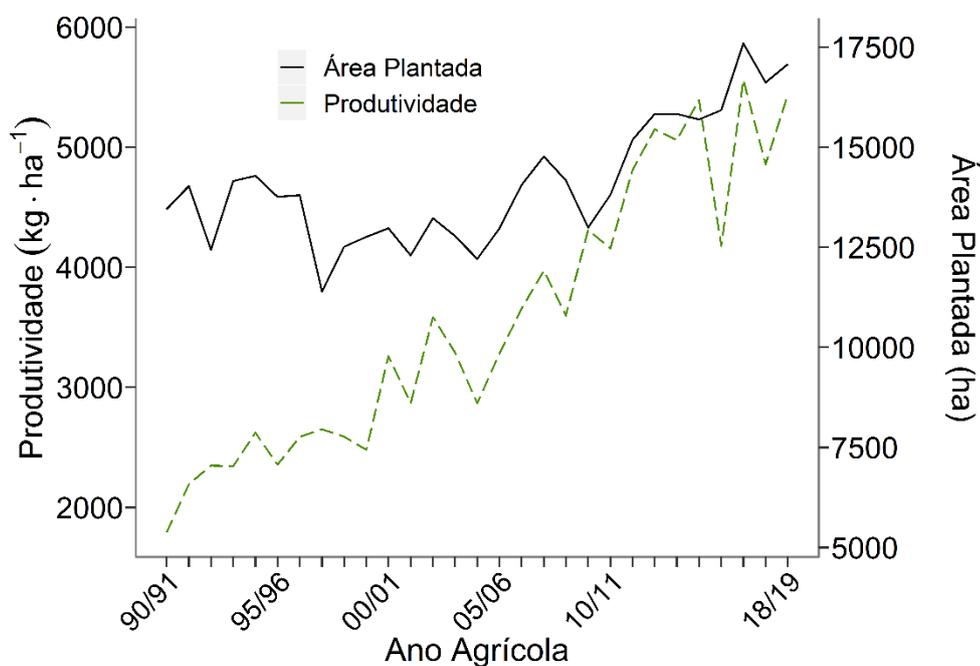
Tabela 2. Consumo (em milhões de toneladas) de milho nas safras 15/16, 16/17 e 17/18 e a projeção da safra 18/19.

Países	Consumo (Milhões de toneladas)			
	Safras			Projeção
	15/16	16/17	17/18	18/19
EUA	298,9	313,83	313,97	319,55
China	217,5	255,00	259,07	276,00
Brasil	57,5	60,50	64,50	66,50
U.E.	73,2	74,00	76,50	83,00
Demais	333,9	380,22	371,01	386,26
Mundo	981	1.083,55	1.085,05	1.131,31

Fonte: Levantamento USDA (2019).

No Brasil o milho é cultivado em todo território nacional, sendo a segunda cultura mais produzida no país, ficando atrás somente da soja. Segundo projeções da Conab (2019), a produção de milho na safra 18/19 equivalerá a 40% do total de grãos produzido nessa safra. Conforme dados desta mesma instituição, os indicadores apontam que de 1990 a 2019 haverá um aumento superior a 25% na área plantada com milho no país, acompanhado por um aumento na produtividade média que ultrapassa os 200% (Figura 1).

Figura 1. Evolução da área plantada e da produtividade da cultura do milho no Brasil.

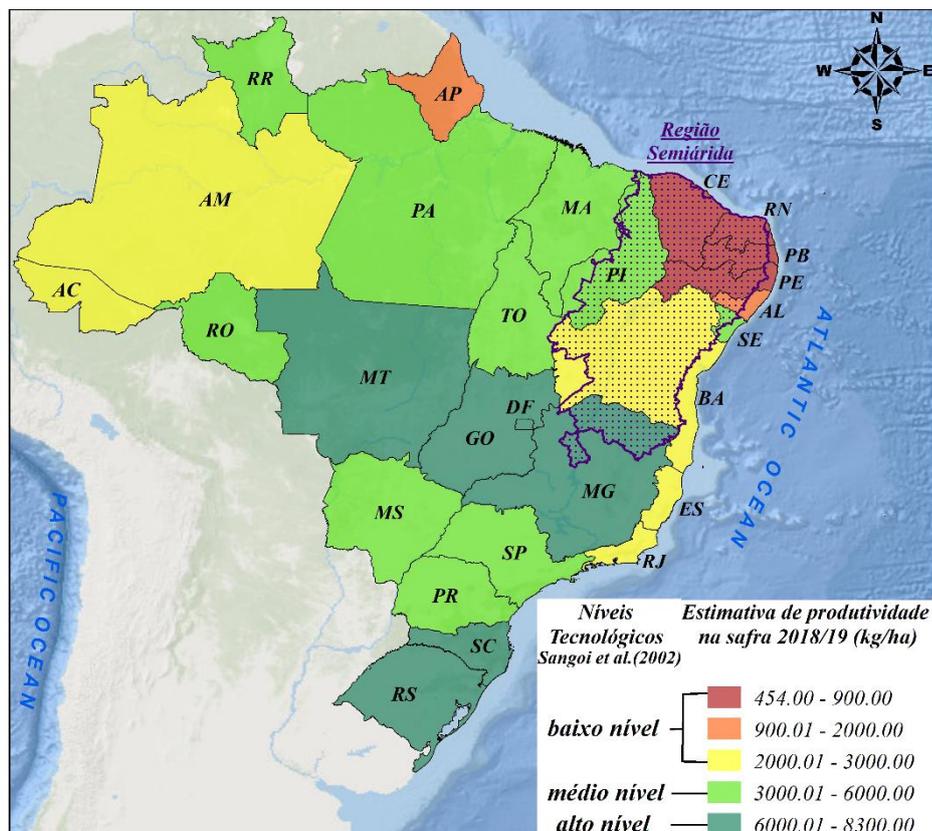


Fonte: Adaptado de CONAB (2019)

Diante deste aspecto o milho apresenta uma notável importância econômica, em virtude de demanda do mercado e do crescimento expressivo da produtividade. Algumas das explicações para tamanha expansão desta cultura estão ligadas ao seu alto valor nutritivo, potencial produtivo e versatilidade de cultivo, sendo utilizado em diferentes escalas de produção e podendo ser facilmente substituído por outra cultura (GALVÃO *et al.* 2014; KRESOVIC *et al.* 2014).

Mesmo sendo o terceiro maior produtor de milho do mundo, e ter um histórico de rápido crescimento da produtividade (Figura 1), o Brasil não consegue resultados mais expressivos em virtude do grande contingente de pequenos produtores pouco tecnificados que cultivam este grão. A maioria destes estão localizado na região semiárida, conforme classificação dos níveis tecnológicos proposto em Sangoi *et al.* (2002), sobre a estimativa de produtividade feita pela CONAB (2019) para a safra atual.

Figura 2. Mapa da estimativa de produtividade do milho na safra 18/19, com classificação dos níveis tecnológicos.



Fonte: Adaptado de CONAB (2019) e Sangoi *et al.* (2002).

A representação da estimativa de produtividade (Figura 2) foi feita com base na média da produtividade por estado, e não reflete o real valor obtido em alguns municípios que

compõe a região semiárida e maior parte da região Nordeste, como é o caso de algumas localidades do Piauí, do Maranhão e da Bahia que tiveram a média de produtividade influenciada pelos altos valores atingidos na fronteira agrícola entre estes estados e o Tocantins, também conhecida como MATOPIBA, e também na região norte de Minas Gerais, bastante influenciada pela alta produtividade alcançada no restante do estado. De maneira geral, a produtividade média na região semiárida é inferior a 900 kg ha^{-1} , enquanto que a média nacional atualmente gira em torno de 5000 kg ha^{-1} .

Diante deste cenário é possível perceber que a produção de milho no Brasil é bastante polarizada entre uma parcela de pequenos produtores do semiárido que cultivam esta cultura sem o uso de tecnologias avançadas, cultivares melhoradas ou práticas agrícolas mais sofisticadas, dependendo totalmente das condições edafoclimáticas para conseguir alguma produção, e uma outra parcela de produtores que investem muito capital para atingir altos índices de produtividade. Contudo, o milho tem uma grande importância social e cultural na região semiárida, sendo todos os anos cultivado por quase todos os agricultores locais, e grande parte desta produção praticada como forma de subsistência.

Grande parte desta quebra de produtividade na região semiárida é explicada pela utilização de manejo e tecnologia insuficientes ou ineficientes e pela variabilidade dos regimes pluviométricos da região (DUARTE, 2018; NEVES *et al.* 2015). Sendo que o manejo inadequado junto com o déficit hídrico causado pelas condições climáticas locais é responsável pelo dobro de quebra de produtividade do milho de sequeiro, quando comparado as demais regiões do país (DUARTE, 2018).

A região Semiárida do Nordeste brasileiro (NEB) é caracterizada por baixos índices pluviométricos e frequência de dias chuvosos concentrados em um período de quatro meses (CUNHA *et al.* 2015; FERREIRA; ALVES; COSTA, 2004; SILVA; RAO, 2002). Sendo o Ceará o estado desta região que mais depende das chuvas, uma vez que o abastecimento hídrico é quase que totalmente suprido por reservatórios, rios intermitentes e efêmeros, não havendo assim nenhum rio perene de longa extensão que passe pelo estado, o que torna a agricultura uma prática bastante arriscada, principalmente quando praticada com milho, que segundo Achakzai (2009), Çakir (2004), Lu *et al.* (2011) e Shirazi *et al.* (2011) é uma cultura que possui fases fenológicas de germinação, florescimento e formação dos grãos bastantes exigentes em relação ao suprimento hídrico. Em função disso, muitas pesquisas desenvolvidas na região mostram uma alta correlação direta e significativa entre a produtividade do milho e a precipitação (DINIZ, 2016; LOPES; DANTAS; FERREIRA, 2019; SILVA; SILVA, 2016).

Mesmo com tais dificuldades, o milho desde 2013 representa mais de 70% do total de grão produzidos no Ceará (CONAB, 2019) sendo amplamente cultivado em vários municípios, principalmente por pequenos agricultores familiares. Segundo informações coletadas no último recenseamento agropecuário, 89,6% dos estabelecimentos rurais cearenses são de agricultores familiares, que produzem 90% do total de milho e feijão do estado (IBGE, 2012).

Devido ao impacto que os fatores climáticos causam nas safras agrícolas de milho em sequeiro ou sob irrigação suplementar, existe a grande necessidade de se realizar um planejamento adequado para se produzir com menores riscos de perdas. Para isto é importante identificar áreas aptas ao cultivo e buscar as janelas de plantio dentro do período chuvoso que atenda as exigências edafoclimáticas do milho. Segundo Oliveira (1996), mesmo com um volume de água reduzido pode-se obter produções viáveis economicamente, desde que as exigências hídricas sejam supridas durante as fases fenológicas críticas.

Por isto que o desenvolvimento de técnicas e tecnologias que auxiliem o produtor a conviver com as condições e variações climáticas são de suma importância, principalmente para aqueles que não têm capital suficiente para fornecer um ambiente controlado para a cultura. Para isto é necessário conhecer a fenologia da cultura e suas necessidades climáticas e obter um mapeamento das características edafoclimáticas da região de plantio.

1.2 Ecofisiologia do milho e os elementos climáticos

Na classificação botânica, o milho pertence a ordem *Gramineae*, família *Poaceae*, gênero *Zea* e espécie *Zea mays* L. É uma planta de metabolismo fotossintético C₄, que converte a radiação solar em biomassa de maneira muito eficiente (ver TAIZ *et al.* 2016), atingindo patamares elevados de produtividade em regiões tropicais e subtropicais, desde que tenham condições favoráveis de suprimento hídrico e nutricional (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014; CUI *et al.* 2017; EDWARDS *et al.* 2010).

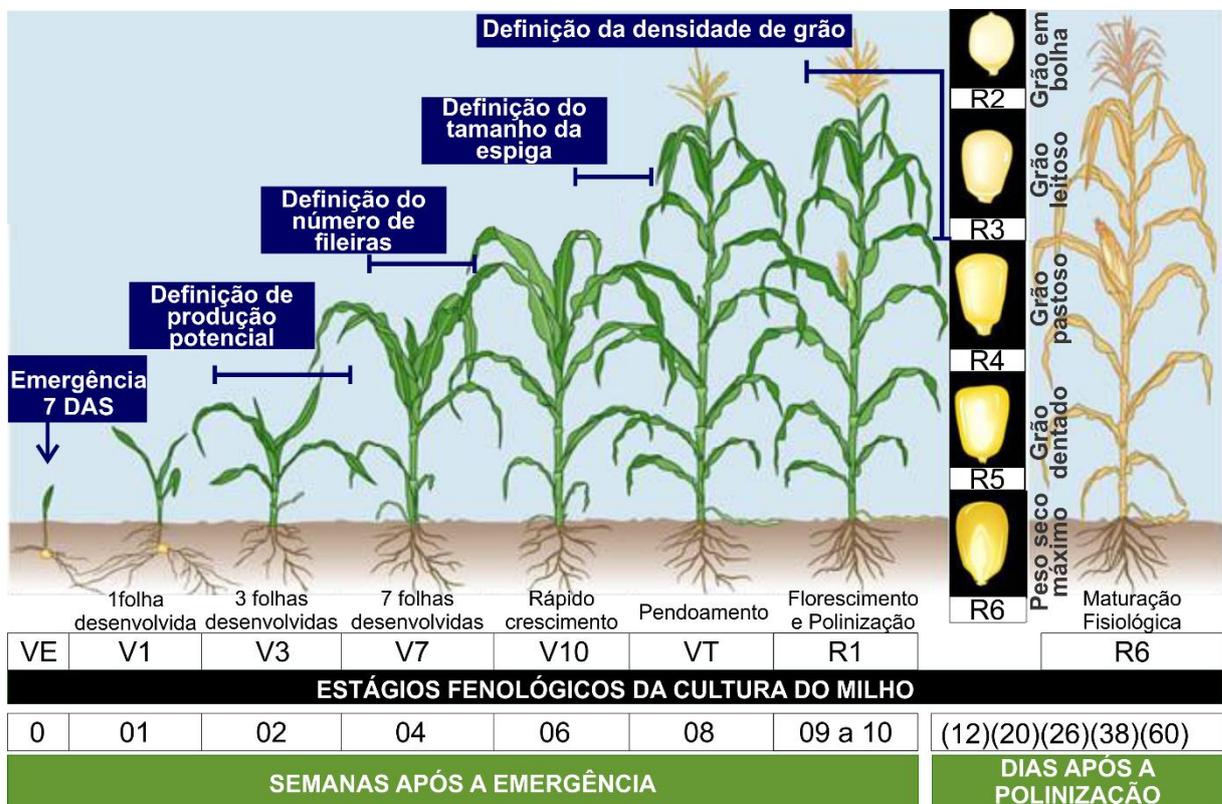
No Brasil, o milho apresenta ciclo médio de 110 e 180 dias, da emergência até a maturidade fisiológica, a variar conforme a classificação de precocidade do genótipo e das condições de temperatura e de suprimento hídrico (BERGAMASCHI; BERGONCI, 2017; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014; SHIRAZI *et al.* 2011).

Para facilitar o estudo da cultura e caracterizar suas necessidades e sensibilidades é necessário se descrever precisamente as etapas fenológicas do milho e identificar seus períodos

críticos. A Figura 3 apresenta a descrição feita por Ritchie, Hanway, Benson (1993), atualmente a mais utilizada entre os pesquisadores da área.

Estas informações são indispensáveis para pesquisas e aplicações que envolvam as interações clima-planta, como classificação da precocidade de genótipo, zoneamento agroclimático, monitoramento e gestão de safra, avaliação de risco climático, eficiência no uso de água da irrigação, entre outras (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Figura 3. Estádios fenológicos de uma planta de milho, com suas respectivas durações. (DAS-Dias Após Semeadura)



Fonte: adaptado de Ritchie, Hanway e Benson (1993)

Após escolha do genótipo a ser cultivado, a descrição da escala fenológica e a identificação das fases críticas é possível se planejar a definição do calendário agrícola buscando adequar as necessidades do milho com as disponibilidades do ambiente, diluindo os danos ligados ao estresse climático ao longo do ciclo fenológico da cultura.

Cada genótipo dispõe de exigências ambientais distintas ou fatores de produtividade, sendo que para uma produção sustentável é necessário conhecer e analisar se as mesmas são atendidas nas condições locais (LAN; SANS; SANTANA, 2008). Estes fatores são responsáveis pela definição tanto da produtividade potencial como da produtividade atingível

da cultura e variam com a localização geográfica da região. No Nordeste, a limitação maior se deve a precipitação, a temperatura e a evapotranspiração, pois afetam as atividades fisiológicas inerentes a produção de grãos e de matéria seca (BARROS; VAREJÃO-SILVA; TABOSA, 2012; SILVA *et al.* 2012).

Dentre as exigências climáticas da cultura, tem-se que:

1. A maior parte dos genótipos de milho apresentam o desenvolvimento restrito quando submetidos a temperaturas inferiores a 10 °C ou superiores a 35 °C, estando a faixa ideal entre 24 e 30 °C (BARROS; VAREJÃO-SILVA; TABOSA, 2012; CRUZ *et al.* 2010; MALDANER *et al.* 2014)

2. O milho tem uma eficiência quântica até 20% maior do que as demais plantas dos outros dois subgrupos fotossintético de plantas C₄, respondendo positivamente a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) de até 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (HATTERSLEY, 1984). Sua eficiência de interceptação de radiação solar e o índice de área foliar (IAF) é dependente da arquitetura das plantas, do adensamento de cultivo, do nível de manejo, e da fase fenológica de desenvolvimento (STRIEDER *et al.* 2008).

3. A necessidade hídrica do milho oscila segundo os genótipos utilizados, o IAF da lavoura, e com a época e a localidade do plantio, sendo descrito valores que variam entre 250 e 800 mm por ciclo (ABDRABBO; SALEH; FARAG, 2016; CRUZ; FILHO, 2008; DOORENBOS; KASSAM, 1979; SUN *et al.* 2010; ZHAO; LIU; ZHANG, 2010; BERGAMASCHI *et al.* 2006). No geral, para atingir a máxima produção em um médio período de amadurecimento, o milho necessita de 500 a 800 mm de precipitação (CRUZ *et al.* 2010; DOORENBOS; KASSAM, 1979).

4. Muitas pesquisas têm desenvolvido diversos genótipos de milho e atualmente seu cultivo é possível desde localidades abaixo do nível do mar até altitudes superiores a 3.600m (MAGALHÃES *et al.* 2002), sendo o problema nutricional facilmente corrigido via adubação. Entretanto, verificar a topografia do terreno é fundamental antes de implantar a cultura, sendo o relevo plano o ideal, para evitar a suscetibilidade à erosão e contribuir para a mecanização do solo, tratos culturais e colheita.

REFERÊNCIAS

- ABDRABBO, M. A. A.; SALEH, S. M.; FARAG, A. A. Water requirements for maize under climate change. **Journal of Applied Sciences Research**, Paquistão, v. 12, n. 5, p. 19–28, 2016.
- ACHAKZAI, A. K. K. Effect of water stress on imbibition, germination and seedling growth of maize cultivars. **Sarhad Journal of Agriculture**, Paquistão, v. 25, n. 2, p. 165–172, 2009.
- BARROS, A. H. C.; VAREJÃO-SILVA, M. A.; TABOSA, J. N. Aptidão climática do estado de Alagoas para culturas agrícolas. **Relatório Técnico. Convênios SEAGRI-AL/Embrapa Solos**, Recife-Pe, ZONEAMENTO AGROECOLÓGICO DO ESTADO DE ALAGOAS (ZAAL), p. 1–86, 2012.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243–249, fev. 2006.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As Plantas e o Clima - Princípios e Aplicações**. [S.l.]: Agrolivros, 2017. V. 1. p.1-352.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O Milho e o Clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. p.1-84.
- ÇAKIR, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, Holanda, v. 89, n. 1, p. 1–16, set. 2004.
- CONAB (Companhia Nacional De Abastecimento). **Conab - Safras**. 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 7 abr. 2019.
- CRUZ, J. C. *et al.* Plantio. In: CRUZ, J. C. (Org.). **Cultivo do Milho**. Sistema de produção. 6. ed. Sete Lagoas- MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. p. 1–10.
- CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P. Cultivares. In: CRUZ, J. C. (Org.). **Cultivo do Milho**. Sistema de produção. 4. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo., 2008. p. 1–4.
- CUI, T. *et al.* QTL mapping for leaf area in maize (*Zea mays* L.) under multi-environments. **Journal of Integrative Agriculture**, China, v. 16, n. 4, p. 800–808, abr. 2017.
- CUNHA, A. P. M. *et al.* Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 214–215, p. 494–505, dez. 2015.
- DINIZ, A. F. **Estudo da variabilidade da pluviosidade (1994-2010) no município de Feira de Santana (Bahia) e seus reflexos na agricultura de sequeiros: o caso do milho**. 2016.114 f. Dissertação- Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, 2016.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. [S.l.]: FAO Irrigation and Drainage, 1979. p.1-201.

DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho - uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil.** 2014.197 f. Dissertação- Universidade de São Paulo, [S.l.]: 2018.

EDWARDS, E. J. *et al.* The Origins of C4 Grasslands: Integrating Evolutionary and Ecosystem Science. **Science**, EUA, v. 328, n. 5978, p. 587–591, 30 abr. 2010.

FERREIRA, F. F.; ALVES, J. M. B.; COSTA, A. A. Um estudo dos impactos das temperaturas da superfície do mar (TSM) em macrorregiões, pluviométricamente homogêneas, no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria-RS, v. 12, p. 193–204, 2004.

GALVÃO, J. C. C. *et al.* Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 61, n. suppl, p. 819–828, dez. 2014.

HATTERSLEY, P. W. Characterization of C4 type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll: Bundle sheath area ratios. **Annals of Botany**, Inglaterra, v. 53, p. 163–179, 1 fev. 1984.

IBGE (Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística). **Censo Agropecuário 2006: Brasil, grandes regiões e Unidades da Federação.** Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2019.

KRESOVIC, B. *et al.* Irrigation as a climate change impact mitigation measure: An agronomic and economic assessment of maize production in Serbia. **Agricultural Water Management**, Holanda, v. 139, p. 7–16, jun. 2014.

LAN, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Clima e solo. *In*: CRUZ, J. C. (Org.). **Cultivo do Milho.** Sistema de produção. 4. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. p. 1–3.

LOPES, J. R. F.; DANTAS, M. P.; FERREIRA, F. E. P. Variabilidade da precipitação pluvial e produtividade do milho no semiárido brasileiro através da análise multivariada. **Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Mato Grosso, v. 7, p. 77–83, jan. 2019.

LU, Y. *et al.* Large-scale screening for maize drought resistance using multiple selection criteria evaluated under water-stressed and well-watered environments. **Field Crops Research**, Holanda, v. 124, n. 1, p. 37–45, out. 2011.

MAGALHÃES, P. C. *et al.* **Fisiologia do Milho.** Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo., 2002. p.1-23.

MALDANER, L. J. *et al.* Exigência Agroclimática da Cultura do Milho. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Paraná, v. 3, p. 13–23, 25 jun. 2014.

NEVES, André Luis Alves *et al.* Agronomic characteristics of corn cultivars for silage production. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina-PR, v. 36, n. 3, p. 1799–1806, 2 jul. 2015.

- OLIVEIRA, J. B. De **Análise pluviométrica evapotranspiração de referência para dez localidades do estado do Ceará-Brasil**. 1996. Trabalho de graduação- Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1996.
- RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a Corn Plant Grows. **Special Report**, Iowa State University of Science and Technology, v. 48, p. 1–25, jun. 1993.
- SANGOI, L. *et al.* Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, Holanda, v. 79, n. 1, p. 39–51, dez. 2002.
- SHIRAZI, S. *et al.* Effects of different irrigation regimes and nitrogenous fertilizer on yield and growth parameters of maize. **International journal of physical sciences**, Nigéria, v. 6, p. 677–683, 2011.
- SILVA, F. De A. S. E; RAO, T. V. R. Regimes pluviais, estação chuvosa e probabilidade de ocorrência de veranicos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 6, n. 3, p. 440–446, dez. 2002.
- SILVA, G.; SILVA, D. F. D. Análise da Influência Climática Sobre a Produção Agrícola no Semiárido Cearense (Analysis of Climate Influence on Agricultural Production in Semiarid Cearense). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 9, n. 2, p. 643–657, 19 mar. 2016.
- STRIEDER, M. L. *et al.* Características de dossel e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 309–317, mar. 2008.
- SUN, H. *et al.* Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat–summer maize rotation in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Holanda, v. 97, n. 8, p. 1139–1145, 1 ago. 2010.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Edição: 6^a ed. [S.l.]: Artmed, 2016. p.1-954.
- USDA (United States Department of Agriculture). **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. EUA, 2019. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0219.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2019.
- WIJewardana, C. *et al.* Interactive effects on CO₂, drought, and ultraviolet-B radiation on maize growth and development. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Suíça, v. 160, p. 198–209, 2016.
- ZHAO, W.; LIU, B.; ZHANG, Z. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. **Agricultural Water Management**, Holanda, v. 97, p. 215–223, 1 fev. 2010.

2. ANÁLISE DE VERANICOS EM UMA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL E SUA INFLUÊNCIA NA PRODUTIVIDADE DO MILHO

RESUMO

O cultivo do milho sob condições de sequeiro embora bastante arriscado em áreas de semiárido, é ainda largamente difundida. Nestas regiões os eventos de chuva são concentrados em um curto período de tempo, irregulares e descontínuos, de modo que compreender tais eventos é de grande relevância para o planejamento e manejo agrícola do milho. Neste estudo, buscou-se analisar em uma região semiárida: (1) a existência de diferenças espaço-temporal na ocorrência de veranicos de diferentes durações; (2) as tendências de variações nas frequências dos veranicos em cenários de anos secos, regulares e chuvosos; (3) como a produtividade histórica de milho se comporta frente a ocorrência das diferentes classes de veranicos; e (4) como a frequência dos fenômenos de El Niño e La Niña de longa duração, juntamente com as diferentes classes de veranicos, impactam a produtividade do milho. Para isto, foram realizadas a quantificação e a espacialização das ocorrência de veranicos em uma série histórica variável entre 245 estações pluviométricas, estratificando-as em seis classes de número de dias sem chuva (5-10; 11-15; 16-20; 21-25; 25-30 e >30), dentro da quadra chuvosa, distribuídos em oito diferentes regiões pluviometricamente homogêneas (RPH) do estado do Ceará. Uma análise de tendência entre a frequência de veranicos em anos secos, regulares e chuvosos, e se este número também é influenciado pela ocorrência de eventos de El Niño e La Niña de longa duração e como as classes e ocorrência temporal de veranicos influenciam na produtividade do milho dentro de cada RPH. Os resultados demonstram que a produtividade de milho em sequeiro está relacionada negativamente com a presença de veranicos, sendo que esta cultura atingi bons resultados com veranicos de até 15 dias, além disso a produtividade despenca significativamente. Também se comprovou que o maior número de veranicos foi encontrado nas regiões mais interioranas do sertão semiárido, principalmente os mais prolongados. Sendo que a maior probabilidade de ocorrência está no primeiro e no último mês da estação chuvosa de cada RPH, com concentração de veranicos que variam de 6 a 20 dias sem chuva, indicando a necessidade de práticas de irrigação suplementar no primeiro mês da estação chuvosa ou, para o caso de cultivo em sequeiro, um plantio voltado mais para o final do mesmo em anos regulares ou chuvosos, em condições de anos secos e/ou com configuração de El Niños de longa duração, aumentam o número de veranicos com mais de 20 dias sendo impraticável a condução do milho sob condições de sequeiro.

Palavras-chave: Análise de frequência. Precipitação. RPH. Sequeiro.

ABSTRACT

Maize production under rainfed conditions, although risky in semi-arid areas, is still widespread. In this region, rainfall events are concentrated over a short, irregular and discontinuous period, so that understanding these events has great relevance to the planning and agricultural management of maize. This study were to analyse for a semi-arid region: (1) whether there is a spatial-temporal difference in the occurrence of dry spells of different durations; (2) the trends in variation in dry-spell frequency during dry, regular and rainy years; (3) the historical behaviour of maize productivity faced with the occurrence of different classes of dry spells; and (4) how the frequency of long-duration El Niño and La Niña phenomena, together with the different classes of dry spells, affect maize productivity. As such, the occurrence of dry spells was quantified and spatialised for a variable historical series from 245 rainfall stations, stratifying them into six classes by number of days with no rain (5-10, 11-15, 16-20, 21-25,25-30 and >30) during the rainy season, distributed over eight different homogeneous rainfall regions (HRR) in the state of Ceará. A trend analysis was then carried out between the frequency of dry spells, considering years classified as dry, neutral and rainy, and whether this number is also influenced by the occurrence of long-duration El Niño and La Niña events, and how the classes and temporal occurrence of dry spells influence maize productivity within each HRR. The results show that the productivity of rainfed maize is negatively related to the presence of dry spells, with the crop achieving good results for dry spells of up to 15 days, after which productivity falls significantly. It was also shown that the greatest number of dry spells was found in regions of the semi-arid region that are further inland, especially more prolonged dry spells. Throughout the highest probability of occurrence is during the first and last month of the rainy season in each HRR, with a concentration of dry spells which vary from 6 to 20 days without rain, indicating the need for additional irrigation practices during the first month of the rainy season or, in the case of rainfed cultivation, planting nearer the end of the season in years of neutral or rainy conditions, under the conditions of dry years and/or long-duration El Niño events, there is an increase in the number of dry spells over 20 days and it is not possible to grow maize under rainfed conditions.

Keywords: Frequency analysis. Rainfall. HRR. Rainfed.

2.1 INTRODUÇÃO

O milho é a principal cultura temporária conduzida no nordeste brasileiro sendo destinado tanto para a alimentação humana quanto para a alimentação animal. A produtividade do milho nesta região é dependente das práticas de manejo e condições climáticas (DUARTE, 2018; NEVES *et al.* 2015), sendo que o manejo inadequado junto com o déficit hídrico causado pelas condições climáticas locais levam ao dobro de quebra de produtividade do milho de sequeiro quando comparado as demais regiões do país (DUARTE, 2018). As tendências de eventos extremos de precipitação, seja por volume excessivo ou por secas, impactam a produção agrícola do nordeste, e estão associadas principalmente ao dipolo de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Tropical e também à temperatura das águas no Pacífico Tropical, com a formação de anomalias climáticas, tais quais os fenômenos de El Niño e La Niña (NOBRE; SHUKLA, 1996; PINHEIRO *et al.* 2018; MARENGO *et al.* 2017).

O reconhecimento das anomalias climáticas que alteram os padrões climatológicos recorrentes permite o desenvolvimento de atividades e tecnologias que minimizem seus efeitos adversos e possibilitem o aproveitamento dos recursos e das condições advindas de tais fenômenos naturais anômalos. Os processos de formação das chuvas em regiões semiáridas, que se concentram em um período do ano e formam a estação chuvosa, são considerados padrões climatológicos recorrentes, e são aproveitados pelos agricultores para a realização do plantio das lavouras. Para ajudar os produtores na tomada de decisão, no que diz respeito ao manejo das culturas dentro da janela de cultivo, pesquisas sobre a natureza da precipitação em escala regional e local são essenciais no julgamento de consequências hidrológicas (HUANG *et al.* 2015) e para a produção de conhecimentos. Embora diversos trabalhos tenham focado nas variações anuais e sazonais das estações chuvosas (DOMÍNGUEZ-CASTRO *et al.* 2018; HARSCH; LAMBERS, 2016; MACHIWAL; JHA, 2017; RICKENBACH, 2018; VALDÉS-PINEDA *et al.* 2016; ZENG *et al.* 2016), e na variação chuvosa espaço-temporal diária e mensal (BURT *et al.* 2018; DARAND; SOHRABI, 2018; HALDER *et al.* 2016; HE *et al.* 2017; OSBORN *et al.* 2016; WATTERSON; CHUA; HOPE, 2016), pesquisas que avaliam as tendências em frequência e duração das precipitações na estação chuvosa e sua relação com a produtividade agrícola ainda são incipientes. Esta incipiência se deve a natureza dos dados, que são caracterizados por não linearidade e alta complexidade (SIVAKUMAR; SINGH, 2012), além da dificuldade de padronização etimológica dos veranicos entre localidades e até mesmo dentro de uma mesma zona climática, implicando em diferentes metodologias de análise.

As metodologias de análise que se referem ao limiar de precipitação que definem um dia seco, ou quantos dias secos consecutivos formam um veranico são exemplo de discrepância de análises, e não há na literatura um consenso (HUANG *et al.* 2015; MCCABE; LEGATES; LINS, 2010; SHE; XIA, 2013; ZHAO; DENG; BLACK, 2016). O veranico de interesse agrícola está associado a uma queda de rendimento da cultura, e tem uma relação com a capacidade de retenção de água disponível no solo de cada localidade, das condições de evapotranspiração e da necessidade hídrica do cultivar. Para cultivos de milho por exemplo, veranicos de até 5 dias podem ser prejudiciais quando ocorrem durante as fases de emergência, floração e formação do grão, causando perda parcial ou total da produção (ÇAKIR, 2004; ESPINOZA; AZEVEDO; ROCHA, 1980; SETTER; FLANNIGAN; MELKONIAN, 2001), e mesmo ocorrendo de forma pontual podem ser tão prejudiciais para as culturas quanto uma seca sazonal (BARRON *et al.* 2003; MANIVASAGAM; NAGARAJAN, 2018; MASUPHA; MOELETSI; TSUBO, 2016; MENEZES; BRITO; LIMA, 2010).

A pontualidade ou limitado número de ocorrências dos veranicos, principalmente aqueles de longa duração, dificulta as análises da estrutura probabilística dos veranicos (MISHRA; SINGH, 2011), e uma das maneiras de se superar tais dificuldades é assumir uma estrutura estocástica do comportamento probabilístico nas diferentes classes de veranicos (SIRANGELO *et al.* 2017), incluindo desde as distribuições geométricas, Poisson e binomial negativa (ANAGNOSTOPOULOU *et al.* 2003; DENI; JEMAIN, 2009; TOLIKA; MAHERAS, 2005), até as distribuições extremas Weibull e Gumbel (ASSAD *et al.* 1993; LANA *et al.* 2008, 2006).

A ocorrência de veranicos é de difícil previsão, entretanto a formação dos mesmos está bastante correlacionada com o baixo volume pluviométrico sendo frequente no primeiro mês da estação chuvosa (KISAKA *et al.* 2015; KOSGEI, 2009)

Dessa forma, o presente estudo tem como hipóteses que:

(1) Em regiões semiáridas há uma maior frequência de veranicos de curta duração. E em sua totalidade, as ocorrências de veranicos concentram-se principalmente no primeiro mês da estação chuvosa e em localidades influenciadas pela continentalidade.

(2) A formação de veranicos em uma região semiárida é influenciada pelo regime pluviométrico e por formação de fenômenos de El Niño e La Niña de longa duração.

(3) A produtividade histórica do milho diminui com o aumento da frequência de veranicos mais prolongados ou com a formação de El Niño de longa duração. E aumenta em períodos caracterizados pela configuração de La Niña de longa duração.

Diante das hipóteses apresentadas, os objetivos propostos para o trabalho foram analisar no estado do Ceará: (1) a variação espaço-temporal na frequência de veranicos de diferentes durações; (2) a diferença espacial na frequência dos veranicos, em cenários pluviométricos de anos secos, regulares e chuvosos; (3) como a formação de fenômenos de El Niño e La Niña influenciam na ocorrência de veranicos e (4) como a produtividade histórica de milho se comporta frente a formação de veranicos de diferentes durações ou mediante a ocorrência dos fenômenos de El Niño e La Niña de longa duração.

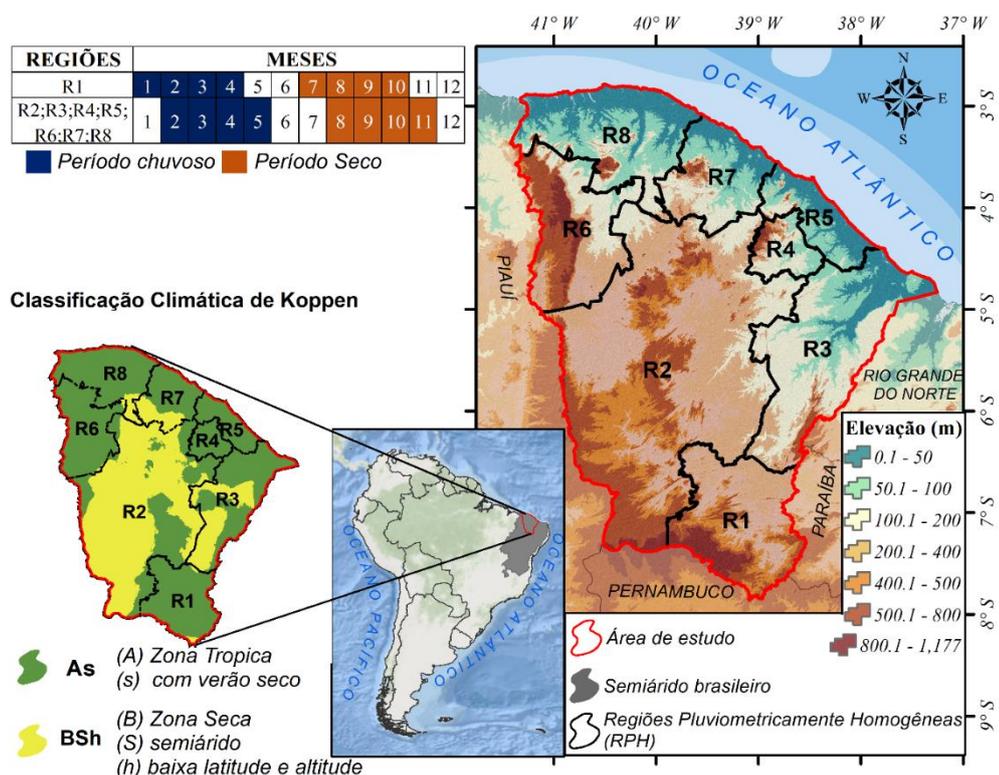
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de Estudo

Com uma extensão de 148.820,4 km², o estado do Ceará está inserido em sua quase totalidade na região Semiárida. É caracterizado por valores altos de insolação (em média 230 W/m²), altas temperaturas (em média 26°C) e amplitude térmica anual baixa (cerca de 2°C). Seu relevo tem altitude que varia de 0 a 1.134 m, o que confere grande diversidade de classes geomorfológicas, sendo que dentro dessas classes a depressão sertaneja é preponderante, ocupando mais de 75% do território.

Nas áreas de depressão a precipitação anual é inferior a 800 mm, enquanto nas áreas litorâneas o regime de chuva é de mais de 1500 mm anuais. Embora ocorra grande discrepância do regime pluviométrico dentro do estado, os dias chuvosos se concentram em um período de quatro meses, que variam conforme a localidade (CUNHA *et al.* 2015; FERREIRA; ALVES; COSTA, 2004; SILVA; RAO, 2002) , o que resulta em dois tipos climáticos segundo a classificação de Köppen (Figura 4).

Figura 4. Mapa hipsométrico da área de estudo, mostrando as RPH (polígonos em preto) com a indicação dos meses mais chuvosos de cada uma e classificação climática de Köppen.



Fonte: Xavier (2001) e Alvares; Stape e Sparovek (2013)

Para a realização do trabalho, foi utilizada a regionalização proposta por Xavier (2001), nela o estado do Ceará foi dividido em oito Regiões Pluviometricamente Homogêneas – RPH, sendo elas Cariri (R1); Sertão Central e Inhamuns (R2); Jaguaribana (R3); Maciço de Baturité (R4); Litoral de Fortaleza (R5); Ibiapaba (R6); Litoral do Pecém (R7) e Litoral Norte (R8). Utilizando Cunha *et al.* (2015), com adaptações de estudos mais detalhados da região como Fernandes (2014); Ferreira *et al.* (2004) e Xavier (2001) dividiu-se o período chuvoso de cada RPH definindo-os a partir da divisão dos regimes pluviométricos no Nordeste (Figura 4).

2.2.2 Coleta de dados

Análises baseadas apenas no volume total de chuva mensal podem gerar perda de informações importantes bem como conclusões incorretas (CINDRIĆ; PASARIĆ; GAJIĆ-ČAPKA, 2010). Para evitar estes erros sistêmicos foi obtido uma série histórica de dados diários de precipitação observados nas 245 estações meteorológicas junto a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes postos de coleta apresentavam série histórica variável, e foram selecionados os dados que continham no mínimo 20 anos de coleta, dados coletados até dezembro de 2017. Além disso, utilizando os critérios de Li *et al.* (2017) não foram utilizadas estações quando havia mais de 1% de dados inconsistentes e faltantes em relação ao total de dados da série de uma estação específica.

Para completar os dados faltantes para uma estação específica adotou-se o critério do vizinho mais próxima descrito em Garcia *et al.* (2006). Caso não houvesse uma estação vizinha em um raio máximo de 20 km, utilizou-se a metodologia proposta em Li *et al.* (2017). Neste caso os dados faltantes foram completados interpolando linearmente os valores das estações adjacentes que possuísem a maior correlação. Em seguida, a homogeneidade das séries de precipitação foi analisada calculando o desvio acumulado (WANG *et al.* 2011), e todas as estações utilizadas foram homogêneas no nível de confiança de 95%. Dentre as 245 estações, 61% apresentaram mais de 30 anos de coleta e apenas 19% tinham entre 20 e 25 anos de coleta.

Os eventos El Niño (ENSO) e La Niña (LNSO) foram obtidos a partir das médias mensais de TSM oriundas do Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (HUANG *et al.* 2014; LIU *et al.* 2014) disponibilizadas pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). A base de dados de produtividade do milho foi obtida no SIDRA do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019).

2.2.3 Definição dos veranicos e análise dos dados

O primeiro passo para delimitar os veranicos foi definir a quadra chuvosa de cada RPH, em seguida foi contabilizado a sequência de dias secos ininterruptos dentro de cada estação. Neste estudo um dia seco (limiar de precipitação) foi definido como um dia com precipitação igual ou inferior a 2 mm (MUPANGWA; WALKER; TWOMLOW, 2011), e os veranicos agrupados em seis classes de dias sem chuva dentro da estação chuvosa 5-10 (A); 11-15 (B); 16-20 (C); 21-25 (D); 26-30 (E) e >30 (F). Em seguida foi quantificado as ocorrências de veranicos de cada classe dentro da série histórica de cada estação.

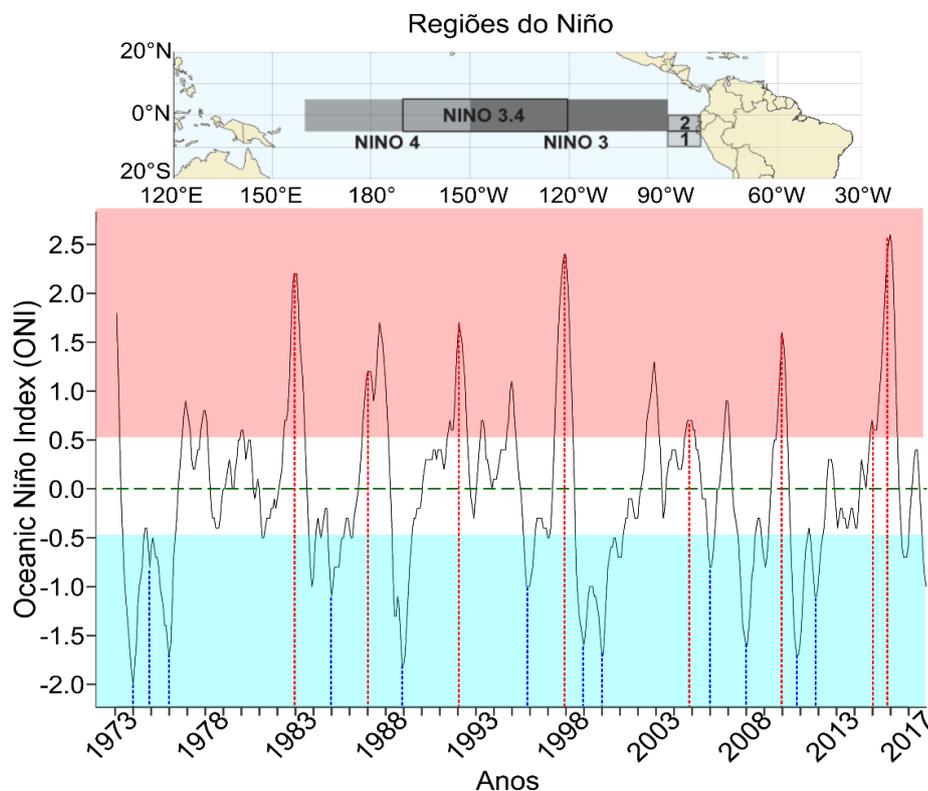
2.2.4 Cenários de precipitação

A série histórica individual das estações foi agrupada e classificada conforme a distribuição gama de descrição probabilística descrita em Lyra *et al.* (2006). Os valores de precipitação anual foram subdivididos em: i) Anos Secos – anos nos quais o total de precipitação acumulada no quadrimestre mais chuvoso (QMC) foi inferior ou igual à 25%; ii) Anos Chuvosos – anos que o total de precipitação acumulada no QMC foi superior ou igual à 75% do total de precipitação e iii) Anos Regulares – anos não abrangidos pelas duas categorias anteriores.

2.2.5 Classificação dos anos de El Niño e La Niña de longa duração

Os anos foram classificados como de El Niño de longa duração quando as médias móveis trimestrais do *Oceanic Niño Index (ONI)* na região 3,4 fossem iguais ou acima a $0,5^{\circ}\text{C}$ e se estes valores fossem mantidos igual ou superior no mês de março do ano seguinte. Foram classificados como La Niña casos em que os índices das médias móveis trimestrais do ONI fossem iguais ou abaixo de $-0,5^{\circ}\text{C}$, e se estes valores se mantinham igual ou menor no mês de março do ano seguinte (TRENBERTH, 1997). Para o cálculo dos índices foram consideradas as médias trimestrais do período de setembro a fevereiro (setembro-novembro, outubro-dezembro, novembro-janeiro, dezembro-fevereiro). Dos 45 anos analisados entre os anos de 1973 e 2017, 8 deles se enquadraram na classificação de El Niño de longa duração e 12 como La Niña de longa duração (Figura 5).

Figura 5. Variação do ONI ao longo dos anos na região 3.4, indicando os eventos de El Niño (linha vermelha) e La Niña (linha azul) de longa duração.



Fonte: Adaptado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)(2019).

2.2.6 Modelagem da frequência de veranicos e as variáveis respostas

Para responder se havia diferença espaço-temporal entre a ocorrência de veranicos de diferentes durações; como a frequência destes veranicos se comportaram frente a cenários pluviométricos secos, regulares e chuvosos; como a produtividade histórica do milho varia com a ocorrência dos veranicos de diferentes durações e quais os impactos diferenciais dos eventos de El Niño e La Niña de longa duração combinados com as diferentes classes de veranicos na produtividade de milho, foi utilizado um modelo linear misto generalizado para cada variável resposta.

Para assegurar as premissas estatísticas dos modelos foi utilizado a distribuição negativa binomial. Todas as análises foram executadas no programa R (R CORE TEAM, 2018), com os pacotes lme4 (BATES *et al.* 2019), emmeans (LENTH, 2019) e ggplot2 (WICKHAM *et al.* 2018). As médias estimadas de cada tratamento no modelo foram comparadas através do teste de Tukey com um nível de significância de 5%. A espacialização dos veranicos foi obtida através da interpolação por Krigagem, executada no software livre Quantum GIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018).

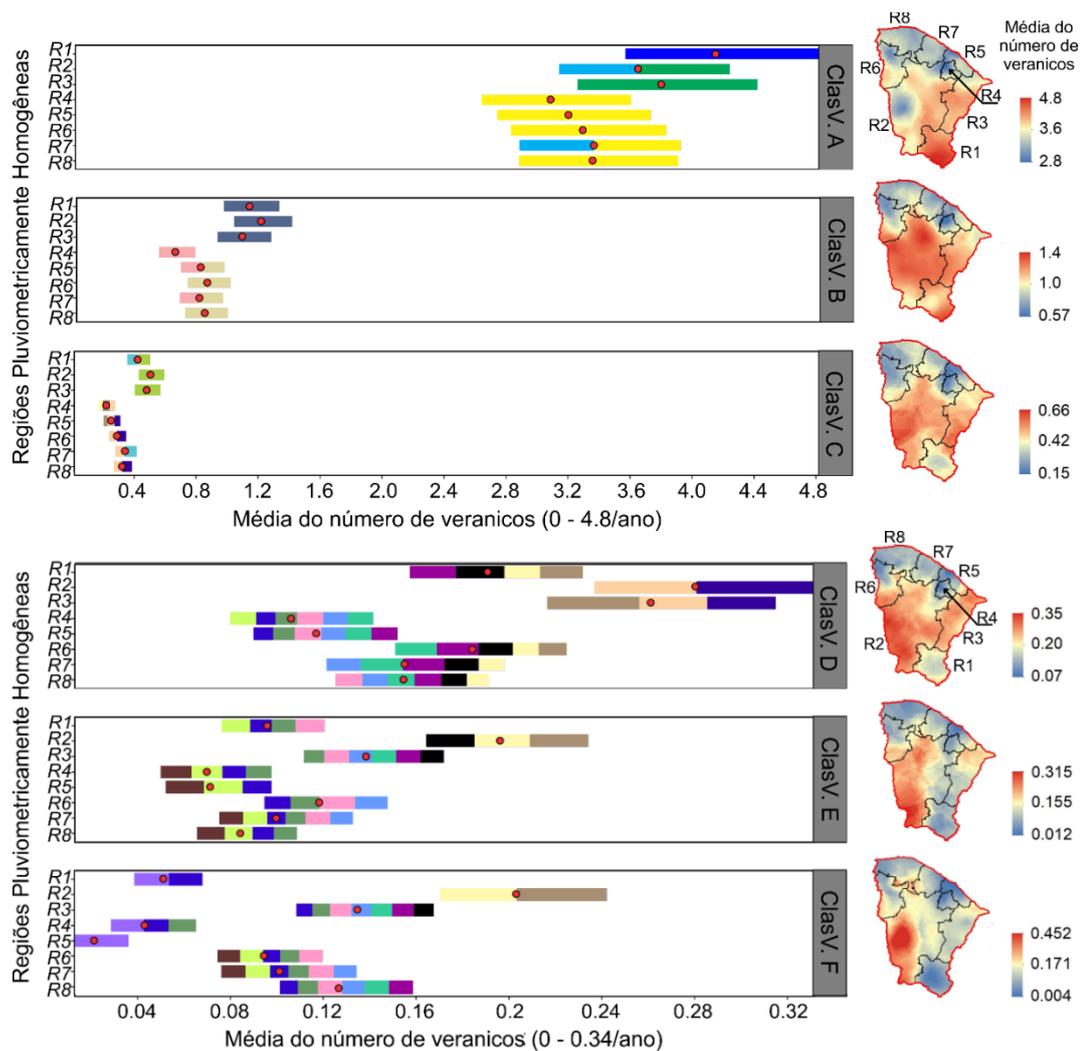
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Frequência das diferentes classes de veranicos em escala anual

Antes de procurar entender como alguns fenômenos ou condições climáticas modulam os padrões climatológicos locais, no caso os veranicos em regiões semiáridas, foi necessário primeiramente entender como estes padrões se comportam sem estas influências.

As médias marginais estimadas da ocorrência de diferentes classes de veranicos por ano são apresentadas na Figura 6 (círculos vermelhos) e as barras são os intervalos de confiança. Barras que apresentem uma cor igual remetem diferença não significativas pelo teste de Tukey, com um grau de confiabilidade de 95%.

Figura 6. Comparação do número de ocorrência das diferentes classes de veranicos (5-10 (A); 11-15 (B); 16-20 (C); 21-25 (D); 26-30 (E) e >30 (F) dias sem chuva) nas oito RPH.



Fonte: Autor.

É perceptível que as classes de veranicos com menor número de dias secos são mais frequentes em todas as regiões, e que esta frequência sofre uma redução exponencial à medida que se aumenta o número de dias secos, sendo que veranicos de classes A tem maior ocorrência que a soma dos demais veranicos, em todas as regiões. Esta tendência de declínio na ocorrência de veranicos mais prolongados também foi verificada na pesquisa de Kisaka *et al.* (2015) e Li *et al.* (2017).

Um outro importante destaque é a regionalização do comportamento dos veranicos com recuo do número de veranicos mais prolongados na R1, a partir do veranico classe D, fato que se deve a posição de barlavento em relação à Chapada do Araripe de uma grande extensão desta região, recebendo ventos úmidos que causam maior uniformidade na distribuição de precipitação, ao encontrar a barreira orográfica. Já na R2 e R3, com quase toda sua extensão formada pela depressão sertaneja e cristas residuais e caracterizada pelos menores volumes de chuva da região, concentram as maiores frequências de todas as classes de veranicos. Sendo que na R2 a incidência de veranico classe D, E e F se iguala a incidência de veranicos classe C nas regiões R4 e R5; estando estas últimas agrupadas com menor frequência de veranicos para todas as classes analisadas, uma vez que correspondem a uma região litorânea (R5) e uma região de serras úmidas próxima ao Litoral (R4), com médias de precipitação elevadas por estarem mais próximas a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é o principal sistema meteorológico convectivo no Ceará, e sofrerem maior atuação de outros sistemas atmosféricos como Linhas de Instabilidade, Sistemas de Brisa e Distúrbios Ondulatórios de Leste. As demais regiões mantiveram um padrão intermediário e bastante homogêneo entre si.

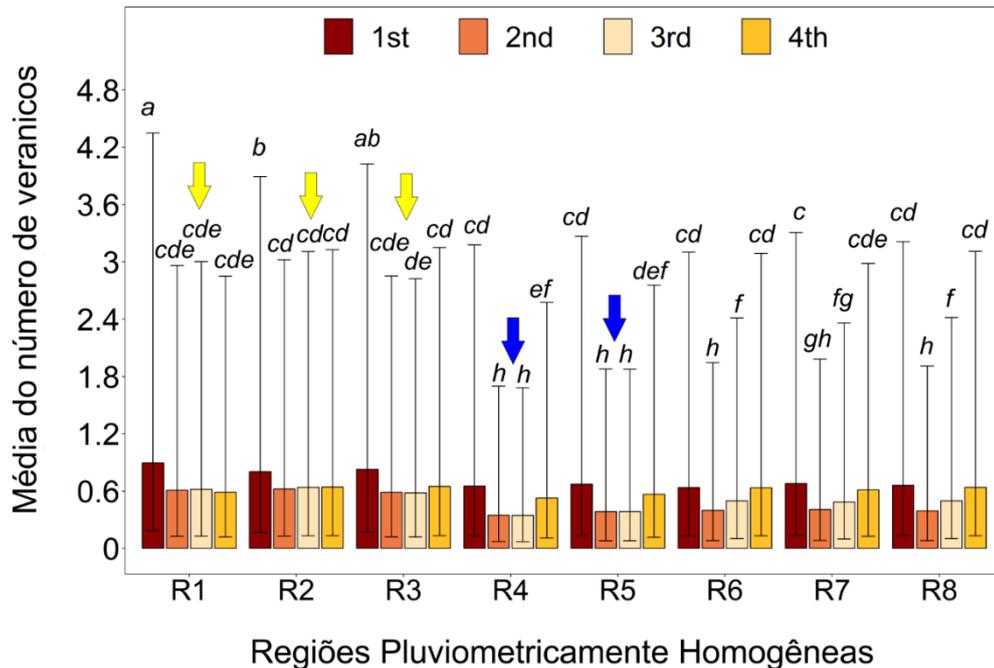
A regionalização do comportamento pluviométrico é bastante comum, principalmente em áreas extensas, cujo clima é dependente de mais de um sistema de circulação atmosférica, que possua topografia variada com várias unidades de relevo e tenha mais de uma formação geomorfológica. Características regionais significativas também foram encontradas nas pesquisas de Fischer *et al.*(2012); Li e Wang (2017); Zhao *et al.*(2014).

She e Xia (2013) encontraram em sua pesquisa que veranicos mais prolongados aumentam a severidade do estresse hídrico. Fato este que sinaliza a maior vulnerabilidade climática da R2 e R3, aumentando os riscos de quebra de safra para produção em sequeiro.

2.3.2 Frequência dos veranicos em escala mensal

Havendo um entendimento espacial do fenômeno é importante saber também como o mesmo está distribuído cronologicamente. A análise foi feita comparando os meses que compõem a quadra chuvosa de cada uma das regiões (Figura 7).

Figura 7. Comparação do número de ocorrência de veranicos nos quatro meses da estação chuvosa entre as oito diferentes regiões da área de estudo.



Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Fonte: Autor.

Para todas as regiões as maiores ocorrências de veranicos foram obtidas no primeiro mês da estação chuvosa e as menores incidências no segundo mês. Isto porque no início da estação chuvosa as chuvas ainda não se estabilizaram e caracterizam-se por alternâncias entre chuvas torrenciais e períodos sem precipitação

Nas Regiões R1, R2 e R3, o primeiro mês é seguido por três meses com valores estatisticamente iguais de menor frequência dos veranicos (setas amarelas). Estas regiões são interioranas e estão mais afastadas do litoral, sendo R2 e R3 caracterizadas por baixos índices pluviométricos e chuvas mal distribuídas. Mupangwa *et al.*(2011) afirma que em áreas semiáridas a ocorrência de veranicos no meio da estação chuvosa está ligada a esta variabilidade espacial e temporal da precipitação.

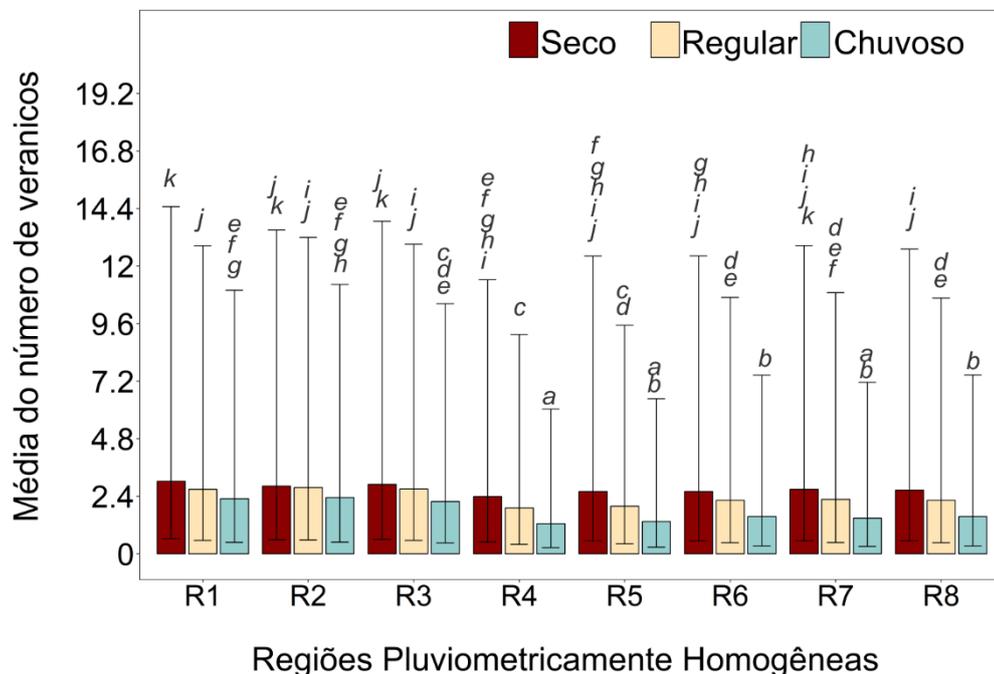
Nas demais regiões os meses com maior incidência de veranicos (primeiro e quarto mês) são estatisticamente iguais aos meses de menor incidência das regiões R1, R2 e R3. As

regiões R4 e R5 que apresentaram o menor número de veranicos em todas as classes, foram as únicas com menores valores totais de veranicos, por dois meses seguidos (setas azuis).

2.3.3 Frequência dos veranicos nos diferentes cenários pluviométricos

Com o entendimento sobre o comportamento espacial e temporal da frequência de veranicos na região semiárida em estudo, foi possível se analisar como a intensidade dos cenários pluviométricos podem alterar o comportamento destas ocorrências. Conforme apresentado na Figura 8, as menores contagens de veranicos ocorreram em cenários chuvosos para todas as regiões, indicando que o maior volume de chuva reflete em uma melhor uniformidade de distribuição ao longo da quadra chuvosa. Já as maiores frequências ocorreram em cenários secos corroborando com os resultados de Huang *et al.* (2015) que comprovaram ser nos dias mais secos a maior ocorrência de veranicos do Nordeste da China e que mudanças sazonais das chuvas podem resultar diretamente nas mudanças dos veranicos.

Figura 8. Comparação do número de ocorrência de veranicos nos diferentes cenários de precipitação pluviométrica entre as oito diferentes regiões da área de estudo.



Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Fonte: Autor.

No caso de R2 e R3 não existe diferença entre o total de veranicos em cenário seco e neutro, indicando que nestas regiões de menor precipitação a ocorrência de chuvas em cenário seco não sofre alteração temporal significativa, mas apenas do volume.

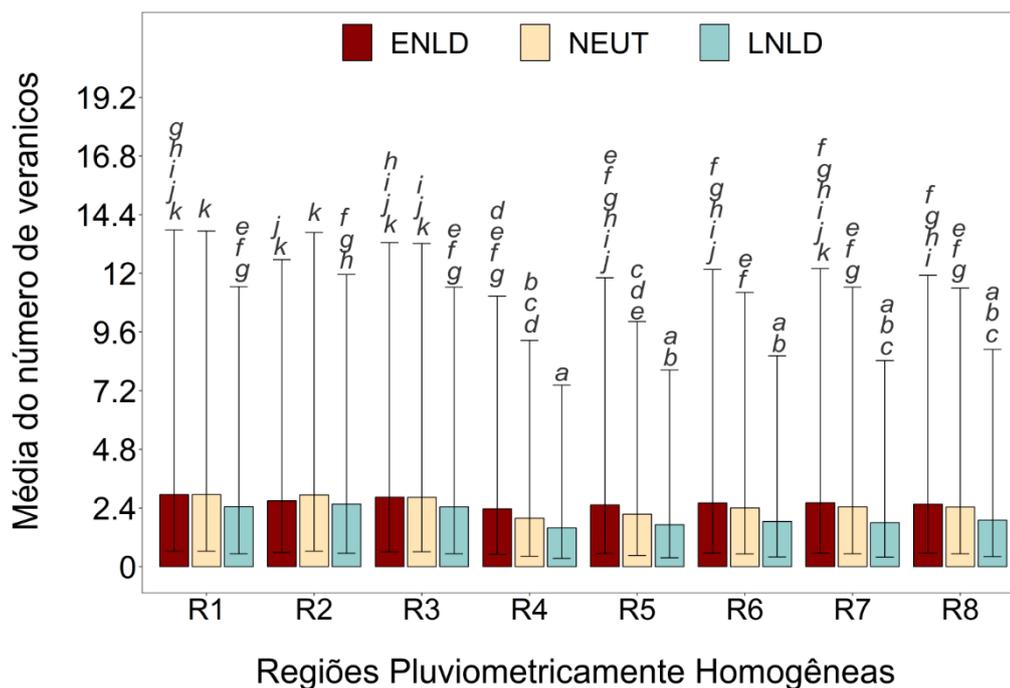
2.3.4 Frequência dos veranicos segundo ocorrência de fenômenos El Niño e La Niña de longa duração.

A precipitação do semiárido brasileiro é marcada por uma grande variabilidade interanual com episódios excepcionalmente secos ou molhados e parte disto pode ser atribuído a variações na superfície do Pacífico tropical que se manifestam como os extremos de El Niño e La Niña (MARENGO *et al.* 2017, 2013). Zhao *et al.* (2016) afirmam que mudanças associadas com o aquecimento global e/ou alterações anormais recorrentes da dinâmica climática local são interativos com padrões meteorológicos de larga escala promovendo ocorrência de veranicos.

É notório que os veranicos estão negativamente relacionados com a proximidade da região em estudo aos principais sistemas atmosféricos responsáveis pelo regime pluviométrico do local. Por isto é importante analisar como a ocorrência de veranicos se comporta frente a formação de anomalias que alteram os sistemas meteorológicos atuantes na produção das chuvas na região de estudo.

Conforme pode ser visualizado na Figura 9 em todas as regiões há uma maior frequência de veranicos nos anos neutros e nos anos acometidos por El Niño de longa duração do que nos anos com La Niña de longa duração, uma vez que esta última é caracterizada por favorecer a formação de fortes chuvas no nordeste brasileiro (MARENGO *et al.* 2013). Tais resultados divergem da conclusão obtida em She e Xia (2013), que encontrou em uma região da China valores semelhantes para veranicos durante eventos de El Niño e La Niña, tal fato se deve a atuação distinta que estes eventos exercem dependendo da localização da área de estudo.

Figura 9. Comparação do número de ocorrência de veranicos em cenários de El Niño de longa duração (ENLD), La Niña de longa duração (LNLD) e anos neutros (NEUT), entre as oito diferentes RPH.



Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Fonte: Autor.

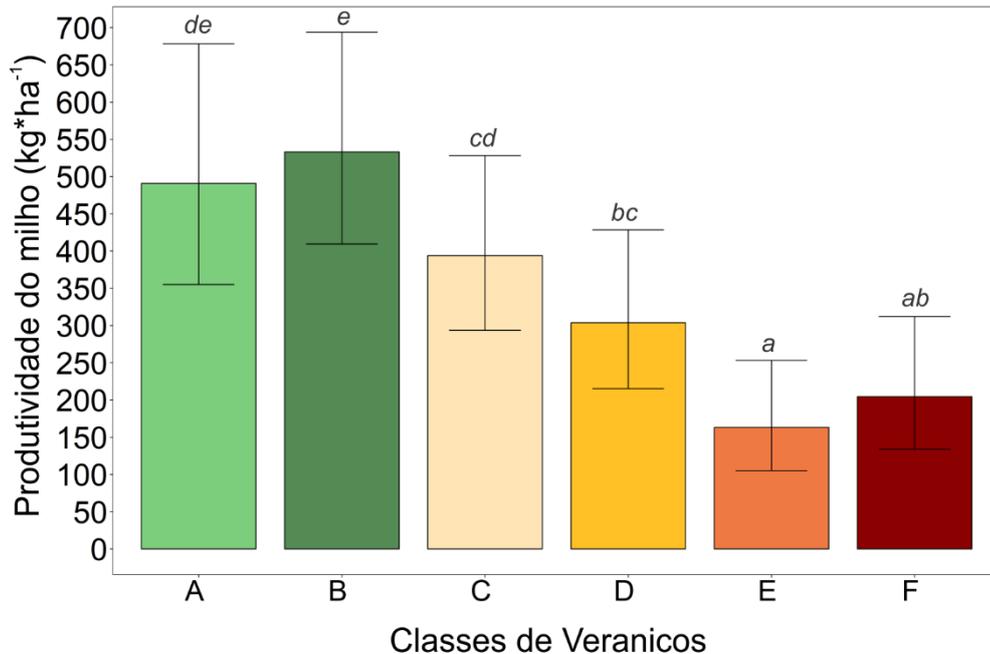
2.3.5 Produtividade do milho e ocorrência dos veranicos

A média histórica de produtividade do milho na região de estudo mostra um rendimento bastante aquém do potencial da cultura. Segundo Liu *et al.* (2012) e Bergamaschi *et al.* (2004) o milho, por ser uma planta de metabolismo C4, pode atingir patamares de produtividade superiores a 10 Mg ha⁻¹. Tamaña quebra de produtividade está associada, as irregularidades climáticas, a um sistema de manejo agrícola com pouco ou nenhum nível tecnológico e ao pouco uso de sementes selecionadas das variedades melhoradas na região, dentre outros fatores.

Mas a nível de comparação entre fatores a cultura apresenta bons rendimentos quando submetida a veranicos de até 15 dias (Classe B); acima disto a quebra de produtividade é bastante expressiva (Figura 10) e pode chegar até 69% quando comparado a produção sob influência entre veranicos classes A e E. O que é explicado pelo fato de o período seco mais duradouro ter maior probabilidade de atingir fases críticas da cultura, como a germinação e a floração. Estudos revelam uma redução no rendimento de 66-93% com base no estágio de crescimento e intensidade do estresse hídrico (ÇAKIR, 2004; GE *et al.* 2012).

Rowhani *et al.* (2011) e Tongwane; Moeletsi (2015) mostraram que as variabilidades das chuvas intra e inter-temporais têm um impacto significativo no milho produzido em regiões semiáridas.

Figura 10. Produtividade do milho no Ceará, associada a diferentes classes de veranicos.

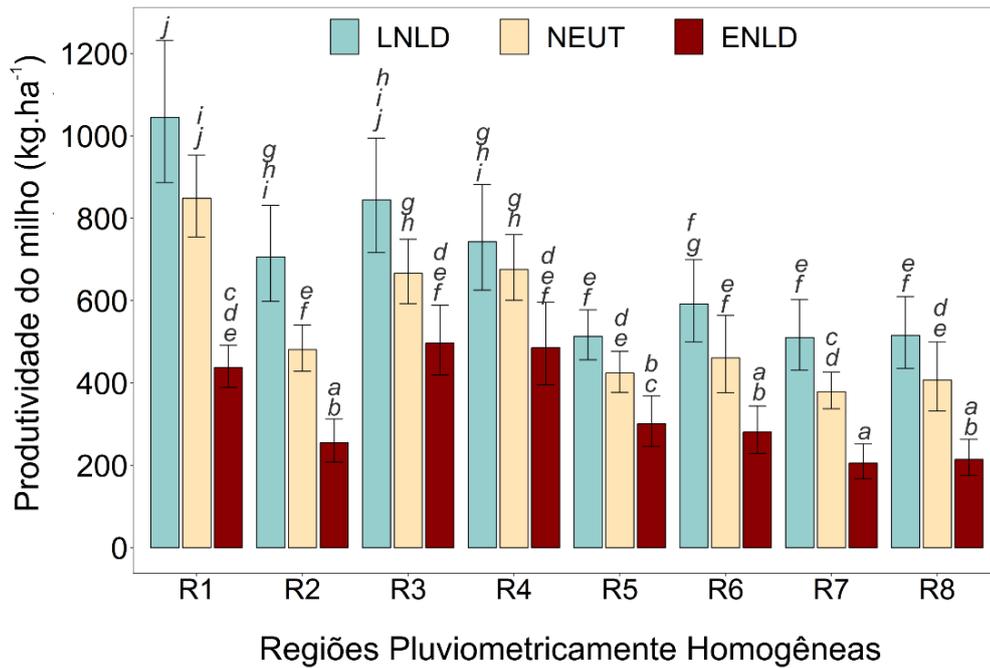


Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Fonte: Autor.

A análise da produtividade histórica de cada região mostra que as localidades mais influenciadas pela continentalidade (R1 a R4) detêm os maiores valores (Figura11), apesar da maior incidência de veranicos e das maiores influências dos fenômenos de El Niño (ENLD) e La Niña (LNLD). Isto porque na área de estudo, as regiões mais litorâneas não possuem tradição na produção de milho, sendo a mesma feita com baixo ou nenhum aporte tecnológico.

A predominância de pequenos e médios produtores de milho ocorrem principalmente nas R1, R2 e R3, sendo que, conforme visto no tópico 2.3.1, é nas regiões R2 e R3 que ocorrem as maiores frequências de veranicos de longa duração. Entretanto, boa parte do milho conduzido em sistema irrigado é feito na R3, fator este que leva a tal diferença de produtividade entre estas regiões.

Figura 1. Produtividade média do milho explicada pela ocorrência das anomalias de temperatura na superfície do Pacífico nas diferentes RPH do Ceará (ENLD- El Niño de longa duração, LNLD- La Niña de longa duração e NEUT- anos sem ocorrência destas anomalias).



Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, com um nível de significância de 5%. Fonte: Autor.

A ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña apresenta influência direta na produtividade da área de estudo, seja pelo regime pluviométrico reduzido (El Niño) ou aumentado (La Niña), o que influencia na frequência de veranicos conforme abordado no tópico 2.3.3 deste trabalho. A região R5, correspondente ao Litoral de Fortaleza, historicamente é a região litorânea que sofre as menores influência da ocorrência dos fenômenos no Ceará, diferentes das regiões R7 e R8 que ficam no litoral norte e sul da região de estudo e são bastante influenciadas por tais fenômenos conforme pode ser observado em Silva e Rao (2002) e Ferreira *et al.* (2004). Logo, em regiões semiáridas não somente a maritimidade reduz os efeitos das anomalias de temperatura na superfície do Pacífico tropical, mas também a posição geográfica da área costeira, que pode determinar o maior ou menor efeitos dos eventos de ENOS e LNOS.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Alemanha, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANAGNOSTOPOULOU, Chr. *et al.* Spatial and temporal analysis of dry spells in Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 74, n. 1, p. 77–91, 1 jan. 2003.
- ASSAD, E. D. *et al.* Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 9, p. 993–1003, 1 set. 1993.
- BARRON, J. *et al.* Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in east Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 117, n. 1, p. 23–37, 30 jun. 2003.
- BATES, D. *et al.* **lme4: Linear Mixed-Effects Models using “Eigen” and S4**. [S.l.]: [s.n.], 2019. p.1-123.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831–839, 2004.
- BURT, T. P. *et al.* Changing patterns of daily precipitation totals at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina, USA. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 38, n. 1, p. 94–104, jan. 2018.
- ÇAKIR, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, Holanda, v. 89, n. 1, p. 1–16, set. 2004.
- CINDRIĆ, K.; PASARIĆ, Z.; GAJIĆ-ČAPKA, M. Spatial and temporal analysis of dry spells in Croatia. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 102, n. 1, p. 171–184, 1 out. 2010.
- CUNHA, A. P. M. *et al.* Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 214–215, p. 494–505, dez. 2015.
- DARAND, M.; SOHRABI, M. M. Identifying drought- and flood-prone areas based on significant changes in daily precipitation over Iran. **NATURAL HAZARDS**, EUA, v. 90, n. 3, p. 1427–1446, fev. 2018.
- DENI, S. M.; JEMAIN, A. A. Mixed log series geometric distribution for sequences of dry days. **Atmospheric Research**, Holanda, v. 92, n. 2, p. 236–243, 1 abr. 2009.
- DOMÍNGUEZ-CASTRO, F. *et al.* Mapping seasonal and annual extreme precipitation over the Peruvian Andes. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 38, n. 15, p. 5459–5475, 1 dez. 2018.
- DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho - uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. 2014.197 f. Dissertação- Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2018.

- ESPINOZA, W.; AZEVEDO, J.; ROCHA, L. A. Densidade de plantio e irrigação suplementar na resposta de três variedades de milho ao déficit hídrico na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 85–95, 1980.
- FERNANDES, F. B. P. **Disponibilidade hídrica para a cultura do feijão-de-corda em função do manejo de solo no semiárido cearense**. 2014.111 f. Tese- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ce, 2014.
- FERREIRA, F. F.; ALVES, J. M. B.; COSTA, A. A. Um estudo dos impactos das temperaturas da superfície do mar (TSM) em macrorregiões, pluviometricamente homogêneas, no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria-RS, v. 12, p. 193–204, 2004.
- FISCHER, T. *et al.* Change-points in climate extremes in the Zhujiang River Basin, South China, 1961-2007. **Climatic Change**, Holanda, v. 110, n. 3–4, p. 783–799, fev. 2012.
- GARCIA, B. I. L. *et al.* Filling in missing rainfall data in the Andes region of Venezuela, based on a cluster analysis approach. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria-RS, v. 14, n. 2, p. 225–233, 2006.
- GE, T. *et al.* Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, Alemanha, v. 34, n. 3, p. 1043–1053, 1 maio. 2012.
- HALDER, S. *et al.* Investigating the impact of land-use land-cover change on Indian summer monsoon daily rainfall and temperature during 1951-2005 using a regional climate model. **Hydrology and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 20, n. 5, p. 1765–1784, 2016.
- HARSCH, M. A.; LAMBERS, J. H. R. Climate Warming and Seasonal Precipitation Change Interact to Limit Species Distribution Shifts across Western North America. **PLOS ONE**, EUA, v. 11, n. 7, p. 1–17, 22 jul. 2016.
- HE, Y. *et al.* Changes in daily and monthly rainfall in the Middle Yellow River, China. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 129, n. 1–2, p. 139–148, jul. 2017.
- HUANG, B. *et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and Intercomparisons. **Journal of Climate**, EUA, v. 28, n. 3, p. 911–930, 14 out. 2014.
- HUANG, J. *et al.* The spatial and temporal analysis of precipitation concentration and dry spell in Qinghai, northwest China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Inglaterra, v. 29, n. 5, p. 1403–1411, jul. 2015.
- KISAKA, M. O. *et al.* Rainfall Variability, Drought Characterization, and Efficacy of Rainfall Data Reconstruction: Case of Eastern Kenya. **Advances in Meteorology**, EUA, p. 1–16, 2015.
- KOSGEI, J. R. **Rainwater harvesting systems and their influences on field scale soil hydraulic properties, water fluxes and crop production**. 2009.198 f. Thesis- University of KwaZulu-Natal, África do Sul, 2009.

LANA, X. *et al.* Statistical distributions and sampling strategies for the analysis of extreme dry spells in Catalonia (NE Spain). **Journal of Hydrology**, Holanda, v. 324, n. 1, p. 94–114, 2006.

_____. Spatial and temporal patterns of dry spell lengths in the Iberian Peninsula for the second half of the twentieth century. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 91, n. 1–4, p. 99–116, 1 fev. 2008.

LENTH, R. **emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means**. [S.l.]: [s.n.], 2019. p.1-67.

LI, C.; WANG, R. Recent changes of precipitation in Gansu, Northwest China: An index-based analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 129, n. 1–2, p. 397–412, jul. 2017.

LI, Z. *et al.* The characteristics of wet and dry spells for the diverse climate in China. **Global and Planetary Change**, Holanda, v. 149, p. 14–19, 1 fev. 2017.

LIU, W. *et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4): Part II. Parametric and Structural Uncertainty Estimations. **Journal of Climate**, EUA, v. 28, n. 3, p. 931–951, 20 nov. 2014.

LIU, Z. *et al.* Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China. **Global Change Biology**, Inglaterra, v. 18, n. 11, p. 3441–3454, 1 nov. 2012.

LYRA, G. B. *et al.* Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 205–215, 2006.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. Evaluating persistence and identifying trends and abrupt changes in monthly and annual rainfalls of a semi-arid region in Western India. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 128, n. 3–4, p. 689–708, maio. 2017.

MANIVASAGAM, V. S.; NAGARAJAN, R. Rainfall and crop modeling-based water stress assessment for rainfed maize cultivation in peninsular India. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 132, n. 1, p. 529–542, 1 abr. 2018.

MARENCO, J. A. *et al.* Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, EUA, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 12 jul. 2013.

_____. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, 2017.

MASUPHA, T. E.; MOELETSI, M. E.; TSUBO, M. Dry spells assessment with reference to the maize crop in the Luvuvhu River catchment of South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, Inglaterra, v. 92, p. 99–111, 2016.

- MCCABE, G. J.; LEGATES, D. R.; LINS, H. F. Variability and trends in dry day frequency and dry event length in the southwestern United States. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 115, p. 1–8, 14 abr. 2010.
- MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B. De; LIMA, R. A. F. De A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 14, n. 2, p. 181–186, fev. 2010.
- MISHRA, A. K.; SINGH, Vijay P. Drought modeling – A review. **Journal of Hydrology**, Holanda, v. 403, n. 1, p. 157–175, 6 jun. 2011.
- MUPANGWA, W.; WALKER, S.; TWOMLOW, S. Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. **Journal of Arid Environments**, EUA, v. 75, n. 11, p. 1097–1104, 1 nov. 2011.
- NEVES, André Luis Alves *et al.* Agronomic characteristics of corn cultivars for silage production. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina-PR, v. 36, n. 3, p. 1799–1806, 2 jul. 2015.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, EUA, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996.
- NOAA, (National Oceanic and Atmospheric Administration). **CPC - Climate Weather Linkage: El Niño Southern Oscillation**. 2019. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso>. Acesso em: 7 abr. 2019.
- OSBORN, T. J. *et al.* Pattern scaling using ClimGen: monthly-resolution future climate scenarios including changes in the variability of precipitation. **CLIMATIC CHANGE**, Holanda, v. 134, n. 3, p. 353–369, fev. 2016.
- PINHEIRO, E. *et al.* Relação Entre Duração dos Eventos de El Niño com as Condições do Atlântico Tropical e a Precipitação no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 497–508, set. 2018.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation, 2018.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. p.1-2630.
- RICKENBACH, T. Seasonal Changes of Extremes in Isolated and Mesoscale Precipitation for the Southeastern United States. **Atmosphere**, Suíça, v. 9, n. 8, p. 309–324, 2018.
- ROWHANI, P. *et al.* Climate variability and crop production in Tanzania. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 151, n. 4, p. 449–460, 15 abr. 2011.
- SETTER, T.; FLANNIGAN, B.; MELKONIAN, J. Loss of kernel set due to water deficit and shade in maize: Carbohydrate supplies, abscisic acid, and cytokinins. **CROP SCIENCE**, EUA, v. 41, n. 5, p. 1530–1540, out. 2001.

- SHE, D.; XIA, J. The spatial and temporal analysis of dry spells in the Yellow River basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Inglaterra, v. 27, n. 1, p. 29–42, 1 jan. 2013.
- SILVA, F. De A. S. E; RAO, T. V. R. Regimes pluviais, estação chuvosa e probabilidade de ocorrência de veranicos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 6, n. 3, p. 440–446, dez. 2002.
- SIRANGELO, B. *et al.* Stochastic analysis of long dry spells in Calabria (Southern Italy). **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 127, n. 3–4, p. 711–724, fev. 2017.
- SIVAKUMAR, B.; SINGH, V. P. Hydrologic system complexity and nonlinear dynamic concepts for a catchment classification framework. **Hydrology and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 16, n. 11, p. 4119–4131, 2012.
- TOLIKA, K.; MAHERAS, P. Spatial and temporal characteristics of wet spells in Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 81, n. 1, p. 71–85, 1 jun. 2005.
- TONGWANE, M. I.; MOELETSI, M. E. Intra-seasonal rainfall variability during the maize growing season in the northern lowlands of Lesotho. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 120, n. 3–4, p. 575–585, maio. 2015.
- TRENBERTH, K. E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, EUA, v. 78, n. 12, p. 2771–2778, 1 dez. 1997.
- VALDÉS-PINEDA, R. *et al.* Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean–atmosphere circulation patterns. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 36, n. 8, p. 2979–3001, 30 jun. 2016.
- WANG, W. *et al.* Spatial and temporal characteristics of changes in precipitation during 1957–2007 in the Haihe River basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Inglaterra, v. 25, n. 7, p. 881–895, 1 out. 2011.
- WATTERSON, I. G.; CHUA, Z.-W.; HOPE, P. K. Extreme monthly rainfall over Australia in a changing climate. **JOURNAL OF SOUTHERN HEMISPHERE EARTH SYSTEMS SCIENCE**, Australia, v. 66, n. 4, p. 402–423, 2016.
- WICKHAM, H. *et al.* **ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics**. [S.l.]: [s.n.], 2018. p.1-227.
- XAVIER, T. De M. B. S. **Tempo de chuva: estudos climáticos e de previsão para o Ceará e Nordeste setentrional**. Fortaleza: ABC, 2001. p.1-478.
- ZENG, W. *et al.* Changes in annual, seasonal and monthly precipitation events and their link with elevation in Sichuan province, China. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 36, n. 5, p. 2303–2322, 1 abr. 2016.

ZHAO, S.; DENG, Y.; BLACK, R. X. Warm Season Dry Spells in the Central and Eastern United States: Diverging Skill in Climate Model Representation. **Journal of Climate**, EUA, v. 29, n. 15, p. 5617–5624, 30 jun. 2016.

ZHAO, Y. *et al.* Changes in precipitation extremes over the Pearl River Basin, southern China, during 1960–2012. **Quaternary International**, Inglaterra, v. 333, p. 26–39, 30 maio. 2014.

3. ZONEMANETO AGROECOLÓGICO DO MILHO DE SEQUEIRO NO ESTADO DO CEARÁ

RESUMO

As condições edafoclimáticas influenciam diretamente a expressão fenológica e o vigor produtivo das plantas de tal maneira que o período de condução e as espécies a serem cultivadas em um determinado local são definidas por estes fatores. Logo o desenvolvimento de técnicas que estabeleçam uma relação entre a geolocalização das variáveis edafoclimáticas do ambiente e as necessidades dos cultivos é uma importante ferramenta que auxilia no planejamento e no processo de tomada de decisão na produção agrícola. Visando maior produtividade e resiliência nos sistemas produtivos e menores impactos ambientais na condução do milho no estado do Ceará, o objetivo deste trabalho é estabelecer um calendário agrícola de cultivo e delimitar o zoneamento edafoclimático do milho em cenários de anos secos, regulares e chuvosos. Para tanto foi elaborado zoneamento agroclimático, utilizando critérios associados ao balanço hídrico e a quebra de produtividades, definindo-se os períodos mais críticos do calendário agrícola, considerando condições de quebra de produtividade de até 10% em cenários chuvosos, de até 30% em cenários regulares e o menor valor possível em cenários secos. Os mapas de zoneamento agroclimático, de classificação dos solos, uso e ocupação, declividade e definição dos corpos hídricos foram normalizados e suas influências na aptidão, ponderadas por meio de uma decisão multicritérios com base no Processo Hierárquico Analítico (AHP). Posteriormente com a aplicação de álgebra de mapas foi possível a obtenção do zoneamento edafoclimático em três diferentes cenários de regime pluviométrico. De maneira geral em anos chuvosos o plantio de milho em sequeiro pode ser recomendado para todo o estado do Ceará com semeadura feita entre 11 de janeiro a 31 de março, em cenários regulares o plantio é recomendado em apenas parte da região sul cearense e nas proximidades do litoral de Fortaleza e Litoral Norte, com janela de plantio entre 21 de janeiro e 28 de fevereiro, já em cenários de anos secos não recomenda-se o plantio desta cultura em sequeiro no estado do Ceará.

Palavras-chave: Condições edafoclimáticas. Quebra de produtividade. Balanço hídrico.

ABSTRACT

The edaphoclimatic conditions directly influence the phenological expression and productive vigor of the plants in such a way that the driving period and the species to be cultivated in a given location are defined by these factors. Therefore, the development of techniques that establish a relationship between the geolocation of the environmental and climatic variables and the needs of the crops is an important tool that assists in the planning and decision-making process in agricultural production. The objective of this work is to establish an agricultural crop calendar and to delimit the edaphoclimatic zoning of maize in dry, regular and rainy year scenarios, aiming at higher productivity and resilience in the production systems and lower environmental impacts on maize conduction in the state of Ceará. In order to do so, agroclimatic zoning was elaborated, using criteria associated with water balance and yield gap, defining the most critical periods of the agricultural calendar, considering conditions of productivity losses of up to 10% in rainy scenarios, up to 30% in regular scenarios and the lowest possible value in dry scenarios. The maps of agroclimatic zoning, land classification, use and occupation, declivity and definition of water bodies were normalized and their influence on fitness, weighted by means of a multicriteria decision based on the Analytic Hierarchy Process (AHP). Later, with the application of map algebra, it was possible to obtain Agroecological Zoning for maize in three different scenarios of pluviometric regime. Generally in rainy years the plantation of maize under rainfed conditions can be recommended for all the state of Ceará with planting done between January 11 and March 31, in regular scenarios the planting is recommended in only part of the region south of Ceará and nearby of the coast of Fortaleza and the North Coast, with planting season between January 21 and February 28, already in dry years scenarios it is not recommended to plant this crop under rainfed conditions in the state of Ceará.

Keywords: Edafoclimatic conditions. Productivity breakdown. Water balance.

3.1 INTRODUÇÃO

A crescente expansão do setor agrícola, inserido no atual cenário econômico globalizado, impõe à agricultura a necessidade de buscar novas tecnologias visando a obtenção de incrementos de produtividade com aproveitamento mais eficiente dos recursos disponíveis (NUNES *et al.* 2007). Neste contexto, dentre os diversos aspectos que devem ser levados em consideração, o conhecimento das condições edafoclimáticas apresenta-se como fator preponderante para a definição de estratégias de manejo das culturas (PORTELA *et al.* 2008). Dentre os elementos passíveis de impor restrição ao desenvolvimento das culturas agrícolas, merecem destaque a temperatura e a pluviosidade, explicitando a importância da utilização de ferramentas como o zoneamento agroclimático na definição de áreas adequadas para cultivos específicos (POSSAS *et al.* 2012)

O zoneamento é a escolha dos locais mais indicados para as diversas culturas, visando-se obter maior retorno do capital investido (OMETTO, 1981). Sendo o zoneamento agroclimático uma ferramenta fundamental para o planejamento de uso e preservação dos recursos naturais essenciais como o solo e a água (BHERING *et al.* 2014). O conhecimento das condições climáticas de uma região, conforme abordado anteriormente, possui extrema importância na delimitação de áreas com condições climáticas homogêneas, possibilitando o estabelecimento de práticas adequadas a cada condição encontrada (ALMEIDA; CALIJURI; PINTO, 2013; NUNES *et al.* 2007).

O zoneamento agrícola pode ser classificado quanto a metodologia e aos objetivos propostos e resultados alcançados. De maneira geral, alguns autores procuram agrupar o zoneamentos em quatro tipos ou categorias, são elas: zoneamento agroclimático; zoneamento agroecológico ou edafoclimático; zoneamento agrícola e zoneamento de riscos climáticos (OMETTO, 1981; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). A caracterização do zoneamento agroclimático é feita quando a delimitação da aptidão das regiões de cultivo levam em consideração somente os fatores climáticos (WOLLMANN; GALVANI, 2013). Segundo Ometto (1981), se for considerado adicionalmente aos elementos do clima, fatores e critérios do solo, este passa a ser caracterizado como zoneamento edafoclimático ou agroecológico, e se juntamente com estes dois fatores tomar em consideração o meio socioeconômico, visando organizar a alocação racional de culturas economicamente rentáveis, conforme as características sociais e culturais de cada região, o zoneamento pode ser definido como zoneamento agrícola (PEREIRA *et al.*, 2002). Diferentemente dos três tipos já comentados, o zoneamento de risco climático é usado quando além das variáveis edafoclimáticas e

fitotécnicas, aplicam-se funções matemáticas e estatísticas para se quantificar o risco de perda das lavouras com base no histórico de ocorrência de eventos climáticos adversos, principalmente a seca (MAPA, 2019).

Devido ao impacto que os fatores climáticos causam nas safras agrícolas, existe a grande necessidade de se realizar um planejamento adequado para que as culturas conduzidas, sejam em sequeiro ou sob irrigação suplementar, possam ser produzidas com menores riscos de perdas. Neste contexto, o Zoneamento Edafoclimático pode auxiliar no planejamento agrícola, indicando as regiões de maiores aptidões e restrições das culturas e os períodos de menor impacto climático, constituindo-se em uma ferramenta fundamental de planejamento e desenvolvimento de uma agricultura sustentável. De acordo com a FAO (1997), os parâmetros utilizados na definição do zoneamento edafoclimático são baseados nas exigências climáticas e edáficas da cultura e no sistema de manejo aplicado ao cultivo. Cada zona agroecológica tem uma combinação similar de limitações e potencialidades de uso da terra que orientam as recomendações para a melhoria da situação de uso atual das terras visando aumento de produtividade e maior preservação dos recursos.

Com o advento e o desenvolvimento de tecnologias no âmbito agrícola pesquisadores e produtores perceberam que não basta apenas fornecer condições favoráveis aos cultivos ou desenvolver genótipos mais resistentes a condições adversas, mas deve-se além disso adequar as práticas agrícolas segundo as condições ambientais e entender como os fatores adversos atuam na redução de produtividade das culturas. Com isto, estudos focados nas causas, nos efeitos e na magnitude das condições que ocasionam perda de produtividade têm ganhado destaque, sendo denominado no meio científico como quebra de produtividade ou *Yield gap*. Sentelhas *et al.* (2015) afirmam que os *Yield Gaps* mais abordados e que geram os maiores impactos são: o total (YG_t), por déficit hídrico (YG_{WD}) e devido a deficiências de manejo (YG_m); por conseguinte, as quebras, serão definidas pelos tipos de produtividade, que no caso são classificadas em potencial (PPf), atingível (PA) e real (PR).

A produtividade potencial ou potencial produtivo é dependente apenas da radiação solar e da temperatura, sem limitação do fornecimento de água e nutrientes e, adicionalmente, sem a ocorrência, em nível de dano agrônômico ou econômico, de pragas e doenças. A produtividade atingível (PA) refere-se à produtividade potencial limitada pela disponibilidade de água e a produtividade real (PR) é sujeita a todos os fatores ambientais (BATTISTI; SENTELHAS; PILAU, 2012; LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; SENTELHAS *et al.* 2015; VAN ITTERSUM *et al.* 2013).

O milho (*Zea mays L.*) constitui-se em uma cultura de grande importância no agronegócio, sendo, adicionalmente, a base de sustentação de pequenas propriedades, constituindo-se também em um dos principais insumos do complexo industrial (QUADROS *et al.* 2014). A cultura apresenta grande adaptabilidade a diferentes condições ambientais. Na região semiárida brasileira, de modo geral, o cultivo do milho é praticado em sistemas de sequeiro, isto é, realiza-se o plantio no período chuvoso, onde as chuvas, em especial no estado do Ceará, concentram-se nos meses de janeiro a meados de maio. Devido ao seu porte e área foliar, a cultura mostra-se exigente em relação à disponibilidade de água, sendo a disponibilidade deste fator preponderante ao seu desenvolvimento.

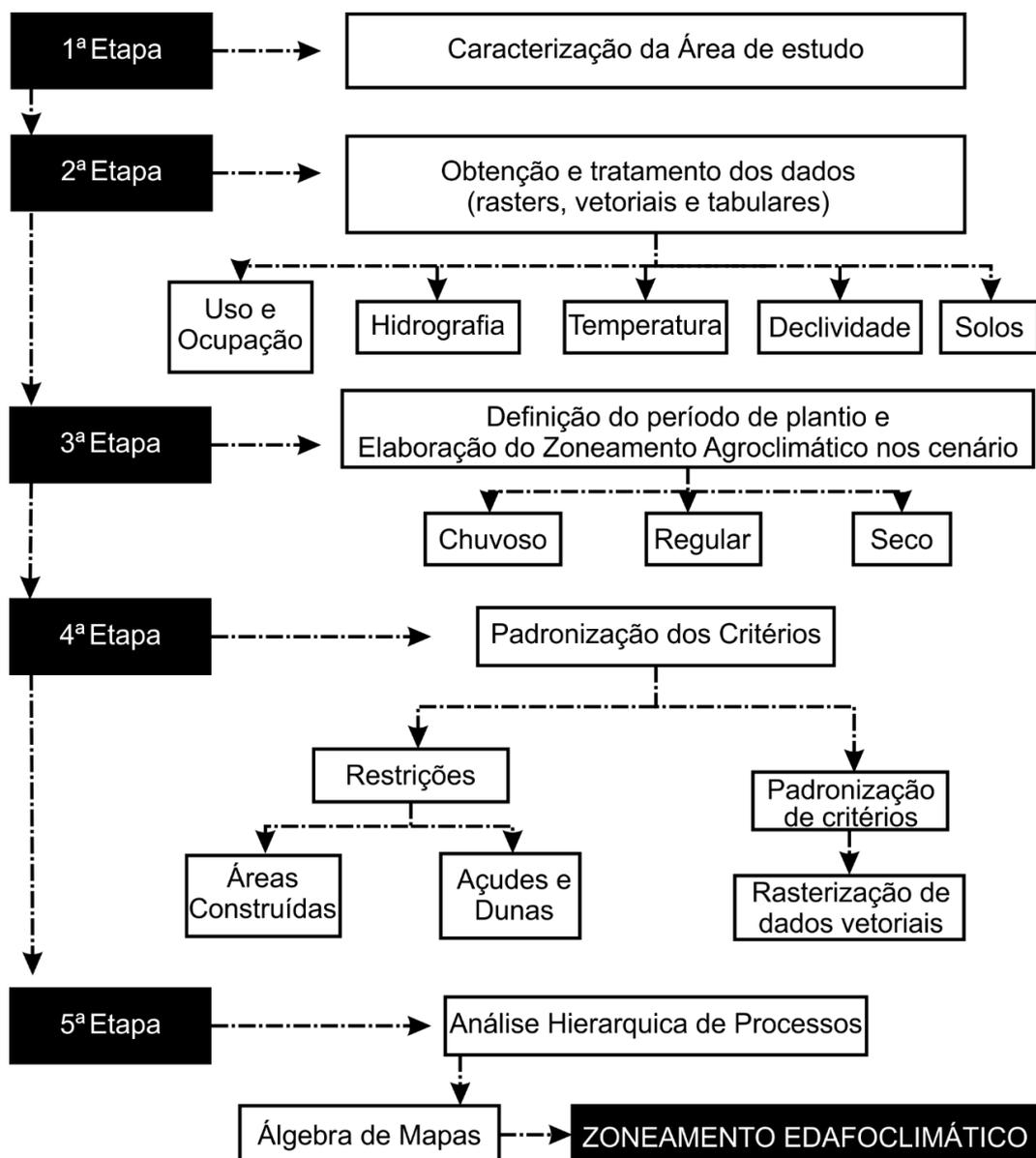
Na modalidade de cultivo em sequeiro, sistema mais comum no estado cearense, o déficit hídrico constitui-se em um dos principais fatores que levam a quebra de produtividade na cultura do milho. Pesquisas realizadas no Brasil, na segunda estação de crescimento, verificam quebras de produtividade média de cerca de 2,1 t.ha⁻¹, obtida em vários locais de cultivo (ANDREA *et al.* 2018). Estudos com modelos de simulação envolvendo vários cenários de produção de milho no Brasil, apresentados no Atlas global de quebra de produtividade (GYGA, 2015), mostram potencial médio de quebra de produtividade de 4,1 t.ha⁻¹, devido ao déficit hídrico, o que é muito elevado, tendo em vista que a média de produtividade da cultura é de aproximadamente 5,0 t.ha⁻¹ (CONAB, 2019).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral definir o zoneamento agroecológico para o cultivo do milho e determinar o melhor período de plantio em cenários de anos secos, regulares e chuvosos no estado do Ceará.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O Zoneamento edafoclimático e a definição do período mais favorável a semeadura do milho no Ceará em cenários de anos secos, regulares e chuvosos foram implementados a partir das metodologias de Varejão-Silva e Barros (2002) de definição do zoneamento agroclimático com a análise multicritério (KIHORO; BOSCO; MURAGE, 2013) para estabelecer o grau de influência dos principais fatores que determinam o nível de produtividade do milho. Este trabalho foi desenvolvido no decorrer de cinco etapas, conforme demonstrado no fluxograma a seguir (Figura 12).

Figura 2. Fluxograma metodológico.



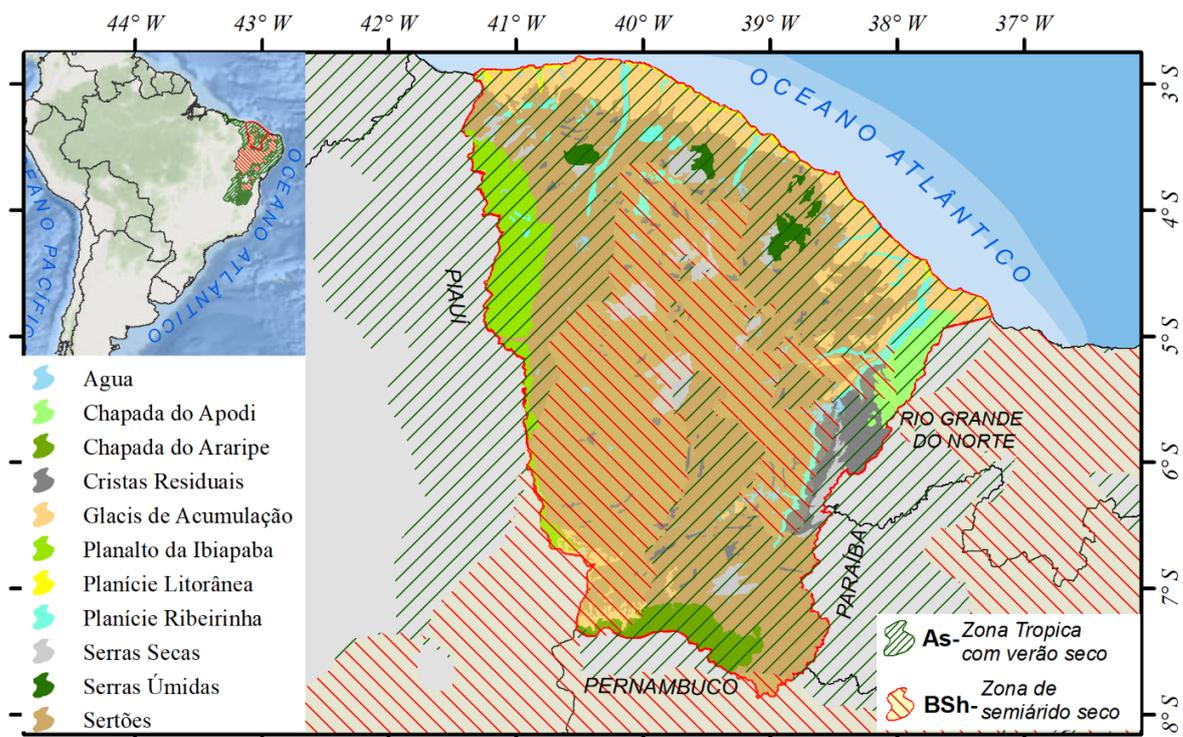
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Caracterização da área de estudo

O Ceará está localizado na região Nordeste do Brasil (NEB) e tem um território de 148.820,4 km². Situado em sua grande parte na região semiárida, apresenta valores de altimetria que variam de 0 a 1134 m. Tamaña discrepância entre valores de altimetria garantem uma grande diversidade de classes geoambientais, uma vez que segundo estudo proposto por Souza (2000) a compartimentação do relevo sintetiza as condições naturais do meio, ou seja, as características geomorfológicas. Sendo que dentre as unidades geoambientais, a depressão sertaneja tem uma preponderância espacial bastante expressiva (Figura 13).

O clima da região, conforme classificação de Köppen e aplicação de Alvares; Stape e Sparovek (2013) é do tipo Zona tropical com verão seco (As) e Zona seca semiárida (Bsh) (Figura 14). A temperatura média anual é de 26°C com amplitude térmica em torno de 2°C e a precipitação média anual é de 900 mm com variação espacial bastante expressiva, sendo que as menores médias (menos de 800 mm) coincidem com a área dos sertões, que é amplamente abrangida pelo tipo climático Bsh.

Figura 3. Espacialização das unidades geomorfológicas do Ceará e classificação climática de Köppen



Fonte: Funceme (2017) e Alvares; Stape e Sparovek (2013).

3.2.2 Obtenção e tratamento dos dados

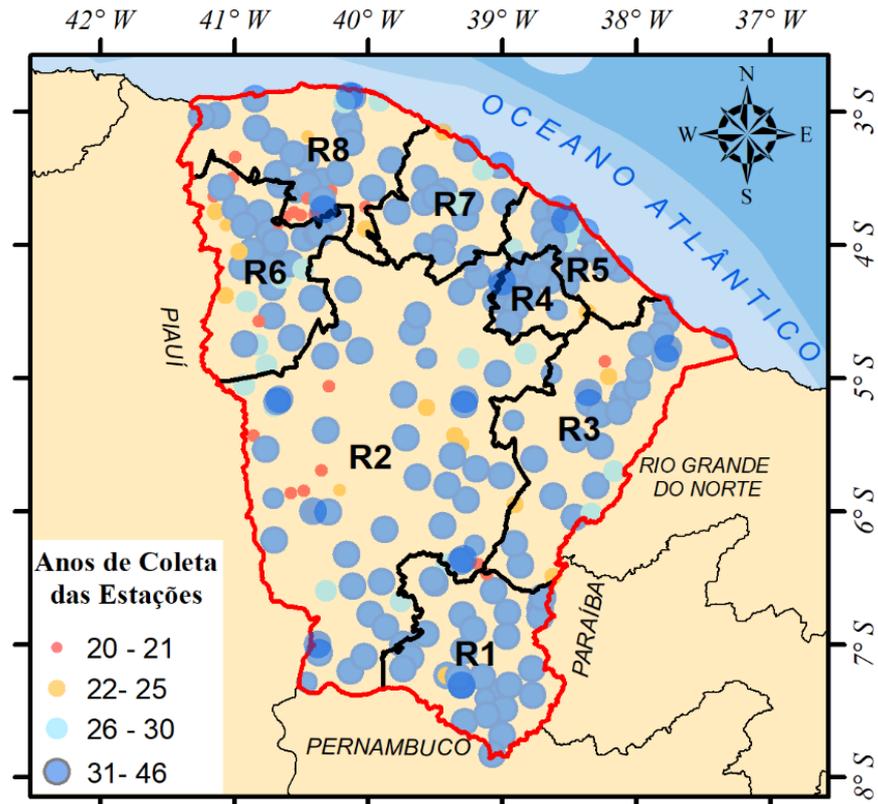
Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados três tipos de formatos de dados: tabular, vetorial (*shapefile*) e matricial (*raster*). Os dados tabulares referem-se as séries históricas de pluviometria e temperatura obtidos a partir de estações meteorológicas e plataformas de coleta de dados, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme).

Os dados vetoriais referem-se aos mapas em formato *shapefile*: classificação dos solos (JACOMINE; ALMEIDA; MEDEIROS, 1973); compartimentação geoambiental (SOUZA, 2000), e recursos hídricos mais expressivos (FUNCEME, 2008). Enquanto os dados matriciais estão relacionados às imagens Landsat 8 utilizadas para revisão do mapa de cobertura e uso do solo (IBGE, 2015) além das imagens SRTM utilizadas no mapeamento da declividade da área de estudo (USGS, 2019).

As séries das estações utilizadas tinham no mínimo 20 anos consecutivos de registros, com dados coletados até dezembro de 2017. Entretanto, considerando ser comum a presença de dados faltantes ou duvidosos nas séries históricas de monitoramento climático, só foram classificadas como apropriadas para o estudo as estações que apresentassem no máximo 1% de dados inconsistentes e faltantes em relação ao total de dados da série, conforme critério adotado em Li *et al.* (2017). As séries com dados faltantes que se enquadraram neste requisito foram corrigidas através do critério do vizinho mais próxima descrito em Garcia *et al.* (2006).

Quando não havia uma estação vizinha em um raio máximo de 20 km foi utilizada a metodologia proposta em Li *et al.* (2017), que neste caso, os dados faltantes foram estimados interpolando linearmente os valores das estações adjacentes que possuísem a maior correlação. Dentre as 245 estações utilizadas neste estudo, 61% apresentavam mais de 30 anos de coleta e apenas 19% tinham entre 20 e 25 anos de coleta (Figura 15). A mínima substituição de dados lacunares objetivou o não enviesamento da base de dados para que, desta forma, os resultados apresentados garantissem um modelo com poder preditivo o mais próximo possível da realidade.

Figura 4. Distribuição geoespacial dos postos de coleta de dados nas oito diferentes regiões pluviometricamente homogêneas conforme classificação de Xavier (2001).



Cariri (R1); Sertão Central e Inhamuns (R2); Jaguaribana (R3); Maciço de Baturité (R4); Litoral de Fortaleza (R5); Ibiapaba (R6); Litoral do Pecém (R7) e Litoral Norte (R8). Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Zoneamento Agroclimático

Os dados climáticos foram então reunidos em cenários de anos secos, regulares e chuvosos determinados conforme a distribuição gama de descrição probabilística retratada em Lyra *et al.* (2006). Em seguida foi determinada a média aritmética dos dados de chuva e de temperatura dos anos secos, regulares e chuvosos para cada estação. Estes valores foram então agrupados em períodos de no máximo dez dias (decêndios) dentro de cada mês, resultando em 36 decêndios anuais. Em cada um dos cenários foi calculado o balanço hídrico decêndial para o milho, utilizando o modelo proposto por Thornthwaite (1948; 1955), onde os valores da capacidade de campo de armazenamento de água no solo (CAD) de cada estação foram obtidos conforme geoespacialização do levantamento exploratório de reconhecimento dos solos (JACOMINE *et al.* 1973).

Para se adequar a modelagem a cultivares de milho recomendadas para região foi utilizado as características da variedade de milho BRS caatingueiro, desenvolvida pela EMBRAPA (2005), com foco direcionado para a região semiárida, sendo semiprecoce com ciclo de 110 dias, o que resulta na diminuição do risco de sofrer com estresse hídrico no período

em que o milho e mais sensível à falta de água. Os coeficientes da cultura (kc) ao longo do ciclo vegetativo foram obtidos conforme trabalho de Souza *et al.* (2015), que adequou os valores recomendados pela Food and Agriculture Organization (FAO) para condições desta variedade conduzida em campo na cidade de Petrolina-PE (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de Kc decendiais para a cultura de milho.

Ciclo (dias)	Decêndios										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
110	0.86	0.86	0.86	0.86	1.23	0.97	0.97	0.52	0.52	0.52	0.52

Fonte: Autor.

Para se definir a recomendação da data de plantio com menor risco climático foi utilizada a metodologia adotada pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (2019) na elaboração do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), feito anualmente para diversas culturas em todo o Brasil e abordada em alguns trabalhos de risco agroclimático (JANUARIO; MENEZES; BONFIM, 2018; MONTEIRO, 2009; SILVA *et al.* 2012). A mesma consiste em realizar simulações com os valores do índice de satisfação das necessidades de água (ISNA), calculado conforme Equação 1, para os vários anos da série histórica de cada estação, considerando o período apto ao plantio do milho quando em 80% dos anos o ISNA é maior ou igual a 0,55, entendendo-se assim que nestes casos a cultura está exposta a um baixo risco climático no período.

$$ISNA = \left(\frac{ETr}{ETp} \right) \quad (1)$$

em que ETr é a evapotranspiração real da cultura e ETp é a evapotranspiração máxima da cultura.

Cada valor de ISNA observado durante essa fase, foi associado à geolocalização da respectiva estação de maneira que buscou-se indicar o período de cultivo comum as estações contidas dentro de uma mesma região pluviometricamente homogênea (RPH).

Após definido o período de cultivo, foi simulado os cálculos de perda de produtividade ou “*yield gap*” causado pelo déficit hídrico (YGDH), sendo o mesmo obtido pela diferença entre a produtividade potencial (PP) cujo valor adotado foi em média 5000 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2005) e a produtividade atingível (PA) obtida segundo Equação 2 (MONTEIRO, 2009;

SENTELHAS *et al.* 2015), utilizando os coeficientes de sensibilidade milho à deficiência hídrica (k_y), conforme valores obtido da pesquisa de Andrioli e Sentelhas (2009).

$$PA_n = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \left[k_{y_i} * \left(1 - \frac{ETr_i}{ETC_i} \right) \right] \right\} * PA_{i-1} \quad (2)$$

em que PA_n é a produtividade atingível final da cultura, em $t \cdot ha^{-1}$, n é o número de decêndios no ciclo da cultura simulada, i é o decêndio corrente, k_y é o coeficiente de sensibilidade ao déficit da cultura no decêndio i , ETr_i é a evapotranspiração real da cultura e ETC_i é a evapotranspiração máxima da cultura, sendo que, quando $i = 1$, $PA_{i-1} = PP$.

No Ceará, as condições são muito adversas para o desenvolvimento de agricultura em sequeiro, tanto em função do elevado déficit hídrico como da irregularidade de distribuição pluviométrica mesmo nas RPH's. Por este motivo foram toleradas quebra de produtividade média de até 10% por RPH em cenários chuvosos, de até 30% em cenários regulares e o menor valor possível em cenários secos. Dos valores obtidos nas simulações foram tomados os decêndios com resultados extremos de quebra de produtividade e coincidindo estes períodos com o máximo de estações de uma mesma RPH, foi assim definido o período inicial para se analisar como as condições do balanço hídrico nos diferentes cenários atenderiam as necessidades do milho, conforme critérios apresentados na tabela 3, estabelecidos em Varejão Silva e Barros (2002) e adaptados utilizando referência de outros trabalhos sobre aptidão climática do milho (AMARAL *et al.* 2013; BARROS; VAREJÃO-SILVA; TABOSA, 2012; FRANCISCO; SANTOS, 2018).

Tabela 4 Critérios utilizados na avaliação de aptidão climática do milho

Aptidão Climática	Milho
C3-Moderada por excesso hídrico	• $\sum EXC_j \geq 400$ mm e/ou $\sum EXC_i \geq 200$ mm;
C2-Plena com período chuvoso prolongado	• $\sum EXC_j < 400$ mm; $P_4/EP_4 \geq 1$; • $DEF_i < 5$ mm e $EXC_i < 200$ mm.
C1-Plena sem restrição	• $\sum EXC_j < 400$ mm; $P_4/EP_4 < 1$; • $DEF_i < 5$ mm e $EXC_i < 200$ mm;
C4-Moderada por deficiência hídrica	• 5 mm $\leq DEF_i < 20$ mm;
C5-Inapta por insuficiência hídrica	• $DEF_i \geq 20$ mm;

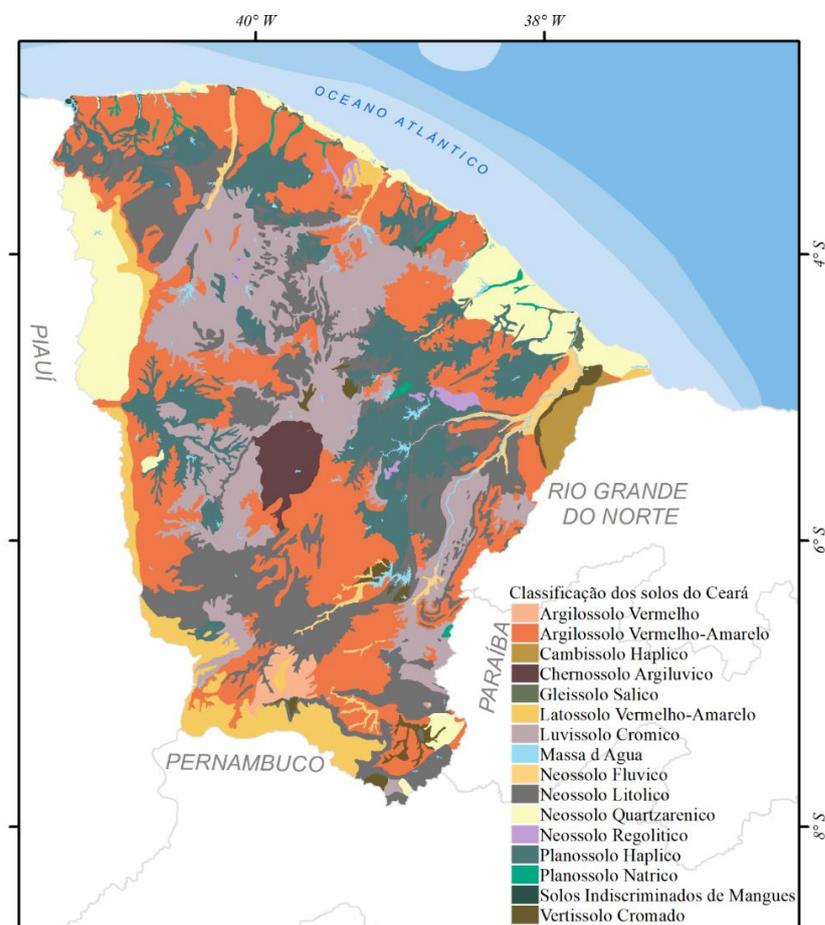
Fonte: Autor.

A delimitação da área de estudo foi recortada utilizando os limites do Estado conforme os arquivos digitais do IBGE (2015) e os dados especializados por krigagem exponencial utilizando o software Qgis (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018), sendo este procedimento realizado separadamente em cada região pluviometricamente homogênea (RPH), assegurando que a zona de influência de cada posto de coleta de dados fosse limitada a condições similares de regime pluviométrico, procurando reduzir os erros de estimativa.

3.2.4 Padronização dos Critérios

Os critérios edáficos adotados nesta pesquisa foram feitos com base no mapa de classificação dos solos elaborado por Jacomine (1973) vetorizado por Funceme (2002) e atualizado segundo EMBRAPA (2018) (Figura 15).

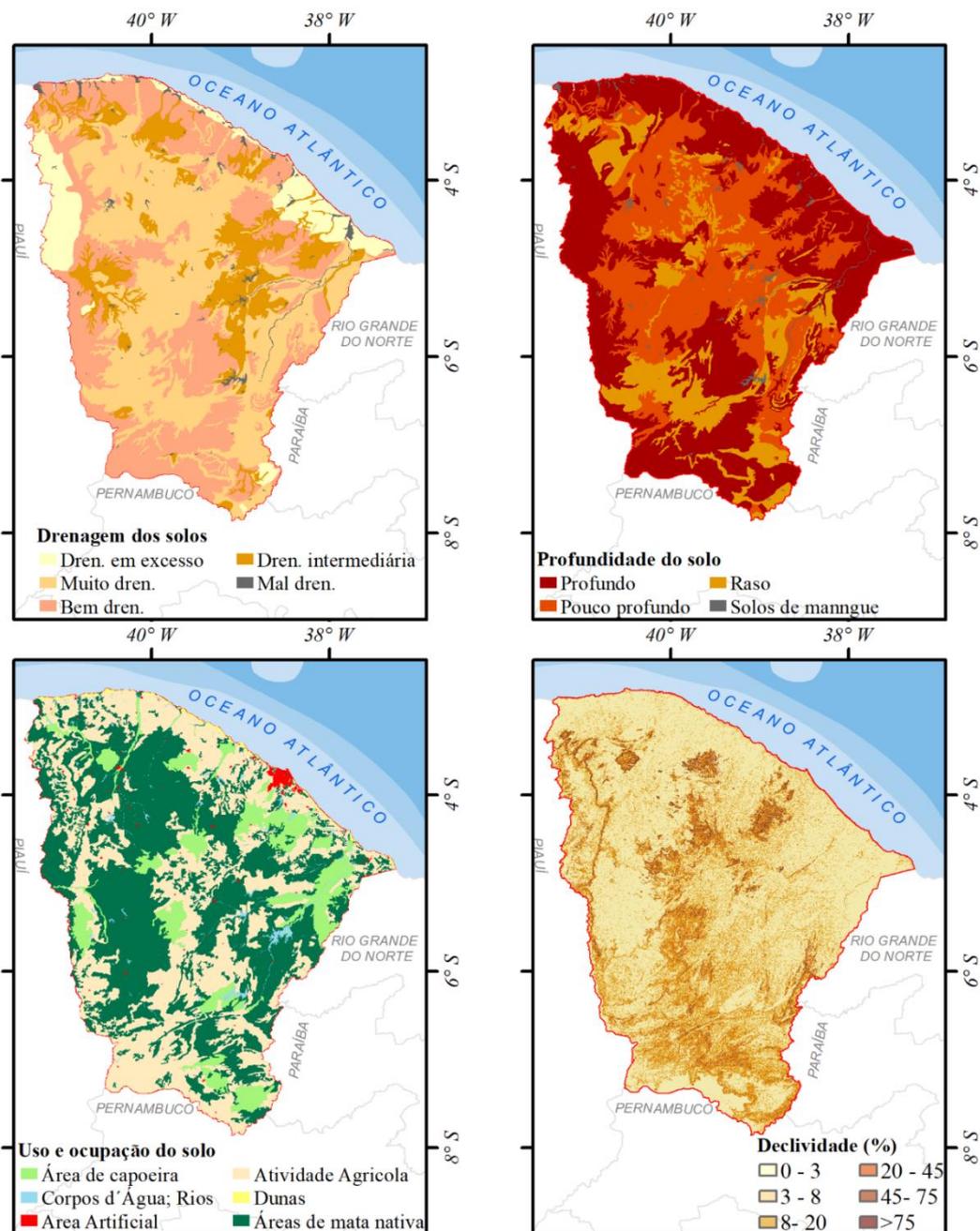
Figura 5. Classificação de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (SBCS) para o 1º nível categórico (EMBRAPA, 2018).



Fonte: Autor.

De posse dos dados necessários para se realizar o zoneamento edafoclimático (Figura 16) foi então elaborado um agrupamento dos atributos segundo o grau de adequação de uma classe aos requisitos da cultura, conforme tabela 5 (AMARAL *et al.* 2013; BARROS *et al.* 2012; EMBRAPA, 2018; SANTOS *et al.* 2005; VAREJÃO-SILVA; BARROS, 2002)

Figura 6. Mapas temáticos do Estado utilizados na elaboração do zoneamento edafoclimático



Fonte: Autor.

Tabela 5. Critérios utilizados, intervalo de dados e classe de adequação para o milho

ATRIBUTOS TEMÁTICOS	Boa	Regular	Restrita	Inapta
Relevo (%)	0 - 8	8 - 20	20 - 45	>45
Profundidade efetiva dos solos (cm)	>100	50-100	<50	-
Drenagem dos solos	Todos os demais*	N.Quartzarenico	N. Regolítico P. Háptico P. Nátrico V. Cromado N. Regolítico	Gleissolo Salico e Solos de Mangues
Temperatura (°C)	24-30	-	≥ 10 e < 24	< 10 ou > 30
Zoneamento Agroclimático (aptidão)	Plena; Plena com período chuvoso prolongado	Moderada por excesso hídrico	Moderada por deficiência hídrica	Inapta
Uso e ocupação dos solos	Áreas Agrícola	Área de capoeira	Áreas de mata nativa e vegetação remanescente	Dunas, Áreas Artificiais e Corpos d'Água

*-Demais solos apresentados na Figura 15; N.-Neossolo; P.-Planossolo; V.-Vertissolo. Fonte: Autor.

Tendo em vista que as unidades temáticas de cada mapa são determinadas em escalas diferentes, foi então necessário realizar uma padronização de critérios (KIHORO; BOSCO; MURAGE, 2013). Neste estudo foi utilizado uma técnica de comparação pareada onde escalas de 1 a 10 foram utilizadas para critérios de standardização, considerando a influência da subclasse de cada variável no zoneamento, onde 0 é a inaptidão para tal condição e 10 a máxima aptidão; em seguida, as pontuações de todos as subclasses foram divididas pelo valor máximo atribuído dentro da classe (SARTORI, 2010). Os valores obtidos estão apresentados na tabela 6. Esta etapa foi elaborada a partir da adaptação de vários trabalhos de análise de aptidão agrícola (BARROS, 2017; BARROS *et al.* 2012; BOZDAĞ; YAVUZ; GÜNAY, 2016; DENGIZ; USUL, 2018; ESA; ASSEN, 2017; KAMAU; KURIA; GACHARI, 2015; LINDA; OLUWATOLA; OPEYEMI, 2015; PRAMANIK, 2016; SAMANTA; PAL; PAL, 2011). Ao final da padronização foi feito a conversão de todos os arquivos que estavam em formato vetorial para formato matricial.

Tabela 6. Valores da padronização dos critérios

ATRIBUTOS TEMÁTICOS	Boa (0,9 - 1)	Regular (0,8 - 0,9)	Restrita (0,5 - 0,8)	Inapta (0 - 0,5)
---------------------	------------------	------------------------	-------------------------	---------------------

Relevo (%)	1	0,8	0,5	0
Profundidade efetiva dos solos (cm)	1	0,9	0,7	0
Drenagem dos solos	1	0,85	0,5	0
Temperatura (°C)	1	-	0,6	0
Zoneamento Agroclimático (aptidão)	1	0,9	0,5	0
Uso e ocupação dos solos	1	0,9	0,5	0

Fonte: Autor.

3.2.5 Análise Multicritério

Após padronização da subclasse torna-se necessário definir a ponderação da influência de cada fator no zoneamento. Para isto, foi adotado o Processo Hierárquico Analítico - AHP, uma metodologia renomada dentro da Análise Multicritério que foi desenvolvida por Saaty (1987). Inicialmente é definido um valor de importância para cada um dos fatores utilizados no zoneamento, sendo esta escala baseada em notas que variam de 0 a 4 conforme classificado na Tabela 7.

Tabela 7. Descrição das notas para atribuição da importância absoluta de cada indicador

<i>Nota</i>	<i>Definição de importância</i>
0	Sem importância
1	Pouca importância
2	Moderada importância
3	Muito importante
4	Extremamente importante

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Nesse processo, é construída uma matriz quadrática **A** em que cada fator é comparado com os outros, aos pares $(x_n ; y_n)$, em relação aos valores da escala de importância. Onde a importância de um fator “ i_{y_n} ” é subtraída da importância de um fator “ i_{x_n} ” conforme representação abaixo. A diferença entre as importâncias, em valor absoluto, é transformada e recebe novos valores com base em uma escala denominada escala de Saaty (Tabela 8) dando origem a matriz de comparação por pares **As**.

$$A = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & i_{y_1} - i_{x_1} & i_{y_1} - i_{x_2} & \cdots & i_{y_1} - i_{x_n} \\ y_2 & i_{y_2} - i_{x_1} & i_{y_2} - i_{x_2} & \cdots & i_{y_2} - i_{x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n & i_{y_n} - i_{x_1} & i_{y_n} - i_{x_2} & \cdots & i_{y_n} - i_{x_n} \end{bmatrix} \quad As = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,n} \\ y_2 & s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n & s_{n,1} & s_{n,2} & \cdots & s_{n,n} \end{bmatrix}$$

Tabela 8. Escala de Saaty para comparações de pares de fatores de influência.

Valor atribuído	Definição
1	Os fatores em comparação têm a mesma importância ($i_{y_n} - i_{x_n} = 0$)
3	Pequena diferença entre a importância dos fatores comparados ($i_{y_n} - i_{x_n} = 1$)
5	Grande diferença entre a importância dos fatores comparados ($i_{y_n} - i_{x_n} = 2$)
7	A diferença de importância entre os indicadores comparados é muito grande ($i_{y_n} - i_{x_n} = 3$)
9	A diferença de importância entre os fatores comparados é máxima (fator com maior importância comparado com indicador de menor importância) ($i_{y_n} - i_{x_n} = 4$)
1/3, 1/5, 1/7, 1/9	Valores intermediários entre os valores adjacentes ($i_{y_n} - i_{x_n} = -1$ ou -2 ou -3 ou -4)

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Após a transformação dos valores originais pela escala de Saaty (1977) realiza-se a normalização ou padronização da matriz, dividindo cada célula pela soma das células que compõe a mesma coluna, gerando uma nova matriz Asn .

$$As = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,n} \\ y_2 & s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n & s_{n,1} & s_{n,2} & \cdots & s_{n,n} \\ \sum_{x=1, y=1}^{x=n, y=n} s_{x,y} & ts_{n,1} & ts_{n,2} & \cdots & ts_{n,n} \end{bmatrix} \quad Asn = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & \frac{s_{1,1}}{ts_{n,1}} & \frac{s_{1,2}}{ts_{n,2}} & \cdots & \frac{s_{1,n}}{ts_{n,n}} \\ y_2 & \frac{s_{2,1}}{ts_{n,1}} & \frac{s_{2,2}}{ts_{n,2}} & \cdots & \frac{s_{2,n}}{ts_{n,n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n & \frac{s_{n,1}}{ts_{n,1}} & \frac{s_{n,2}}{ts_{n,2}} & \cdots & \frac{s_{n,n}}{ts_{n,n}} \end{bmatrix}$$

$$As_n = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & ns_{1,1} & ns_{1,2} & \cdots & ns_{1,n} \\ y_2 & ns_{2,1} & ns_{2,2} & \cdots & ns_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & ns_{n,1} & ns_{n,2} & \cdots & ns_{n,n} \end{bmatrix}$$

E para se obter o Vetor das Prioridades Médias Locais (PML) calcula-se a média aritmética de cada linha da matriz **As_n**. No final desses cálculos, tem-se a importância relativa de cada fator ou o peso dos mesmos, sendo que a soma dos pesos deve ser igual a um.

$$PML = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & \cdots & x_n & \sum_{x=1}^{x=n} \frac{ns_{1,x}}{n} = p1 \\ y_1 & ns_{1,1} & ns_{1,2} & \cdots & ns_{1,n} & \\ y_2 & ns_{2,1} & ns_{2,2} & \cdots & ns_{2,n} & \sum_{x=1}^{x=n} \frac{ns_{2,x}}{n} = p2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_n & ns_{n,1} & ns_{n,2} & \cdots & ns_{n,n} & \sum_{x=1}^{x=n} \frac{ns_{n,x}}{n} = pn \end{bmatrix} \quad PML = \begin{bmatrix} p1 \\ p2 \\ \vdots \\ pn \\ \sum_{z=1}^{z=n} p_z = 1 \end{bmatrix}$$

Estes procedimentos da AHP são executados tanto para obtenção dos pesos de influência dos fatores, a saber: temperatura, uso e ocupação, declividade, drenagem e profundidade dos solos.

Em seguida, para a verificação da consistência dos valores, foi calculado o Índice de Consistência (μ), conforme equação 3 (SAATY, 2004).

$$\mu = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

em que: n é a ordem da matriz de comparação em par dos indicadores e λ_{\max} é o maior autovalor da mesma matriz.

λ_{\max} foi obtido da seguinte forma:

i) Multiplicando cada célula da matriz Saaty (**As**) pelo valor do respectivo fator no vetor PML resultando em uma outra matriz chamada **Asc**;

ii) Obtendo a totalização das entradas, somando os valores de cada linha da matriz Asc e em seguida dividir cada elemento de vetor coluna resultante pelo seu elemento correspondente no vetor dos pesos (PML);

iii) somar os elementos de vetor coluna resultante dessa divisão e dividir o resultado pela ordem de matriz de comparação par a par. Matematicamente o procedimento é:

$$\begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n,1} & S_{n,2} & \cdots & S_{n,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p1 \\ p2 \\ \vdots \\ pn \end{bmatrix} = Asc = \begin{bmatrix} SC_{1,1} & SC_{1,2} & \cdots & SC_{1,n} \\ SC_{2,1} & SC_{2,2} & \cdots & SC_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SC_{n,1} & SC_{n,2} & \cdots & SC_{n,n} \end{bmatrix} \quad \sum Asc = \begin{bmatrix} \sum_{n=z}^{n=1} SC_{1,n} = b_1 \\ \sum_{n=z}^{n=1} SC_{2,n} = b_2 \\ \vdots \\ \sum_{n=z}^{n=1} SC_{n,n} = b_n \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\left[\left(\frac{b1}{p1} \right) + \left(\frac{b2}{p2} \right) + \cdots + \left(\frac{bn}{pn} \right) \right]}{n}$$

Para que a matriz seja considerada consistente o $\mu \geq 0$ (SAATY, 2004). Apenas o índice de consistência não é suficiente para considerar o julgamento dos fatores melhor ajustados a realidade. Deste modo o cálculo da razão de consistência (RC) deve ser no máximo dez por cento, ou seja, $RC \leq 0,1$ (SAATY, 1977). A razão de consistência (RC) foi calculada conforme equação 4:

$$RC = \frac{\mu}{IA} \quad (4)$$

em que IA é o Índice de inconsistência Aleatória, o qual depende da ordem de matriz de comparação pareada. Esses índices encontram-se determinados até matrizes de ordem 15 (Tabela 9). Em matrizes acima desta ordem esse índice tende a um limite e, portanto, utiliza-se a média aritmética das três maiores dimensões definidas ($n = 13, 14$ e 15), como uma aproximação do valor limite (SAATY, 1977)

Tabela 9. Índice de Inconsistência Aleatória (IA).

<i>Ordem da matriz ou dimensão</i>	<i>IA (Escala Saaty: 1 - 9)</i>
2	0,000
3	0,416
4	0,851
5	1,115
6	1,150

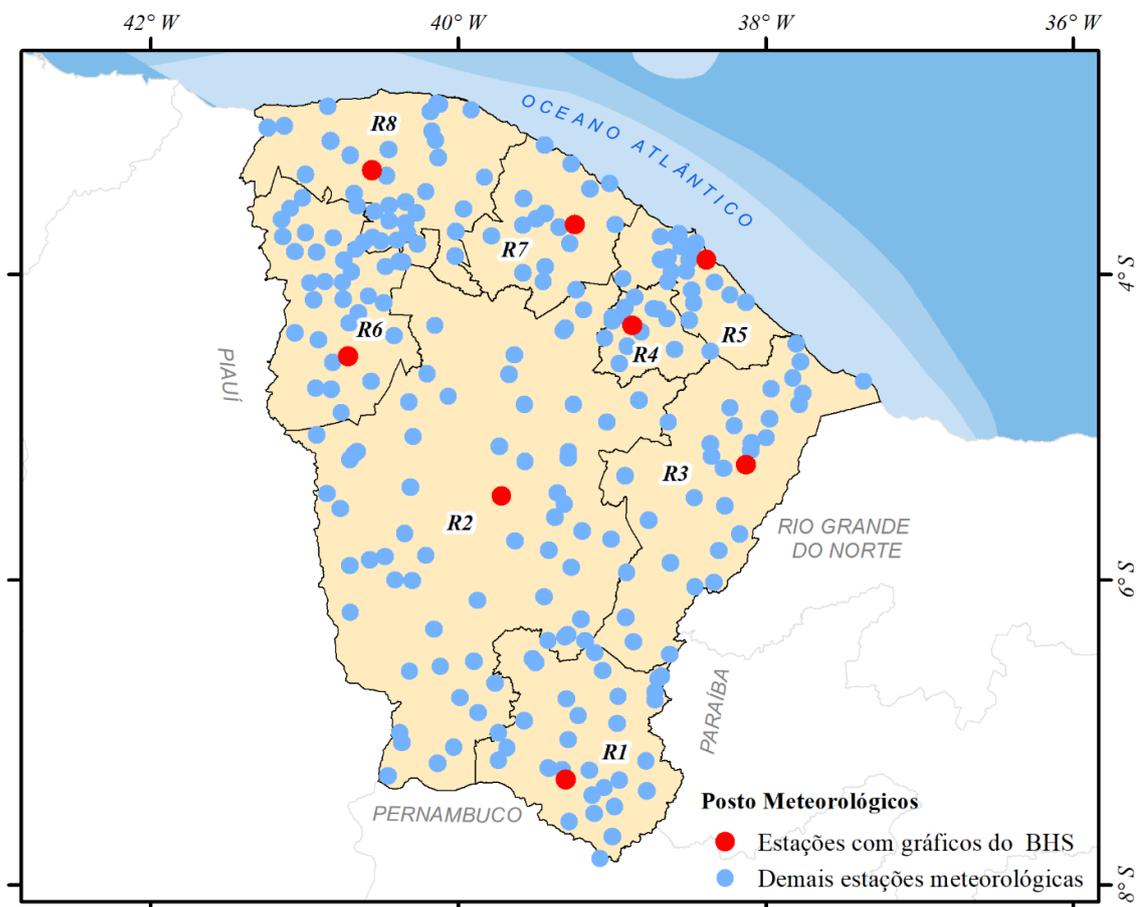
Fonte: Autor.

Em seguida por álgebra de mapas e com a espacialização regional realizada neste estudo, baseada em um sistema de informação geográfica (SIG), definiram-se regiões de aptidão edafoclimática e épocas mais adequadas de semeadura em conformidade à Silva e Azevedo (2000) para diminuir os efeitos causados pela má distribuição de chuvas e indicar os locais mais apropriados para condução do milho em sequeiro.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mesmo realizando os processos metodológicos dentro de cada RPH, os resultados do balanço hídrico sequencial (BHS) apresentaram certas diferenças entre as estações, de maneira que foi escolhido uma estação representativa de cada RPH para poder representar os gráficos do BHS decendial em cenários de anos chuvosos, secos e regulares. As estações escolhidas tinham a maior série histórica de coleta dos dados e eram mais centralizadas dentro de cada RPH, as mesmas estão distribuídas conforme representado na Figura 17.

Figura 7. Distribuição dos postos meteorológicos usados como representantes de cada região pluviometricamente homogênea (RPH).



Fonte: Autor.

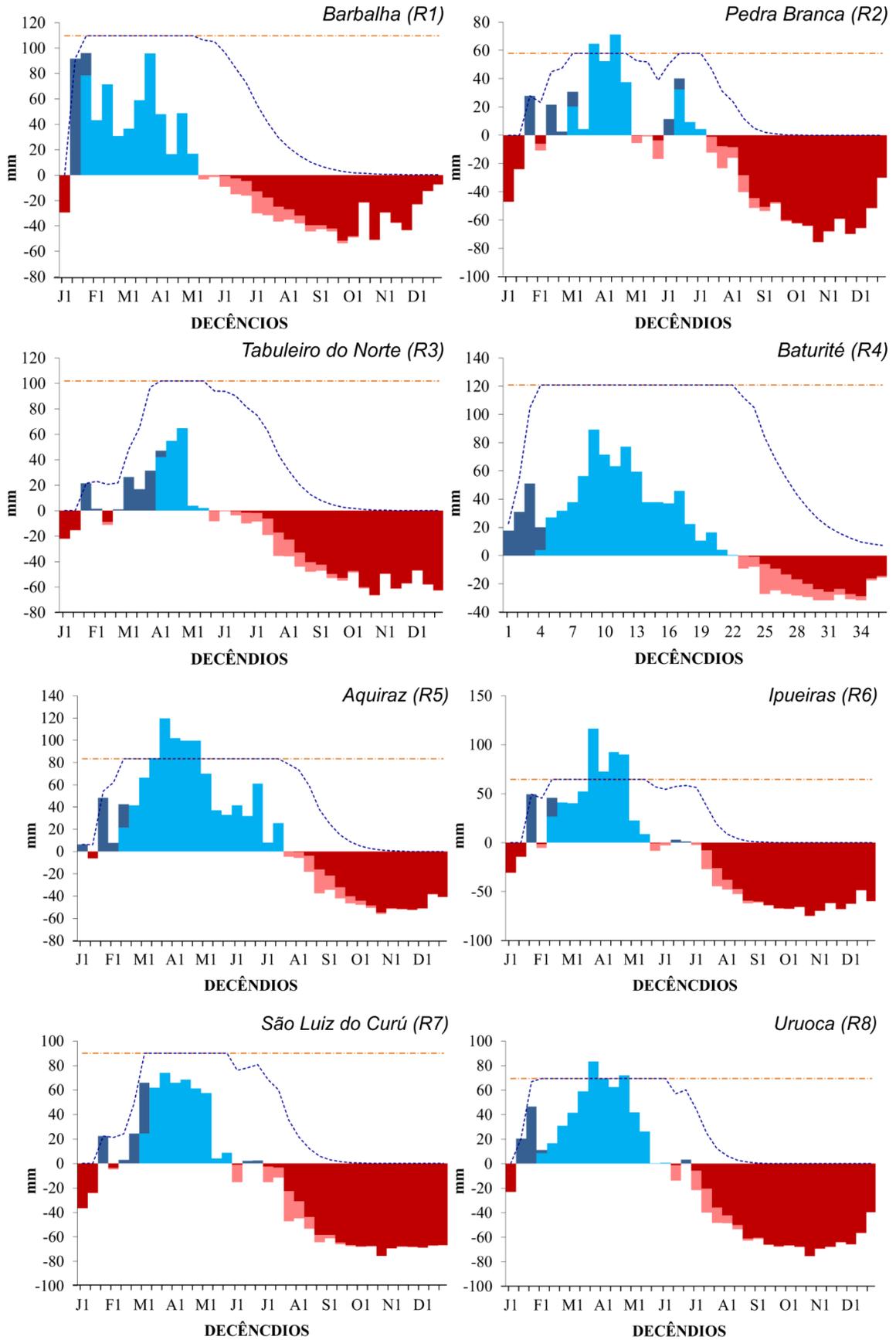
3.3.1 Cenário Chuvoso

O conhecimento sobre a deficiência hídrica em condições de possível predição é essencial em um planejamento agrícola, pois auxilia no desenvolvimento de técnicas adequadas para cada condição. A cuidadosa observação da variabilidade da precipitação e a intensidade da evapotranspiração leva a redução – e pode até evitar – a ocorrência de déficit hídrico (MARENGO *et al.* 2004)

Na Figura 18 é representado o resumo do balanço hídrico sequencial em cenários chuvosos. Tanto nesta como nas figuras dos demais cenários, a representação é feita em decêndios, onde cada mês é representado por sua inicial (p. ex.: janeiro-J, fevereiro-F, março-M, etc.) e apresenta três decêndios numerados.

É imperioso destacar que mesmo em períodos com chuvas acima da média não se verifica cenários uniformes em todo o estado. Tal resultado é coerente com as pesquisas de Andrade e Éden (2010) que caracterizam o Ceará como alvo de precipitações de elevada irregularidade espacial e temporal. Os resultados demonstraram regimes menos intensos concentrados na R2 (Pedra Branca) e R3 (Tabuleiro do Norte), sendo comum um período de veranico entre maio e junho na R2 e entre fevereiro e maio na R3. Não se recomenda o planejamento que coincida estes veranicos com as fases críticas de floração e enchimento de grãos (DOORENBOS e KASSAM, 1994), pois a falta de água reduziria sensivelmente os níveis de produção (ANDRADE JÚNIOR *et al.* 2007).

Figura 8. Caracterização da variação sazonal das condições do BHS em cenário chuvoso



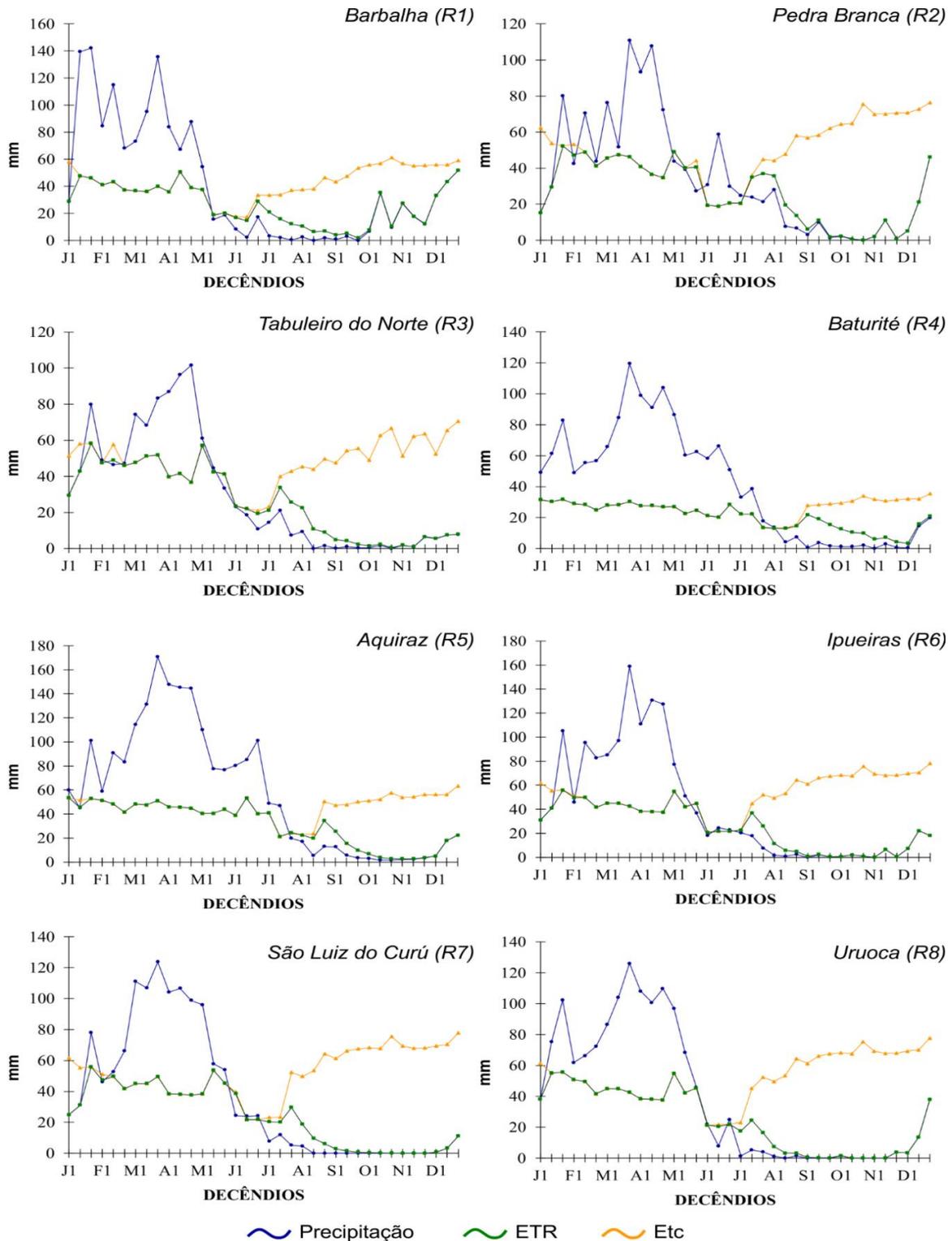
■ Reposição ■ Deficiência ■ Retirada ■ Excedente - - - CAD - - - Armazenamento

Fonte: Autor.

Também pode-se perceber o quão antecipado é o período chuvoso na R1 (Barbalha) e R4 (Baturité) que se inicia em meados de janeiro e se estende até maio. Observa-se na Figura 18, que o saldo de reposição foi predominante no primeiro semestre dos decênios, de acordo com a maior precipitação captada pela Figura 19 neste mesmo período. Como consequência primeira das precipitações ressalta-se a maior nebulosidade nestes meses sobre o estado, interferindo na fração de energia incidente sobre as culturas. R2 (Pedra Branca) difere das demais regiões deste estudo, por apresentar valores excedentes mais distribuídos ao longo do primeiro semestre. Esta característica contrasta com os demais territórios que concentram suas precipitações excedentes nos primeiros meses dos decênios.

R7 (São Luís do Curú) foi a região mais uniforme sob a variável reposição, enquanto R3 (Tabuleiro do Norte), foi o de menor expressão nesta mesma análise. As chuvas acima do normal garantem pleno desenvolvimento do milho como pode ser visto na Figura 19, onde a cultura tem sua máxima expressão produtiva ($E_{Tr}=E_{Tc}$) até meados de junho, garantindo assim uma longa brecha agrícola passível de exploração. Mesmo nas regiões R2 e R3 a cultura consegue ter bom desempenho apesar de ser menos expressivo que nas demais.

Figura 9. Caracterização da variação sazonal da precipitação, ETr e ETC em cenário chuvoso



Fonte: Autor.

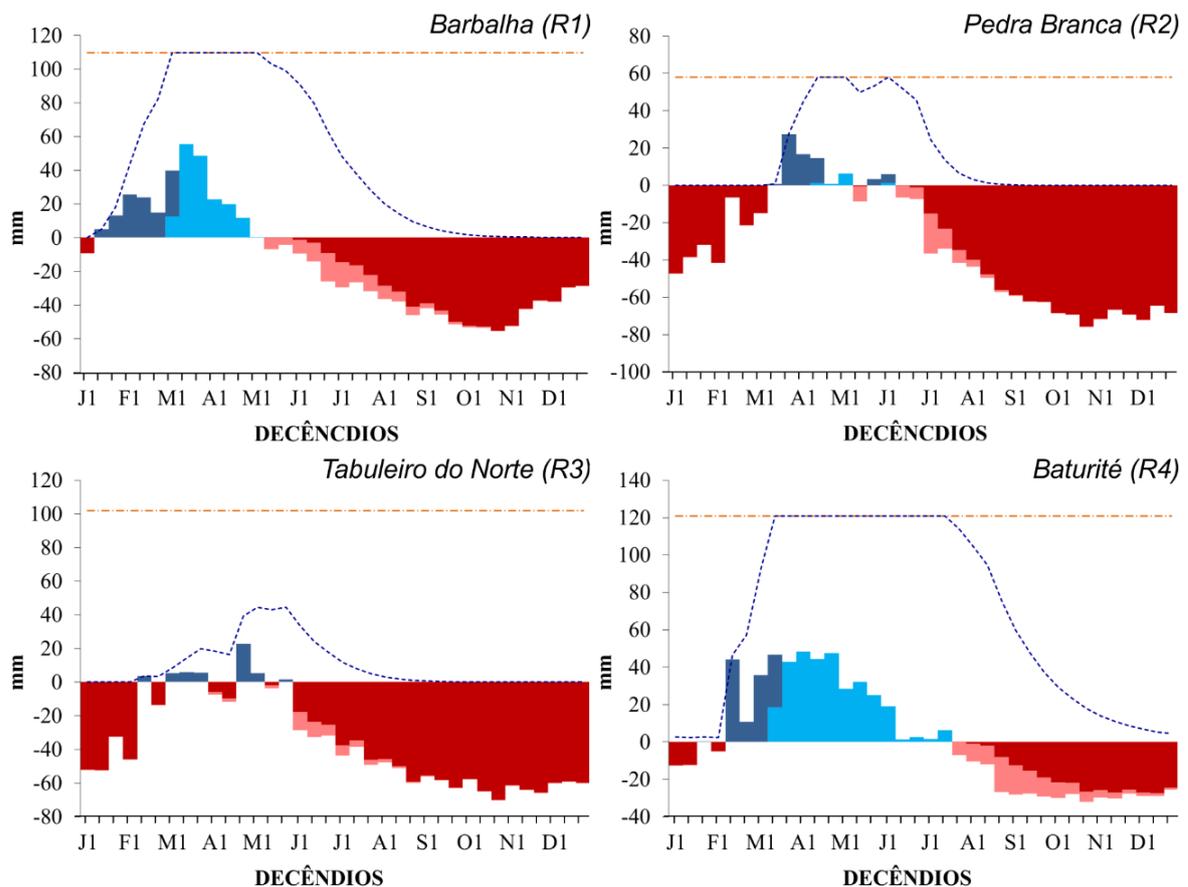
3.3.2 Cenário Regular

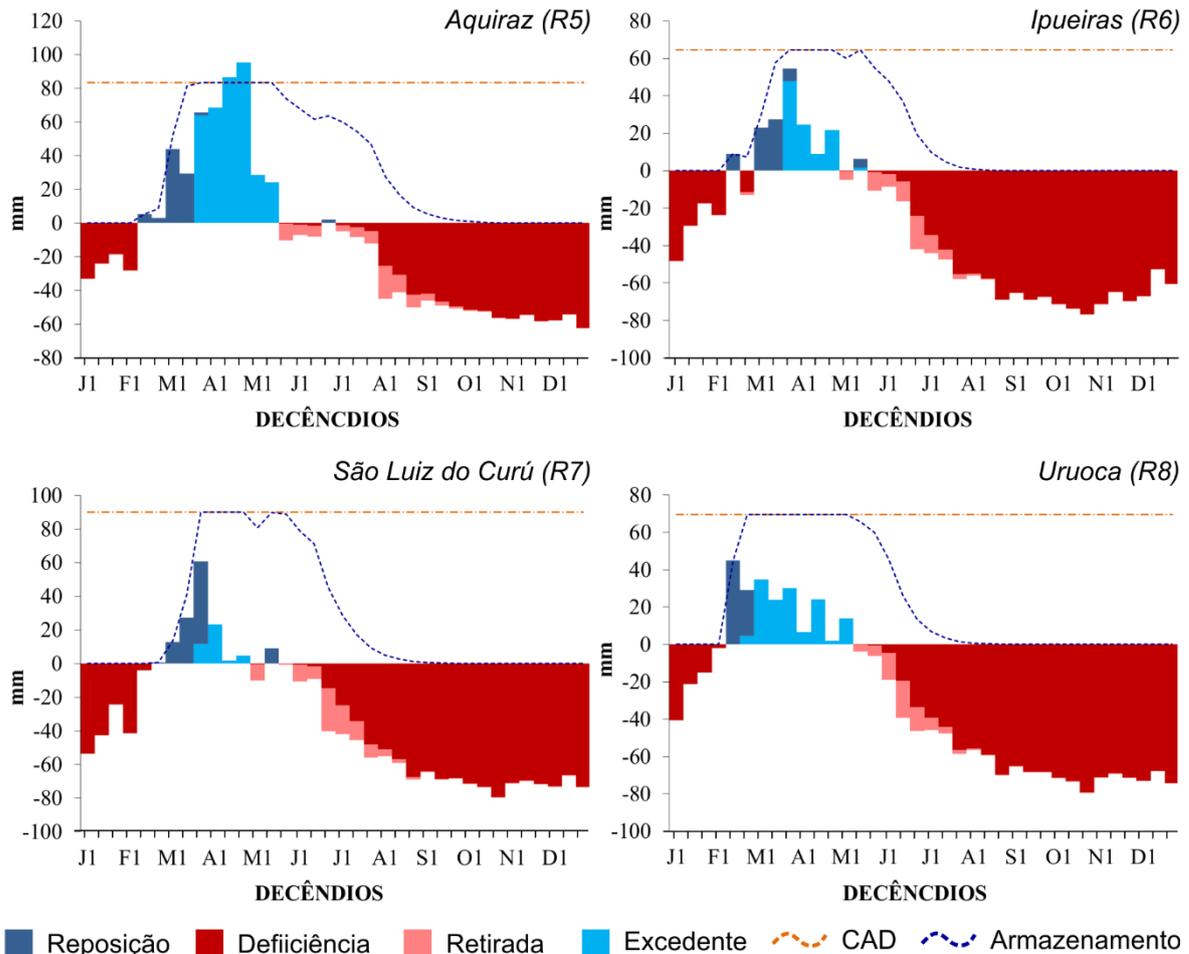
Sob cenários regulares, o regime pluviométrico sofre redução drástica e desloca o seu início aproximadamente dois decênios a frente, em relação ao início da ocorrência de chuvas

nos cenários chuvosos. Muito embora as regiões litorâneas R5, R7 e R8 (Aquiraz, São Luís do Curú e Uruoca, respectivamente) tenham sua estação chuvosa influenciada pelos mesmos fenômenos de formação, a R5 (Aquiraz) foi a que menos sofreu dispersão na ocorrência temporal com os efeitos da redução do regime pluviométrico, conforme pode ser visualizado na Figura 20.

A definição do período de cultivo nesta condição tem sua importância mantida, haja vista que mesmo em um cenário climático dentro da normalidade, o zoneamento fundamenta a tomada de decisão durante veranicos presentes em todo o estado do Ceará (SILVA e RAO, 2002) e para minimizar as perdas de safra pontuais principalmente por parte dos pequenos produtores (ANDRADE JÚNIOR *et al.* 2007).

Figura 20. Caracterização da variação sazonal das condições do BHS em cenário regular





Fonte: Autor.

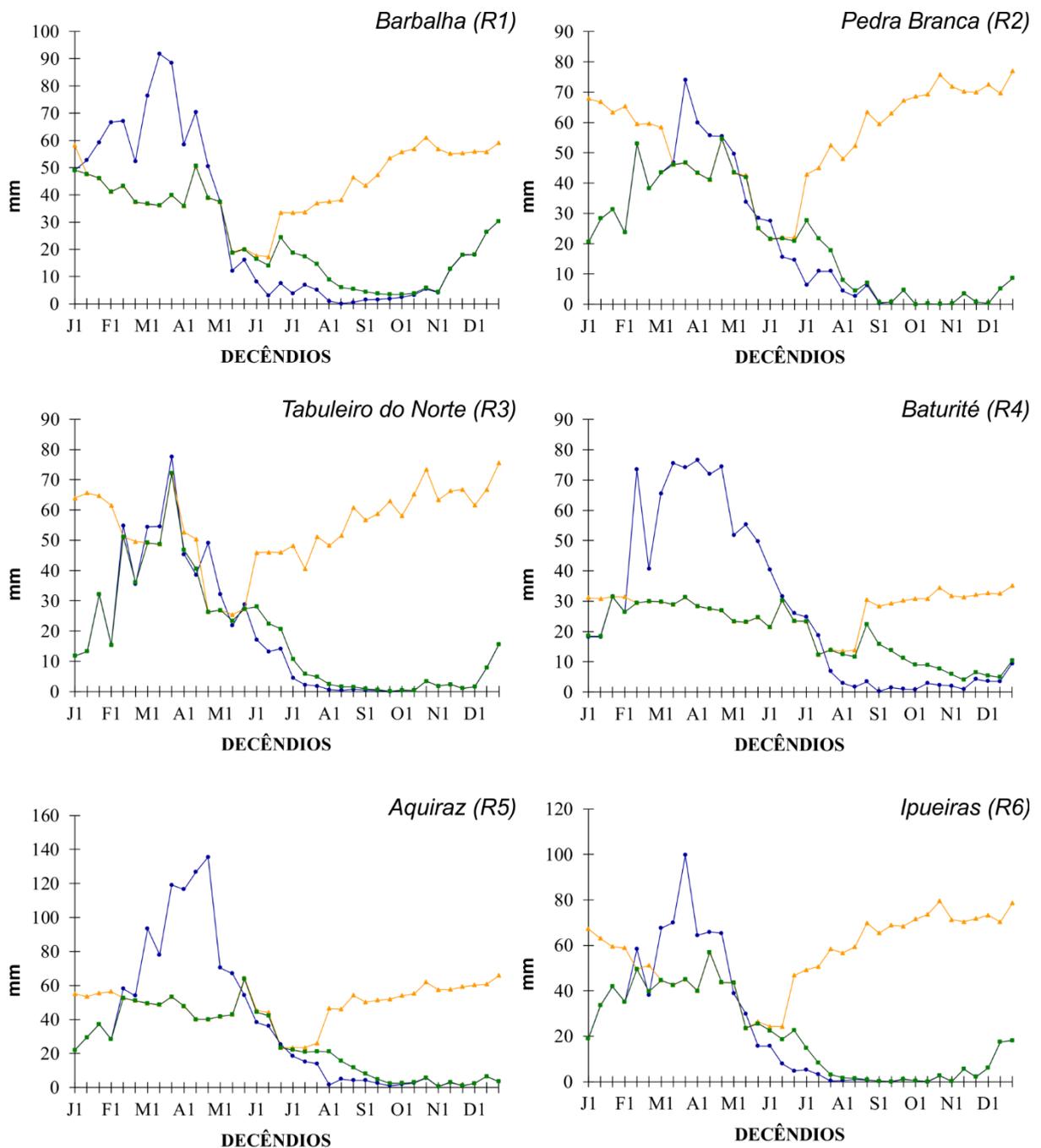
As regiões R2 (Pedra Branca) e R3 (Tabuleiro do Norte) são as que fornecem um menor período de desenvolvimento do milho a um máximo potencial fisiológico, sendo as regiões R1, R4 e R5 (Barbalha, Baturité e Aquiraz, respectivamente) as que oferecem uma condição mais estável por mais tempo (Figura 20). A partir de tais observações é possível distinguir esta zona homogênea, também definida como Zona R145 que fornecem condições hídricas bastantes confortáveis para o cultivo do milho tanto em condições de cenários chuvosos quanto em cenários regulares.

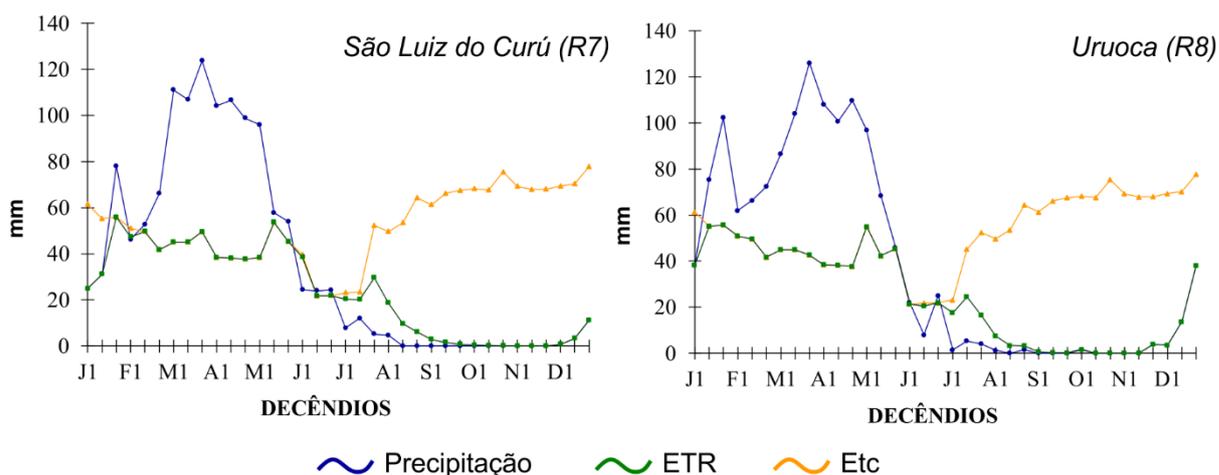
O volume repostado em cenários regulares (Figura 20) tem bastante irregularidade espacial e temporal dentro dos próprios anos, como ratifica Andrade e Éden (2010), haja vista que dentre as oito (08) regiões analisadas, apenas R1, R4 e R5 (Barbalha, Baturité e Aquiraz, respectivamente) apresentaram uma tendência definida de incremento gradual e posterior decréscimo progressivo, comportamento apresentado somente em R4, R5 e R8 (Uruoca, Aquiraz e Baturité, respectivamente) em período chuvosos. R4 (Baturité) foi a região mais

uniforme sob a variável reposição, enquanto Tabuleiro do Norte, novamente foi o de menor expressão nesta análise.

Quanto às deficiências, todos as regiões deste estudo, demonstram evolução semelhante no segundo semestre, sendo Baturité e Barbalha (nesta ordem) os municípios de menores déficits registrados. Tal comportamento é coerente com a localização geográfica próxima a encostas de elevadas altitudes á barlavento de ambas regiões, o que favorecem os eventos de precipitação local (Figura 21).

Figura 21. Caracterização da variação sazonal da precipitação, ETr e ETc em cenário regular





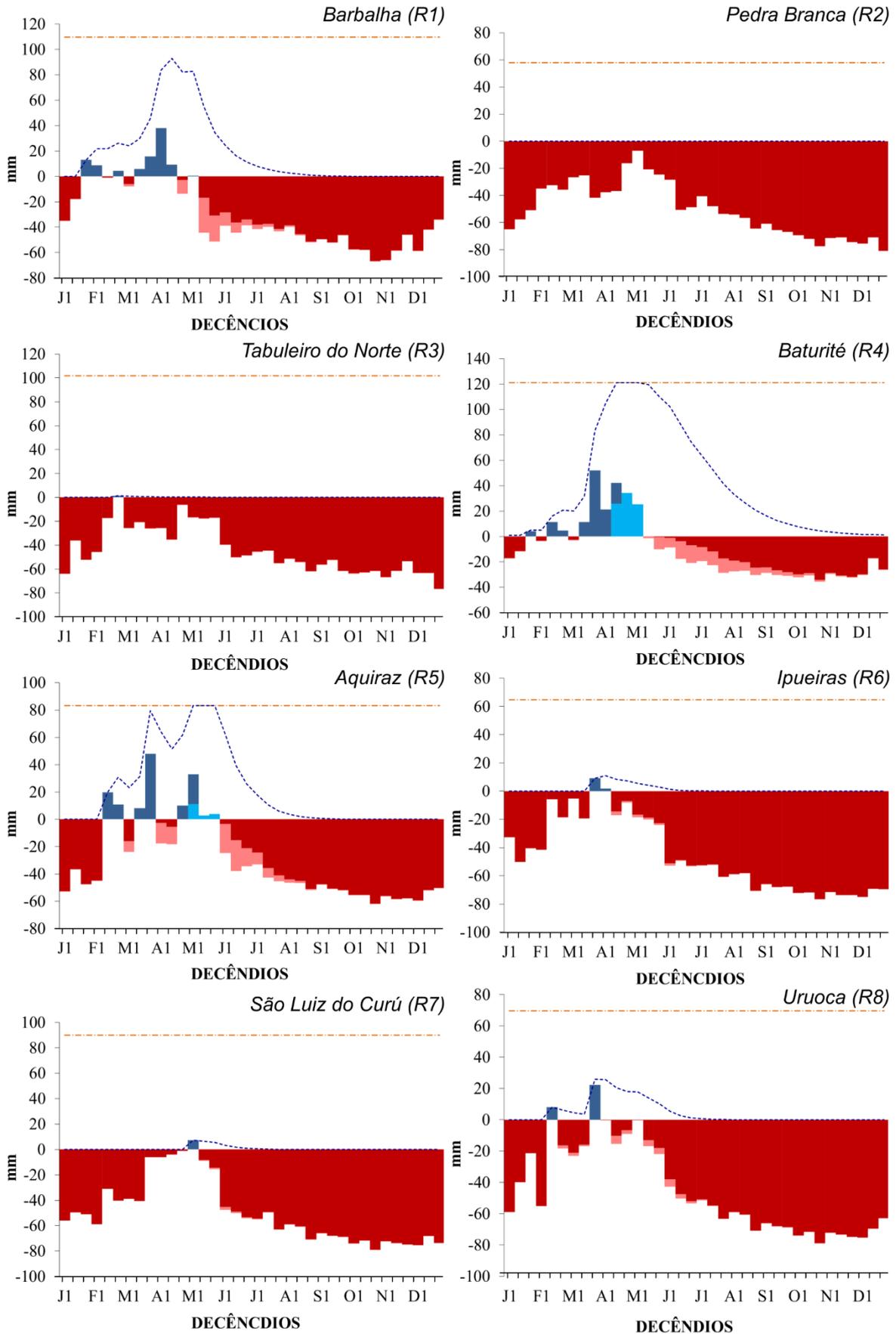
Fonte: Autor.

Na Figura 21, observa-se que os mesmos comportamentos de Precipitação, ETC e ET_0 podem ser observados a cada decêndio em todo o estado do Ceará nos anos regulares, com distinção apenas na intensidade sem tendência temporal definida (ANDRADE e ÉDEN, 2010). Percebe-se, portanto, que a partir de julho, todas as ETC's são normalmente superiores às precipitações, e neste sentido, ressaltam-se as menores disparidades entre estas duas variáveis nos municípios de Baturité e Aquiraz, nesta ordem.

3.3.3 Cenário Seco

O destaque da supracitada R145(zona formada pelas regiões R1,R4 e R5) ratifica-se também nos cenários de anos secos onde apenas estas três regiões esboçam BHS positivo (Figura 22), principalmente a R4 que é uma região de serras úmidas geograficamente próxima ao litoral. Ainda na Figura 22, observam-se que as regiões R2 (Pedra Branca) e R3 (Tabuleiro do Norte) se destacam negativamente por apresentar deficiência durante todos os decêndios, não sendo registrados quaisquer eventos de reposição hídrica suficiente para definir um armazenamento significativo pelo solo.

Figura 22. Caracterização da variação sazonal das condições do BHS em cenário seco



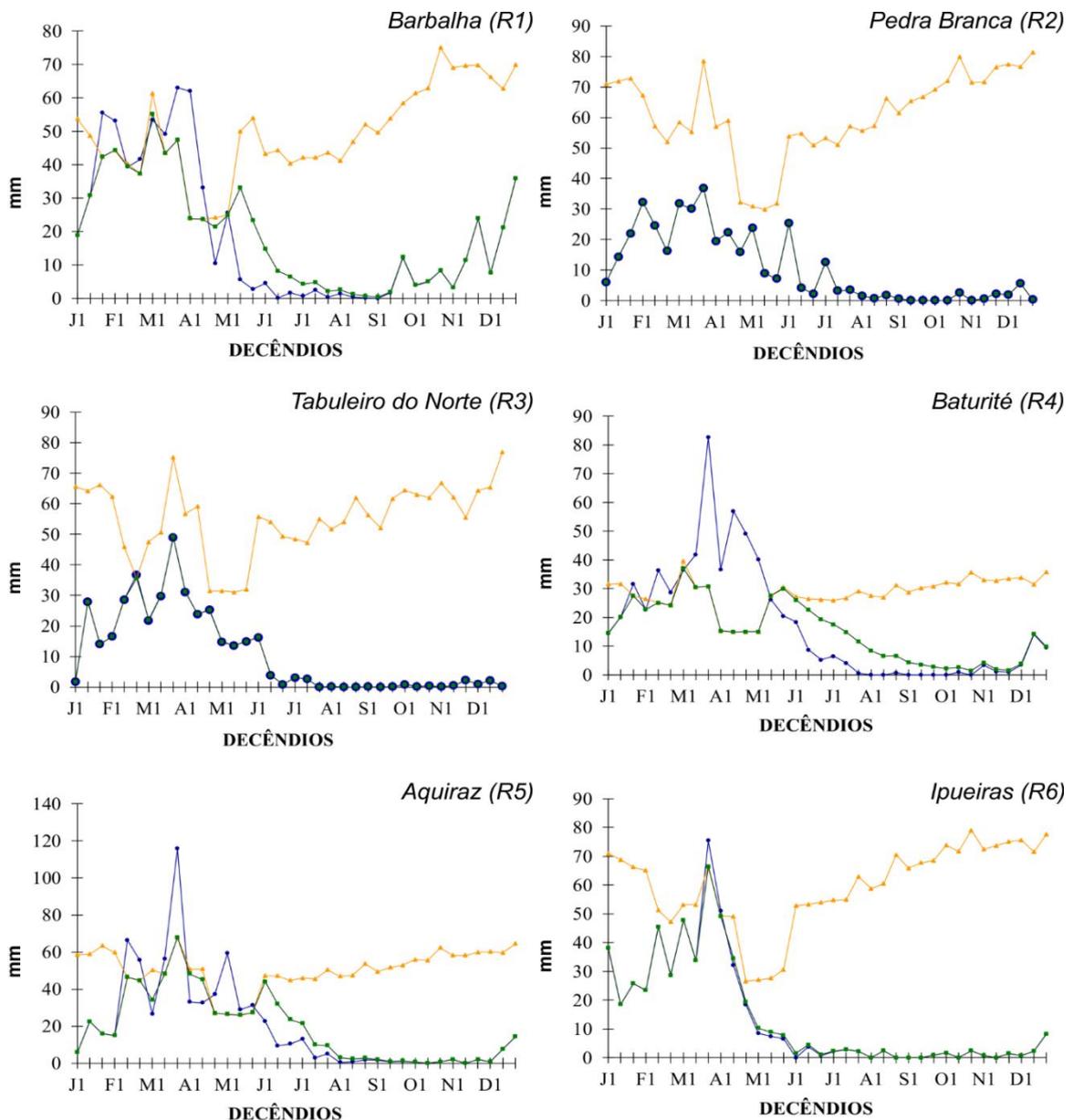
■ Reposição ■ Deficiência ■ Retirada ■ Excedente - - - CAD - - - Armazenamento

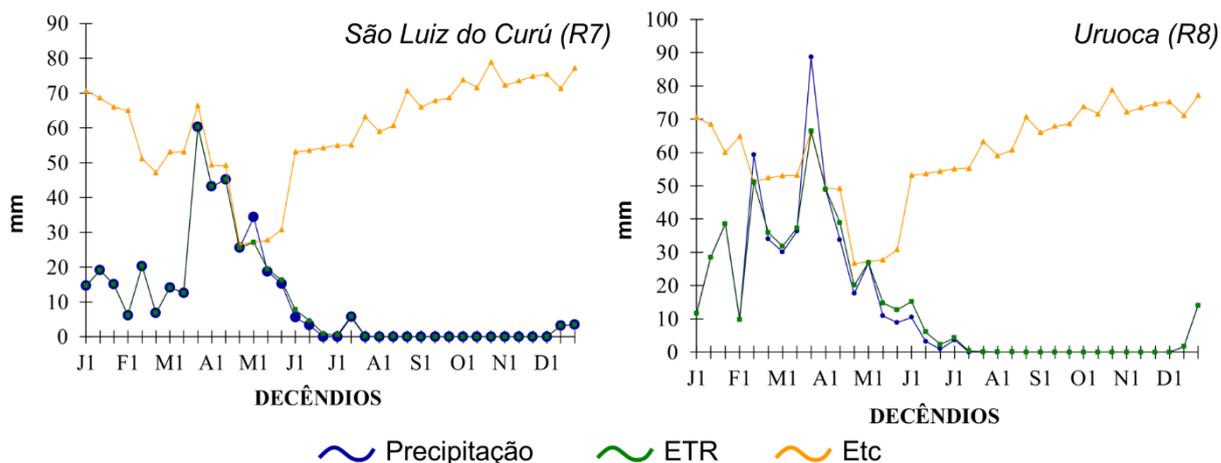
Fonte: Autor.

Seguindo a hierarquia de déficit, R6 (Ipueiras) e R7 (São Luís do Curú) registraram valores de reposição pouco relevantes no primeiro semestre dos decêndios. Nesta ótica, as deficiências mostram-se bastante similares entre os meses permanecendo no patamar de 60 mm de deficiência em todas as regiões durante o segundo semestre, com exceção de Baturité que mesmo sob situação climatológica crítica registrou as menores taxas de deficiência.

Sendo a disponibilidade hídrica nestas condições insuficiente até mesmo para a R145, que em todas as simulações de condução da cultura teve as exigências atendidas por, no máximo, dois decêndios em toda a área de estudo (Figura 23).

Figura 10. Caracterização da variação sazonal da precipitação, ETr e ETc em cenário regular





Fonte: Autor.

Nesta situação, o estado apresenta tímida reposição nas regiões R145 que compreendem as regiões representadas por Barbalha, Baturité e Aquiraz. Nos restantes dos decêndios, até mesmo nestas regiões, os índices pluviométricos não contribuem para irrigação nem para o armazenamento de água, como sugerido por De Matos *et al.* (2015).

Os períodos Chuvoso e Normal apontaram resultados semelhantes quanto ao comportamento, mas com intensidades diferentes, sugerindo que a irregularidade temporal não é fator decisivo para o volume das reposições no Ceará.

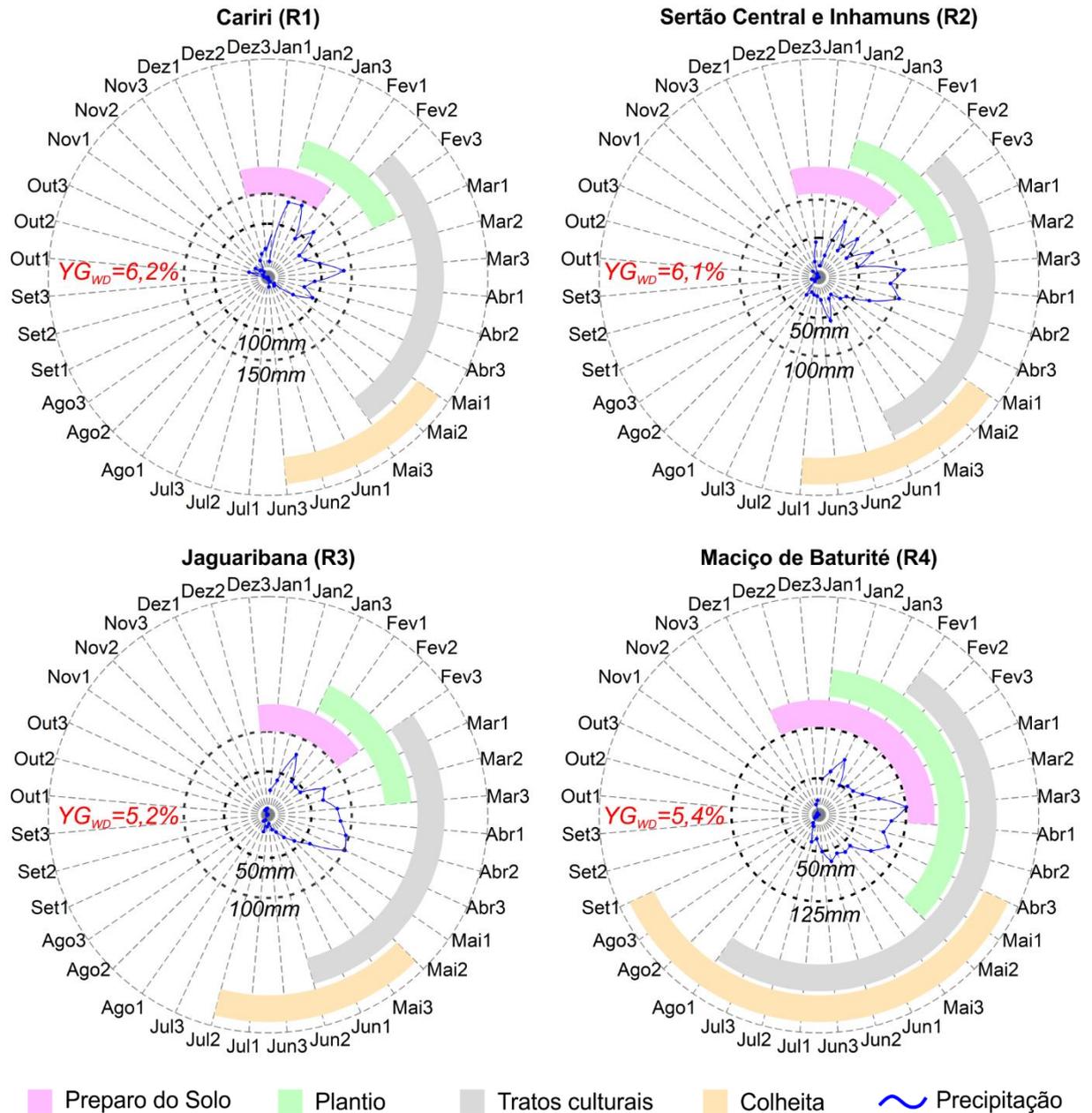
3.3.4 Calendário Agrícola

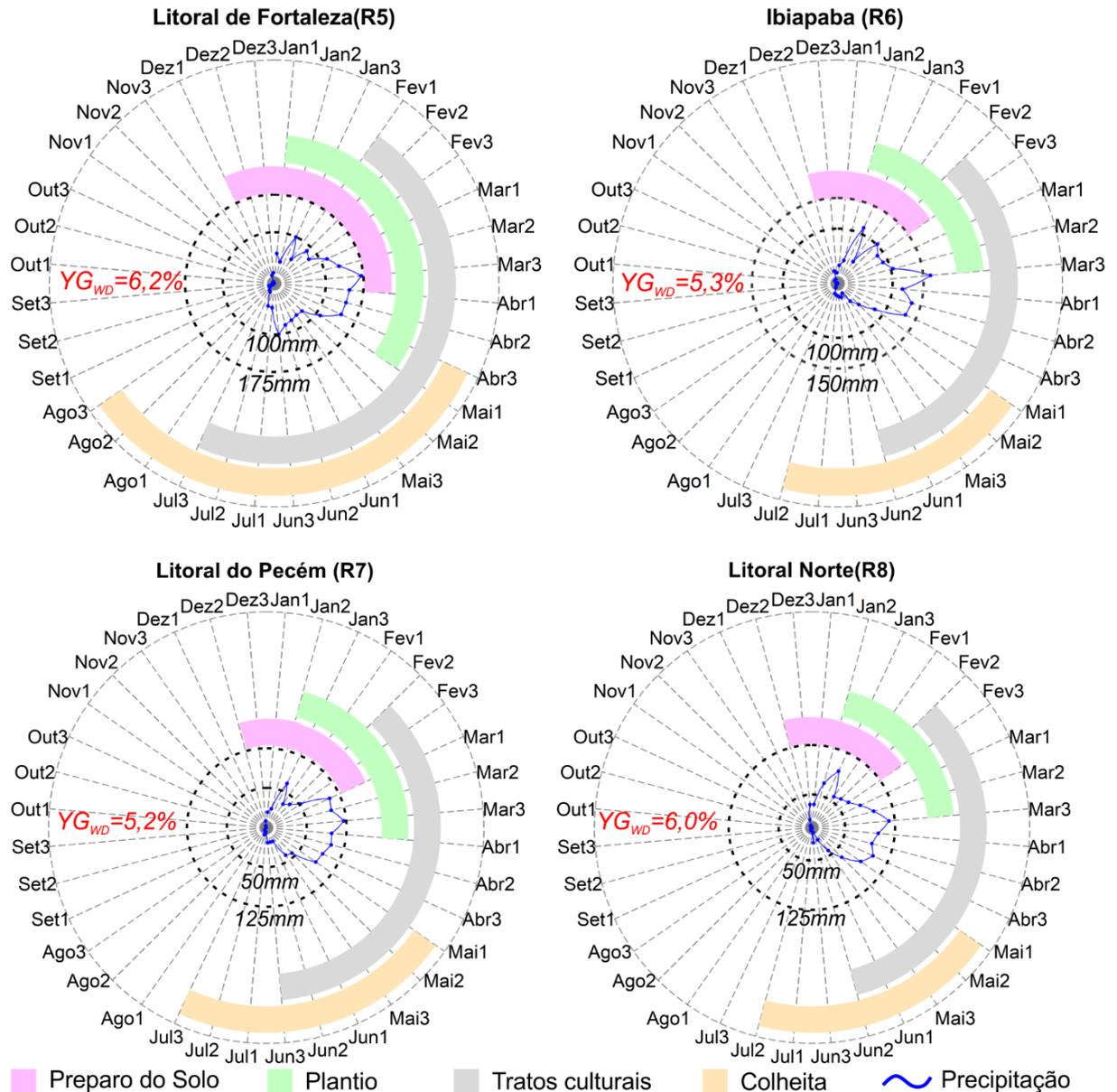
O Semiárido brasileiro é caracterizado por baixos índices pluviométricos e frequência de dias chuvosos concentrados em um período de quatro meses (CUNHA *et al.* 2015). O Ceará é o estado desta região que mais depende das chuvas, uma vez que o abastecimento hídrico é quase que totalmente suprido por reservatórios, rios intermitentes e efêmeros, fato este que torna a atividade agrícola bastante arriscada. Especialmente, ao se tratar do milho, que segundo Shirazi *et al.* (2011) possui fases fenológicas de germinação, florescimento e formação dos grãos bastante sensíveis ao suprimento hídrico. A literatura é rica em estudos neste sentido, dentre eles, o de Lopes, Dantas, Ferreira (2019), que comprovam uma correlação direta e significativa entre a produtividade do milho e a precipitação nos municípios cearenses.

Reconhecendo-se que a definição das épocas de semeadura, por meio do balanço hídrico do solo é favorável na redução do risco climático para a produção agrícola cearense (MARIN; SENTELHAS; UNGARO, 2000), a sugestão do período completo definido para a

realização de práticas agrícolas como preparo do solo, cultivo, manejo da cultura e colheita são apresentadas segundo o contexto dos cenários pluviométricos nas figuras 23, 24 e 25.

Figura 11. Calendário agrícola sugerido para as oito diferentes RPH's em cenários de anos chuvosos





Fonte: Autor.

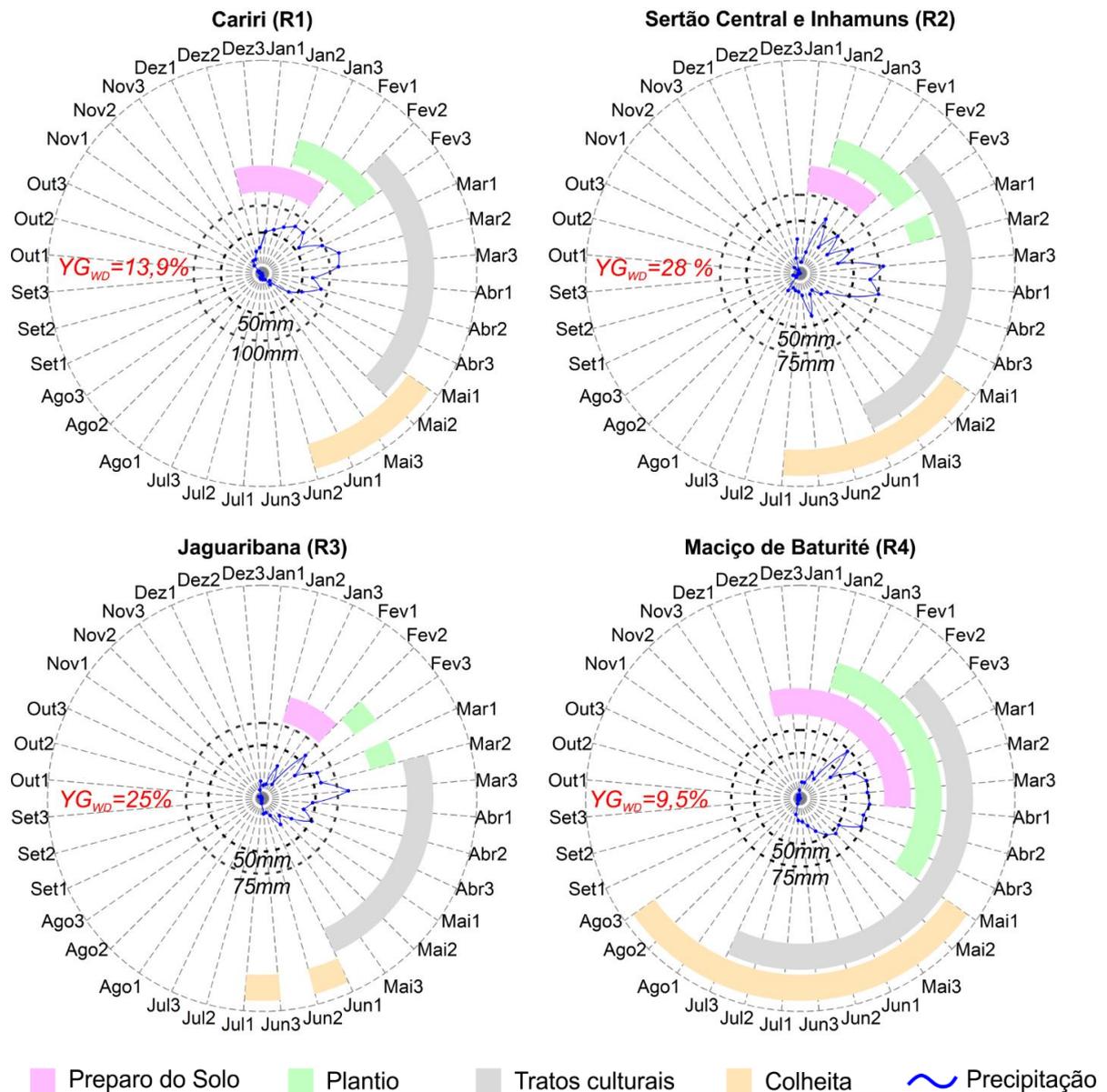
É perceptível na Figura 24, períodos mais prolongados que possibilitam ao agricultor, como tomador de decisão, iniciar o plantio mais confortavelmente. Entretanto, há de se considerar a comum ocorrência de veranicos no primeiro e último mês da estação chuvosa¹. Neste caso específico, como o balanço foi aplicado em decêndios, é factível reconhecer que alguns veranicos tenham passados despercebidos entre dois decêndios, podendo prejudicar o desenvolvimento das plantas. Para que tais eventos sejam evitados, pode-se realizar irrigação suplementar ou então retardar o início do plantio mais para o meio da estação chuvosa.

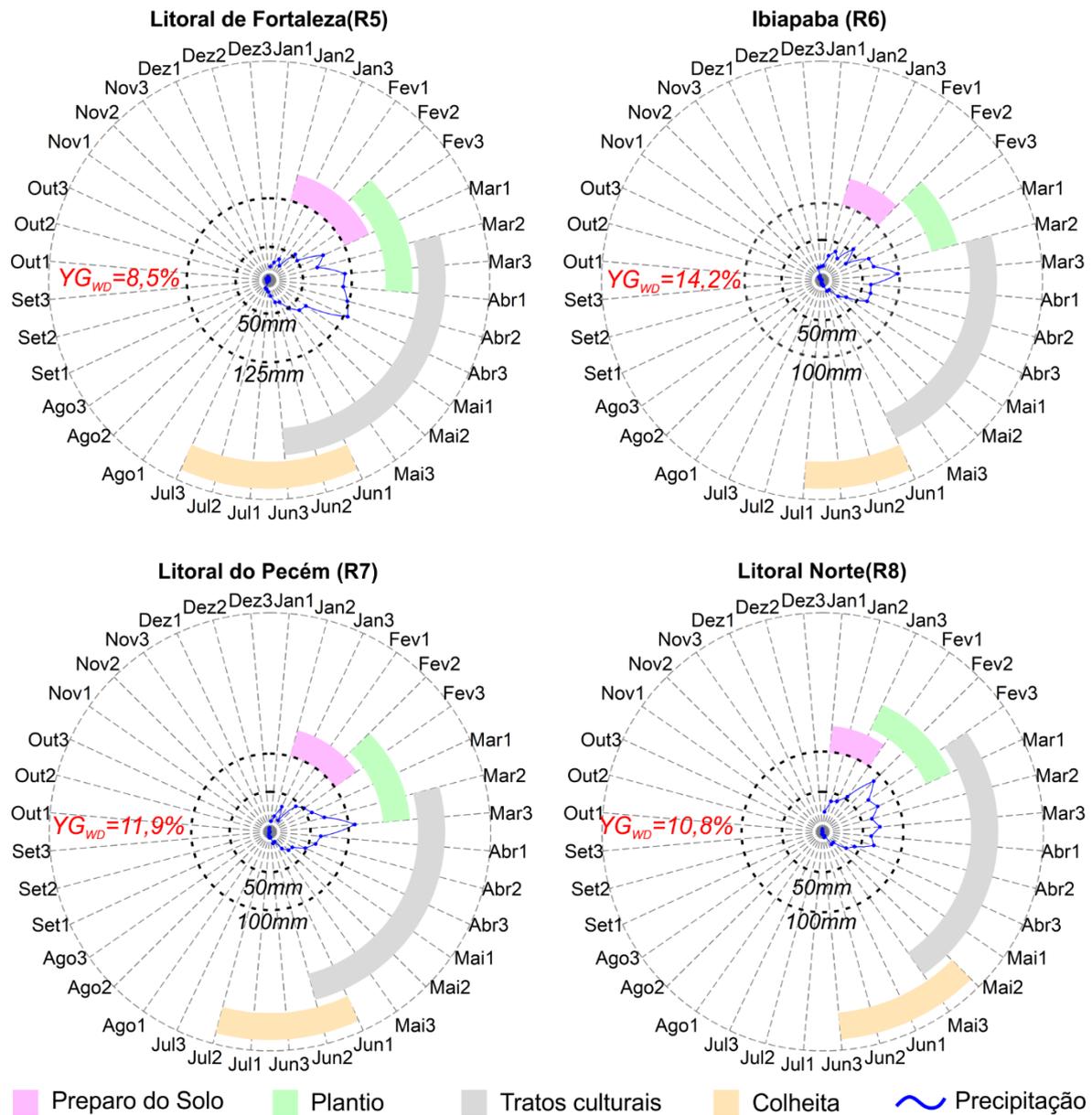
¹Ver Capítulo II, pag. 42.

Do ponto de vista geográfico, o Litoral do estado (R5, R7 e R8) e o Maciço de Baturité (R4) apresentaram a maior janela temporal para a exploração da cultura do milho.

Na Figura 25, é sugerido o calendário agrícola para o plantio de milho nas diferentes regiões deste estado. Observa-se que mesmo em anos regulares, a queda de precipitação foi muito brusca, desencadeando *yield gaps* bastante expressivos, com exceção da R145.

Figura 12. Calendário agrícola sugerido para as oito diferentes RPH's em cenários de anos regulares



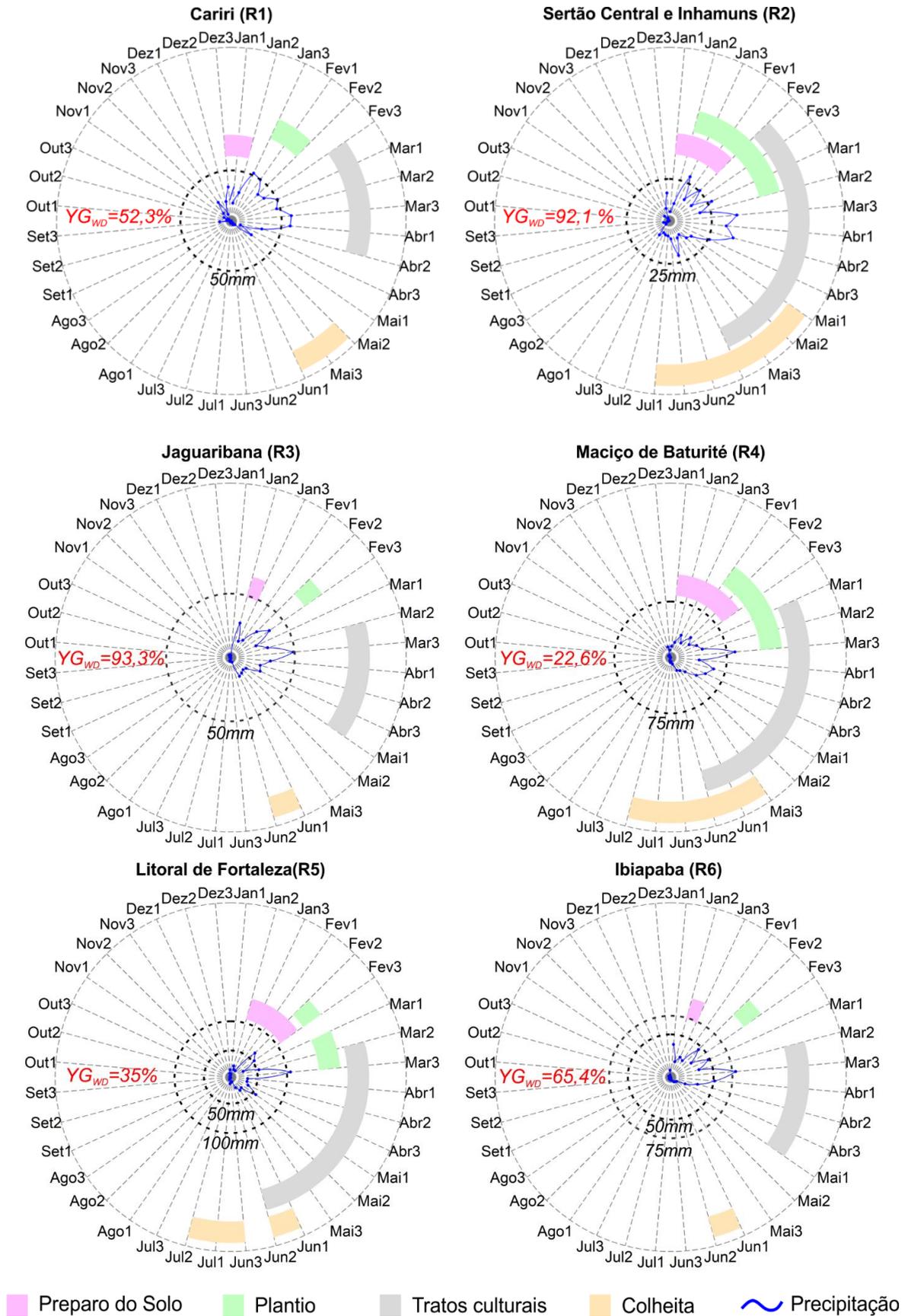


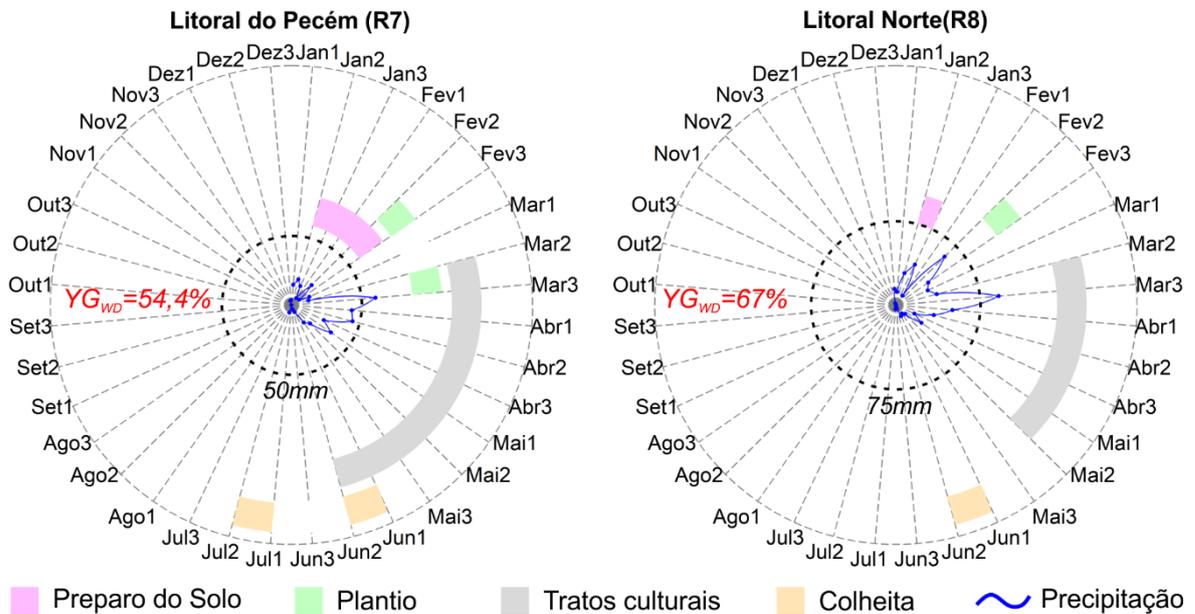
Fonte: Autor.

Independentemente da capacidade de retenção de água nos solos cearenses (ANDRADE JUNIOR *et al.* 2007), na proporção em que as épocas de semeadura foram simuladas de dezembro a março, as áreas indicadas como de menor risco climático avançam em direção às regiões centro e norte do Estado, haja vista que nessas regiões o período chuvoso estende-se até os meses de abril e maio (CUNHA *et al.*, 2015)

Em continuidade, na Figura 26 foi sugerido o calendário agrícola para condições de anos secos, apesar de quebras de produtividade neste cenário foram bastante expressivas (superiores a 75%), conforme apresentado na Figura 26.

Figura 13. Calendário agrícola sugerido para as oito diferentes RPH's em cenários de anos secos





Fonte:Autor.

É válido salientar que, em conformidade aos resultados obtidos por Bergonci *et al.* (2001) as oscilações nas safras de milho estão dependentes da disponibilidade de água, sobretudo no período crítico da cultura, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (65 a 90 dias após a sementeira). Isto significa dizer que dar início ao plantio de milho neste cenário seco é certamente submeter a cultura a um estresse hídrico superior à sua capacidade de recuperação fisiológica (BERGAMASCHI *et al.* 2004).

Diante das abordagens obtidas sobre balanço hídrico é racional admitir que: *i*) a condução do milho em sequeiro é praticável em condições de cenários chuvosos; *ii*) parcialmente restrita à zona R145 sob cenários de anos regulares; e *iii*) não recomendável em anos secos. Todas as condições consideradas neste estudo foram embasadas pelo limiar dos cenários extremos, isto é, as situações mais pessimistas dentro da janela de cultivo.

3.3.5 Análise Hierárquica de Processos (AHP)

Na tabela 10 é apresentado os valores dos pesos de cada uma das classes avaliadas neste trabalho por meio do processo AHP visto anteriormente, além da ponderação das classes e da análise da razão de inconsistência do teste.

Tabela 10. Matriz de decisão com o pesos dos critérios em função das classes de adequação

ATRIBUTOS TEMÁTICOS	Pesos das classes	Boa (0,9 - 1)	Regular (0,8 - 0,9)	Restrita (0,5 - 0,8)	Inapta (0 - 0,5)
Relevo (%)	0,157	1	0,8	0,5	0
Profundidade efetiva dos solos (cm)	0,034	1	0,9	0,7	0
Drenagem dos solos	0,071	1	0,85	0,5	0
Temperatura (°C)	0,333	1	-	0,6	0
Zoneamento Agroclimático (aptidão)	0,333	1	0,9	0,5	0
Uso e ocupação dos solos	0,071	1	0,9	0,5	0

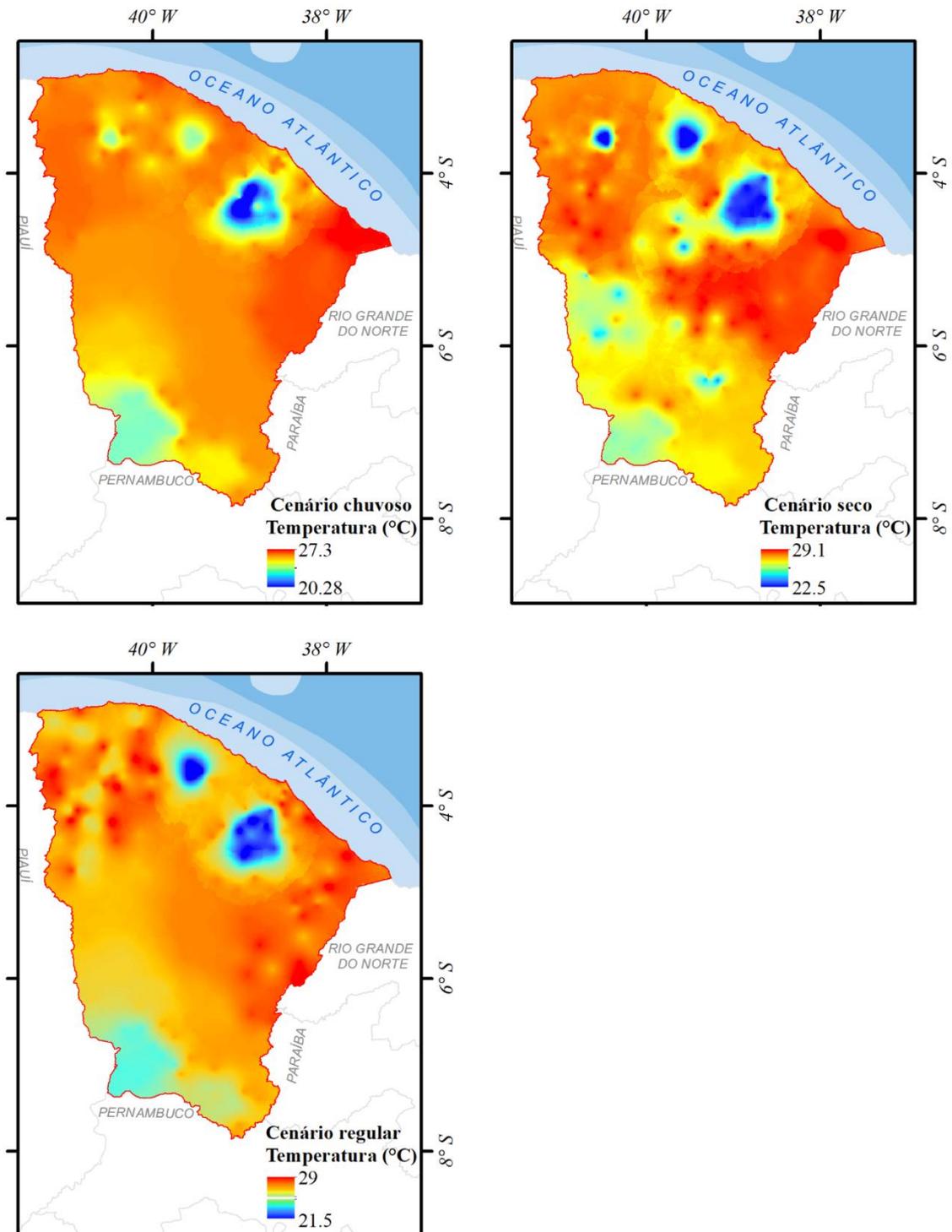
Fonte:Autor.

A razão de consistência (RC) foi de 0,0276, bem menor que 0,1 (recomendado), o que indica que as comparações das características de aptidão foram consistentes e que os pesos relativos foram apropriadamente escolhidos (CHEN; YU; KHAN, 2010; PARK *et al.* 2011; SAATY, 1977; YING *et al.* 2007)

3.3.6 Mapas de Zoneamento Agroclimático e Zoneamento Edafoclimático

As médias de temperaturas para os diferentes cenários não apresentaram diferenças expressivas e nem amplitudes térmicas elevadas (Figura 27), entretanto é possível perceber que em cenários chuvosos há uma maior homogeneidade de temperatura e em cenários secos há uma maior disparidade entre as localidades. Contudo a temperatura na maioria dos lugares se encontra na faixa de boa aptidão (24-30°C), não sendo um potencial limitador da produtividade do milho, com exceção dos efeitos sobre a R4, que é uma área predominantemente formada com serras úmidas e como já visto caracteriza-se por volume pluviométrico intenso, porém com médias de temperatura durante a estação chuvosa de mais ou menos 20°C.

Figura 14. Mapas das médias de temperatura nos diferentes cenários



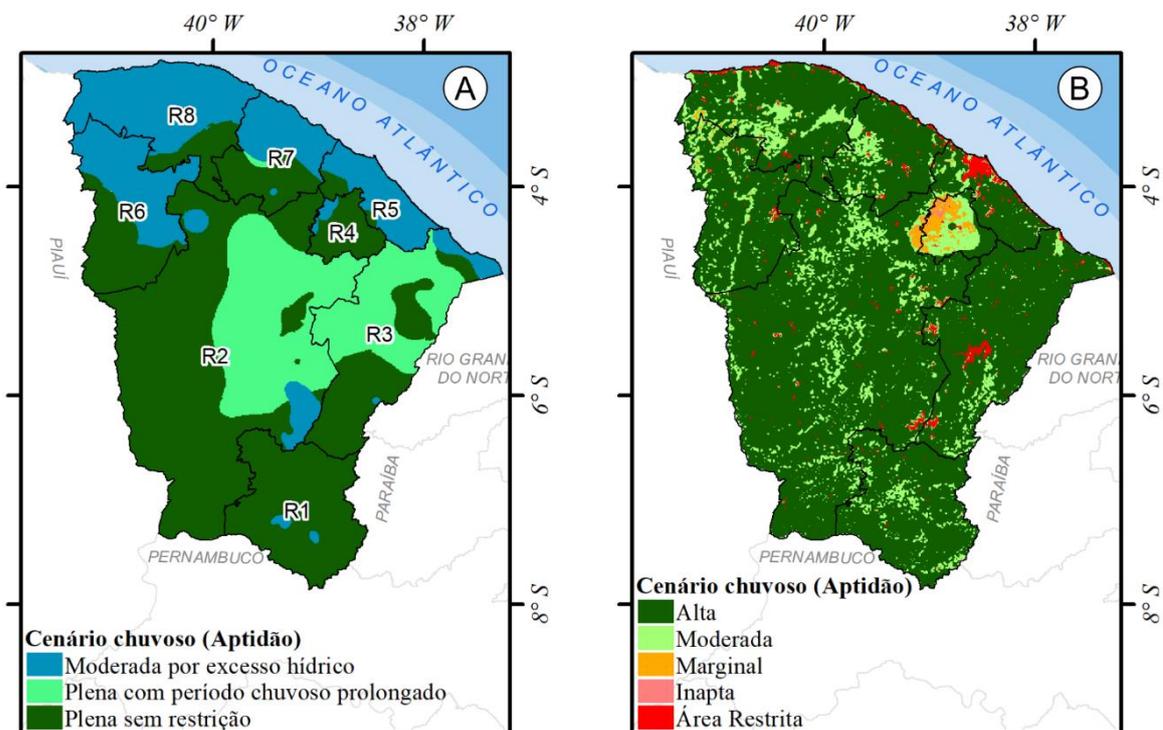
Fonte: Autor.

O mapa de zoneamento agroclimático foi definido em intervalos conforme abordado pela EMBRAPA no zoneamento agroclimático de culturas agrícolas para o estado do Alagoas (ZAAL) (BARROS *et al.* 2012) e de Pernambuco (ZAPE) (VAREJÃO-SILVA; BARROS, 2002). Para a definição do zoneamento edafoclimático foi utilizada uma escala de aptidão com

intervalos definidos entre alta, moderada, marginal e inapta FAO (1976), além de ter sido atribuído uma outra feição relacionada a restrição em centros urbanos, recursos hídricos e a faixa de dunas na costa oceânica (Figuras 28, 29 e 30).

Nos mapas de aptidão climática para a cultura do milho no cenário chuvoso (Figura 28), observa-se que 24,34% da área do Estado (Tabela 11), apresenta aptidão climática moderada por excesso hídrico, principalmente na região do Litoral e 21,3% apresenta aptidão plena com período chuvoso prolongado, mais concentrado no sertão central e nordeste do estado. Segundo Barros et al (2012) onde o período chuvoso for prolongado, o ciclo vegetativo da cultura pode apresentar problemas devido ao encharcamento do solo, levando a problemas de colheita, armazenamento e secagem dos grãos. Uma alternativa é planejar o plantio mais para o final da quadra chuvosa para garantir a colheita durante um período seco. Logo não se trata de uma limitação tão expressiva e de difícil superação quanto o estresse hídrico, como pode ser observado no mapa edafoclimático onde a maior parte destas áreas são de alta aptidão. A classe de aptidão Plena, com 80784,3 km² representa 54,36 % da área total, não havendo área de inaptidão ou moderada por deficiência hídrica. No zoneamento edafoclimático 83,84% é representado por zona de alta aptidão.

Figura 15. Mapas de zoneamento agroclimático (A) e mapas de zoneamento edafoclimático (B) em condições de cenário chuvoso



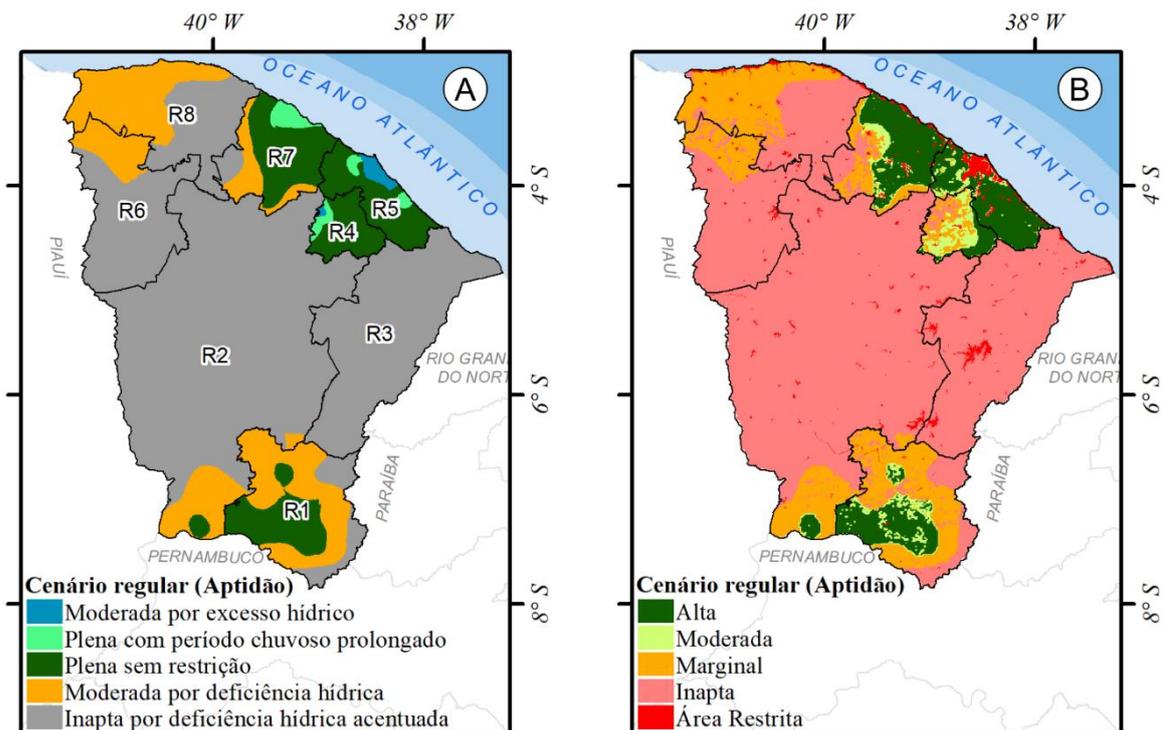
Fonte: Autor.

Para o cenário regular, observa-se que 13,45 % da área do Estado (Tabela 11), apresenta aptidão climática plena sem restrição, com 19.980,8 km², ocorrendo na região do litoral de Fortaleza (R5), litoral do Pecém (R7), Maciço de Baturité e sul cearense.

O litoral é a região geográfica formada pelas Várzeas e Tabuleiros, nestas regiões, com exceção das dunas e dos mangues, a terra é intensamente ocupada por atividade agrícola justamente em função da boa aptidão edafoclimática (FRANCISCO, 2010)

Observando o mapa de aptidão edafoclimática tanto no cenário chuvoso como regular é perceptível que grande parte da R4 tem aptidão climática plena sem restrições, entretanto boa parte deste território apresenta aptidão edafoclimática entre moderada a marginal, isto se deve principalmente por que é muito comum nesta área zonas de relevo acentuado, que impossibilitam o plantio do milho. (AMARAL *et al.* 2013)

Figura 16. Mapas de zoneamento agroclimático (A) e mapas de zoneamento edafoclimático (B) em condições de cenário regular



Fonte: Autor.

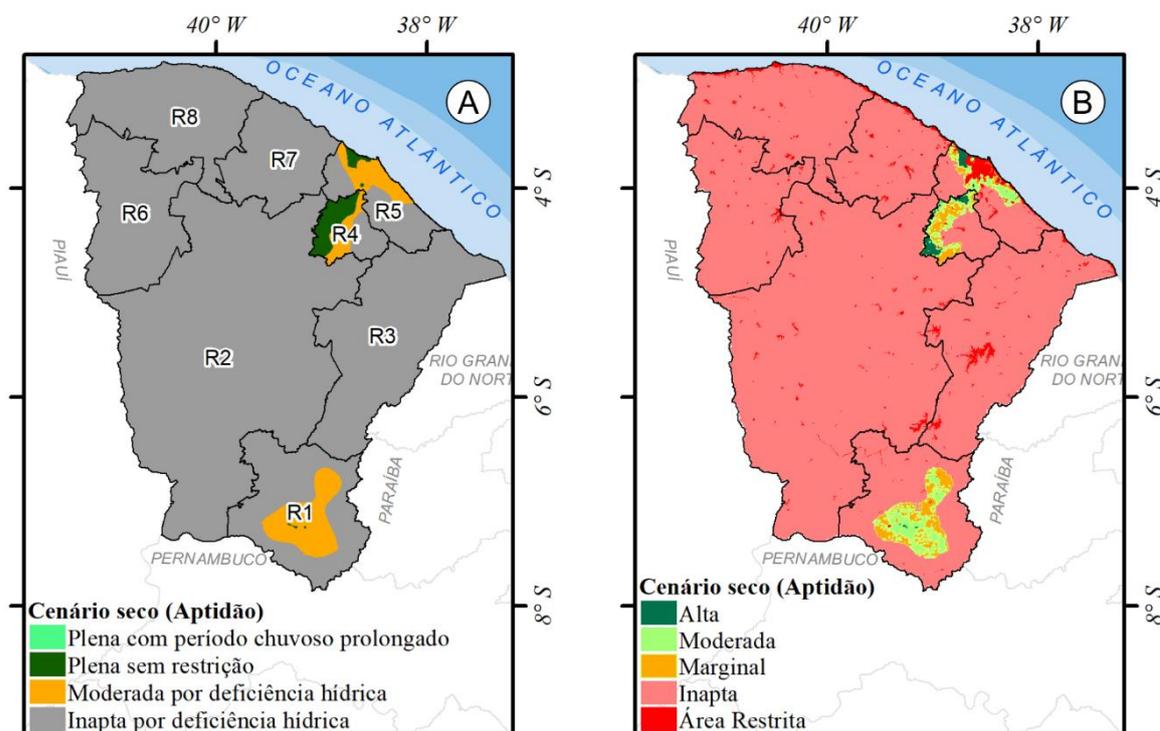
No mapa de aptidão agroclimática (Figura 30), no cenário seco observa-se o predomínio da classe de aptidão inapta por deficiência hídrica em 96,55% da área com 13.9974,1 km² (Tabela 11) abrangendo quase todas as regiões do estado. Resultados semelhantes foram encontrados para Paraíba (FRANCISCO; SANTOS, 2018). De acordo com

Barros *et al.* (2012), no cenário seco as possibilidades climáticas para o cultivo do milho são muito reduzidas devido ao estresse hídrico.

A classe de aptidão moderada por deficiência hídrica ocorre numa estreita faixa na região do Litoral e uma área de tamanho similar na região sul cearense ocupando uma área de 6786,4 km², o que representa 4,57% da área do Estado. Apenas uma área de 1,23% possui aptidão plena sem restrição, localizado principalmente na RPH 4, que conforme visto anteriormente trata-se de uma região de serras húmidas caracterizadas por chuvas prolongadas e intensas.

As zonas de alta aptidão reduzem drasticamente dos cenários chuvoso para os regulares (74,04%) e dos cenários regulares para os cenários secos (9,47%) atingindo um patamar de apenas 0,33% (Tabela 12) do total da área, tal acontecimento está associado diretamente com a queda da aptidão agroclimática apresentada na Tabela 11.

Figura 30. Mapas de zoneamento agroclimático (A) e mapas de zoneamento edafoclimático (B) em condições de cenário seco



Fonte: Autor.

Tabela 11. Descrição das zonas de aptidão agroclimática em relação a área total do terreno

Aptidão Agroclimática	Áreas de aptidão nos cenários pluviométricos					
	Seco		Regular		Chuvoso	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Moderada por	0	0	749,7	0,5	36167,1	24,34

excesso hídrico						
Plena com período chuvoso prolongado	20,2	0,01	1753,2	1,18	31655,6	21,3
Plena sem restrição	1826,3	1,23	19980,8	13,45	80784,3	54,36
Moderada por deficiência Hídrica	6786,4	4,57	25518,9	17,17	0	0
Inapta por deficiência hídrica	139974,1	94,19	100604,4	67,7	0	0
Total	148607	100	148607	100	148607	100

Fonte: Autor.

Tabela 12. Descrição das zonas de aptidão edafoclimáticas em relação a área total do terreno

Aptidão Edafoclimática	Áreas de aptidão nos cenários pluviométricos					
	Seco		Regular		Chuvoso	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Alta	497.1	0.33	14560.8	9.80	124586.1	83.84
Moderada	2393.8	1.61	4521.8	3.04	18558	12.49
Marginal	4140.8	2.79	23571.8	15.86	1783.9	1.20
Inapta	138102.2	92.93	102479.5	68.96	205.9	0.14
Área Restrita	3473.1	2.34	3473.1	2.34	3473.1	2.34
Total	148607	100	148607	100	148607	100

Fonte: Autor.

CONCLUSÕES

Na região semiárida em estudo o cultivo do milho conduzido em sequeiro é indicado no final do primeiro mês da quadra chuvosa em casos de cenários chuvoso ou regulares, e não deve ser praticado para cenários secos ou sobre a influência de El Niño.

Para regiões semiáridas, o milho consegue ter rendimento com no máximo 15 dias de veranico, acima disso já passa a sofrer uma queda brusca de produtividade, cuja severidade vai depender da fase fenológica que este período seco vai coincidir.

Já que as previsões confiáveis do ENSO e da LNSO e de cenários de precipitação são emitidas antecipadamente por vários centros de previsão, a possibilidade de usar as perspectivas climáticas para o planejamento de condução do milho reduzem os riscos de quebra de safra na região semiárida.

O plantio de milho em sequeiro só deve ser recomendado em todo o estado do Ceará nos períodos de anos chuvosos, e desde que se considere uma quebra de produtividade de até 10% a sua semeadura deve ser feita a partir do dia 11 de janeiro até 31 de março, podendo se estender por mais alguns meses dependendo da região, conforme apresentado nos resultados deste trabalho.

Em cenários de anos regulares o plantio é recomendado apenas em parte da região sul cearense e nas proximidades do litoral de Fortaleza e Litoral Norte, com janela de plantio compreendida entre 21 de janeiro até o 28 de fevereiro considerando uma quebra de produtividade de até 15%.

Assim, a caracterização da variação sazonal das condições do BHS (deficiências e excedentes) ao longo dos anos de cada estação foi possível mediante a integração de conhecimentos multidisciplinares (Geoprocessamento, Agrometeorologia, Ciências do Solo e Fitotecnia) direcionadas à cultura do Milho (*Zea Mays L.*) fomentando o desenvolvimento de ferramenta para o planejamento agrícola.

REFERÊNCIAS

- ABDRABBO, M. A. A.; SALEH, S. M.; FARAG, A. A. Water requirements for maize under climate change. **Journal of Applied Sciences Research**, Paquistão, v. 12, n. 5, p. 19–28, 2016.
- ACHAKZAI, A. K. K. Effect of water stress on imbibition, germination and seedling growth of maize cultivars. **Sarhad Journal of Agriculture**, Paquistão, v. 25, n. 2, p. 165–172, 2009.
- ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 28, n. 3, p. 352–355, set. 2013.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Alemanha, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMARAL, A. J. Do *et al.* **Potencial Pedoclimático do Estado de Alagoas para a Cultura do Milho (L.)**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. p.1-92.
- ANAGNOSTOPOULOU, Chr. *et al.* Spatial and temporal analysis of dry spells in Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 74, n. 1, p. 77–91, 1 jan. 2003.
- ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; PALÁCIO, H. A. Q. O semiárido cearense e suas águas. *In*: ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. (Org.). **Semiárido e o manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza-Ce: Editora Ltda, 2010. p. 408.
- ANDREA, M. C. Da S. *et al.* Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 264–273, 2018.
- ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, Paulo Cesar Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 7, p. 653–660, jul. 2009.
- ASSAD, E. D. *et al.* Veranicos na região dos cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 9, p. 993–1003, 1 set. 1993.
- BARRON, J. *et al.* Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in east Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 117, n. 1, p. 23–37, 30 jun. 2003.
- BARROS, A. C. De **Análise multicritério aplicada ao zoneamento agrícola do município de Itaberá-SP**. 2017. 80 f. Dissertação de mestrado- UNESP, Botucatu-SP, 2017.
- BARROS, A. H. C.; VAREJÃO-SILVA, M. A.; TABOSA, J. N. Aptidão climática do estado de Alagoas para culturas agrícolas. **Relatório Técnico. Convênios SEAGRI-AL/Embrapa Solos**, Recife-Pe, ZONEAMENTO AGROECOLÓGICO DO ESTADO DE ALAGOAS (ZAAL)p. 1–86, 2012.
- BATES, D. *et al.* **lme4: Linear Mixed-Effects Models using “Eigen” and S4**. [S.l.]: [s.n.], 2019. p.1-123.

BATTISTI, Rafael; SENTELHAS, Paulo César; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, v. 42, n. 1, p. 24–30, 2012.

BERGAMASCHI, H. *et al.* Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831–839, 2004.

_____. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243–249, fev. 2006.

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As Plantas e o Clima - Princípios e Aplicações**. [S.l.]: Agrolivros, 2017. V. 1. p.1-352.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O Milho e o Clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. p.1-84.

BERGONCI, J. I. *et al.* Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 7v. 36, p. 949–956, 2001.

BHERING, S. B. *et al.* Geotecnologias aplicadas ao Zoneamento Agroecológico do estado do Mato Grosso do Sul. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia-MG, v. 26, n. 1, p. 171–187, jan. 2014.

BOZDAĞ, A.; YAVUZ, F.; GÜNAY, A. S. AHP and GIS based land suitability analysis for Cihanbeyli (Turkey) County. **Environmental Earth Sciences**, Alemanha, v. 75, n. 9, p. 813, 28 abr. 2016.

BURT, T. P. *et al.* Changing patterns of daily precipitation totals at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina, USA. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 38, n. 1, p. 94–104, jan. 2018.

ÇAKIR, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, Holanda, v. 89, n. 1, p. 1–16, set. 2004.

CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. **Environmental Modelling & Software**, Inglaterra, v. 25, n. 12, p. 1582–1591, 2010.

CINDRIĆ, K.; PASARIĆ, Z.; GAJIĆ-ČAPKA, M. Spatial and temporal analysis of dry spells in Croatia. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 102, n. 1, p. 171–184, 1 out. 2010.

CONAB, (Companhia Nacional De Abastecimento). **Conab - Safras**. 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 7 abr. 2019.

CRUZ, J. C. *et al.* Plantio. In: CRUZ, J. C. (Org.). **Cultivo do Milho**. Sistema de produção. 6. ed. Sete Lagoas- MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. p. 1–10.

CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P. Cultivares. In: CRUZ, J. C. (Org.). **Cultivo do Milho**. Sistema de produção. 4. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo., 2008. p. 1–4.

- CUI, T. *et al.* QTL mapping for leaf area in maize (*Zea mays* L.) under multi-environments. **Journal of Integrative Agriculture**, China, v. 16, n. 4, p. 800–808, abr. 2017.
- CUNHA, A. P. M. *et al.* Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 214–215, p. 494–505, dez. 2015.
- DARAND, M.; SOHRABI, M. M. Identifying drought- and flood-prone areas based on significant changes in daily precipitation over Iran. **NATURAL HAZARDS**, EUA, v. 90, n. 3, p. 1427–1446, fev. 2018.
- DENGIZ, O.; USUL, M. Multi-criteria approach with linear combination technique and analytical hierarchy process in land evaluation studies. **Eurasian Journal of Soil Science**, v. 7, n. 1, p. 20–29, 1 jan. 2018.
- DENI, S. M.; JEMAIN, A. A. Mixed log series geometric distribution for sequences of dry days. **Atmospheric Research**, Holanda, v. 92, n. 2, p. 236–243, 1 abr. 2009.
- DINIZ, A. F. **Estudo da variabilidade da pluviosidade (1994-2010) no município de Feira de Santana (Bahia) e seus reflexos na agricultura de sequeiros: o caso do milho.** 2016.114 f. Dissertação- Universidade Federal da Bahia, Salvador-Ba, 2016.
- DOMÍNGUEZ-CASTRO, F. *et al.* Mapping seasonal and annual extreme precipitation over the Peruvian Andes. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 38, n. 15, p. 5459–5475, 1 dez. 2018.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Campina Grande-PB: UFPB, 1994. p.3-101 (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- DOORENBOS, Jan; KASSAM, Amir H. **Yield response to water.** 33. ed. Roma: FAO Irrigation and Drainage, 1979. p.1-193.
- DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho - uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil.** 2014.197 f. Dissertação- Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2018.
- EDWARDS, E. J. *et al.* The Origins of C4 Grasslands: Integrating Evolutionary and Ecosystem Science. **Science**, EUA, v. 328, n. 5978, p. 587–591, 30 abr. 2010.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. p.1-590.
- EMBRAPA, (Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária). **Milho - BRS Caatingueiro - Portal Embrapa.** Petrolina-PE, 2005. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/380/milho---brs-caatingueiro>. Acesso em: 26 abr. 2019.
- ESA, E.; ASSEN, M. A GIS based land suitability analysis for sustainable agricultural planning in Gelda catchment, Northwest Highlands of Ethiopia. **Journal of Geography and Regional Planning**, v. 10, n. 5, p. 77–91, 31 maio. 2017.

ESPINOZA, W.; AZEVEDO, J.; ROCHA, L. A. Densidade de plantio e irrigação suplementar na resposta de três variedades de milho ao déficit hídrico na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 85–95, 1980.

FAO. **A Framework for Land Evaluation**. Roma: Food & Agriculture Organization, 1976. V. FAO Soils Bulletin 52. p.1-79.

_____. **Agro-ecological Zoning: Guidelines**. Roma: Food & Agriculture Organization, 1996. V. FAO Soils Bulletin 73. p.1-78.

FERNANDES, F. B. P. **Disponibilidade hídrica para a cultura do feijão-de-corda em função do manejo de solo no semiárido cearense**. 2014.111 f. Tese- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ce, 2014.

FERREIRA, F. F.; ALVES, J. M. B.; COSTA, A. A. Um estudo dos impactos das temperaturas da superfície do mar (TSM) em macrorregiões, pluviométricamente homogêneas, no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria-RS, v. 12, p. 193–204, 2004.

FISCHER, T. *et al.* Change-points in climate extremes in the Zhujiang River Basin, South China, 1961-2007. **Climatic Change**, Holanda, v. 110, n. 3–4, p. 783–799, fev. 2012.

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização agrícola do estado da Paraíba utilizando sistema de informações geográficas**. 2010. 122 f. Dissertação (Manejo de Solo e Água)- Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Aptidão Climática do Estado da Paraíba para as Principais Culturas**. Campina Grande-PB: EPGRAF, 2018. p.1-120.

FUNCEME, (Fundação Cearense De Meteorologia E Recursos Hídricos). **Delimitação em formato shape dos polígonos de classificação dos solos e da capacidade de armazenamento de água (CAD)**. Fortaleza-Ce: 2002. Escala:1:600000. Disponível em: http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/13-Mapa_CE_CAD_A2.pdf. Acesso em: 1 dez. 2019

_____. **Delimitação em formato shape de rios principais e dos espelhos d'água acima de 5 ha no estado do Ceará entre 2004 e 2007**. Fortaleza-Ce: 2008. . Acesso em: 1 nov. 2019

_____. **Polígonos de compartimentação geoambiental do Ceará**. Fortaleza-Ce: 2017. Escala:1:600000. . Acesso em: 1 nov. 2019

GALVÃO, J. C. C. *et al.* Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 61, n. suppl, p. 819–828, dez. 2014.

GARCIA, B. I. L. *et al.* Filling in missing rainfall data in the Andes region of Venezuela, based on a cluster analysis approach. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria-RS, v. 14, n. 2, p. 225–233, 2006.

GE, T. *et al.* Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, Alemanha, v. 34, n. 3, p. 1043–1053, 1 maio. 2012.

GYGA, (Global Yield Gap Atlas). **Food security analysis: from local to global**. 2015. Disponível em: <http://www.yieldgap.org>. Acesso em: 1 jan. 2019.

HALDER, S. *et al.* Investigating the impact of land-use land-cover change on Indian summer monsoon daily rainfall and temperature during 1951-2005 using a regional climate model. **Hydrology and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 20, n. 5, p. 1765–1784, 2016.

HARSCH, M. A.; LAMBERS, J. H. R. Climate Warming and Seasonal Precipitation Change Interact to Limit Species Distribution Shifts across Western North America. **PLOS ONE**, EUA, v. 11, n. 7, p. 1–17, 22 jul. 2016.

HATTERSLEY, P. W. Characterization of C4 type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll: Bundle sheath area ratios. **Annals of Botany**, Inglaterra, v. 53, p. 163–179, 1 fev. 1984.

HE, Y. *et al.* Changes in daily and monthly rainfall in the Middle Yellow River, China. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 129, n. 1–2, p. 139–148, jul. 2017.

HUANG, B. *et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and Intercomparisons. **Journal of Climate**, EUA, v. 28, n. 3, p. 911–930, 14 out. 2014.

HUANG, J. *et al.* The spatial and temporal analysis of precipitation concentration and dry spell in Qinghai, northwest China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Inglaterra, v. 29, n. 5, p. 1403–1411, jul. 2015.

IBGE, (Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística). **Censo Agropecuário 2006: Brasil, grandes regiões e Unidades da Federação**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2019.

_____. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2015. Escala:1:1000000. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1. Acesso em: 1 jan. 2019

JACOMINE, P. K. T.; ALMEIDA, J. C.; MEDEIROS, L. A. R. **Levantamento Exploratório–Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. Recife-PE: [s.n.], 1973. V. 1. p.1-376.

JANUARIO, I. R.; MENEZES, R. H. N. De; BONFIM, O. E. T. Análise de risco climático para semeadura do arroz no Sul do Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 11, n. 4, p. 1241–1250, 22 out. 2018.

JUNIOR, A. A. *et al.* Zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza-CE, v. 38, n. 1, p. 109–117, 2007.

KAMAU, S. W.; KURIA, D. N.; GACHARI, M. K. Crop-land Suitability Analysis Using GIS and Remote Sensing in Nyandarua. **Journal of Environment and Earth Science**, v. 5, n. 6, p. 121–132, 2015.

KIHORO, J.; BOSCO, N. J.; MURAGE, H. Suitability analysis for rice growing sites using a multicriteria evaluation and GIS approach in great Mwea region, Kenya. **Springer Plus**, EUA, v. 2, n. 1, p. 265, jun. 2013.

KISAKA, M. O. *et al.* Rainfall Variability, Drought Characterization, and Efficacy of Rainfall Data Reconstruction: Case of Eastern Kenya. **Advances in Meteorology**, EUA, p. 1–16, 2015.

KOSGEL, J. R. **Rainwater harvesting systems and their influences on field scale soil hydraulic properties, water fluxes and crop production.** 2009.198 f. Thesis- University of KwaZulu-Natal, África do Sul, 2009.

KRESOVIC, B. *et al.* Irrigation as a climate change impact mitigation measure: An agronomic and economic assessment of maize production in Serbia. **Agricultural Water Management**, Holanda, v. 139, p. 7–16, jun. 2014.

LAN, E. C.; SANS, Luiz Marcelo Aguiar; SANTANA, D. P. Clima e solo. *In*: CRUZ, J. C. (Org.). **Cultivo do Milho**. Sistema de produção. 4. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. p. 1–3.

LANA, X. *et al.* Statistical distributions and sampling strategies for the analysis of extreme dry spells in Catalonia (NE Spain). **Journal of Hydrology**, Holanda, v. 324, n. 1, p. 94–114, 2006.

_____. Spatial and temporal patterns of dry spell lengths in the Iberian Peninsula for the second half of the twentieth century. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 91, n. 1–4, p. 99–116, 1 fev. 2008.

LENTH, R. **emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means.** [S.l.]: [s.n.], 2019. p.1-67.

LI, C.; WANG, R. Recent changes of precipitation in Gansu, Northwest China: An index-based analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 129, n. 1–2, p. 397–412, jul. 2017.

LI, Z. *et al.* The characteristics of wet and dry spells for the diverse climate in China. **Global and Planetary Change**, Holanda, v. 149, p. 14–19, 1 fev. 2017.

LINDA, A.; OLUWATOLA, A.; OPEYEMI, T.-A. Land Suitability Analysis for Maize Production in Egbeda Local Government Area of Oyo State Using GIS Techniques. **International Scholarly and Scientific Research & Innovation**, v. 9, n. 3, p. 294–299, 2015.

LIU, W. *et al.* Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4): Part II. Parametric and Structural Uncertainty Estimations. **Journal of Climate**, EUA, v. 28, n. 3, p. 931–951, 20 nov. 2014.

LIU, Z. *et al.* Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China. **Global Change Biology**, Inglaterra, v. 18, n. 11, p. 3441–3454, 1 nov. 2012.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009.

LOPES, J. R. F.; DANTAS, M. P.; FERREIRA, F. E. P. Variabilidade da precipitação pluvial e produtividade do milho no semiárido brasileiro através da análise multivariada. **Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Mato Grosso, v. 7, p. 77–83, jan. 2019.

LU, Y. *et al.* Large-scale screening for maize drought resistance using multiple selection criteria evaluated under water-stressed and well-watered environments. **Field Crops Research**, Holanda, v. 124, n. 1, p. 37–45, out. 2011.

LYRA, G. *et al.* Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 205–215, 2006.

LYRA, G. B. *et al.* Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 205–215, 2006.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K. Evaluating persistence and identifying trends and abrupt changes in monthly and annual rainfalls of a semi-arid region in Western India. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 128, n. 3–4, p. 689–708, maio. 2017.

MAGALHÃES, P. C. *et al.* **Fisiologia do Milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo., 2002. p.1-23.

MALDANER, L. J. *et al.* Exigência Agroclimática da Cultura do Milho. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Paraná, v. 3, p. 13–23, 25 jun. 2014.

MANIVASAGAM, V. S.; NAGARAJAN, R. Rainfall and crop modeling-based water stress assessment for rainfed maize cultivation in peninsular India. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 132, n. 1, p. 529–542, 1 abr. 2018.

MAPA, (Ministério Da Agricultura E Abastecimento). **Zoneamento Agrícola de Risco Climático: Instrumento de Gestão de Risco Utilizado pelo Seguro Agrícola do Brasil**. 2019. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>. Acesso em: 1 jan. 2019.

MARENGO, J. A. *et al.* Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, EUA, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, 2004.

_____. Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, EUA, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 12 jul. 2013.

_____. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, 2017.

MARIN, F. R.; SENTELHAS, Paulo Cesar; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, Piracicaba-SP, v. 57, p. 1–6, 2000.

MASUPHA, T. E.; MOELETSI, M. E.; TSUBO, M. Dry spells assessment with reference to the maize crop in the Luvuvhu River catchment of South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, Iglaterra, v. 92, p. 99–111, 2016.

MATOS, R. M. De *et al.* Variação climatológica da precipitação no município de Barbalha-CE. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 72 SOEA. , 2015, Fortaleza,Ce. **Anais...** Fortaleza,Ce: [s.n.], 2015.

MCCABE, G. J.; LEGATES, D. R.; LINS, H. F. Variability and trends in dry day frequency and dry event length in the southwestern United States. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 115, p. 1–8, 14 abr. 2010.

MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B. De; LIMA, R. A. F. De A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 14, n. 2, p. 181–186, fev. 2010.

MISHRA, A. K.; SINGH, Vijay P. Drought modeling – A review. **Journal of Hydrology**, Holanda, v. 403, n. 1, p. 157–175, 6 jun. 2011.

MONTEIRO, J. E. B. A. (Org). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília-DF: INMET, 2009. p.1-530.

MUPANGWA, W.; WALKER, S.; TWOMLOW, S. Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. **Journal of Arid Environments**, EUA, v. 75, n. 11, p. 1097–1104, 1 nov. 2011.

NEVES, Andre Luis Alves *et al.* Agronomic characteristics of corn cultivars for silage production. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina-PR, v. 36, n. 3, p. 1799–1806, 2 jul. 2015.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, EUA, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, 1996.

NOAA, (National Oceanic And Atmospheric Administration). **CPC - Climate Weather Linkage: El Niño Southern Oscillation**. 2019. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso>. Acesso em: 7 abr. 2019.

NUNES, E. L. *et al.* Zoneamento agroclimático da cultura do café para a Bacia do Rio Doce. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos-SP, v. 22, n. 3, p. 297–302, dez. 2007.

OLIVEIRA, J. B. De **Análise pluviométrica evapotranspiração de referência para dez localidades do estado do Ceará-Brasil**. 1996. Trabalho de graduação- Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1996.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda, 1981. p.1-441.

OSBORN, T. J. *et al.* Pattern scaling using ClimGen: monthly-resolution future climate scenarios including changes in the variability of precipitation. **CLIMATIC CHANGE**, Holanda, v. 134, n. 3, p. 353–369, fev. 2016.

- PARK, S. *et al.* Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. **Landscape and Urban Planning**, Holanda, v. 99, n. 2, p. 104–114, 28 fev. 2011.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.; SENTELHAS, P. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. **Agrometeorologia: Fundamentos E Aplicações Práticas**, 2002.
- PINHEIRO, E. *et al.* Relação Entre Duração dos Eventos de El Niño com as Condições do Atlântico Tropical e a Precipitação no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 497–508, set. 2018.
- PORTELA, G. L. F. *et al.* Zoneamento agroclimático da cultura da mangueira no Estado do Piauí. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal-SP, v. 30, n. 4, p. 1036–1039, dez. 2008.
- POSSAS, J. M. C. *et al.* Zoneamento agroclimático para a cultura do pinhão-mansão no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 16, n. 9, p. 993–998, set. 2012.
- PRAMANIK, M. K. Site suitability analysis for agricultural land use of Darjeeling district using AHP and GIS techniques. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 2, n. 2, p. 56, 29 mar. 2016.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S.l.]: Open Source Geospatial Foundation, 2018.
- QUADROS, P. D. De *et al.* Desempenho agrônômico a campo de híbridos de milho inoculados com *Azospirillum*. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 61, n. 2, p. 209–218, abr. 2014.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. p.1-2630.
- RICKENBACH, T. Seasonal Changes of Extremes in Isolated and Mesoscale Precipitation for the Southeastern United States. **Atmosphere**, Suiça, v. 9, n. 8, p. 309–324, 2018.
- RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a Corn Plant Grows. **Special Report**, Iowa State University of Science and Technology, v. 48, p. 1–25, jun. 1993.
- ROWHANI, P. *et al.* Climate variability and crop production in Tanzania. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 151, n. 4, p. 449–460, 15 abr. 2011.
- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3, p. 161–176, 1 jan. 1987.
- SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, EUA, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1 jun. 1977.
- SAATY, T. L. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, Alemanha, v. 13, n. 1, p. 1–35, 1 mar. 2004.

SAMANTA, S.; PAL, B.; PAL, D. K. Land Suitability Analysis for Rice Cultivation Based on Multi-Criteria Decision Approach through GIS. **International Journal of Science & Emerging Technologies**, v. 2, n. 1, p. 12–20, 2011.

SANGOI, L. *et al.* Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, Holanda, v. 79, n. 1, p. 39–51, dez. 2002.

SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2005. p.1-92.

SARTORI, A. A. Da C. **Análise multicritérios na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura)- Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

SENTELHAS, P. C. *et al.* The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, Inglaterra, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, nov. 2015.

SETTER, T.; FLANNIGAN, B.; MELKONIAN, J. Loss of kernel set due to water deficit and shade in maize: Carbohydrate supplies, abscisic acid, and cytokinins. **CROP SCIENCE**, EUA, v. 41, n. 5, p. 1530–1540, out. 2001.

SHE, D.; XIA, J. The spatial and temporal analysis of dry spells in the Yellow River basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Inglaterra, v. 27, n. 1, p. 29–42, 1 jan. 2013.

SHIRAZI, S. *et al.* Effects of different irrigation regimes and nitrogenous fertilizer on yield and growth parameters of maize. **International journal of physical sciences**, Nigéria, v. 6, p. 677–683, 2011.

SILVA, F. De A. S. E; RAO, T. V. R. Regimes pluviais, estação chuvosa e probabilidade de ocorrência de veranicos no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 6, n. 3, p. 440–446, dez. 2002.

SILVA, G.; SILVA, D. F. D. Análise da Influência Climática Sobre a Produção Agrícola no Semiárido Cearense (Analysis of Climate Influence on Agricultural Production in Semiarid Cearense). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 9, n. 2, p. 643–657, 19 mar. 2016.

SILVA, V. De P. R. Da *et al.* Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 17, n. 2, p. 180–189, 2012.

SIRANGELO, B. *et al.* Stochastic analysis of long dry spells in Calabria (Southern Italy). **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 127, n. 3–4, p. 711–724, fev. 2017.

SIVAKUMAR, B.; SINGH, V. P. Hydrologic system complexity and nonlinear dynamic concepts for a catchment classification framework. **Hydrology and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 16, n. 11, p. 4119–4131, 2012.

SOUZA, L. S. B. De *et al.* REQUERIMENTO HÍDRICO E COEFICIENTE DE CULTURA DO MILHO E FEIJÃO-CAUPI EM SISTEMAS EXCLUSIVO E CONSORCIADO. **Revista Caatinga**, Mossoró-RN, v. 28, n. 4, p. 151–160, 18 nov. 2015.

SOUZA, M. J. N. Bases Naturais e Esboço do Zoneamento Geoambiental do Estado do Ceará. *In*: SOUZA, M. J. N.; LIMA, L. C.; MORAES, J. O. (Org.). **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza-Ce: FUNCEME, 2000. p. 13–98.

STRIEDER, M. L. *et al.* Características de dossel e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 309–317, mar. 2008.

SUN, H. *et al.* Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat–summer maize rotation in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Holanda, v. 97, n. 8, p. 1139–1145, 1 ago. 2010.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Edição: 6^a ed. [S.l.]: Artmed, 2016. p.1-954.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Inglaterra, v. 38, p. 55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. V. 8. p.5-86.

TOLIKA, K.; MAHERAS, P. Spatial and temporal characteristics of wet spells in Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 81, n. 1, p. 71–85, 1 jun. 2005.

TONGWANE, M. I.; MOELETSI, M. E. Intra-seasonal rainfall variability during the maize growing season in the northern lowlands of Lesotho. **Theoretical and Applied Climatology**, Alemanha, v. 120, n. 3–4, p. 575–585, maio. 2015.

TRENBERTH, K. E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, EUA, v. 78, n. 12, p. 2771–2778, 1 dez. 1997.

USDA, (United States Department Of Agriculture). **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. EUA, 2019. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0219.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2019.

USGS, (United States Geological Survey)-Earth Explorer. **NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 3.0 Global 1 arc second Data Released over South America**. EUA, 2019. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 7 abr. 2019.

VALDÉS-PINEDA, R. *et al.* Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean–atmosphere circulation patterns. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 36, n. 8, p. 2979–3001, 30 jun. 2016.

VAN ITTERSUM, M. K. *et al.* Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Crop Yield Gap Analysis – Rationale, Methods and Applications**, v. 143, p. 4–17, 1 mar. 2013.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. **Zoneamento de aptidão climática do Estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos**. Recife-PE: Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária de Pernambuco, 2002. p.1-51.

WANG, W. *et al.* Spatial and temporal characteristics of changes in precipitation during 1957–2007 in the Haihe River basin, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Inglaterra, v. 25, n. 7, p. 881–895, 1 out. 2011.

WATTERSON, I. G.; CHUA, Z.-W.; HOPE, P. K. Extreme monthly rainfall over Australia in a changing climate. **JOURNAL OF SOUTHERN HEMISPHERE EARTH SYSTEMS SCIENCE**, Australia, v. 66, n. 4, p. 402–423, 2016.

WICKHAM, H. *et al.* **ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics**. [S.l.]: [s.n.], 2018. p.1-227.

WIJEWARDANA, C. *et al.* Interactive effects on CO₂, drought, and ultraviolet-B radiation on maize growth and development. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Suíça, v. 160, p. 198–209, 2016.

WOLLMANN, C. A.; GALVANI, E. Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual / Agro-climatic zoning: Research lines and characterization theoretical and conceptual. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, 4 jun. 2013.

XAVIER, T. De M. B. S. **Tempo de chuva : estudos climáticos e de previsão para o Ceará e Nordeste setentrional**. Fortaleza: ABC, 2001. p.1-478.

YING, X. *et al.* Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—A case study of Hunan Province, China. **Ecological Modelling**, Holanda, v. 209, n. 2, p. 97–109, 2007.

ZENG, W. *et al.* Changes in annual, seasonal and monthly precipitation events and their link with elevation in Sichuan province, China. **International Journal of Climatology**, Inglaterra, v. 36, n. 5, p. 2303–2322, 1 abr. 2016.

ZHAO, S.; DENG, Y.; BLACK, R. X. Warm Season Dry Spells in the Central and Eastern United States: Diverging Skill in Climate Model Representation. **Journal of Climate**, EUA, v. 29, n. 15, p. 5617–5624, 30 jun. 2016.

ZHAO, W.; LIU, B.; ZHANG, Zhihui Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. **Agricultural Water Management**, Holanda, v. 97, p. 215–223, 1 fev. 2010.

ZHAO, Y. *et al.* Changes in precipitation extremes over the Pearl River Basin, southern China, during 1960–2012. **Quaternary International**, Inglaterra, v. 333, p. 26–39, 30 maio. 2014.