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

**Classificação climática segundo Köppen e Thornthwaite e zoneamento
agrícola das culturas de milho e soja na União Econômica e Monetária do
Oeste Africano**

Marcela dos Santos Müller

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2015**

Marcela dos Santos Müller
Engenheira Agrônoma

**Classificação climática segundo Köppen e Thornthwaite e zoneamento agrícola das
culturas de milho e soja na União Econômica e Monetária do Oeste Africano**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2015

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

Müller, Marcela dos Santos

Classificação climática segundo Köppen e Thornthwaite e zoneamento agrícola das culturas de milho e soja na União Econômica e Monetária do Oeste Africano / Marcela dos Santos Müller. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
150 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Senegal 2. Guiné Bissau 3. Mali 4. Burkina Faso 5. Costa do Marfim 6. Benim
7. Togo 8. Níger 9. África 10. Alimentos 11. Agricultura I. Título

CDD 633.15
M958c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais, Antonio e Terezinha;

Aos meus sobrinhos, Guigo e Cisco.

Aos meus irmãos, sendo as meninas todas MM.

Ao meu Eric.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela acolhida, desde a graduação.

Ao mais que professor, orientador e amigo, Dr. Durval Dourado Neto e sua linda esposa, acima de tudo pela sua extrema generosidade e bom humor, em todos os momentos.

Ao querido Dr. Klaus Reichardt, que muito me auxiliou nesses anos de convívio.

Ao caríssimo Dr. Ole Wendroth, da University of Kentucky, que me adotou antes mesmo de me conhecer e me fez resgatar o sentimento de família.

Ao Dr. Ricardo de Oliveira Ferraz, amigo constante em minha trajetória acadêmica.

Ao Dr. Antonio Luiz Fancelli e ao Dr. Godofredo César Vitti, grandes amigos e que muito me ajudaram em minha formação profissional e pessoal.

A todos os professores que fizeram parte de minha formação e cujo ensinamento é refletido constantemente em minha vida.

Ao Programa de Pós Graduação em Fitotecnia, representado pelo Prof. Dr. Francisco Mourão e Luciane Aparecida Lopes Toledo, pela constante colaboração durante todos esses anos.

À mais que prestativa e profissional, Eliana Maria Garcia, que muito me auxiliou na revisão de todo material submetido.

Ao André Assunção, pelo profissionalismo na confecção dos mapas presentes nesse estudo.

À CAPES, processo BEX 0564/12-5, pela outorga de bolsa através do programa de doutorado sanduíche no exterior.

Aos queridos e essenciais colegas de pós graduação, de trabalho e de vida: Ana Paula Schwantes, Adilson Nunes da Silva, Paula Caroline Moura, Karla Vilaça, Simone Ferreira e Vânia Aversa; Sleem Ali, Sarah Förster, Ryoma Yoshika, Antonio Marchi, Jina Lim, Kang Hong e Sandy Berger.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE ABREVIATURAS.....	21
1 INTRODUÇÃO.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Estrutura fundiária	28
2.2 Divisão política.....	29
2.2.1 Benim	30
2.2.1.1 Características socioeconômicas	31
2.2.1.2 Agricultura e outros setores relevantes.....	32
2.2.1.2.1 Algodão (<i>Gossypium hirsutum</i>).....	32
2.2.1.2.2 Palma (<i>Elaeis guineensis</i>).....	33
2.2.1.3 Estrutura fundiária	34
2.2.1.4 Condições climáticas	34
2.2.2 Burkina Faso.....	35
2.2.2.1 Características socioeconômicas	35
2.2.2.2 Agricultura e outros setores relevantes.....	36
2.2.2.3 Estrutura fundiária	36
2.2.2.4 Condições climáticas	37
2.2.3 Costa do Marfim.....	38
2.2.3.1 Características socioeconômicas	38
2.2.3.2 Agricultura e outros setores econômicos relevantes.....	39
2.2.3.2.1 Cacau (<i>Theobroma cacao</i>).....	39
2.2.3.2.2 Borracha (<i>Hevea brasiliensis</i>) e palma (<i>Elaeis guineensis</i>)	40
2.2.3.3 Estrutura fundiária	40
2.2.3.4 Condições climáticas	41
2.2.4 Guiné Bissau.....	42
2.2.4.1 Características socioeconômicas	42
2.2.4.2 Agricultura e outros setores relevantes.....	43
2.2.4.3 Estrutura fundiária	43
2.2.4.4 Condições climáticas	44

2.2.5	Mali	45
2.2.5.1	Características socioeconômicas	45
2.2.5.2	Agricultura e outros setores econômicos	45
2.2.5.2.1	Algodão (<i>Gossypium hirsutum</i>)	46
2.2.5.2.2	Cana de açúcar (<i>Saccharum officinarum L.</i>).....	46
2.2.5.3	Estrutura fundiária.....	47
2.2.5.4	Condições climáticas.....	47
2.2.6	Níger.....	48
2.2.6.1	Características socioeconômicas	48
2.2.6.2	Agricultura e outros setores econômicos	49
2.2.6.3	Estrutura fundiária.....	49
2.2.6.4	Condições climáticas.....	49
2.2.7	Senegal	50
2.2.7.1	Características socioeconômicas	50
2.2.7.2	Agricultura e outros setores econômicos	51
2.2.7.2.1	Amendoim (<i>Arachis hypogaea</i>)	51
2.2.7.2.2	Cana de açúcar (<i>Saccharum officinarum L.</i>).....	52
2.2.7.2.3	Fertilizantes	52
2.2.7.3	Estrutura fundiária.....	53
2.2.7.4	Condições climáticas.....	53
2.2.8	Togo	54
2.2.8.1	Características socioeconômicas	54
2.2.8.2	Agricultura e outros setores relevantes	55
2.2.8.2.1	Algodão (<i>Gossypium hirsutum</i>)	55
2.2.8.2.2	Café (<i>Coffea arabica</i>) e cacau (<i>Theobroma cacao</i>).....	56
2.2.8.3	Estrutura fundiária.....	56
2.2.8.4	Condições climáticas.....	56
2.3	Caracterização do Índice de desenvolvimento humano	57
2.4	Caracterização ambiental	58
2.4.1	Restrições de natureza ambiental.....	58
2.4.2	Uso do solo.....	59
2.4.3	Índice de qualidade de solo	62
2.4.4	Utilização dos recursos hídricos	62
2.5	Produtividade potencial das culturas de milho e soja	64

2.6	A cultura de milho na UEMOA.....	65
2.7	A cultura de soja na UEMOA.....	67
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
3.1	Elaboração dos estudos de classificação climática e zoneamento agrícola.....	71
3.1.1	Definição da base de dados	72
3.1.2	Aquisição dos dados	72
3.2	Caracterização edáfica.....	73
3.2.1	Índice de qualidade de solo	73
3.2.2	Declividade.....	76
3.2.3	Ambiente de produção.....	77
3.3	Elementos do clima	77
3.3.1	Evapotranspiração potencial.....	78
3.4	Balanço hídrico.....	78
3.4.1	Balanço hídrico cíclico mensal.....	78
3.4.2	O critério de Thornthwaite e Mather	79
3.4.3	O método de Mendonça.....	80
3.4.4	Derivação da equação básica da estimativa de armazenamento de água no solo.....	81
3.5	Classificação climática por Köppen (1900)	82
3.6	Classificação climática por Thornthwaite (1948).....	85
3.6.1	Índice de umidade.....	85
3.6.2	Índice de aridez.....	85
3.6.3	Índice hídrico.....	85
3.6.4	Índice termal de verão	86
3.7	Produtividades potencial, atingível e real.....	88
3.7.1	Produtividade potencial	88
3.7.2	Produtividade atingível.....	91
3.7.3	Produtividade real.....	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.1	Caracterização edáfica.....	93
4.1.1	Classes de solos	93
4.1.2	Capacidade de água disponível.....	101
4.1.3	Relevo.....	102
4.1.4	Ambientes de produção para as culturas de milho e soja.....	104
4.2	Elementos do clima	105

4.2.1	Temperatura	105
4.2.2	Precipitação	111
4.3	Evapotranspiração	113
4.3.1	Evapotranspiração potencial	113
4.3.2	Evapotranspiração real	114
4.4	Balanco hídrico	115
4.4.1	Deficiência hídrica	115
4.4.2	Excedente hídrico	116
4.5	Classificação climática por Köppen (1900)	118
4.6	Classificação climática por Thornthwaite (1948)	120
4.7	Produtividade potencial das culturas de milho e soja	122
4.7.1	Produtividade potencial da cultura de milho	122
4.7.2	Produtividade potencial da cultura de soja	124
4.8	Produtividade atingível das culturas de milho e soja	130
4.8.1	Produtividade atingível da cultura de milho	130
4.8.2	Produtividade atingível da cultura de soja	131
4.9	Produtividade real das culturas de milho e soja	134
4.9.1	Produtividade real da cultura de milho	134
4.9.2	Produtividade real da cultura de soja	135
5	CONCLUSÕES	139
	REFERÊNCIAS	141

RESUMO

Classificação climática segundo Köppen e Thornthwaite e zoneamento agrícola das culturas de milho e soja na União Econômica e Monetária do Oeste Africano

A União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA) é uma organização de integração regional constituída por oito países da África Ocidental: Benim, Burkina Faso, Costa do Marfim, Guiné Bissau, Mali, Níger, Senegal e Togo. O presente trabalho tem por objetivos realizar: (a) a classificação climática segundo Köppen (1900) e Thornthwaite (1948), e (b) o zoneamento agrícola das culturas de milho e soja na região da UEMOA com base nos valores de (i) produtividade potencial (dióxido de carbono, temperatura, radiação fotossinteticamente ativa, fotoperíodo e genótipo), (ii) produtividade atingível, com elevado uso de insumos e tecnologia e (iii) produtividade real. A classificação climática de acordo com ambos os autores caracterizou a maior parte do território formado pela UEMOA como árido e em relação ao zoneamento agrícola, tem-se que a região da UEMOA é altamente indicada para o cultivo de milho e de soja, contudo, os valores médios de produtividade real referentes a esses cultivos são inferiores aos valores da produtividade atingível, indicando que o principal problema na região é o baixo nível de adoção tecnológica.

Palavras-chave: Senegal; Guiné Bissau; Mali; Burkina Faso; Costa do Marfim; Benim; Togo; Níger; África; Alimentos; Agricultura

ABSTRACT

Climate classification by Köppen and Thornthwaite and agricultural zoning for maize and soybean in the West African Economic and Monetary Union

The West African Economic and Monetary Union (also known as UEMOA from its name in french: *Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine*) is an organization of eight West African countries: Benin, Burkina Faso, Ivory Coast, Guinea-Bissau, Mali, Niger, Senegal and Togo. The following study has as main objectives: (a) climate classification by Köppen e Thornthwaite; and (b) agricultural zoning for maize and soybean in the UEMOA region based on (i) potencial yield (carbon dioxide, temperature, photosynthetically active radiation, photoperiod and genotype), (ii) attainable yield, under high inputs and technological adoption and (iii) actual yield. Climate classification according to both authors characterized most of the territory formed by UEMOA as arid and regarding to agricultural zoning, UEMOA region is highly suitable for growing maize and soybeans, however, average values of actual yield in relation to these crops are lower than those of attainable yield, indicating that the main problem in this region is the low level of technological adoption.

Keywords: Benin; Burkina Faso; Ivory Coast; Guinea-Bissau; Mali; Niger; Senegal; Togo; Africa; Foods; Agriculture

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa [A] da África destacando a União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA) (WIKIPÉDIA, 2014) e [B] referente à divisão política dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Togo, (vii) Benim e (viii) Níger.....30
- Figura 2 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Benim, no período de 1990 a 2009 (WORLD BANK, 2014).....35
- Figura 3 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Burkina Faso, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014).....38
- Figura 4 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) na Costa do Marfim, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)42
- Figura 5 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Guiné Bissau, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014).....44
- Figura 6 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Mali, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014).....48
- Figura 7 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Níger, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)50
- Figura 8 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Senegal, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014).....54
- Figura 9 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Togo, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014).....57
- Figura 10 - Índice de desenvolvimento humano (IDH) geral e por dimensão avaliada: educação, renda e saúde, para o ano base 2013, do Brasil e dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2015).....58
- Figura 11 – Zonas úmidas dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2013)59
- Figura 12 – Uso do solo nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2009)61

Figura 13 - Distribuição espacial das regiões com maior disponibilidade hídrica para irrigação nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (BNDES, 2013)	63
Figura 14 - Exemplo esquemático do critério de Thornthwaite e Mather (1955, 1957) para o início do balanço hídrico mensal cíclico ($L = 0$ no último mês da estação úmida)	80
Figura 15 - Exemplo esquemático do critério de Mendonça (1958) para início do balanço hídrico cíclico mensal para regiões áridas e semiáridas	80
Figura 16 - (A) Relação hipotética entre ET_a e A (THORNTHWAITE; MATHER, 1955, 1957) e (B) reservatório de água no solo	82
Figura 17 - Classes de solos dos países que pertencem à União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA): (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger pela classificação SiBCS (EMBRAPA, 2006) e WRB (FAO, 2006)	93
Figura 18 – Capacidade de água disponível (CAD, mm) dos solos dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger	101
Figura 19 - Relevo da superfície (altitude, m) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger	102
Figura 20 - Ambientes de produção dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (BNDES, 2013)	105
Figura 21 - Temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger, referente aos meses de [A] janeiro, [B] fevereiro, [C] março, [D] abril, [E] maio e [F] junho	107
Figura 22 - Temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger, referente aos meses de [A] julho, [B] agosto, [C] setembro, [D] outubro, [E] novembro e [F] dezembro	108

Figura 23 - Temperatura média anual do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger	109
Figura 24 - Temperatura mínima anual do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger	110
Figura 25 - Temperatura máxima anual do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger	111
Figura 26 - Precipitação média anual (mm.ano^{-1}) nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger	112
Figura 27 - Evapotranspiração potencial de referência (ET_0 , mm.ano^{-1}) média anual dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	114
Figura 28 - Evapotranspiração real média anual (ET_a , mm.ano^{-1}) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	115
Figura 29 - Deficiência hídrica média anual (DH , mm.ano^{-1}) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	116
Figura 30 - Excedente hídrico médio anual (EH , mm.ano^{-1}) nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	117
Figura 31 - Classes climáticas propostas por Köppen (1900) para os países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	118
Figura 32 - Classes climáticas propostas por Thornthwaite (1948) referente aos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	121
Figura 33 - Produtividade potencial (kg.ha^{-1}) da cultura de milho nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger.....	123

- Figura 34 - Produtividade potencial (kg.ha^{-1}) da cultura de soja nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger 126
- Figura 35 - Produtividade atingível (kg.ha^{-1}) da cultura de milho nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger 131
- Figura 36 - Produtividade atingível (kg.ha^{-1}) da cultura de soja nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger 132
- Figura 37 - Produtividade real (kg.ha^{-1}) da cultura de milho nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger 135
- Figura 38 - Produtividade real (kg.ha^{-1}) da cultura de soja nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes originais de cobertura do solo (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2009) e sua respectiva reclassificação (BONTEMPS et al., 2009)	60
Tabela 2 - Distribuição relativa (%) das classes de uso do solo (A, B, C e D) nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger: [A] alterado, [B] florestas tropicais, [C] savana e [D] dunas, cidades e corpos d'água (BICHERON et al., 2008)	61
Tabela 3 - Produção (mil t), área colhida (ha) e produtividade ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de milho nos países pertencentes à UEMOA: (i) Benim, (ii) Burkina Faso, (iii) Costa do Marfim, (iv) Guiné Bissau, (v) Mali, (vi) Níger, (vii) Senegal e (viii) Togo; UEMOA, África e Brasil, para o ano de 2013 (FAO, 2015)	66
Tabela 4 - Consumo total de nutrientes (t): nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) nos países pertencentes à UEMOA: (i) Benim, (ii) Burkina Faso, (iii) Costa do Marfim, (iv) Guiné Bissau, (v) Mali, (vi) Níger, (vii) Senegal e (viii) Togo; UEMOA, África e Brasil, para o ano de 2012 (FAO, 2015)	67
Tabela 5 - Produção (t), área colhida (ha) e produtividade ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de soja nos países membros da UEMOA: (i) Benim, (ii) Burkina Faso, (iii) Costa do Marfim, (iv) Guiné Bissau, (v) Mali, (vi) Níger, (vii) Senegal e (viii) Togo; UEMOA, África e Brasil, para o ano de 2013 (FAO, 2015)	68
Tabela 6 - Correlação aproximada entre o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiCBS (EMBRAPA, 2006) e o World Reference Base for Soil Resources – WRB (FAO, 2006) para classes de solos em primeiro nível e, em alguns casos, segundo nível de classificação (*) e unidades consideradas miscelânea (**). Adaptado de BNDES (2013), PRADO (2005) e INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE (2001)	74
Tabela 7 - Classes da aptidão pedológica para culturas anuais baseada no índice de qualidade do solo (IQS) BNDES (2013)	75
Tabela 8 – Classificação da aptidão pedológica (alta, média, baixa e inapta) por ordem de solo, com a correlação entre o World Reference Base for Soils Resources – WRB (FAO, 2006) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiCBS (EMBRAPA, 2006), baseado no índice de qualidade do solo (IQS), baseada em profundidade (P), drenagem (D) e estrutura-textura (T) do solo	76

Tabela 9 - Classes de aptidão pedológica (alta, média, baixa e inapta) para culturas anuais baseadas na declividade do solo (%)	77
Tabela 10 - Classes de aptidão de ambientes de produção (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, inapta) considerando IQS e declividade	77
Tabela 11 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo BWs, BSs, BWw, BSw, BWx' e BSx'	83
Tabela 12 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo Af, Am e Aw	84
Tabela 13 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo Cw, Cs, Cfs e Cf	84
Tabela 14 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo Dw e Df	85
Tabela 15 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo ET e EF	85
Tabela 16 - Classificação climática de Thornthwaite (1948) (A, B1, B2, B3, B4, C1, C2, D e E).....	87
Tabela 17 - Sufixos A', B'1, B'2, B'3, B'4, C'1, C'2, D' e E' e a', b'1, b'2, b'3, b'4, c'1, c'2 e d' referentes à classificação climática de Thornthwaite (1948)	88
Tabela 18 - Parâmetros empíricos dependentes da temperatura para o cálculo da variável auxiliar λ (kg.ha ⁻¹ .h ⁻¹) (GOUDRIAAN, 1982).....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Armazenamento de água no solo
A_c	Capacidade de água disponível
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
Cassim	Carbono assimilado
CFA	Comunidade Financeira Africana
Cinv	Chuva no inverno
CLETC	China Light Industrial Corporation for Foreign Economic and Technical Co-operation
Cmax	Chuva máxima
CMDT	Compagnie Malienne de Développement du Textile
Cmin	Chuva mínima
Co	Concentração base de CO ₂
CRs	Correlação da radiação solar
CSS	Compagnie Sucriere Senegalaise
Cta	Chuva total anual
Cver	Chuva no verão
Cx	Concentração atual de carbono
D _{FR}	Duração da fase reprodutiva
DH	Deficiência hídrica
DH _T	Deficiência hídrica anual
<i>e</i>	Eficiência de conversão
EH	Excedente hídrico
EH _T	Excedente hídrico anual
ETa	Evapotranspiração atual
ETo	Evapotranspiração potencial de referência
ETo _T	Evapotranspiração potencial de referência anual
EUR	Eficiência do uso da radiação
FSa	Fitomassa seca de parte aérea
GD	Graus-dia
H	Fotoperíodo médio do ciclo
HIV	Vírus da imunodeficiência humana

I	Índice térmico
Ia	Índice de aridez
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de colheita
IDH	Índice de desenvolvimento humano
Ih	Índice hídrico
IQS	Índice de qualidade do solo
Iu	Índice de umidade
Kc	Coeficiente de cultura
Ky	Coeficiente de sensibilidade
L	Negativo acumulado
Mcm	Mês de ocorrência da chuva máxima
Mtm	Mês de ocorrência da temperatura máxima
NSCT	Nouvelle Société Cotonnière du Togo
p	Poder refletor da cultura
P	Precipitação pluvial (chuva)
PA	Produtividade atingível
PCC	Paridade do poder de compra
PIB	Produto interno bruto
PP	Produtividade potencial
pR	Alocação de carboidrato
SiBCS	Sistema brasileiro de classificação de solos
SIG	Sistemas de informações geográficas
SOBEPALH	Société Beninoise du Palmier a Huile
SOCOMA	Société Cotonnière du Gourma
SOFITEX	Société Burkinabé des Fibers Textiles
SONAPRA	Société Nationale pour la Promotion Agricole
SOTOCO	Société Togolaise du Coton
SUKALA	Sucrier du Kala Supérieurl Société
T	Temperatura
Tb	Temperatura basal
TE	Eficiência termal de verão
Tma	Temperatura média anual

T_{max}	Temperatura máxima mensal
T_{min}	Temperatura mínima mensal
T_{mm}	Temperatura média mensal
u	Teor de água
UEMOA	União econômica e monetária do oeste africano ou Union économique et monétaire ouest-africaine
VBP	Microsoft visual basic
VE	Verão de Thornthwaite
WRB	World reference base for soil resources
ZCIT	Zona de convergência intertropical
Z_e	Profundidade efetiva do sistema radicular
ΔA	Variação do armazenamento
ϕ	Latitude
Φ	Fator de cultura (soja e milho)
φ	Fator de depleção por qualidade de solo e relevo
Ψ	Massa bruta de carboidrato total
Θ_f	Capacidade de campo
Θ_w	Ponto de murcha permanente

1 INTRODUÇÃO

A União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA) é uma organização de integração regional estabelecida para promover a integração econômica entre os oito países da África Ocidental (Benim, Burkina Faso, Costa do Marfim, Guiné Bissau, Mali, Níger, Senegal e Togo) que compartilham o uso da moeda Franco CFA (Comunidade Financeira Africana) e se encontram, sem exceção, no quartil inferior do Índice de Desenvolvimento Humano. A UEMOA foi criada em 10 de janeiro de 1994, na cidade de Dakar, capital do Senegal, por um tratado assinado pelos Chefes de Estado e de Governo do Benim, Burkina Faso, Costa do Marfim, Mali, Níger, Senegal e Togo. Em 2 de maio de 1997, a Guiné Bissau tornou-se o oitavo Estado membro da UEMOA (WIKIPEDIA, 2014).

O presente trabalho foi baseado no Estudo de Viabilidade de Produção de Biocombustíveis na UEMOA, Chamada Pública de Prospeção BNDES/FEP nº 02/2011 (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES, 2013), que foi motivado pela importante contribuição que os biocombustíveis podem propiciar para o aumento da segurança energética e redução das emissões de gases de efeito estufa em nível global, bem como implementar a produção bioenergética naquela região, aumentando a atratividade a investimentos externos agroindustriais de porte, o que possibilitaria a abertura de novas frentes de trabalho capazes de transformar o cenário econômico e social de uma das regiões mais pobres do mundo.

A utilização parcial dos dados apresentados pelo BNDES (2013), principalmente no que tange ao mapeamento das condições do entorno agrícola e ambiental, permitiu a classificação climática dos países-membros, bem como o estudo do zoneamento agrícola para as culturas de milho e soja, a fim de oferecer subsídio do ponto de vista da produção de alimentos, considerando que todos os países do citado bloco econômico necessitam importar alimentos básicos para subsistência e geração de energia.

O presente trabalho tem por objetivos (a) classificação climática por Köppen (1900) e Thornthwaite (1948) e (b) realização do zoneamento agrícola das culturas de milho e soja dos países da UEMOA com base nos valores de: (i) produtividade potencial (dióxido de carbono, temperatura, radiação fotossinteticamente ativa, fotoperíodo e genótipo), (ii) produtividade atingível com elevado uso de insumos e tecnologia e (iii) produtividade real.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA) é uma organização de integração regional constituída por oito países da África Ocidental, a saber: Benim, Burkina Faso, Costa do Marfim, Guiné Bissau, Mali, Níger, Senegal e Togo. Os países-membros apresentam um PIB conjunto de 146 bilhões de dólares, sendo que todos, sem exceção estão no quartil inferior de IDH do mundo. A UEMOA compreende aproximadamente 100 milhões de habitantes, oriundos de uma mistura de povos Africanos que guardam em comum, exceto pela Guiné Bissau, um histórico de colonização francesa. A herança mais característica desta colonização é a adoção do francês como idioma oficial (apenas Guiné Bissau foge à regra, por apresentar o português como idioma oficial). A orientação religiosa varia entre países e até mesmo entre vilas, com a adoção do Cristianismo mais concentrada ao sul, o Islamismo ao norte e crenças animistas locais como o vodu, distribuídas igualmente por toda a região (WIKIPEDIA, 2014).

A UEMOA engloba uma área de aproximadamente 342 milhões de hectares, de grande diversidade biofísica envolvendo desde condições de alta pluviosidade anual de cobertura original florestal até condições de clima desértico típico da transição subsaariana.

Os países são, em geral, pouco urbanizados, com média de apenas 36% da população vivendo em áreas urbanas; o mínimo se encontra no Níger, com 18% e máximo na Costa do Marfim, com 51%. Todos os países-membros da UEMOA necessitam importar alimentos para suprir suas necessidades (BNDES, 2013).

A infraestrutura logística tem investimentos abaixo do necessário, rede rodoviária insuficiente e malhas ferroviárias não integradas. A mão de obra dos países apresenta uma produtividade muito baixa, mesmo para padrões da África subsaariana. A baixa produtividade gera um problema de falta de mão de obra exacerbado no campo, o que pode ter, no futuro, consequências ainda piores devido o êxodo rural que começa a se manifestar nas camadas mais jovens da população. A baixa qualificação da mão de obra também é um problema para a indústria local, mas com menor intensidade, devido a menor demanda de mão de obra nesse setor.

No setor agrícola, o principal problema é a garantia da segurança alimentar da população, tendo em face que a agricultura local emprega baixa tecnologia e tem como principal objetivo a subsistência familiar. Os governos dependem da importação de produtos alimentícios e commodities para atendimento das necessidades básicas da população. É evidente a necessidade premente do aumento da produtividade da terra e da mão de obra

local, a fim de garantir aos países maior estabilidade do ponto de vista da disponibilidade de alimentos, bem como reduzir a dependência de importação e o endividamento externo.

Outro grande desafio enfrentado nas atividades agrícolas é a informalidade nos registros de terras. A posse de terras é comumente cedida à população pelo uso costumeiro, sob a influência e concordância dos líderes locais, porém, não há documentação ou registros centralizados que garantam segurança jurídica na transferência de posse. Ainda, por se tratar de pequenas propriedades existe a dificuldade de se implementar agricultura em áreas mais extensas, devido dificuldade de acessar uma quantidade de terra contígua suficiente. Esse tipo de estrutura fundiária não garante segurança aos investidores estrangeiros.

Na política, os países-membros da UEMOA sofreram crises ou golpes de Estado ao longo do tempo e, atualmente, o desenvolvimento de cada um está diretamente relacionado a sua estabilidade política, refletida no nível de investimento, no crescimento da produtividade e na evolução dos indicadores sociais.

O fornecimento de energia elétrica nos países da UEMOA varia de 9 a 47% para a população geral e de zero a 22% na zona rural; índice que é função da baixa capacidade de geração em alguns países e da baixa confiabilidade no suprimento devido oscilações de tensão na rede. A inoperância com relação ao fornecimento de energia elétrica é um outro fator que corrobora para a baixa atratividade aos investimentos industriais na região. Nenhum dos países da UEMOA apresenta taxa de eletrificação superior a 50% (BNDES, 2013).

2.1 Estrutura fundiária

A estrutura fundiária dos países da UEMOA e do Oeste da África apresenta diversos fatores em comum: (i) forte influência de aspectos costumeiros e de líderes locais na definição das propriedades e na transferência destas; (ii) pouca influência da legislação, pois as leis são do período pós-independência dos países (décadas de 60 e 70) e não refletem a realidade do país ou mesmo no caso de novas leis, estas normalmente não são cumpridas ou o cumprimento é inadequado e (iii) grande fragmentação da terra em pequenas propriedades, com enfoque na produção de subsistência.

Todos os países do acordo enfrentam algum nível de insegurança jurídica com relação à propriedade de terras. Apesar de, em alguns países, a legislação ser mais nova, algumas dificuldades podem ainda ser relacionadas, a saber: (i) legitimação ou ratificação da posse habitual das terras pelas comunidades locais (positivação do direito) e desenvolvimento de sistema de cadastro de terras dos países que inclua formas razoáveis de registrar terras pertencentes a estes grupos; (ii) implementação e/ou complementação das leis já

promulgadas; e (iii) criação e desenvolvimento de órgãos/instituições de regularização fundiária e aperfeiçoamento de um sistema consistente e unificado de registro de terras (BNDES, 2013; BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014a, 2014d, 2014f e 2014g).

2.2 Divisão política

A Figura 1 ilustra a localização geográfica e a divisão política dos países que pertencem à União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA): Benim, Burkina Faso, Costa do Marfim, Guiné Bissau, Mali, Níger, Senegal e Togo, segundo Thematic Mapping (2009) e WIKIPEDIA (2014).

Figura 1 - Mapa [A] da África destacando a União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA) (WIKIPÉDIA, 2014) e [B] referente à divisão política dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Togo, (vii) Benim e (viii) Níger

2.2.1 Benim

A República do Benim está localizada entre 6° 10' e 12° 25' de latitude norte e entre 0° 45' e 3° 55' de longitude leste (FAO, 2015).

2.2.1.1 Características socioeconômicas

O Benim é um país tropical, localizado na região subsaariana; apresenta 10,1 milhões de habitantes e abrange uma área de 112.620 km². A capital constitucional é a cidade de Porto Novo, mas Cotonou é a sede do governo, maior cidade e principal porto do país; é banhado ao sul pelo Oceano Atlântico, com região costeira de 121 km (WIKIPÉDIA, 2014).

A densidade populacional é de 89,7 hab.km⁻², contudo com disparidades significativas entre o sul superlotado (entre 220 e 442 hab.km⁻²), o centro moderadamente povoado (59 hab.km⁻²) e o norte, pouco povoado (entre 24 e 28 hab.km⁻²). Mais da metade da população está concentrada no sul, região litorânea, que representa menos de 11% do território nacional; 45% da população beninense é urbana (FAO, 2015).

Dados do United Nations Development Programme (2015), apontam que em 2013, o IDH do Benim foi de 0,476, valor que é considerado alto para a UEMOA, mas que ocupa a posição 165º no mundo. As religiões tradicionais africanas são adotadas por 47% da população, seguidas pelo Cristianismo (38%) e Islamismo (21%) (WIKIPÉDIA, 2014; BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014a).

O Benim fez parte da região denominada como “Costa dos Escravos” devido ao alto número de inimigos de guerra capturados e embarcados em navios negreiros para o Novo Mundo, como parte do Mercado Transatlântico de Escravos, no século XVII.

O Benim apresenta PIB de 15 bilhões de dólares, taxa de crescimento de 4,4% ao ano, baseado fortemente no setor agrícola e no porto de Cotonou. O PIB per capita também se apresenta em ascensão, chegando no ano de 2012 em US\$ 1.619; o país apresenta grande importância portuária como escoadouro dos países vizinhos que não têm acesso ao mar. Sua principal fonte de energia renovável é o carvão vegetal, que tem uso prioritário no aquecimento de alimentos, com relação aos derivados de petróleo, é país dependente de importação. Na agricultura, o cultivo do algodão é responsável por aproximadamente 10% do PIB e 80% das receitas de exportação; cultivos de milho, feijão, arroz, amendoim, caju, abacaxi e mandioca são a base da agricultura de subsistência local; os solos potencialmente aráveis são estimados em 7 milhões de hectares, ou quase 63% da área total de seu território (BNDES, 2013; FAO, 2015). Apresenta áreas de preservação da floresta de savana; florestas ripárias e da fauna, mantidas como parques nacionais, altamente atrativas ao turismo.

2.2.1.2 Agricultura e outros setores relevantes

O cultivo de algodão se destaca no cenário econômico do Benim, representando até 80% das exportações e 15% do PIB. O óleo de palma também tem destaque e já foi o mais importante produto agrícola de exportação, mas tem perdido espaço para o algodão nas últimas décadas (BNDES, 2013).

No setor de serviços, o principal destaque concerne à atividade de transporte, principalmente relacionado às reexportações. O país, além de costeiro, está localizado ao lado da Nigéria – segunda maior economia da África – e de vários países sem acesso ao mar, incluindo Burkina Faso e Níger. Desta forma, o Benim funciona como um polo logístico, todavia, o comércio de reexportação tem efeitos ambíguos sobre o desenvolvimento econômico do Benim pois, apesar das atividades comerciais serem de grande importância para a economia do país, representando até 25% das receitas do governo e 20% do PIB, essas dependem fortemente da política econômica na Nigéria (WORLD BANK, 2009).

2.2.1.2.1 Algodão (*Gossypium hirsutum*)

Os países do Oeste Africano, devido ao clima e solo favoráveis, apresentam uma forte vantagem competitiva global na produção de algodão pois, adicionalmente ao fato da adoção da colheita manual proporcionar melhor qualidade da pluma quando comparada à colheita mecanizada, tem-se que os custos de produção são inferiores aos dos países desenvolvidos.

O agronegócio do algodão domina a economia formal do Benim (agricultura, indústria e comércio exterior), representando até 80% das exportações e 15% do PIB. O setor da cotonicultura contribui direta e indiretamente para a subsistência de cerca de 60% da população do Benim (BNDES, 2013).

Em todo o Oeste Africano o algodão surgiu como commodity nos anos 40 e 50, sob a direção de empresas estatais francesas. Após a independência do Benim em 1960 até a década de 80, o agronegócio do algodão nesse país apresentou-se cíclico: cresceu fortemente para, em seguida, sofrer revezes devido falta de política agrícola no setor; em 1982, com o estabelecimento por parte do governo da SONAPRA (Société Nationale pour la Promotion Agricole) a produção se expandiu novamente. Contudo, os preços pagos aos agricultores estavam muito abaixo do mercado internacional e, apesar da expansão da área plantada, a produtividade voltou a entrar em estagnação (BNDES, 2013).

Atualmente, o cultivo do algodoeiro ocupa área de 210 mil hectares, com produtividade de aproximadamente 1,2 t.ha⁻¹, em propriedades com área média de 1 a 2 hectares. O setor industrial conta com 18 plantas de descaroçamento, uma dúzia de

importadores de insumos (fertilizantes e defensivos) e dois produtores de óleo. Além disso, uma série de serviços auxiliares, tais como transporte e finanças, giram em torno da agroindústria algodoeira (BNDES, 2013).

2.2.1.2.2 Palma (*Elaeis guineensis*)

A palma faz parte da história do Benim e da ocupação da mão de obra feminina nesse país. Atualmente, cerca de 400 mil hectares de palma nativa e 30 mil hectares de cultivada são exploradas no Benim; a maior parte da área pertence à estatal SOBEPALH. A história da palma no Benim repete o ciclo de auge seguido pelo abandono do setor, comum a vários outros cultivos em outros países (WORLD RAINFOREST MOVEMENT, 2011).

Com o principal objetivo de servir como matéria-prima para a produção de sabonetes nos países colonizadores, as primeiras plantações de palma, em larga escala, foram estabelecidas no século XIX. Nessa época, o cultivo ocupava cerca de 500 mil hectares e a extração do óleo era feita manualmente, apenas por mulheres. O primeiro ciclo de industrialização do setor se deu nos anos 50, liderado e administrado pelo governo colonial, consistindo em investimentos em grandes plantas de processamento.

Uma nova expansão do setor ocorreu nos anos 60, com a instalação de novas plantas de processamento e plantio de 30 mil hectares de palma, o que só foi possível através da apropriação de áreas de 17 mil pequenos fazendeiros, que foram remunerados pela terra concedida, com um tipo de arrendamento. A privatização do setor se deu em 1990, quando o governo iniciou um programa de fomento visando dar maior eficiência aos processos, através do qual facilitou a compra de equipamentos e subsidiou a produção de mudas por viveiros particulares, mas sempre com controle de preços. Essa nova fase do setor possibilitou que produtores mais experientes adquirissem novas áreas agrícolas em outras regiões do país (BNDES, 2013).

A mão de obra feminina ainda é importante parte do agronegócio da palma: em 2000, 83% da demanda interna de óleo era suprida pelo trabalho artesanal de mulheres que operavam em pequena escala. Adicionalmente, 7% dessa demanda era suprida por unidades industriais e os outros 10%, por importações (WORLD RAINFOREST MOVEMENT, 2011).

Atualmente, a produção de óleo de palma no Benim é pouco representativa no agronegócio mundial pois a produção do fruto, em 2011, foi de 295 mil toneladas, representando menos de 0,1% da produção mundial e cerca de 14% da produção da UEMOA, que é liderada pela Costa do Marfim, que representa 70% da produção, segundo dados da FAO (2014).

2.2.1.3 Estrutura fundiária

Ocorrência comum a outros países pertencentes à UEMOA, a divisão de terras no Benim é bastante fragmentada, sendo 3,3 hectares o tamanho médio das propriedades. Ainda que a questão da posse da terra tenha sido definida por lei criada em 2007, não houve efetivamente a implementação dessa pois a corrupção e as tradições locais continuam determinando a gestão da terra; as mulheres são tradicionalmente excluídas do direito à propriedade na maior parte dos grupos étnicos. Ainda, o direito à propriedade por parte da população mais pobre é sempre mais vulnerável às intervenções, enquanto que grandes proprietários por vezes se beneficiam dessas (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014a).

2.2.1.4 Condições climáticas

Benim é caracterizado por duas zonas climáticas bem definidas separadas por uma zona de transição. A área sul apresenta duas estações de chuva por ano e é úmida e quente; com uma longa estação seca de dezembro a março, quando o “harmattan”, vento quente e seco, sopra do nordeste em direção ao sudeste. A precipitação média anual na região costeira atinge 1300 mm, dividida em duas estações chuvosas: a primeira e mais importante vai de março a julho, a segunda apresenta-se mais curta e com chuvas menos intensas, de setembro a novembro. Ocorrem também duas estações secas, a principal de dezembro a abril; de julho a setembro ocorre a segunda, contudo um pouco mais curta e com temperaturas mais amenas (Figura 2). A área ao norte é caracterizada por apenas uma estação chuvosa. O centro do país tem um clima de transição. A precipitação está entre 700 e 1.300 mm de chuva por ano, distribuídos em 70 a 110 dias no ano; caracterizada por variações espaciais e temporais que dificultam a adoção da agricultura de sequeiro. As temperaturas máximas médias de todo o país podem variar entre 28°C e 33,5°C, enquanto que as médias mínimas oscilam entre 24,5°C e 27,5°C. Os valores médios de evapotranspiração, calculados utilizando a fórmula de Penman, situam-se entre 3,7 mm e 4,8 mm.dia⁻¹ (FAO, 2015).

Temperaturas e umidade são elevadas na faixa costeira, a temperatura média máxima em Cotonou é de 31°C e a mínima de 24°C.

Figura 2 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Benim, no período de 1990 a 2009 (WORLD BANK, 2014)

2.2.2 Burkina Faso

Burkina Faso está localizado entre as latitudes 9° e 15° norte e as longitudes 6° oeste e 3° leste (FAO, 2015).

2.2.2.1 Características socioeconômicas

Burkina Faso é a capital da UEMOA. É um país tropical continental cujo território de 274 mil km² apresenta 33% com possibilidade de cultivo, o que perfaz 9 milhões de hectares. O país conta ainda com 390 mil hectares de parques nacionais e 880 mil hectares de reserva florestal (FAO, 2015); a população total de 16,5 milhões de habitantes apresenta densidade populacional de 60 hab.km⁻² e 27% é considerada urbana. Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH de Burkina Faso para o ano de 2013 foi de 0,388, um dos mais baixos do mundo, ocupando a 181ª posição; o crescimento apresenta-se por volta de 3,0% ao ano (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014b).

Ouagadougou é a capital e a maior cidade de Burkina Faso, que apresenta 61% da população islâmica e 23% adepta ao Cristianismo, porém, as religiões consideradas crenças tribais são seguidas por quase toda população. No ano de 2001, aproximadamente 6,5% dos adultos do país foram diagnosticados como soropositivos para HIV; a expectativa de vida em 2002 era de 43 anos; 75% da população burquinense é considerada analfabeta (FAO, 2015).

O PIB de Burkina Faso é de 22 bilhões de dólares, com crescimento de 6,5% ao ano nos últimos anos, impulsionado pelo setor agrícola que perfaz aproximadamente 31% do PIB. O PIB per capita, em 2012, foi de US\$ 1302, um dos mais baixos do mundo. A região norte do país é desértica, mas a maior parte de Burkina Faso central fica num planalto baixo,

coberto por savanas, com altitude de 200 a 300 metros, apresentando reservas de caça e parques nacionais (BNDES, 2013).

2.2.2.2 Agricultura e outros setores relevantes

A agricultura e pecuária representam 31% do PIB, 60% das exportações e 92% da mão de obra empregada no país; a área cultivada é de 4,4 milhões de hectares (FAO, 2015).

Burkina Faso é atualmente o maior produtor de algodão na África subsaariana que era, até recentemente, o principal produto de exportação do país, empregando quase cerca de um quarto da população. Sorgo e milho são cultivos também de elevada importância, contudo o setor de mineração ultrapassou a agricultura em peso significativo para a economia local quando o ouro tornou-se o principal produto de exportação do país (BNDES, 2013).

O agronegócio do algodão, em Burkina Faso, é controlado pelo estado através da Société Burkinabé des Fibers Textiles (SOFITEX), empresa agroindustrial e comercial envolvida em todo o ciclo produtivo do algodão, desde o plantio, beneficiamento e exportação da fibra. A SOFITEX foi fundada em 1979 e até hoje é uma das maiores empresas de algodão na África, tendo mantido monopólio sobre o setor algodoeiro em Burkina Faso até 2004.

O domínio da SOFITEX se estende por área de 550 mil hectares cultivados com algodão, o que envolve cerca de 3 milhões de produtores rurais, representando 25% do total da população da Burkina Faso.

Atualmente compartilham o mercado algodoeiro com a SOFITEX as empresas FASO COTTON e SOCOMA. No entanto, a queda acentuada no preço dessa *commodity* nos últimos anos tornou o setor mais vulnerável, levando a um acúmulo de enormes perdas e a recapitalização das empresas de descaroçamento, que fez com que a participação do governo na SOFITEX aumentasse de 35% para 65% (AFRICAN DEVELOPMENT BANK, 2010).

2.2.2.3 Estrutura fundiária

O direito de propriedade e as regras referentes à aquisição de propriedades em Burkina Faso são adequadamente definidas por lei, contudo, a falta de robustez judicial prejudica sua implementação (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014b).

Burkina Faso apresenta características bem definidas diferenciando as regiões norte e sul do país: o norte é uma região mais árida, com domínio de atividades pastoris e o sul, mais úmido, com propriedades familiares com área média de 3 a 6 hectares. Nos últimos anos, o poder das tradições locais na estrutura fundiária tem perdido força, visto o aumento das transações de compra e venda, ao invés do tradicional sistema hereditário e a escassez de

terras. Dessa forma, a possibilidade legal da posse da terra apresenta tendência para a maior centralização fundiária no país (BNDES, 2013).

Existem cerca de 1,3 milhões de propriedades rurais em Burkina Faso, sendo que em 87% dessas são exercidas atividades de subsistência e/ou pecuária de baixa produtividade. A baixa produtividade da agricultura e da pecuária colocam pressão sobre os recursos naturais frágeis, especialmente em áreas densamente povoadas do planalto central (FAO, 2015).

2.2.2.4 Condições climáticas

Burkina Faso é caracterizada pela alternância de estação seca e chuvosa, cujo ritmo é determinado pela zona de convergência intertropical (ZCIT): a estação chuvosa é maior no sul, com precipitação entre 600 e 900 mm.ano⁻¹ e a estação seca, representada pelo sopro do “harmattan”. A estação chuvosa dura aproximadamente quatro meses, de maio/junho a setembro (Figura 3) e apresenta-se mais curta no norte do país.

A temperatura média varia sazonalmente entre 27°C e 30°C no sul e 22°C e 33°C no norte. O país é dividido em três zonas, de acordo com o clima e essas se sobrepõem às unidades fitogeográficas: (i) região do Sudão do sul: a precipitação média é entre 900 e 1.200 mm.ano⁻¹, distribuídos por seis a sete meses, e está localizado ao sul da latitude 11° 30'; (ii) região do Sudão do norte: tem precipitação média entre 600 e 900 mm.ano⁻¹ ao longo de quatro a cinco meses, e está localizado entre os paralelos 11°30' e 14°00' N; com presença de vegetação arbórea mais densa e cobertura vegetal contínua, contudo, mais sujeita a pressão humana; e (iii) zona do Sahel: está a 14°00' N, com precipitação média entre 300 e 600 mm.ano⁻¹, concentradas em três meses; a vegetação apresenta-se composta por arbustos (FAO, 2015).

Figura 3 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Burkina Faso, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.2.3 Costa do Marfim

Costa do Marfim está localizado entre as latitudes 4° e norte e as longitudes 2° e 9° oeste (FAO, 2015).

2.2.3.1 Características socioeconômicas

A Costa do Marfim é um país tropical, sendo a região norte desértica e a região sul banhada pelo Atlântico. Possui área de 322 mil km², com população de 16,9 milhões de habitantes em 2004 dos quais 45% é urbana; densidade populacional de 52 hab.km⁻² e crescimento de 2,3% ao ano (FAO, 2015).

Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH da Costa do Marfim em 2013 foi de 0,452, considerado alto para a UEMOA mas um dos mais baixos do mundo (171^a posição). O Islamismo e Cristianismo são as principais religiões locais, seguidas por aproximadamente 39 e 33% da população, respectivamente (BNDES, 2013; BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014c).

A expectativa de vida do marfinense era de apenas 41 anos, em 2003, em parte devido à prevalência do vírus do HIV em 9,7% da população com idades entre 15 e 49 anos. A taxa de alfabetização é de 49%, experimentando uma forte disparidade entre os sexos pois 60% dos homens são alfabetizados, comparado apenas a 39% das mulheres (FAO, 2015).

O PIB da Costa do Marfim é de US\$ 36 bilhões, apresentando crescimento de 14% em 2012, baseado fortemente no setor de serviços, principalmente o portuário. A instabilidade política da região devida a uma sucessão de golpes de estado culminou na guerra civil em 2002 e colocou o país numa classificação de zona de alto risco de segurança. Apesar do

deterioramento político-administrativo, a Costa do Marfim é o único país da UEMOA com superávit na balança comercial devido às exportações de cacau, café e petróleo. A presença de empresas multinacionais indica que o governo local tem conseguido conquistar investidores estrangeiros, e os riscos políticos diminuíram muito quando comparados ao período de crise. Dessa forma, o país começa a esboçar características desejadas para receber investimentos externos (BNDES, 2013).

2.2.3.2 Agricultura e outros setores econômicos relevantes

A base econômica da Costa do Marfim está assentada no desenvolvimento da agricultura que contribui com quase 28% do PIB em 2003, gerando cerca de 60% das receitas de exportação e ocupando 45% da força de trabalho, segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015). O país apresenta-se como o maior exportador de cacau do mundo, mas outros cultivos também têm-se destacado, como castanha de caju, café, óleo de palma, borracha e abacaxi (WORLD BANK, 2009).

Estima-se que os solos aráveis perfazam 21 milhões de hectares ou seja, 65% da área total do território da Costa do Marfim, todavia, em 2002, a área cultivada não atingiu 7 milhões de hectares (FAO, 2015).

O setor agrícola foi o principal motor do crescimento da Costa do Marfim durante os anos de prosperidade econômica, ou seja, desde a independência até o início de 1980, com o crescimento espetacular das culturas promovidas pelo Estado (cacau, café, algodão, banana, abacaxi, óleo de palma e borracha). A agricultura é agora mais diversificada, com ênfase na produção de alimentos.

Segundo a FAO (2015), existem dois tipos de operadores envolvidos no setor agrícola: (i) as empresas agroindustriais, com grandes plantações mecanizadas e métodos de agricultura intensiva; e (ii) os agricultores individuais que formam a maior parte da população rural. Sistemas de produção praticados por estes pequenos agricultores são baseados em cultivo manual de baixos rendimentos, focados fortemente no binômio café-cacau.

2.2.3.2.1 Cacau (*Theobroma cacao*)

A produção média de cacau na Costa do Marfim é de 1,3 milhão de toneladas de sementes por ano, o que perfaz 40% de todo cacau produzido no mundo; cultivado por cerca de 700 mil pequenos produtores é considerado o pilar central do agronegócio desse país. Contudo, ao longo da última década, não houve incentivos ao setor, além da pesada tributação e falta de apoio governamental, o que ocasionou estagnação na produção e empobrecimento

dos produtores rurais. O cenário atual é representado por árvores antigas, baixas produtividade e qualidade dos frutos e problemas fitossanitários; a maior parte dos produtores encontra-se abaixo da linha de pobreza e as organizações de produtores estão sem acesso a crédito. Essa situação está gerando, além de problemas sociais, a migração do cultivo de cacau em favor de culturas mais rentáveis, como, por exemplo, a borracha (WORLD BANK, 2009; BNDES, 2013).

Em 2011, o governo da Costa do Marfim reformulou o modelo de gestão do setor, lançando um programa para melhoria dos níveis de produtividade rural, o que pode gerar, num futuro próximo, aumento no rendimento e na qualidade do produto. A Cargill é a maior processadora de cacau do país; conta com uma unidade de processamento localizada em Abidjan e postos de recolhimento próximos aos centros produtores, ainda efetua compra de 90% de suas sementes em cooperativas de pequenos produtores (BNDES, 2013).

2.2.3.2.2 Borracha (*Hevea brasiliensis*) e palma (*Elaeis guineensis*)

A Costa do Marfim é o maior exportador de borracha e de óleo de palma de todo continente Africano; a produção de borracha foi de 240 mil toneladas em 2012. As duas cadeias de valor são bem estruturadas e os cultivos coexistem em áreas de pequeno e médio porte - que respondem por 60% da produção total, e plantações industriais (BNDES, 2013). Ao longo dos últimos anos, a elevação dos preços internacionais da borracha e do óleo de palma impulsionou a expansão desses setores no país.

A expectativa de expansão das áreas para ambos os cultivos é em plantações de pequeno e médio porte, no entanto, o elevado custo do estabelecimento dessas (atingindo até mil dólares por hectare) e a falta de financiamento de longo prazo representam limitações para os pequenos agricultores. A atual expansão das plantações está sendo financiada pelo setor privado, com capital proveniente principalmente de grandes agricultores e da classe média urbana (BNDES, 2013).

2.2.3.3 Estrutura fundiária

Em 2000, a nova Constituição da Costa do Marfim passou a garantir o direito de propriedade a todos os cidadãos, contudo, a propriedade improdutiva é considerada propriedade do Estado e a produtiva segue o sistema tradicional de herança; ou seja, o primeiro cultivador da terra tem o direito de utilizar a propriedade. A lentidão no processo de recenseamento das terras é o maior entrave para o desenvolvimento da atividade agrícola no país, pois atingiu até hoje menos de 10% de toda área agrícola, tendo sido iniciado em 1998.

O perfil das áreas agrícolas da Costa do Marfim muda da região setentrional para a meridional, com o tamanho médio das propriedades variando de 3,5 a 13 hectares. O norte, caracterizado pelas savanas, apresenta cultivo de arroz e milho, em fazendas com área média de 3,5 hectares; o sul, com clima mais úmido, apresenta o cultivo de cacau, palma e café, com área média das propriedades entre 10 e 13 hectares (BNDES, 2013).

2.2.3.4 Condições climáticas

O clima na Costa do Marfim é úmido e quente em todo território, compreendendo desde a zona equatorial na costa sudeste até a região central e semiárido no norte. Existem duas estações bem definidas: uma seca durante o inverno e outra úmida nos meses de verão, porém ambas muito quentes (Figura 4). A precipitação média histórica de 1990 a 2009 foi de 1.350 mm, com temperaturas variando entre 24 e 32°C, mas com temperaturas mais baixas nas montanhas (FAO, 2015; WORLD BANK, 2015).

O país está dividido em três zonas agroecológicas: (i) sul (50% do território): o sul é o ambiente mais chuvoso e inclui praticamente toda região de floresta. É caracterizada por um clima com quatro estações: uma longa temporada seca (dezembro a março), um longo período de chuvas (março a junho), uma estação seca curta (julho a agosto) e, finalmente, uma curta estação chuvosa (setembro a novembro). A precipitação é superior a 1500 mm.ano⁻¹, com os cultivos de café e cacau dominando a economia da região (dois terços da área cultivada), mas também estão presentes o óleo de palma, borracha e coco. Culturas anuais cobrem 25% da área plantada (milho, arroz, mandioca, banana, consorciadas com cacau, em geral). A agricultura é extensiva, baseada em práticas tradicionais de corte e queima, com baixos rendimentos. Essas práticas combinadas com o rápido crescimento da população levaram ao desmatamento em grande escala e redução do período de pousio; (ii) zona Sudano guineense (19% do país) é uma zona de transição entre a região das florestas e o norte, sendo caracterizada por quatro estações: uma longa temporada seca (novembro a fevereiro), um longo período de chuvas (março a junho), uma estação seca curta (julho-agosto) e uma curta estação chuvosa (setembro a outubro). A precipitação varia entre 1200 e 1500 mm.ano⁻¹, mas distribuídos de forma irregular, o que inviabiliza as práticas agrícolas; e (iii) zona sudanesa (31% do país): está localizada mais ao norte; é a região com uma única estação chuvosa, com precipitação entre 900 e 1200 mm.ano⁻¹, o que possibilita a prática da agricultura de sequeiro. Os solos com potencial agrícola aceitável perfazem menos que 50% da área e cerca de 40% das fazendas da região produzem algodão (FAO, 2015).

Figura 4 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) na Costa do Marfim, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.2.4 Guiné Bissau

Guiné Bissau está localizada entre as latitudes 11° e 13° norte e as longitudes 13° e 17° oeste (FAO, 2015).

2.2.4.1 Características socioeconômicas

A Guiné Bissau é o menor país em extensão dentro da UEMOA, compreendendo área de 36 mil km² com população de 1,5 milhões de habitantes. Está situado a extremo oeste da África Ocidental, apresentando-se todo voltado para o Oceano Atlântico. A densidade populacional em Guiné Bissau é de 42 hab.km⁻², com expectativa de vida de 45 anos, sendo 44% da população, urbana (WORLD BANK, 2013). Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH da Guiné Bissau em 2013 foi de 0,396, posição 177^a do mundo.

O PIB da Guiné Bissau é de dois bilhões de dólares, apresentando crescimento de 4,3% nos últimos anos devido o setor agrícola. O PIB per capita também apresentou crescimento, chegando a US\$ 1230 em 2011. Guiné Bissau possui quatro portos em plena atividade, contudo, outros modais não são explorados, o que restringe tanto o transporte dentro do país como a prestação de serviços para países continentais fronteiriços (WORLD BANK, 2013).

Este é o único país da UEMOA cujo idioma oficial é o português, contudo falado apenas por 14% da população. O Islamismo e as crenças indígenas são as principais religiões seguidas, respectivamente, por 50 e 40% da população. O país é caracterizado por alta instabilidade político-administrativa (WIKIPÉDIA, 2014).

2.2.4.2 Agricultura e outros setores relevantes

O setor agrícola participa em 69% do PIB e emprega 540 mil pessoas, ou seja, 82% da população ativa, incluindo 48% das mulheres (FAO, 2015). O agronegócio da castanha de caju, principal cultivo do país, responsável por cerca de 90% das receitas de exportação, é o setor mais organizado da economia da Guiné Bissau. Estima-se que as plantações de caju cubram cerca de 6% do território do país, perfazendo 210 mil hectares; outros cultivos de importância são: arroz, raízes e tubérculos e frutos de dendê (BNDES, 2013).

A produção e área de cultivo de castanha de caju (*Anacardium occidentale*) em Guiné Bissau crescem a ritmo de 10% e 4% ao ano, respectivamente. Aproximadamente 80% das unidades de cultivo têm área média entre dois e três hectares; dentre as grandes plantações, destaca-se apenas uma com área cultivada de 1.300 hectares associada a uma planta de processamento.

O cultivo do cajueiro, em Guiné Bissau, nunca foi alvo de investimentos seja em melhoramento genético e/ou tecnologia, contudo as produtividades alcançadas são consideradas aceitáveis, cerca de 500 a 600 kg.ha⁻¹. Praticamente todas as moradias no país contam com plantas de cajueiro. O pós-colheita, em condições não controladas, gera perdas na qualidade das castanhas, ainda assim a Guiné-Bissau exporta mais de 95% de sua safra de castanhas secas para a Índia, o segundo maior consumidor da castanha no mundo; em primeiro estão os Estados Unidos (FAO, 2015).

Em Guiné Bissau existem três unidades de processamento em grande escala: a Agri-Bissau e Sicaju têm capacidade de processamento de 16 toneladas por dia e a terceira, a B&B Caju, apresenta capacidade operacional de 8,6 toneladas por mês. No momento, os processadores locais se beneficiam de uma proteção alfandegária representada por imposto de 8,6% sobre as exportações de nozes cruas (BNDES, 2013).

2.2.4.3 Estrutura fundiária

De acordo com o relatório do BNDES (2013), o nível de fragmentação fundiária em Guiné Bissau é bastante elevado, sendo que 98% das propriedades apresentam área inferior a cinco hectares, o tamanho médio das propriedades é de 1,5 hectares. A gestão fundiária é exercida pelo governo que, com o objetivo de estimular investimentos e a produção agrícola no país, faz frequentemente concessões de terra visando a produção de castanha de caju. Esta política de concessão é baseada no conceito jurídico de que a propriedade da terra é do “povo da Guiné-Bissau”, cabendo ao Estado apenas sua gestão.

2.2.4.4 Condições climáticas

Situada aproximadamente a meia distância entre o Equador e o Trópico de Câncer, a Guiné-Bissau apresenta clima caracteristicamente quente e úmido. Há duas estações distintas: a estação das chuvas e a estação seca. O território insular, composto por mais de 80 ilhas, exibe algumas das melhores praias da África Ocidental. A estação das chuvas estende-se de maio até novembro, com maior pluviosidade em julho e agosto. A estação seca corresponde aos meses restantes do ano; dezembro e janeiro apresentam as menores temperaturas que, historicamente, são muito elevadas durante todo o ano (Figura 5).

A pluviosidade média histórica em Guiné Bissau, no período de 1990 a 2009, foi de 1.170 mm (WIKIPEDIA, 2014; WORLD BANK, 2015). O clima subdivide o país em três zonas agroecológicas: (i) o norte é caracterizado por duas estações distintas: a estação seca, entre novembro e maio e uma estação chuvosa, de junho a outubro; com precipitação variando entre 1200 e 1500 mm.ano⁻¹ e distribuídos por mais de 107 dias, a temperatura média anual é de 27,4°C; (ii) o sudeste caracterizado pelo clima tropical úmido, com precipitação da ordem de 2.000 a 2.550 mm.ano⁻¹, 70% concentrada de julho a setembro (em 125 dias). A temperatura média anual é de 26,9°C, a umidade relativa do ar chega a 70%, essa área tem grande potencial agrícola; (iii) o noroeste do país apresenta clima moderadamente chuvoso e quente, com 1500 a 1870 mm.ano⁻¹ de precipitação média concentrados em 112 dias. A temperatura média anual é de 26,6°C e apresenta grande potencial para a produção agrícola (FAO, 2015).

Figura 5 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Guiné Bissau, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.2.5 Mali

Mali está localizado entre as latitudes 10° e 25° norte e as longitudes 13° oeste e 5° leste (FAO, 2015).

2.2.5.1 Características socioeconômicas

Mali é um país continental, localizado na região do deserto do Saara; seu clima é considerado semiárido e desértico em 75% de seu território. Possui área total de 1240 mil km², dos quais 51% são cobertos por deserto; apresenta população de 15 milhões de habitantes que perfazem densidade média de 12 hab.km⁻² mas caracterizada por grande heterogeneidade entre as regiões, pois ao norte a densidade é inferior a 2 hab.km⁻² enquanto no centro e sul a densidade é superior a 25 hab.km⁻² (FAO, 2015). A fração urbana no Mali é de 35,6% da população (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014d).

Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH de Mali em 2013 foi de 0,407, considerado o 176º no mundo e o PIB de 17 bilhões de dólares, com crescimento de 5,8% nos últimos anos, sempre baseado no setor agrícola e na exportação de recursos minerais como ouro, urânio, fosfatos e calcário. O PIB per capita também apresentou crescimento, chegando a US\$ 1.091 em 2012. Aproximadamente 95% da população do país segue a religião Islâmica (BNDES, 2013).

Mali vive sob forte instabilidade político-administrativa e por isso é caracterizada com nível de segurança extremamente baixo (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014d).

2.2.5.2 Agricultura e outros setores econômicos

A economia de Mali está alicerçada na agricultura familiar, seguida pelas atividades de pecuária e pesca. As áreas cultivadas ocupam 4,7 milhões de hectares ou seja, 4% do território. Mali contém subsolo rico em minerais, a saber: ouro, fosfato, calcário, bauxita, ferro, magnésio, gesso, urânio e mármore. O ouro é o principal recurso de exportação, atingindo volume total anual de 1,4 bilhões de dólares (2010), o que torna o país o terceiro maior exportador desse minério na África, atrás somente da África do Sul e Gana.

A agricultura representou 40% do PIB em 2005, 75% das receitas de exportação e 80% dos empregos (FAO, 2015). A produção agrícola é essencialmente voltada ao cultivo de produtos de subsistência como arroz, milho e sorgo; o algodão é a cultura comercial mais

comum, especialmente no sul do país. A agricultura do Mali é essencialmente de perfil extensivo, com uso de mão de obra de baixa produtividade (BNDES, 2013).

2.2.5.2.1 Algodão (*Gossypium hirsutum*)

O agronegócio do algodão também faz parte da história de desenvolvimento rural de Mali. Os investimentos em infraestrutura para o transporte de algodão permitiram o acesso a várias áreas remotas do país nos anos de economia mais forte.

Em 1974, com a criação da empresa de algodão do Mali, a Compagnie Malienne de Développement du Textile (CMDT), a produção de algodão cresceu vertiginosamente. A empresa CMDT através de monopólios coordenava desde a produção até a comercialização da fibra, com forte integração vertical da indústria e com preço mínimo garantido aos produtores.

No início dos anos 80, a produção nacional era de 144 mil toneladas e, no final da década de 90, chegou a 518 mil toneladas. Essa foi a melhor fase do agronegócio do algodão em Mali, contudo, a partir do ano de 2000, em função dos baixos preços ofertados os agricultores, o interesse no cultivo da fibra declinou.

A região sul de Mali perfaz 7,7% de seu território e apresenta condições climáticas bastante propícias ao desenvolvimento das plantas de algodão, pois essas demandam longo período de crescimento com elevada radiação solar e disponibilidade hídrica mas tempo seco durante a colheita (BNDES, 2013).

2.2.5.2.2 Cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.)

Os precursores da indústria açucareira maliana foram duas refinarias de açúcar estabelecidas pelo governo chinês entre as décadas de 60 e 70 - o complexo de Ouagadougou, com cerca de 1,7 mil hectares de cana cultivados e o de Siribala, com 3,5 mil hectares (INTERNATIONAL POVERTY REDUCTION CENTER IN CHINA, 2010).

Em 1996, os dois complexos de produção de açúcar foram assumidos pela SUKALA, uma parceria público-privada sino-maliana com 60% do capital controlado pela China Light Industrial Corporation for Foreign Economic and Technical Co-operation (CLETC) e 40% pelo governo do Mali. Em 2009, a empresa produziu aproximadamente 39 mil toneladas de açúcar e 2,8 milhões de toneladas de etanol.

Nova companhia, a N-SUKALA foi estabelecida em 2009, formada pela parceria entre CLETC e o governo maliano, com objetivo de desenvolver o cultivo de cana irrigada próximo ao complexo de Ouagadougou, dentro do Office du Níger, com instalação de uma nova usina,

com capacidade de produção de 100 mil toneladas de açúcar e 9,6 milhões de toneladas de etanol por ano (BNDES, 2013).

2.2.5.3 Estrutura fundiária

Mali apresenta o direito e regulação da aquisição de propriedade bem definidos, porém a forte corrupção traz problemas para a implementação da legislação no país (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014e). A estrutura fundiária atual caracteriza-se por apresentar 68% das propriedades agrícolas com área inferior a 5 hectares e 14% superior a 10 hectares, a maior parte na região do Office du Níger.

Em 2008, reformas administrativas facilitaram o registro das terras, contudo, o elevado valor para se registrar uma propriedade bem como o profundo enraizamento dos costumes tradicionais têm sido empecilhos à implantação desta regulamentação. Oficialmente, a posse de qualquer terra não registrada é do governo, e esses territórios são os mais comuns na zona rural (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014d).

2.2.5.4 Condições climáticas

O clima do Mali é caracterizado por elevadas temperaturas médias e alternância de uma estação chuvosa que vai de junho a setembro - quando as cheias do rio Níger são comuns e criam o delta do Níger - e outra seca, que dura entre cinco e nove meses, indo de outubro-novembro a maio-junho (Figura 6). A precipitação média é de 280 mm.ano⁻¹, porém bastante variável dentro do território e apresentando os menores volumes rumo ao norte do país (FAO, 2015).

Mali pode ser representado em quatro subtipos climáticos: (i) área Sudano-Guiné: localizada no sul do país, recobrindo 6% de todo território e caracterizada por bosques e florestas, com volumes de precipitação superiores a 1.200 mm.ano⁻¹; (ii) área do Sudão: abrange 17% do território de Mali e localizado no centro do país, é caracterizada por uma vegetação mais ou menos densa, com precipitação variando de 600 a 1.200 mm.ano⁻¹; (iii) área do Sahel: abrange 26% das terras ao norte do país, com precipitação de 200 a 600 mm.ano⁻¹ e área ocupando a maior parte do delta do Níger; e (iv) área subsaariana: recobre 51% da área total do território malaio, estendendo-se por toda a região setentrional, onde a precipitação é inferior a 200 mm.ano⁻¹ (FAO, 2015).

Figura 6 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Mali, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.2.6 Níger

Níger está localizado entre as latitudes 11° e 24° norte e as longitudes 0° e 16° leste (FAO, 2015).

2.2.6.1 Características socioeconômicas

O Níger é o país mais pobre do mundo, não tem acesso ao mar e apresenta-se desértico em 80% de seu território que é de 1267 mil km², possui 17,2 milhões de habitantes sendo 80% seguidores do Islamismo, e com expectativa de vida de 46 anos (em 2003). Embora apresente densidade populacional média de 13 hab.km⁻², 90% da população está concentrada numa faixa de cerca de 200 km de largura, ao sul do território, ao longo da fronteira com a Nigéria, onde os volumes de chuva favorecem as atividades de agricultura e pecuária. Cerca de 20% dos nigerianos são nômades (povos como os tuaregues e fulanis) e 18% da população é urbana. Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH de Níger para o ano de 2013 foi de 0,337, ocupando a 187ª posição mundial, que corresponde ao mais baixo do mundo.

O PIB do Níger é de 12 bilhões de dólares, com crescimento de 4,5% nos últimos anos baseado no setor primário, pois o país é um dos principais produtores e exportadores de petróleo, gás, urânio (é o quinto maior produtor de urânio do mundo) e ouro. O PIB per capita foi de US\$ 727, em 2012 (BNDES, 2013) e, de acordo com o Bertelsmann Transformation Index (2014e), o país vive sob elevado nível de instabilidade política.

2.2.6.2 Agricultura e outros setores econômicos

O setor agrícola contribuiu com 40% do PIB em 2001, ocupando 87% da força de trabalho em 2004 (FAO, 2015). Segundo BNDES (2013), a pecuária bovina é a base do agronegócio do Níger, seguida pelo cultivo de algumas culturas de exportação e de subsistência, como milho e sorgo. A terra arável é de 16,5 milhões de hectares, dos quais apenas 4,5 milhões explorados em 2002. A atividade agrícola está concentrada principalmente ao sul, na zona sudanesa, numa faixa de cerca de 200 km de largura, onde ocorre a maior precipitação do país, enquanto a região norte do Sahel continua a ser preferida para pecuária. A maior parte da produção agrícola é resultado da atividade de pequenos núcleos familiares que se dedicam, quase que exclusivamente, ao cultivo de subsistência, com o uso de técnicas bastante tradicionais. Quase toda a terra cultivada é ocupada por culturas de sequeiro, principalmente milho e sorgo, feijão-frade, mandioca, amendoim e algodão, esses dois últimos eram importantes culturas de exportação, hoje marginalmente contribuem para a economia. A natureza aleatória das chuvas é um dos fatores mais limitantes ao desenvolvimento da agricultura nigeriana.

2.2.6.3 Estrutura fundiária

No Níger, bem como em outros países da UEMOA, as propriedades agrícolas são consideradas pequenas, variando de 1 hectare nas áreas irrigadas a 5 hectares nas áreas de sequeiro, segundo dados da United States Agency for International Development (1984). Segundo Bertelsmann Transformation Index (2014e), em 1993, houve a criação de um código agrícola que visava a descentralização da administração fundiária e permitia o registro do direito à terra, mas a falta de capacidade de gestão apenas aumentou a disputa pelo direito à terra.

O direito de propriedade através da herança governa todos os tipos de terra, e a posição de controle do líder local é muito forte, controlando toda a área cultivada, incluindo pastos, áreas em descanso e aquelas áreas comuns de toda comunidade (BNDES, 2013).

2.2.6.4 Condições climáticas

O Níger possui dois terços de seu território ocupado pelo deserto do Saara, onde o clima é extremamente seco. Seu território é composto predominantemente por planícies desérticas e dunas de areia, com planícies ou terrenos ondulados no sul e colinas ao norte (WIKIPEDIA, 2015).

A pluviosidade histórica média em Níger no período de 1990 a 2009 foi de apenas 120 mm.ano⁻¹ (WORLD BANK, 2015); enquanto que de 1960 a 1990 foi inferior a 20 mm.ano⁻¹, conforme demonstrado na Figura 7.

O país pode ser dividido em quatro zonas climáticas: (i) zona subsaariana: em 65% do território, com menos de 100 mm.ano⁻¹ de chuvas e temperatura média em torno de 35°C, com clima desértico; (ii) região do Sahel-Saara: em 12,2% do território, com precipitação anual entre 100 e 300 mm.ano⁻¹ e clima semidesértico. O clima na faixa de Sahel é caracterizado por uma longa temporada de seca, que dura no mínimo oito meses (vai de outubro a maio) seguido por uma estação das águas que dura três a quatro meses (junho a setembro) mas caracterizada por extrema variação no número de dias de chuva; (iii) zona Sudão-Sahel: 12,9% do território, com precipitação variando entre 300 e 600 mm.ano⁻¹ e (iv) a zona sudanesa: 0,9% do território, com mais de 600 mm.ano⁻¹ (FAO, 2015).

Figura 7 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Níger, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.2.7 Senegal

Senegal está localizado entre as latitudes 12° e 17° norte e as longitudes 11° e 18° oeste (FAO, 2015).

2.2.7.1 Características socioeconômicas

Senegal é um país tropical, situado no extremo ocidente do continente Africano, extensamente banhado pelo Oceano Atlântico, com cerca de 530 km de litoral, área de 197 mil km² e população de 13,7 milhões de habitantes, 94% seguidora do Islamismo. Densidade populacional média de 69 hab.km², com crescimento de 2,6% ao ano, com 43% dos

senegaleses vivendo nas áreas urbanas e 80% concentrados ao longo da faixa costeira que apresenta menos de 200 km de largura (FAO, 2015). Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH do Senegal em 2013 foi de 0,485, 163ª posição no mundo mas o mais elevado da UEMOA.

O PIB de Senegal é de 25 bilhões de dólares, apresentando crescimento de 4,4% nos últimos anos e PIB per capita de US\$ 1944 em 2013 (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014f).

O setor de serviços responde por 61% do PIB senegalês e os principais destaques são para as empresas de telecomunicações, transporte, comércio e, em menor escala, o turismo (BNDES, 2013). O Senegal representa uma das democracias mais estáveis da África.

2.2.7.2 Agricultura e outros setores econômicos

A área cultivável em Senegal é estimada em 3,8 milhões de hectares, ou seja, 19% da área do território total do país, contudo, a área cultivada é de 2,5 milhões de hectares. A agricultura do Senegal é desenvolvida por pequenos produtores de amendoim e um grande produtor privado de cana de açúcar, no norte do país; característica comum a todo território são os solos pobres e chuvas irregulares; apenas 5% da área agrícola é irrigada.

Os principais setores ligados ao agronegócio no Senegal são produção e processamento de amendoim e de cana de açúcar e indústria química de produção de fertilizantes. O país ainda é fortemente dependente de importações de alimentos básicos, como cereais e açúcar, mercado esse prioritário na alocação de terras à iniciativa privada (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2007).

2.2.7.2.1 Amendoim (*Arachis hypogaea*)

O cultivo de amendoim ocupa 40% da área agrícola do Senegal, atingindo 2 milhões de hectares e emprega aproximadamente um milhão de agricultores, o que perfaz 8% da população senegalesa. A exportação de óleo vegetal de amendoim representa até 50% do mercado mundial do óleo (USDA, 2007) sendo o cultivo da oleaginosa responsável por cerca de 60% das exportações agrícolas do Senegal.

O cultivo do amendoim está nas mãos de pequenos produtores, em toda região oeste do país e caracterizado pela baixa escala, devido à fragmentação das propriedades, ao baixo nível de utilização de insumos agrícolas e à condição de cultivo de sequeiro. Segundo o USDA (2007), a produção média nos últimos anos foi de 850 mil toneladas por ano, com produtividade média de 400 kg.ha⁻¹.

2.2.7.2.2 Cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.)

A produção de açúcar no Senegal começou em 1972, sob encargo da Compagnie Sucriere Senegalaise (CSS). A empresa através de monopólio e subsídios do governo produz e comercializa açúcar branco, cristal e em cubos; cultiva atualmente cerca de 10 mil hectares próprios irrigados de cana de açúcar, com produtividade por volta de 120 t.ha⁻¹, produzindo açúcar e aproximadamente 12 milhões de litros de etanol por ano, consumidos pela indústria local. A empresa emprega três mil trabalhadores permanentes, sendo a colheita feita manualmente por mais dois mil trabalhadores temporários. O mercado de açúcar do Senegal é protegido por impostos de importação com preço de venda determinado pelo governo.

A produção atual da CSS não é suficiente para suprir o mercado local, que importa atualmente 40-50 mil toneladas de açúcar por ano. A empresa está implantando um projeto para expandir a sua produção para 150 mil toneladas de açúcar, equivalente à demanda atual de açúcar de todo Senegal, contudo, a fragmentação fundiária mostra-se como entrave à expansão das áreas de cultivo (BNDES, 2013).

2.2.7.2.3 Fertilizantes

A indústria de fertilizantes no Senegal é controlada pela ICS (*Industries Chimiques du Sénégal*) e conta com a exploração de minas de fosfato, matéria-prima para produção de fertilizantes. A empresa possui minas de fosfato em *Taïba*, a 100 km de Senegal, de onde extrai a matéria-prima com elevado padrão comercial. A capacidade de mineração em *Taïba* é de dois milhões de toneladas de fosfato por ano, com reservas estimadas entre 60 e 70 milhões de toneladas (INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER, 2010).

A rocha fosfática é destinada à produção de ácido fosfórico em plantas adjacentes à mina e à produção de fertilizantes, como o diamônio fosfato, superfosfato simples e superfosfato triplo (INDUSTRIES CHIMIQUES DU SENEGAL, 2014).

A produção total anual de P₂O₅ é de aproximadamente 660 mil toneladas, destinadas quase totalmente à exportação, com pequena fração reservada para a planta de fertilizantes.

A segunda unidade produtiva é a de Mbaou, com 250 mil toneladas de fertilizante granulado por ano, que abastece o mercado do oeste Africano, principalmente para os cultivos de algodão, amendoim e legumes (BNDES, 2013).

2.2.7.3 Estrutura fundiária

A agricultura de subsistência ocupa, aproximadamente, 95% das terras agrícolas do Senegal, que é caracterizada por áreas de cultivo entre 1,5 e 5 hectares; os 5% restantes são cultivados por produtores comerciais.

A tentativa de organizar o regime fundiário local se deu nas décadas de 60 e 70: em 1964 estabeleceu-se que 97% das terras pertenceriam ao Estado, porém na década seguinte nova legislação descentralizou a gestão das terras, passando esta responsabilidade para as comunidades rurais (BNDES, 2013). Contudo, essas tentativas foram em vão, pois as tradições continuam prevalecendo em algumas comunidades e a transferência de terras depende da decisão do líder comunitário, baseada na idade, sexo ou posição social do postulante (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014f).

2.2.7.4 Condições climáticas

O clima do Senegal é caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca e uma úmida. A precipitação média em todo território é de aproximadamente 700 mm.ano⁻¹, média sujeita a fortes variações interanuais que mascaram fortes disparidades geográficas importantes como diferença na precipitação entre a região sul, de 1.500 mm.ano⁻¹ e a região norte, de 350 mm.ano⁻¹ (FAO, 2015). Na Figura 8, observa-se que a precipitação histórica média anual, entre 1960 e 1990, foi de 550 mm.ano⁻¹, mas no período de 1990 a 2009, foi de 405 mm.ano⁻¹ (WORLD BANK, 2014). Na capital, Dakar, a faixa de temperatura vai de 18°C até 27°C em janeiro; em agosto de 25°C a 33°C.

A localização faz com que o território senegalês sofra influência direta do mar e dos ventos harmattan, durante a estação seca.

Figura 8 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Senegal, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.2.8 Togo

Togo está localizado entre as latitudes 6° e 11° norte e as longitudes 0° e 2° leste (FAO, 2015).

2.2.8.1 Características socioeconômicas

Togo é um país de 57 mil km² de extensão, com o sul banhado pelo Oceano Atlântico, formando aproximadamente 55 km de litoral; apresenta área cultivada de 2,63 milhões de hectares ou 46% da área total de seu território. Possui 6,6 milhões de habitantes, com a maior densidade populacional da UEMOA, 115 hab.km⁻² mas com distribuição bastante desequilibrada, 50% da população vive na zona costeira e 20% na cidade de Lomé, capital do país (FAO, 2015). Apenas 38% da população é urbana e apresenta crescimento de 2,1% ao ano. Segundo o United Nations Development Programme (2015), o IDH de Togo em 2013 foi de 0,473 que apresenta a 166ª posição no mundo.

O PIB do Togo é de US\$ 6,5 bilhões, apresentando crescimento de 5,6% nos últimos anos, impulsionado pelo setor agrícola e pelo setor de serviços portuários que apresenta o porto de Lomé como um dos principais escoadouros para os países vizinhos. O PIB per capita chegou a US\$ 1049 em 2012. Cerca de 30% da população segue religiões Cristãs, 20% Islâmicas e 50% crenças indígenas (BNDES, 2013). No ano de 2001, cerca de 6% da população apresentava-se soro positiva para HIV (FAO, 2015).

A agricultura de subsistência é representada pelo cultivo de mandioca, inhame e milho, sendo as principais culturas de exportação o algodão, cacau e café. Além da agricultura, outro setor de grande importância é a mineração de fosfatos, importante insumo

para a cadeia de fertilizantes. O setor de mineração tem desempenhado um papel fundamental na economia do Togo, compreendendo a extração e exportação de fosfato (BNDES, 2013).

2.2.8.2 Agricultura e outros setores relevantes

O setor agrícola foi responsável por 40,8% do PIB em 2003 e empregou 57% da força de trabalho (FAO, 2015). O algodão é o principal produto de exportação do Togo, contudo cacau e café também apresentam papel importante para as divisas do país.

Além da agricultura, a exploração e exportação de rochas fosfáticas tem desempenhado papel importante na economia do Togo desde os anos 60, com a entrada de divisas para o país através da exportação do fosfato e como o desenvolvimento da indústria de fertilizantes local.

2.2.8.2.1 Algodão (*Gossypium hirsutum*)

Nas décadas passadas, o algodão desempenhou papel fundamental no agronegócio togolês, perfazendo 60% das exportações agrícolas, até 20% das receitas de exportação do país, bem como envolveu direta e indiretamente 50% da população rural; bem como beneficiando a produção de alimentos por intermédio do aproveitamento da fertilidade do solo das áreas cultivadas com a cultura de algodão (WORLD BANK, 2010).

Entre 1974 e 2009, a companhia pública Société Togolaise du Coton (SOTOCO) assumiu a condução do agronegócio de algodão em Togo, sendo responsável pela comercialização da fibra e pelo descaroçamento de metade da produção, sendo a outra parte processada por empresas privadas. Em 2007, a empresa possuía cerca de mil funcionários fixos e mais mil sazonais para atividades de processamento.

O setor cresceu de forma sustentada até o início de 2000. Em 1985, foram produzidas em Togo, 63 mil toneladas de algodão em caroço, passando para 188 mil toneladas em 1999. Contudo, a partir de 2004, a produção caiu acentuadamente devido à falta de pagamento aos produtores de sementes que acabaram por focar suas atividades na produção de alimentos. Na safra 2005/2006, foi registrada a produção de 65 mil toneladas e apenas 30 mil toneladas na safra 2009/2010. Com os resultados decrescentes, devido à deterioração na gestão interna da SOTOCO, o governo togolês iniciou a reestruturação do setor em 2009 com a fundação da Nouvelle Société Cotonnière du Togo (NSCT), parceria público-privada, na qual o governo detém 60% do capital e os 40% restantes estão sob gestão de associações de produtores.

O algodão é a única possibilidade de *cash crop* a ser produzida no Togo. O cultivo de cereais, considerado como a alternativa na maioria das regiões, apresenta limitações climáticas e de mercado (WORLD BANK, 2010).

2.2.8.2.2 Café (*Coffea arabica*) e cacau (*Theobroma cacao*)

Apesar da zona agrícola favorável ao cultivo de café e cacau no Togo ser relativamente limitada à região de planalto e central, ambas as culturas têm grande impacto social, envolvendo cerca de 40 mil produtores, o que perfaz 10% de todos os agricultores do país.

Na década de 70, a área coberta por plantações de café e cacau era de 94 mil hectares, atualmente apresenta 30 mil hectares destinadas ao café (WORLD BANK, 2010) e 80 mil para cacau (FAO, 2015). Contudo, a atual elevação dos preços internacionais do cacau e a possibilidade de cultivo de variedades híbridas tolerantes às doenças recorrentes no país podem impulsionar novamente a revitalização do setor (WORLD BANK, 2010).

2.2.8.3 Estrutura fundiária

A influência das tradições locais com o agravante da escassez de terras cria um cenário de tensão na legalização da posse de terras no Togo. A maioria das propriedades é pequena, variando de um a três hectares. No interior do país, principalmente, chefes e autoridades locais manipulam as leis tradicionais em seu próprio favor. Apenas 36% das terras consideradas agricultáveis do país encontram-se sob algum sistema de propriedade que garante proteção de longo prazo ao proprietário; pequenos proprietários, mulheres e imigrantes não tem direito algum à propriedade da terra (BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX, 2014g).

2.2.8.4 Condições climáticas

Togo possui sua região sul caracterizada por chuvas muito bem distribuídas durante todo o ano, sendo os meses de julho, agosto e setembro os mais úmidos; ao norte as chuvas são mais concentradas (FAO, 2015). No período de 1960 a 1990, conforme a Figura 9, a precipitação média anual foi de 1.390 mm, e no período de 1990 a 2009, 1.180 mm (WORLD BANK, 2015).

Figura 9 - Valores médios mensais de pluviosidade (P, mm) e temperatura (T, °C) em Togo, no período de 1960 a 1990 (WORLD BANK, 2014)

2.3 Caracterização do Índice de desenvolvimento humano

O índice de desenvolvimento humano foi desenvolvido em 1990, pelo economista paquistanês Mahbud ul Haq e vem sendo utilizado, desde 1993, pelo Programa das Nações Unidas em seu relatório anual sobre o desenvolvimento dos países. Esse sistema de avaliação enfatiza que as pessoas e suas capacitações e potenciais devem ser o mais importante critério avaliado no desenvolvimento de um país, não apenas o aspecto econômico. O IDH é um índice obtido com a média geométrica normalizada de três dimensões chave do desenvolvimento humano, que englobam: saúde, instrução e renda (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2015).

A dimensão saúde é avaliada pela expectativa de vida ou longevidade da população de uma determinada localidade, em um ano de nascimento de referência. Ocultamente, há uma sintetização das condições de saúde e de salubridade de um determinado local, já que a expectativa de vida é fortemente influenciada pelo número de mortes precoces. Essa dimensão é calculada usando um valor mínimo para longevidade de até 20 anos e valor máximo para longevidade superior a 85 anos de vida (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2015).

Quanto à educação, dois indicadores são considerados, sendo o primeiro a taxa de alfabetização de pessoas com 15 anos ou mais de idade, pois na maioria dos países, uma criança já concluiu o primeiro ciclo de estudos antes dessa idade. Por isso, a medição do analfabetismo se dá, tradicionalmente a partir dos 15 anos. O segundo indicador é o somatório das pessoas, independentemente da idade, matriculadas em algum curso, seja ele fundamental, médio ou superior (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2015).

O padrão de vida é medido de acordo com a renda per capita da população. Como existem diferenças entre o custo de vida de um país para o outro, a renda medida pelo IDH é em dólar PPC (Paridade do Poder de Compra), que elimina essas diferenças (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2015; PNUD BRASIL, 2015).

De acordo com o United Nations Development Programme (2015), para o ano base de 2013, o IDH de todos os países da UEMOA está abaixo do brasileiro em qualquer uma das dimensões avaliadas (Figura 10).

Figura 10 - Índice de desenvolvimento humano (IDH) geral e por dimensão avaliada: educação, renda e saúde, para o ano base 2013, do Brasil e dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2015)

2.4 Caracterização ambiental

2.4.1 Restrições de natureza ambiental

O reconhecimento e exclusão das áreas não propícias ao desenvolvimento da agricultura como áreas protegidas, áreas de fragilidade ambiental ou de interesse para conservação, dunas, afloramentos de rochas e áreas urbanas é imprescindível em estudos dessa natureza, pois com a identificação geográfica dessas, a simulação de produtividade atingível nos países pode ser melhor elaborada.

Assim sendo, considerou-se nesse estudo as áreas de proteção internacional identificadas na região da UEMOA, de acordo com o compêndio realizado pela United Nations Environment Programme (2013). As áreas de proteção ambiental compreenderam as seguintes classes: reservas marinhas, parques e reservas nacionais, reservas ou santuários da

flora e/ou fauna, reserva de uso controlado e outros tipos de reservas. Uma outra classe considerada nesse estudo foram as áreas frágeis ambientalmente pois são de baixo interesse para o desenvolvimento de atividades agrícolas mas de elevada importância ambiental. Na Figura 11 estão representadas as áreas cobertas por rios, áreas alagadas e pântanos, consideradas como áreas úmidas na United Nations Environment Programme (2013).

Figura 11 – Zonas úmidas dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2013)

2.4.2 Uso do solo

A heterogeneidade dos solos e clima dos países estudados reflete a variabilidade dos biomas na região. As florestas tropicais nas regiões de clima úmido, localizadas na costa sul do território contrastam com as dunas na porção norte, características de clima desértico. Na transição encontram-se as savanas, vegetação esparsa, típicas de locais com clima quente e período seco bem definido.

A Figura 12 caracteriza o uso do solo nos países pertencentes à UEMOA no ano de 2009, de acordo com a European Space Agency (2009). De forma qualitativa, foram determinadas seis regiões principais que podem ser observadas no mapa: (i) zona alterada, de

uso misto; (ii) vegetação nativa de alta densidade; (iii) vegetação nativa de baixa densidade; (iv) hidrografia, áreas úmidas e alagadas; (v) áreas sem coberturas e dunas; e (vi) áreas urbanas

A caracterização do uso do solo foi baseada nos arquivos de informações da European Space Agency (2009), contudo, reclassificada de acordo com a proposição de Bontemps et al. (2009) conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classes originais de cobertura do solo (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2009) e sua respectiva reclassificação (BONTEMPS et al., 2009)

Classificação original	Reclassificação
Inundação ou cultivos irrigados (ou aquáticos)	
Cultivos de sequeiro	Alterado
Cultivos em mosaico (50-70%) / vegetação (pastagens/arbustos/florestas) (20-50%)	
Cultivos em mosaico (pastagens/arbustos/florestas) (50-70%) / cultivos (20-50%)	
Semi abertas (>15%) florestas sempre verdes de folhas largas ou semi decíduas (>5m)	Vegetação natural de alta densidade
Fechadas (>40%) florestas de folhas largas decíduas (>5m)	
Abertas (15-40%) florestas de folhas largas decíduas (>5m)	
Fechadas (>40%) florestas aciculadas sempre verdes (>5m)	
Abertas (15-40%) florestas aciculadas decíduas ou sempre verdes (>5m)	
Semi abertas (>15%) florestas mistas de folhas largas e aciculadas (>5m)	
Mosaico de florestas e arbustos (50-70%) / pastagens (20-50%)	
Mosaico de pastagens (50-70%) / florestas ou arbustos (20-50%)	
Semi abertas (>15%) (folhas largas ou aciculadas, sempre verdes ou decíduas) arbustos (<5m)	Vegetação natural de baixa densidade
Semi abertas (>15%) vegetação herbácea (pastagens, savannas, e líquens/musgos)	
Vegetação esparsa (<15%)	
Semi fechada (>15%) florestas de folhas largas regularmente inundadas (semi-permanentemente ou temporariamente) – água doce ou salobra	Hidrografia/Corpos d'água
Fechada (>40%) floresta de folhas largas ou arbustos permanentemente inundados – florestas – água salobra	
Semi aberta (>15%) pastagens ou vegetação lenhosa sob regular inundação ou encharcamento do solo – água doce ou salina	
Corpos de água	
Neve ou gelo permanente	
Áreas sem cobertura	Áreas sem cobertura/dunas
Superfícies artificiais (áreas urbanas >50%)	Urbano

Figura 12 – Uso do solo nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2009)

Considerando a reclassificação proposta por Bontemps et al. (2009), apresenta-se na Tabela 2 a distribuição relativa das classes de uso do solo nos países da UEMOA.

Tabela 2 - Distribuição relativa (%) das classes de uso do solo (A, B, C e D) nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger: [A] alterado, [B] florestas tropicais, [C] savana e [D] dunas, cidades e corpos d'água (BICHERON et al., 2008)

País	Classes de uso do solo			
	A	B	C	D
Benim	25,2	1,6	71,2	2,0
Burkina Faso	65,0	0,0	32,1	2,9
Costa do Marfim	33,6	14,4	49,9	2,1
Guiné Bissau	26,7	17,6	35,8	19,9
Mali	10,5	0,0	24,5	65,0
Níger	3,4	0,0	24,8	71,8
Senegal	56,5	0,6	38,5	4,4
Togo	17,5	1,4	78,5	2,6
UEMOA	18,0	1,6	31,0	49,5

2.4.3 Índice de qualidade de solo

O solo possui múltiplos papéis no ambiente, sendo fundamental como meio onde ocorre a produção agrícola, ambiente florestal, regulador dos fluxos de água, gases e energia, remediação para resíduos, desenvolvimento urbano e recreação (DORAN; PARKIN, 1994; LARSON; PIERCE, 1994; SINGER; EWING, 2000). O índice de qualidade do solo é um componente crítico para a determinação da sustentabilidade do sistema agrícola e, embora seja um termo relativamente novo, é de amplo conhecimento que a qualidade dos solos é bastante variável e sensível ao tipo de uso e às ações de manejo (LARSON; PIERCE, 1994).

A capacidade do solo em desempenhar com sucesso suas funções é referida como “qualidade do solo” (KARLEN et al., 1997), conceito ainda muito discutido devido a sua natureza dinâmica e complexa.

Do ponto de vista das atividades agrícolas, o índice de qualidade do solo deve compreender atributos físicos, pois esses assumem vital importância no estabelecimento de relações fundamentais com os processos hidrológicos, tais como taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão; possuem também função essencial no suprimento e armazenamento de água, de nutrientes e de oxigênio no solo. Entre os principais indicadores físicos de qualidade de solo estão a textura, estrutura, resistência à penetração, profundidade de enraizamento, capacidade de água disponível, percolação da água e sistema de cultivo (GOMES; FILIZOLA, 2006).

Ainda, apresentam relevância nos estudos agrônômicos aspectos relacionados às propriedades e características químicas do solo (adaptado de GOMES; FILIZOLA, 2006).

Para proceder a uma definição para a medição da qualidade do solo, um conjunto mínimo de características do solo que representam a qualidade do solo deve ser selecionado e quantificado (SPAROVEK, 2014).

2.4.4 Utilização dos recursos hídricos

A possibilidade de irrigação é uma importante informação para a determinação de áreas com alto potencial de produção agrícola. Entende-se, entretanto, que recursos hídricos são estratégicos para o desenvolvimento dos países e que qualquer análise de disponibilidade de água para irrigação deva fazer parte de uma política pública de gestão de recursos hídricos que não comprometa o abastecimento da população bem como as funções ecológicas que as reservas d'água exercem. Em se tratando de um conjunto de países, como no caso da UEMOA, o desafio de planejamento de uso dos recursos hídricos é ainda mais complexo

porque precisa gerenciar as demandas e equalizar as diferenças regionais para minimizar os riscos de conflitos reais e potenciais do uso da água.

Considerando-se as limitações de acesso a dados quantitativos de vazão de rios e volume de água de subsolo, optou-se por conduzir no presente trabalho um mapeamento mais qualitativo e menos determinante da disponibilidade de água para irrigação com o objetivo de auxiliar no entendimento regional da distribuição dos recursos hídricos, sem sugerir, contudo, a adoção de projetos de irrigação.

A caracterização do uso da irrigação foi baseada nos dados de recursos hídricos para o continente Africano, mapa de reservatórios e de rios (FAO, 2000) e observações qualitativas obtidas nos trabalhos de campo (BNDES, 2013). Na Figura 13 são representadas as áreas potencialmente irrigáveis.

Figura 13 - Distribuição espacial das regiões com maior disponibilidade hídrica para irrigação nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (BNDES, 2013)

2.5 Produtividade potencial das culturas de milho e soja

A produtividade potencial pode ser definida como a capacidade fotossintética de uma planta cultivada, amplamente suprida de água e nutrientes, sob condições normais de disponibilidade de CO₂, radiação e temperatura e mantida livre de quaisquer interferências de natureza fitossanitária, como incidência de plantas daninhas, insetos-praga e doenças (LOVENSTEIN et al., 1995).

Para Evans e Fischer (1999) a produtividade potencial é definida como a produtividade máxima que pode ser atingida por uma planta em dado ambiente, determinado, por exemplo através de modelos de simulação com suposições de natureza agrônômica e fisiológica.

Para a estimativa da produção de uma planta, segundo Taiz e Zeiger (2004), o principal processo a ser considerado é a assimilação (absorção e posterior redução) do CO₂ atmosférico em fotoassimilados, que depende, entre outros fatores, da radiação solar e da temperatura do ar, por sua vez dependentes da duração do fotoperíodo diário.

O desenvolvimento das plantas é dependente da transformação dos fotoassimilados (CH₂O) em moléculas mais complexas, como carboidratos, celulose, amido, proteínas, lipídios e ácidos. Essas rotas metabólicas requerem consumo de energia (respiração de crescimento), sendo muitas vezes expressas, de modo genérico, para cada órgão como sua eficiência de conversão em raiz, colmo, folhas e órgãos reprodutivos das plantas.

Além da respiração de crescimento, deve ser considerada a respiração de manutenção, a qual consome fotoassimilados e reservas da planta para fornecer energia aos processos de degradação e síntese necessários para a manutenção dos gradientes iônicos e das estruturas celulares, entre outras funções (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Portanto, num determinado ambiente, a biomassa seca total das plantas será proporcional à fotossíntese líquida, resultante dos efeitos combinados entre fotossíntese total e respiração durante a fase de crescimento. A fotossíntese líquida, por sua vez, será proporcional à eficiência da interceptação da radiação pelas plantas, diretamente influenciadas pelas condições ambientais a que estiverem sujeitas, pela população e o arranjo espacial utilizado, pelo número e angulação das folhas em relação ao colmo, bem como pela extensão da área foliar e sua permanência em plena atividade.

De acordo com Costa (1994), o rendimento fotossintético da planta representa a interação entre a resposta fotossintética de folhas individuais com a disponibilidade de luz que incide sobre elas; contudo, a eficiência de interceptação depende de vários fatores, como a

idade da planta, arquitetura foliar, arranjo espacial de plantas e população empregada, ao passo que a eficiência de conversão, depende principalmente do ambiente de produção (temperatura, radiação e solo, principalmente), estado nutricional e equilíbrio hídrico das plantas.

Já a partição de fotoassimilados é função principalmente do genótipo, enquanto a eficiência de conversão da radiação interceptada, além do genótipo, é afetada pelo estado nutricional e pela sanidade da planta, pela temperatura e pela disponibilidade hídrica, entre outros (TAIZ; ZEIGER, 2004). Segundo Dourado Neto (1999), a partição de fotoassimilados é, sobretudo, função do genótipo e das relações de fonte-dreno.

Tendo-se em mente todas as considerações acerca dos modelos de crescimento, desenvolvimento e ecofisiologia dos cultivos, é possível inferir que o CO₂ assimilado pode ser convertido em massa de carboidrato em função do índice de área foliar, da temperatura e da radiação solar interceptada pelo dossel da cultura. Estimando-se os valores de fotoperíodo, índice de área foliar e duração do ciclo, considerando-se as correções quanto à respiração de manutenção e de crescimento, bem como a variação temporal da área foliar, pode-se transformar esse valor em massa líquida de carboidrato total final produzida durante o ciclo da cultura. Assim, a radiação incidente, função da localização geográfica e da época do ano, a eficiência de interceptação, que depende da idade da planta e arquitetura do dossel da cultura, a produção de fotoassimilados, que depende principalmente da temperatura e da disponibilidade hídrica, além das taxas de respiração, da partição de fotoassimilados e de conversão de carboidratos, as quais dependem principalmente do genótipo, da temperatura e da disponibilidade hídrica, são os principais aspectos a serem considerados no estabelecimento de modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas, de maneira geral.

2.6 A cultura de milho na UEMOA

A produção mundial de milho em 2013, segundo Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015) foi de 1,018 bilhão de toneladas, sendo os Estados Unidos o maior produtor, responsável por 34,7% desse volume. A África produz, aproximadamente, 7% do total mundial e importa cerca de 20% de todo milho consumido naquele continente. O maior produtor de milho na África é a África do Sul que produz 1,23% do total mundial, em área de 3,2 milhões de hectares. Praticamente todo milho produzido na África é cultivado sob regime de sequeiro, o que apresenta grave consequência do ponto de vista social em anos de deficiência ou irregularidade na distribuição de chuvas.

Na safra de 2013, foram colhidos, em todo o mundo, 185 milhões de hectares de milho, enquanto em toda a África foram colhidos 35 milhões de hectares. A África é responsável pelo consumo de 30% de todo milho produzido no mundo, dependendo diretamente de importações para atendimento da demanda interna; 95% do milho produzido na África é consumido na alimentação humana, sendo 90% representado pelo milho branco (INTERNATIONAL INSTITUTE OF TROPICAL AGRICULTURE, 2014a).

A produção de milho atingida na safra de 2013 pelos países membros da UEMOA perfazem 8,5% do milho produzido em todo continente Africano (FAO, 2015). A produção, área colhida e produtividade de milho cultivado nos países da UEMOA são demonstrados na Tabela 3.

Do ponto de vista de adoção tecnológica, dados da FAO (2015) baseados em resposta dos produtores locais a questionários, demonstram que o consumo de insumos agrícolas nos países membros da UEMOA é incipiente. Em relação aos fertilizantes, têm-se apenas os dados de consumo total de fertilizantes por país, o que dificulta o entendimento do nível de tecnologia adotado em cada cultivo, contudo, baseado na produtividade média apresentada para o cultivo de milho (Tabela 4), depreende-se que exista baixíssimo aporte tecnológico no cultivo desse cereal.

Tabela 3 - Produção (mil t), área colhida (ha) e produtividade (kg.ha⁻¹) de milho nos países pertencentes à UEMOA: (i) Benim, (ii) Burkina Faso, (iii) Costa do Marfim, (iv) Guiné Bissau, (v) Mali, (vi) Níger, (vii) Senegal e (viii) Togo; UEMOA, África e Brasil, para o ano de 2013 (FAO, 2015)

País	Produção (mil t)	Área colhida (ha)	Produtividade (kg.ha ⁻¹)
Benim	1.346	973.453	1.382
Burkina Faso	1.585	913.630	1.735
Costa do Marfim	661	340.000	1.944
Guiné Bissau	7	15.000	488
Mali	1.503	640.526	2.346
Níger	12	15.000	833
Senegal	223	151.450	1.474
Togo	693	550.000	1.259
UEMOA	6.154	3.599.059	1.433
África	71.613	34.903.210	2.033
Brasil	80.539	15.317.432	5.258

Observa-se, na Tabela 4, os volumes de fertilizantes consumidos pelos países pertencentes à UEMOA, no ano de 2012.

Tabela 4 - Consumo total de nutrientes (t): nitrogênio (N), fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O) nos países pertencentes à UEMOA: (i) Benim, (ii) Burkina Faso, (iii) Costa do Marfim, (iv) Guiné Bissau, (v) Mali, (vi) Níger, (vii) Senegal e (viii) Togo; UEMOA, África e Brasil, para o ano de 2012 (FAO, 2015)

País	Consumo total de nutrientes		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Benim	28.893	14.247	9.340
Burkina Faso	28.253	18.696	19.037
Costa do Marfim	33.526	15.264	24.856
Guiné Bissau	n.d.	n.d.	n.d.
Mali	126.927	31.659	21.108
Níger	12.932	3.211	5.026
Senegal	20.741	1.742	4.381
Togo	6.797	5.466	998
UEMOA	257.969	90.285	84.746
África	3.279.477	1.394.159	522.916
Brasil	4.251.169	4.343.221	4.600.684

(*) n.d.: dados não disponíveis

O consumo dos nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, em todo continente Africano representam, respectivamente, 2,7%, 3,0% e 1,8% do consumo mundial de fertilizantes. No Brasil, o consumo interno representa 3,6%, 9,4% e 16,15% do total mundial.

Os três maiores consumidores de fertilizantes na África são Egito, África do Sul e Etiópia, dentro da UEMOA é Mali, que consome de 2 a 4% de todo fertilizante consumido no continente Africano.

2.7 A cultura de soja na UEMOA

A produção mundial de soja em 2013, segundo FAO (2015) foi de 276 milhões de toneladas, sendo os Estados Unidos o maior produtor, responsável por 32% desse volume. A África produz menos que 1% do total mundial, com importações do grão que se aproximam ao total produzido (INTERNATIONAL INSTITUTE OF TROPICAL AGRICULTURE, 2014b), cerca de 2,2 milhões de toneladas no ano de 2013. O maior produtor de soja no continente Africano é a África do Sul, seguida pela Nigéria, ambos perfazem 62% de toda soja produzida nesse continente.

Como pode-se observar na Tabela 5, Burkina Faso apresenta-se como maior produtor de soja dentro da UEMOA, com 22 milhões de toneladas de soja produzidas em 16 mil hectares, com produtividade quase equivalente a 50% da média brasileira. A maior área

colhida de soja encontra-se no Benim, mas com menores níveis de produtividade (FAO, 2015).

A baixa disponibilidade de fertilizantes é um fator preponderante na restrição ao crescimento da produção de soja na maioria dos países Africanos. Na Nigéria, o farelo de soja é uma importante fonte proteica usada na alimentação animal. A indústria de aves, no continente Africano, apresentou taxa de crescimento de 30% entre os anos de 2003 e 2008, o que impulsionou a demanda do farelo. A produção comercial de soja está assentada em grandes fazendas na Zâmbia, Zimbábue e África do Sul, contudo, é cultivada em pequena escala nas outras partes da África, onde é cultivada em conjunto com sorgo, milho e mandioca, com todos os tratos culturais e colheita executados manualmente (INTERNATIONAL INSTITUTE OF TROPICAL AGRICULTURE, 2014b).

Tabela 5 - Produção (t), área colhida (ha) e produtividade (kg.ha⁻¹) de soja nos países membros da UEMOA: (i) Benim, (ii) Burkina Faso, (iii) Costa do Marfim, (iv) Guiné Bissau, (v) Mali, (vi) Níger, (vii) Senegal e (viii) Togo; UEMOA, África e Brasil, para o ano de 2013 (FAO, 2015)

País	Produção (t)	Área colhida (ha)	Produtividade (kg.ha ⁻¹)
Benim	16.000	19.000	842
Burkina Faso	22.773	16.114	1.351
Costa do Marfim	1.000	950	1.052
Guiné Bissau	n.d.	n.d.	n.d.
Mali	1.850	2.750	672
Níger	n.d.	n.d.	n.d.
Senegal	n.d.	n.d.	n.d.
Togo	1.500	3.000	500
UEMOA	42.123	41.814	1.007
África	2.246.313	1.797.259	1.797
Brasil	81.724.477	27.906.675	2.929

(*) n.d.: dados não disponíveis

Aproximadamente 111 milhões de hectares de soja foram colhidos no mundo em 2013, com 85 milhões de hectares em todo continente americano, 20 milhões na Ásia, 3 milhões na Europa e 2,2 milhões na África.

Um dos principais problemas fitossanitários enfrentado no cultivo de soja, atualmente, é a proliferação da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), o que também tem prejudicado sobremaneira o cultivo da leguminosa na África. Alguns materiais resistentes já foram lançados no mercado africano, contudo, com abrangência ainda reduzida.

Do ponto de vista da adoção tecnológica, os dados apresentados pela FAO (2015) são absolutamente incipientes acerca do consumo de defensivos agrícolas no continente africano, compreendendo apenas estimativas para três países, nenhum deles pertencentes à UEMOA.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de trabalho foi baseada em conceitos já estabelecidos e publicados, com a utilização de ferramentas de geoprocessamento, programação computacional e modelagem espacial. Os dados utilizados foram compilados a partir de bases públicas com o critério de que abrangessem todo o território estudado. Foi adotada uma estratégia metodológica que equalizasse a disponibilidade das informações georreferenciadas à escala continental de operação do modelo e a necessidade de geração de informações suficientemente precisas para conclusão da caracterização proposta. Depois de compiladas e estruturadas em um formato comum, as bases de dados originais foram integradas e processadas por rotinas computacionais a fim de gerar variáveis derivadas para alimentação das etapas subsequentes do modelo.

Aos dados edafoclimáticos foram combinadas informações sobre uso e cobertura do solo, bem como sobre as áreas protegidas ou de interesse para preservação. Dessa forma, o resultado final representa a estimativa do potencial biofísico de produção das culturas de milho e soja integradas à dinâmica de ocupação do território local.

A partir dessas informações, foram gerados os mapas de acordo com os diferentes cenários propostos no zoneamento agroclimático das culturas de milho e soja, sendo as informações organizadas em banco de dados através do software TNTMIPS.

Diante da diversidade de condições socioeconômicas e infraestruturais da região e do caráter do presente estudo, optou-se pela definição e modelagem da produtividade atingível dos cultivos de soja e milho com a adoção de elevado emprego de tecnologia. Ou seja, a estimativa de produtividade atingível foi calculada considerando um referencial agrônomo padrão de emprego de tecnologia, denominado de altos insumos. Outro cenário foi baseado na realidade local, gerando a produtividade real, em que a dificuldade de acesso a agroquímicos e/ou aos recursos financeiros para aquisição desses faz parte da rotina da maior parte dos agricultores, considerando-se então baixo emprego de tecnologia.

3.1 Elaboração dos estudos de classificação climática e zoneamento agrícola

A base de dados geográficos foi elaborada em ambiente SIG, utilizando o software TNTMIPS, que suporta o desenvolvimento dos trabalhos de classificação pedológica e climática.

3.1.1 Definição da base de dados

O desenvolvimento do trabalho teve início com a definição dos dados necessários com relação à base cartográfica, dados climáticos, dados de solos e mapas pedológicos comuns a todos os países compreendidos na UEMOA. Dessa forma, o banco de dados foi constituído compreendendo: (a) base cartográfica digital (hidrografia e divisão entre os países); (b) classes de solos e (c) histórico dos dados climáticos.

Com relação ao estudo pedológico, os atributos básicos das unidades de mapeamento foram baseados em Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006), cuja classificação compreende os seguintes aspectos: fertilidade natural do solo, textura, relevo, profundidade do solo, susceptibilidade à erosão (declividade, textura e profundidade), drenagem e pedregosidade/rochosidade.

3.1.2 Aquisição dos dados

Os dados originais necessários para confecção dos mapas de divisão política da região da UEMOA foram acessados a partir de Thematic Mapping (2009).

Os dados históricos de pluviosidade mensal, pluviosidade anual, temperatura mínima mensal, temperatura máxima mensal, temperatura média mensal, temperatura média anual e radiação solar, do período de 1950 a 2000, utilizados na caracterização de elementos do clima, bem como as informações pertinentes aos métodos usados para geração dos dados, unidades e formatos podem ser encontrados em Hijmans et al. (2005a, 2005b). Esses autores fizeram o levantamento dos dados acima citados em toda superfície do globo, com exceção da Antártica, e através de uma avaliação minuciosa dos dados, promoveram a remoção das estações com erros, dessa forma, os dados consistentes de precipitação perfazem amostragens de 47.554 locais, temperatura média de 24.542 locais e temperatura mínima e máxima de 14.835 locais.

A obtenção da base de dados pedológica, capacidade de armazenamento de água no solo (CAD, mm), padronização dos atributos, nomenclaturas e demais dados em relação ao solo para toda região de estudo foram possíveis a partir dos dados da FAO (2012), que é baseada no sistema World Reference Base for Soil Resources (WRB) segundo FAO (2006), daí a necessidade de se correlacionar esse com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) baseado em Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006). Os dados de altitude e declividade do solo foram obtidos a partir da Shuttle Radar Topography Mission (2010).

O balanço hídrico climatológico foi produzido através de rotina computacional de processamento integrado das variáveis: precipitação, temperatura, radiação solar e armazenamento de água no solo, o qual possibilitou a obtenção da deficiência hídrica, excedente hídrico, evapotranspiração potencial (ET_o , mm.mês^{-1}) e evapotranspiração real (ET_a , mm.mês^{-1}).

3.2 Caracterização edáfica

3.2.1 Índice de qualidade de solo

A geração do índice de qualidade de solo teve como base os dados pedológicos da região de estudo de acordo com a classificação de WRB - World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2006) e sua correlação com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) de acordo com Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006).

Algumas classes WRB (FAO, 2006) não encontram correspondentes diretos na classificação brasileira, tanto em nível de ordem como em nível de subordem, sendo essas: solos com sulfato de cálcio, solo sálico com duripã e solos alagados (Tabela 6).

Tabela 6 - Correlação aproximada entre o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiCBS (EMBRAPA, 2006) e o World Reference Base for Soil Resources – WRB (FAO, 2006) para classes de solos em primeiro nível e, em alguns casos, segundo nível de classificação (*) e unidades consideradas miscelânea (**). Adaptado de BNDES (2013), PRADO (2005) e INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE (2001)

Descrição (SiCBS)	Descrição (WRB)	Sigla (WRB)
Argissolo	<i>Acrisols</i>	AC
	<i>Alisols</i>	AL
	<i>Lixisols</i>	LX
Cambissolo	<i>Cambisols</i>	CM
Chernossolo	<i>Chernozems</i>	CH
	<i>Kastanozems</i>	KS
	<i>Phaeosems</i>	PH
Espodossolo	<i>Podzols</i>	PD
Gleissolo	<i>Gleysols</i>	GL
Gleissolo Sálco	<i>Solonchaks</i>	SC
Latossolo	<i>Ferrasols</i>	FR
Luvissolo	<i>Luvisols</i>	LV
Neossolo Flúvico (*)	<i>Fluvisols</i>	FL
Neossolo Litólico (*)	<i>Leptosols</i>	LP
Neossolo Quartzarênico (*)	<i>Arenosols</i>	AR
Neossolo Regolítico (*)	<i>Regosols</i>	RG
Nitossolo	<i>Nitisols</i>	NT
Organossolo	<i>Histosols</i>	HS
Planossolo Háptico (*)	<i>Planosols</i>	PL
Planossolo Nátrico (*)	<i>Solonetz</i>	SN
Plintossolo	<i>Plinthosols</i>	PT
Vertissolo	<i>Vertisols</i>	VR
Afloramento rochoso (**)	<i>Rock out crops</i>	RK
Áreas urbanas (**)	<i>Urban</i>	UR
Corpos d'água (**)	<i>Water Bodies</i>	WR
Dunas (**)	<i>Dunes ou Shifting Sands</i>	DS
-	<i>Calcisols</i>	CL
-	<i>Durisols</i>	DU
-	<i>Gypsisols</i>	GY
-	<i>Stagnosols</i>	ST

A avaliação da aptidão pedológica é o processo de determinar a aptidão do solo para usos específicos e diz respeito a um conjunto de princípios e conceitos básicos que podem ser aplicados em qualquer parte do mundo, em qualquer local ou região; requerendo uma comparação, entre diferentes tipos de solos, entre os benefícios obtidos e as necessidades existentes (SAMPAIO, 2007). Em etapa qualitativa, houve a consideração de quatro níveis de aptidão: alta, média, baixa e inapta. Os critérios de classificação são expostos na Tabela 7 e na Tabela 8. O ambiente de produção, segundo Prado (2008), é definido como a soma das

interações de atributos do solo (fertilidade, drenagem, textura e profundidade) e de relevo que influenciam diretamente a sobrevivência e capacidade de produção vegetal. Para este estudo, foi adaptada a metodologia de Prado (2008) de ambiente de produção para as características dos dados disponíveis para a região, cruzando as classes de aptidão por declividade com as classes de aptidão pedológica. A interpretação das informações edáficas foi combinada às informações de relevo como um procedimento padrão de detalhamento da informação edáfica para uma escala local. A determinação da qualidade combinada de solo-relevo foi estruturada como uma chave lógica para cada ordem de solo e faixas de declividade do terreno. Dessa forma, criou-se o IQS com base em três atributos: profundidade, drenagem e textura-estrutura combinadas. Os solos receberam notas variando de 1 a 3 para cada atributo (profundidade, drenagem e estrutura-textura) sendo o índice de qualidade do solo resultado da média geométrica dessas (Tabela 8), conforme BNDES¹ (2013).

Para a estimativa do IQS foi utilizada a seguinte equação:

$$IQS = \left(\prod_{i=1}^n a_i \right)^{1/n} \quad (1)$$

ou seja

$$IQS = \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} \quad (2)$$

em que IQS se refere ao Índice de Qualidade de Solo, a_1 à nota de 1 a 3 para a profundidade do solo, a_2 à nota de 1 a 3 para a drenagem do solo e a_3 à nota de 1 a 3 para a estrutura-textura do solo.

De acordo com os valores estimados do IQS para cada ordem de solo, houve o estabelecimento de quatro classes subdivididas em níveis de aptidão, a saber: alta, média, baixa e inapta, com os limites estabelecidos citados na Tabela 7.

Tabela 7 - Classes da aptidão pedológica para culturas anuais baseada no índice de qualidade do solo (IQS) BNDES¹(2013)

Inapta	Classe de aptidão pedológica		
	Baixa	Média	Alta
$\leq 1,3$	$1,3 < IQC < 1,8$	$1,8 \leq IQC < 2,5$	$\geq 2,5$

¹ BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Estudo de Viabilidade de Produção de Biocombustíveis na UEMOA (União Econômica e Monetária do Oeste Africano). Relatório 2: Coleta de dados e entendimento da situação atual.** Chamada Pública de Prospecção BNDES/FEP nº 2/2011. Rio de Janeiro, 2013. 322 p.

Tabela 8 – Classificação da aptidão pedológica (alta, média, baixa e inapta) por ordem de solo, com a correlação entre o World Reference Base for Soils Resources – WRB (FAO, 2006) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiCBS (EMBRAPA, 2006), baseado no índice de qualidade do solo (IQS), baseada em profundidade (P), drenagem (D) e estrutura-textura (T) do solo

Sistema de Classificação de solos		P	D	T	IQS	Aptidão Pedológica
WRB	SiCBS					
Nitisols	Nitossolo	3	3	3	3,0	Alta
Phaeosems	Chernossolo	3	2	3	2,6	Alta
Lixisols	Argissolo	3	2	3	2,6	Alta
Ferrasols	Latossolo	3	3	2	2,6	Alta
Acrisols	Argissolo	3	2	2	2,3	Média
Luvisols	Luvisolo	2	2	3	2,3	Média
Arenosols	Neossolo Quartzarênico	2	3	1	1,8	Média
Calcisols	-	2	1	3	1,8	Média
Gleysols	Gleissolo	2	1	3	1,8	Média
Histosols	Organossolo	2	1	3	1,8	Média
Vertisols	Vertissolo	2	1	3	1,8	Média
Fluvisols	Neossolo Flúvico	2	3	1	1,8	Média
Gypsisols	-	2	1	2	1,6	Baixa
Planosols	Planossolo Háptico	2	1	2	1,6	Baixa
Leptosols	Neossolo Litólico	1	2	2	1,6	Baixa
Plinthosols	Plintossolo	2	2	1	1,6	Baixa
Cambisols	Cambissolo	1	2	2	1,6	Baixa
Regosols	Neossolo Regolítico	1	1	2	1,3	Inapta
Solonetz	Planossolo Nátrico	1	1	1	1,0	Inapta
Solonchaks	Gleissolo Sálco	1	1	1	1,0	Inapta
Durisols	-	1	1	1	1,0	Inapta
Rock Out crops	Afloramento rochoso	1	1	1	1,0	Inapta
Stagnosols	-	1	1	1	1,0	Inapta

3.2.2 Declividade

A declividade foi gerada com base no modelo de elevação do terreno em 90 metros (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION, 2010). A partir de funções em ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas) e com a utilização de algoritmos de oito localidades vizinhas, foi possível realizar o cálculo da declividade em porcentagem, conforme demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Classes de aptidão pedológica (alta, média, baixa e inapta) para culturas anuais baseadas na declividade do solo (%)

Classes de aptidão	Declividade (%)
Alta (relevo plano)	< 2
Média (relevo suave ondulado)	$2 \leq \text{declividade} \leq 6$
Baixa (relevo ondulado)	$6 < \text{declividade} \leq 12$
Inapta (relevo montanhoso)	> 12

3.2.3 Ambiente de produção

A conjugação do IQS, que considera a aptidão pedológica baseada em profundidade (P), drenagem (D) e textura-estrutura (T), conforme descrita na Tabela 8, com a aptidão por declividade descrita na Tabela 9, gerou uma classificação geral do ambiente de produção, subdividida em nove classes, conforme proposto na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes de aptidão de ambientes de produção (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, inapta) considerando IQS e declividade

Classe de aptidão por declividade	Classe de aptidão por IQS			
	Alta	Média	Baixa	Inapta
Alta	A1	B1	C2	Inapto
Média	A2	B2	D2	Inapto
Baixa	C1	D1	E1	Inapto
Inapta	Inapta	Inapta	Inapta	Inapto

A classe de aptidão do solo A1 proporciona condições para a melhor produtividade. A classe de aptidão do solo E1 é o ambiente que proporciona menor produtividade, dentre as áreas consideradas aptas.

3.3 Elementos do clima

Os dados originais de temperatura do ar foram organizados em temperatura mensal média mínima, temperatura mensal média máxima, temperatura mensal média e temperatura anual média, de forma a permitir confecção dos mapas e balanço hídrico cíclico; enquanto os dados de precipitação foram organizados de forma adequada para a geração dos mapas de precipitação e balanço hídrico cíclico.

3.3.1 Evapotranspiração potencial

Evapotranspiração potencial é uma variável meteorológica, definida como o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera através da evaporação da água do solo e da evaporação e transpiração das plantas de uma superfície uniformemente vegetada, sem limitação hídrica. Ocorre quando a folhagem vegetal se mantém turgesciente e quando o processo decorre em função apenas de atributos do clima, não havendo restrição de água ou cobertura vegetal.

A equação para a estimativa de evapotranspiração potencial (ET_{0i} , mm.mês⁻¹) (THORNTHWAITE, 1948) é:

$$ET_{0i} = \left[1,6 \left(\frac{10.T_i}{I} \right)^{\sum_{i=0}^3 a_i I^i} \right], \text{ em que } I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (3)$$

na qual I é o índice térmico, calculado através da temperatura do ar mensal média (T_i , °C), a_i é o coeficiente empírico composto (os valores desses coeficientes foram determinados através de análise de regressão utilizando valores mensais médios de temperatura, que resultou em $a_0 = 0,49239$, $a_1 = 0,01792$, $a_2 = -0,0000771$ e $a_3 = 0,000000675$).

3.4 Balanço hídrico

3.4.1 Balanço hídrico cíclico mensal

A equação básica de estimativa de armazenamento de água no solo (A , mm) (THORNTHWAITE; MATHER, 1955, 1957) é:

$$A = A_c \cdot e^{-\frac{L}{A_c}} \quad (4)$$

na qual L é perda de água potencial acumulada (mm), definida como a soma acumulada da diferença entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração de referência e A_c é a capacidade de armazenamento de água no solo (mm):

$$A_c = 10(\theta_f - \theta_w)Ze \quad (5)$$

na qual Ze é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm), θ_f e θ_w são, respectivamente, o conteúdo de água no solo (cm³.cm⁻³) na “capacidade de campo” e no “ponto de murcha permanente”.

Se $(P_i - ET_{0i}) < 0$ (caso I – estação seca):

$$L_i = L_{i-1} - (P_i - ET_{0i}) \quad (6)$$

e

$$A_i = A_c \cdot e^{-\frac{L_i}{A_c}} \quad (7)$$

Se $(P_i - ET_{0i}) \geq 0$ (caso II – estação úmida):

$$A_i = A_{i-1} + (P_i - ET_{0i}); \text{ se } A_i \geq A_c \text{ então } A_i = A_c \quad (8)$$

e

$$L_i = -A_c \cdot \ln\left(\frac{A_i}{A_c}\right) \quad (9)$$

na qual P_i é a precipitação (mm) e ET_{0i} é a evapotranspiração de referência para o mês 'i'.

A evapotranspiração atual (ET_{a_i} , mm) no período 'i' pode ser calculado como segue:

$$\Delta A_i = A_i - A_{i-1} \quad (10)$$

$$ET_{a_i} = P_i + \Delta A_i \quad (11)$$

na qual ΔA_i é a variação do armazenamento de água no solo entre os meses 'i' e 'i-1':

Se $(P_i - ET_{0i}) < 0$ (caso I – estação seca), então:

$$DH_i = ET_{0i} - ET_{a_i} \quad (12)$$

$$E_i = 0 \quad (13)$$

Se $(P_i - ET_{0i}) \geq 0$ (caso II – estação úmida), então:

$$DH_i = 0 \quad (14)$$

$$EH_i = P_i - ET_{0i} - \Delta A_i \quad (15)$$

na qual DH e EH são deficiência e excedente hídrico, respectivamente (mm).

3.4.2 O critério de Thornthwaite e Mather

Thornthwaite e Mather (1955, 1957) assumiram o armazenamento de água no solo A tendo seu máximo valor A_c (equivalente à capacidade de campo) no final do último mês da estação úmida. Portanto, para o mês que corresponde ao último mês da estação úmida, tem-se que $L = 0$ (Figura 14). Então, o cálculo iterativo começa no início do primeiro mês da estação

seca com $L_i = -(P_i - ET_{p_i})$ e $A_i = A_c \cdot e^{-\frac{P_i - ET_{p_i}}{A_c}}$.

Figura 14 - Exemplo esquemático do critério de Thornthwaite e Mather (1955, 1957) para o início do balanço hídrico mensal cíclico ($L = 0$ no último mês da estação úmida)

O uso desse procedimento para condições áridas e semiáridas, nas quais a capacidade de campo nunca é atingida no final da estação úmida, traria como consequência a repetição contínua dos ciclos até a convergência dos valores mensais de armazenamento de água do solo, apontando para a ineficiência dessa rotina de cálculo.

3.4.3 O método de Mendonça

A fim de evitar a necessidade de vários ciclos de cálculo até a convergência, Mendonça (1958) propôs o critério (Figura 15) para iniciar o balanço hídrico cíclico mensal, como segue:

$$\alpha = e^{-\lambda} \quad (16)$$

com

$$\alpha = \frac{A}{A_c} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{L}{A_c} \quad (18)$$

Figura 15 - Exemplo esquemático do critério de Mendonça (1958) para início do balanço hídrico cíclico mensal para regiões áridas e semiáridas

Mendonça (1958) usou um sistema de duas equações e duas variáveis, x e y (Figura 16):

$$y + p = e^{-x} \quad (19)$$

$$y = e^{-(x+n)} \quad (20)$$

em que 'y' é 'A' por unidade de 'A_c' no último mês da estação seca, 'x' é 'L' por unidade de 'A_c' no último mês da estação úmida, e 'N', 'P', 'n' e 'p' são definidos como:

$$N = -\sum_{i=a}^b (P_i - ET_{O_i}); \text{ se } (P_i - ET_{O_i}) < 0 \quad (21)$$

$$P = \sum_{i=(b+1) \bmod 12}^{(a-1) \bmod 12} (P_i - ET_{O_i}); \text{ se } (P_i - ET_{O_i}) \geq 0 \quad (22)$$

$$n = \frac{N}{A_c} \quad (23)$$

$$p = \frac{P}{A_c} \quad (24)$$

sendo 'a' e 'b' o número de ordem do primeiro e do último mês da estação seca, respectivamente.

Para estimar 'L' no último mês da estação úmida (e o início do primeiro mês da estação seca) do balanço hídrico cíclico mensal, ele propôs:

$$L = -A_c \cdot \ln\left(\frac{p}{1 - e^{-n}}\right) \quad (25)$$

3.4.4 Derivação da equação básica da estimativa de armazenamento de água no solo

O procedimento de Thornthwaite e Mather (1955, 1957) apresenta a seguinte assunção básica (Figura 16):

$$\frac{dB}{dt} = K \cdot \frac{A}{A_c} \quad (26)$$

em que:

$$K = ETp = \frac{L}{T} \quad (27)$$

$$A = A_c - B \quad (28)$$

Substituindo (27) e (28) em (26) e reescrevendo numa forma conveniente, temos:

$$\int_0^L \frac{1}{A_c - B} dB = \frac{L}{T \cdot A_c} \int_0^T dt \quad (29)$$

A solução da integral começa:

$$\left[-\ln\left(\frac{1}{A_c - B}\right) \right]_0^L = \frac{L}{T \cdot A_c} (t_0^T) \quad (30)$$

Então,

$$A = A_c e^{\frac{L}{A_c}} \quad (31)$$

Figura 16 - (A) Relação hipotética entre ET_a e A (THORNTHWAITE; MATHER, 1955, 1957) e (B) reservatório de água no solo

3.5 Classificação climática por Köppen (1900)

O sistema de classificação climática proposto por Köppen (1900) (Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15) é um dos mais abrangentes, sendo mundialmente utilizado em sua versão original ou com modificações, conforme proposto por Köppen e Geiger (1928). O método parte do pressuposto de que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região (ROLIM et al., 2007). Nesse sistema, para o hemisfério norte, onde estão os países da UEMOA, o verão compreende os meses de maio, junho e julho, e o inverno os meses de novembro, dezembro e janeiro.

Tabela 11 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo BWs, BSs, BWw, BSw, BWx' e BSx'

Condição	Classe	Condição	Classe
1 Cinv $\geq$ 3.Cver e Cta/10 $\leq$ Tma e Tma $>$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $>$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$)	BWs BW _s h' BW _s h' v BW _s h' v BW _s h BW _s h v BW _s h v BW _s k BW _s k v BW _s k v BW _s k' BW _s k' v BW _s k' v	2 Cinv $\geq$ 3.Cver e Cta/10 $\leq$ 2Tma e Tma $>$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $>$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$)	BSs BS _s h' BS _s h' v BS _s h' v BS _s h BS _s h v BS _s h v BS _s k BS _s k v BS _s k v BS _s k' BS _s k' v BS _s k' v
3 Cver $\geq$ 3.Cinv e Cta/10 $\leq$ Tma+14 e Tma $>$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $>$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$)	BWw BW _w h' BW _w h' v BW _w h' v BW _w h BW _w h v BW _w h v BW _w k BW _w k v BW _w k v BW _w k' BW _w k' v BW _w k' v	4 Cver $\geq$ 3.Cinv e Cta/10 $\leq$ 2.Tma+28 e Tma $>$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $>$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$)	BSw BS _w h' BS _w h' v BS _w h' v BS _w h BS _w h v BS _w h v BS _w k BS _w k v BS _w k v BS _w k' BS _w k' v BS _w k' v
5 Cta/10 $\leq$ Tma+7 e Tma $>$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $>$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$)	BWx' BW _{x'} h' BW _{x'} h' v BW _{x'} h' v BW _{x'} h BW _{x'} h v BW _{x'} h v BW _{x'} k BW _{x'} k v BW _{x'} k v BW _{x'} k' BW _{x'} k' v BW _{x'} k' v	6 Cta/10 $\leq$ 2.Tma+14 e Tma $>$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $>$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $>$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$) Tma $\leq$ 18 e Tmin $\leq$ 18 e 8 $\leq$ Mtm $\leq$ 10 ($\phi \geq 0$) 2 $\leq$ Mtm $\leq$ 4 ($\phi < 0$)	BSx' BS _{x'} h' BS _{x'} h' v BS _{x'} h' v BS _{x'} h BS _{x'} h v BS _{x'} h v BS _{x'} k BS _{x'} k v BS _{x'} k v BS _{x'} k' BS _{x'} k' v BS _{x'} k' v

(*) Se Tmax-Tmin $<$ 5, acrescentar o sufixo **i**, (**) Se $\phi \geq 0$ e Mtm $<$ 7, acrescentar o sufixo **g**, Se $\phi \geq 0$ e Mtm $\geq$ 7, acrescentar o sufixo **g'**, Se $\phi < 0$ e Mtm $>$ 6, acrescentar o sufixo **g**, Se $\phi < 0$ e Mtm $\leq$ 6, acrescentar o sufixo **g'**, Cinv: Chuva no inverno (mm), Cver: Chuva no verão (mm), Cta: Chuva total anual (mm), Tma: Temperatura (°C) média anual, Tmin: Temperatura (°C) mínima mensal, Mtm: Mês de ocorrência da temperatura máxima, ϕ : latitude

Tabela 12 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo Af, Am e Aw

Condição	Classe	Condição	Classe
1 Tmin ≥ 18 e Cmin > 60 e	Af	2 Tmin ≥ 18 e Cta > 10.Cmin e	Am
Mtm < 7 (φ ≥ 0)	Af g	Mtm < 7 (φ ≥ 0)	Am g
Mtm ≥ 7 (φ ≥ 0)	Af g'	Mtm ≥ 7 (φ ≥ 0)	Am g'
Mtm > 6 (φ < 0)	Af g	Mtm > 6 (φ < 0)	Am g
Mtm ≤ 6 (φ < 0)	Af g'	Mtm ≤ 6 (φ < 0)	Am g'
Tmax-Tmin < 5 e	Af i	Tmax-Tmin < 5 e	Am i
Mtm < 7 (φ ≥ 0)	Af i g	Mtm < 7 (φ ≥ 0)	Am i g
Mtm ≥ 7 (φ ≥ 0)	Af i g'	Mtm ≥ 7 (φ ≥ 0)	Am i g'
Mtm > 6 (φ < 0)	Af i g	Mtm > 6 (φ < 0)	Am i g
Mtm ≤ 6 (φ < 0)	Af i g'	Mtm ≤ 6 (φ < 0)	Am i g'
3 Tmin ≥ 18 e	Aw	Tmin ≥ 18 e Tmax-Tmin < 5 e	Aw i
Mtm < 7 (φ ≥ 0)	Aw g	Mtm < 7 (φ ≥ 0)	Aw i g
Mtm ≥ 7 (φ ≥ 0)	Aw g'	Mtm ≥ 7 (φ ≥ 0)	Aw i g'
Mtm > 6 (φ < 0)	Aw g	Mtm > 6 (φ < 0)	Aw i g
Mtm ≤ 6 (φ < 0)	Aw g'	Mtm ≤ 6 (φ < 0)	Aw i g'

Cta: Chuva total anual (mm), Tmax: Temperatura (°C) máxima mensal, Cmin: Chuva mínima (mm), Tmax: Temperatura(°C) máxima mensal,

Tmin: Temperatura (°C) mínima mensal, Mtm: Mês de ocorrência da temperatura máxima, φ: latitude

Tabela 13 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo Cw, Cs, Cfs e Cf

Condição	Classe	Condição	Classe
1 -3 ≤ Tmin < 18 e 5 ≤ Mcm ≤ 7 (φ ≥ 0) e	Cw	2 -3 ≤ Tmin < 18 e 5 ≤ Mcm ≤ 7 e Cmin < 30 (φ < 0) e	Cs
Mtm < 7	Cw g	Mtm > 6	Cs g
Mtm ≥ 7	Cw g'	Mtm ≤ 6	Cs g'
Tmax-Tmin < 5 e	Cw i	Tmax-Tmin < 5 e	Cs i
Mtm < 7	Cw i g	Mtm > 6	Cs i g
Mtm ≥ 7	Cw i g'	Mtm ≤ 6	Cs i g'
-3 ≤ Tmin < 18 e Mcm = 1 ou Mcm ≥ 11 e Cmax ≥ 10.Cmin (φ < 0) e	Cw	-3 ≤ Tmin < 18 e Mcm = 1 ou Mcm ≥ 11 e Cmax ≥ 3.Cmin e Cmin < 30 (φ ≥ 0) e	Cs
Mtm > 6	Cw g	Mtm < 7	Cs g
Mtm ≤ 6	Cw g'	Mtm ≥ 7	Cs g'
Tmax-Tmin < 5 e	Cw i	Tmax-Tmin < 5 e	Cs i
Mtm > 6	Cw i g	Mtm < 7	Cs i g
Mtm ≤ 6	Cw i g'	Mtm ≥ 7	Cs i g'
3 -3 ≤ Tmin < 18 e 5 ≤ Mcm ≤ 7 e Cmin ≥ 30 (φ < 0) e	Cfs	4 -3 ≤ Tmin < 18 (φ < 0) e	Cf
Mtm > 6	Cfs g	Mtm > 6	Cf g
Mtm ≤ 6	Cfs g'	Mtm ≤ 6	Cf g'
Tmax-Tmin < 5 e	Cfs i	Tmax-Tmin < 5 e	Cf i
Mtm > 6	Cfs i g	Mtm > 6	Cf i g
Mtm ≤ 6	Cfs i g'	Mtm ≤ 6	Cf i g'
-3 ≤ Tmin < 18 e Mcm = 1 ou Mcm ≥ 11 e Cmax ≥ 3.Cmin e Cmin ≥ 30 (φ ≥ 0) e	Cfs	-3 ≤ Tmin < 18 (φ ≥ 0) e	Cf
Mtm < 7	Cfs g	Mtm < 7	Cf g
Mtm ≥ 7	Cfs g'	Mtm ≥ 7	Cf g'
Tmax-Tmin < 5	Cfs i	Tmax-Tmin < 5 e	Cf i
Mtm < 7	Cfs i g	Mtm < 7	Cf i g
Mtm ≥ 7	Cfs i g'	Mtm ≥ 7	Cf i g'

Se Tmm ≥ 10 (4x ou mais) e Tmax ≥ 22, acrescentar o sufixo **a**, Se Tmm ≥ 10 (4x ou mais) e Tmax < 22, acrescentar o sufixo **b**, Se Tmm ≥ 10 (menos que 4x) e Tmin ≥ -38, acrescentar o sufixo **c**, Se Tmm ≥ 10 (menos que 4x) e Tmin < -38, acrescentar o sufixo **d**; Tmm: Temperatura (°C) média mensal, Tmin: Temperatura (°C) mínima mensal, Tmax: Temperatura (°C) máxima mensal, Mcm: Mês de ocorrência da chuva máxima,

Cmin: Chuva mínima (mm), Cmax: Chuva máxima (mm), Mtm: Mês de ocorrência da temperatura máxima, φ: latitude

Tabela 14 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo Dw e Df

Condição	Classe	Condição	Classe
1 Tmin < -3 e Tmax ≥ 10 e 5 ≤ Mcm ≤ 7 e Cmax ≥ 10.Cmin (φ ≥ 0) e	Dw	2 Tmin < -3 e Tmax ≥ 10 (φ ≥ 0) e	Df
Tmm ≥ 10 e Tmax ≥ 22	Dw a	Tmm ≥ 10 e Tmax ≥ 22	Df a
Tmax < 22	Dw b	Tmax < 22	Df b
Tmin ≥ -38	Dw c	Tmin ≥ -38	Df c
Tmin < -38	Dw d	Tmin < -38	Df d

Tmin: Temperatura (°C) mínima mensal, Tmax: Temperatura (°C) máxima mensal, Mcm: Mês de ocorrência da chuva máxima, Cmin: Chuva mínima (mm), Cmax: Chuva máxima (mm), Tmm: Temperatura (°C) média mensal, φ: latitude

Tabela 15 - Classificação climática de Köppen (1900) para as classes do tipo ET e EF

Condição	Classe	Condição	Classe
1 Tmax ≥ 0	ET	2 Tmax < 0	EF

Tmax: Temperatura (°C) máxima mensal.

3.6 Classificação climática por Thornthwaite (1948)

A classificação climática proposta por Thornthwaite (1948) (Tabela 16 e Tabela 17) utiliza os seguintes índices: índice de umidade (Iu), índice de aridez (Ia), índice hídrico (Ih) e índice de eficiência termal de verão (TE).

3.6.1 Índice de umidade

O índice de umidade (Iu) é calculado pela relação entre o excedente hídrico anual (EH_T , mm.ano⁻¹) e a evapotranspiração potencial de referência anual (ET_{OT} , mm.ano⁻¹):

$$Iu = \frac{EH_T}{ET_{OT}} \times 100 \quad (32)$$

3.6.2 Índice de aridez

O índice de aridez (Ia) é calculado pela relação entre a deficiência hídrica anual (DH_T , mm.ano⁻¹) e a evapotranspiração potencial de referência anual (ET_{OT} , mm.ano⁻¹):

$$Ia = \frac{DH_T}{ET_{OT}} \times 100 \quad (33)$$

3.6.3 Índice hídrico

O índice hídrico (Ih) é calculado com base no índice de umidade (Iu) e no índice de aridez (Ia):

$$Ih = Iu - \frac{3.Ia}{5} \quad (34)$$

3.6.4 Índice termal de verão

O índice termal de verão (TE) é utilizado para a determinação dos sufixos a serem adicionados posteriormente à classificação dos grupos climáticos de Thornthwaite (1948).

Para o hemisfério norte, o índice termal de verão é calculado pela relação entre a evapotranspiração potencial de referência que ocorre nos meses de maio (ET_{O_5}), junho (ET_{O_6}) e julho (ET_{O_7}) (VE, mm.ano⁻¹) e a evapotranspiração potencial de referência anual (ET_{O_T} , mm.ano⁻¹). Já para o hemisfério sul, pela relação entre a evapotranspiração potencial de referência que ocorre nos meses de novembro ($ET_{O_{11}}$), dezembro ($ET_{O_{12}}$) e janeiro (ET_{O_1}) (VE, mm.ano⁻¹) e a evapotranspiração potencial de referência anual (ET_{O_T} , mm.ano⁻¹).

Sendo assim, para o hemisfério norte ($\phi \geq 0$ - o solstício de verão ocorre por volta do dia 21 de junho), tem-se:

$$VE = ET_{O_5} + ET_{O_6} + ET_{O_7} \quad (35)$$

Para o hemisfério sul ($\phi < 0$ - o solstício de verão ocorre por volta do dia 21 de dezembro), tem-se:

$$VE = ET_{O_{11}} + ET_{O_{12}} + ET_{O_1} \quad (36)$$

E finalmente, o índice TE pode ser calculado pela relação entre evapotranspiração potencial de referência que ocorre no *verão de Thornthwaite* (VE) (o dia que ocorre o solstício é, aproximadamente, o dia mediano da estação de verão; e não o início da estação de verão como ocorre hoje) e a evapotranspiração potencial de referência anual (ET_{O_T}):

$$TE = \frac{VE}{ET_{O_T}} \quad (37)$$

Tabela 16 - Classificação climática de Thornthwaite (1948) (A, B1, B2, B3, B4, C1, C2, D e E)

T	Condição	Classe	T	Condição	Classe
1	$Ih \geq 100$	A	2	$80 \leq Ih < 100$	B4
	$Ia < 16,7$	Ar		$Ia < 16,7$	B4r
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	Aw		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B4w
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	Aw2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B4w2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	As		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B4s
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	As2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B4s2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	As		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B4s
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	As2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B4s2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	Aw		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B4w
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	Aw2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B4w2
3	$60 \leq Ih < 80$	B3	4	$40 \leq Ih < 60$	B2
	$Ia < 16,7$	B3r		$Ia < 16,7$	B2r
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B3w		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B2w
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B3w2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B2w2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B3s		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B2s
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B3s2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B2s2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B3s		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B2s
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B3s2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B2s2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B3w		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B2w
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B3w2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B2w2
5	$20 \leq Ih < 40$	B1	6	$0 \leq Ih < 20$	C2
	$Ia < 16,7$	B1r		$Ia < 16,7$	C2r
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B1w		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	C2w
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	B1w2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	C2w2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B1s		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	C2s
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	B1s2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	C2s2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B1s		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	C2s
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	B1s2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	C2s2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B1w		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	C2w
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	B1w2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	C2w2
7	$-20 \leq Ih < 0$	C1	8	$-40 \leq Ih < -20$	D
	$Ia < 16,7$	C1r		$Ia < 16,7$	Dr
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	C1w		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	Dw
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	C1w2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	Dw2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	C1s		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	Ds
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	C1s2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	Ds2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	C1s		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	Ds
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	C1s2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	Ds2
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	C1w		$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	Dw
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	C1w2		$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	Dw2
9	$-60 \leq Ih < -40$	E			
	$Ia < 16,7$	Er			
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	Ew			
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi \geq 0$)	Ew2			
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	Es			
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi < 0$)	Es2			
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	Es			
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi \leq DHv$ ($\phi \geq 0$)	Es2			
	$16,7 \leq Ia < 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	Ew			
	$Ia \geq 33,3$ e $DHi > DHv$ ($\phi < 0$)	Ew2			

 $DHi = DH_{11} + DH_{12} + DH_1$ e $DHv = DH_5 + DH_6 + DH_7$ ($\phi \geq 0$)

 $DHi = DH_5 + DH_6 + DH_7$ e $DHv = DH_{11} + DH_{12} + DH_1$ ($\phi < 0$)

Tabela 17 - Sufixos A', B'1, B'2, B'3, B'4, C'1, C'2, D' e E' e a', b'1, b'2, b'3, b'4, c'1, c'2 e d' referentes à classificação climática de Thornthwaite (1948)

Classificação em massa de Phormidium (17-18)					
Condição		Sufixo	Condição		Sufixo
1	$ET_{OT} \geq 1140$	A'	2	$TE < 48,0$	a'
	$997 \leq ET_{OT} < 1140$	B'4		$48,0 \leq TE < 51,9$	b'4
	$855 \leq ET_{OT} < 997$	B'3		$51,9 \leq TE < 56,3$	b'3
	$712 \leq ET_{OT} < 855$	B'2		$56,3 \leq TE < 61,6$	b'2
	$570 \leq ET_{OT} < 712$	B'1		$61,6 \leq TE < 68,0$	b'1
	$427 \leq ET_{OT} < 570$	C'2		$68,0 \leq TE < 76,3$	c'2
	$285 \leq ET_{OT} < 427$	C'1		$76,3 \leq TE < 88,0$	c'1
	$142 \leq ET_{OT} < 285$	D'		$TE \geq 88,0$	d'
	$ET_{OT} < 142$	E'			

ET_{OT} (mm.ano⁻¹): Evapotranspiração potencial de referência anual; TE: Eficiência termal de verão

3.7 Produtividades potencial, atingível e real

3.7.1 Produtividade potencial

Para estimar a produtividade potencial das culturas de milho e de soja foi utilizado o modelo proposto por Doorenbos e Pruitt (1975), modificado por Dourado Neto et al. (2010), onde foram estimados os seguintes parâmetros, em função da espécie: eficiência do uso de radiação, coeficiente de extinção de luz, valores basais de temperatura ótima e mínima e máxima, tipo de metabolismo, duração do ciclo, índice de colheita, teor de água na parte exportável, temperatura média do ar, radiação solar global, acúmulo de massa de matéria seca nos períodos de céu nublado e de céu limpo durante o ciclo e fatores de correção do índice de área foliar e da temperatura.

Para esse processamento foi desenvolvido uma rotina computacional em linguagem de programação Microsoft Visual Basic (VBP, versão 6.0) que simula o crescimento das culturas com plantio em cada um dos meses do ano para então selecionar o ciclo que resulta em maior produtividade. É importante ressaltar que os dados de elementos do clima (radiação solar, temperatura, precipitação) obtidos para a região do estudo e utilizados na alimentação do modelo são valores médios de 50 anos, chamados “Normais Climatológicas”, indicados para classificação do clima e zoneamento agroclimático, porém não são indicados para análise de risco climático o que exigiria o acesso a dados desagregados por ano em escala de tempo preferencialmente mais detalhada que a mensal.

A assimilação de CO₂ pelas plantas, para a produção bruta de carboidrato (η , kg[CH₂O].ha⁻¹.dia⁻¹) está relacionada com a fração da radiação fotossinteticamente ativa (Ω , J.m⁻².s⁻¹) do espectro solar, de acordo com a seguinte equação:

A assimilação de CO_2 (C_{assim} , $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) pelas plantas C_3 (soja) e C_4 (milho), correspondente à concentração de CO_2 de 340 vppm (C_o , vppm), pode ser assim descrita (GOUDRIAAN, 1982):

$$C_{\text{assim}} = \lambda \cdot \left[1 - e^{-\delta \cdot \frac{\Omega \cdot (1-p)}{\lambda}} \right] \cdot \left[1 + \beta \cdot \ln \left(\frac{C_x}{C_o} \right) \right] \quad (39)$$

em que C_x se refere à concentração atual de carbono (assumiu-se $C_x = 385$ vppm), C_o à concentração base de carbono, p ao poder refletor ($\text{J} \cdot \text{J}^{-1}$) da cultura, δ e β aos parâmetros empíricos descritos por Penning de Vries, van Laar e Chardon (1983), em que: $\delta = 0,48 \text{ kg}(\text{CO}_2) \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ e $\beta = 0,8$ para espécies C_3 (soja) e $\beta = 0,4$ para espécies C_4 (milho) e λ à variável auxiliar ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) calculada por intermédio da seguinte equação:

$$\lambda = 40 \cdot \left(w_0 + \frac{w_1}{w_2} \right) \cdot T \quad (40)$$

em que T se refere à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do ar, w_0 , w_1 e w_2 aos parâmetros empíricos dependentes da temperatura (Tabela 18) (GOUDRIAAN, 1982).

Tabela 18 - Parâmetros empíricos dependentes da temperatura para o cálculo da variável auxiliar λ ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) (GOUDRIAAN, 1982)

Condição	w_0	w_1	w_2
Se $T < 0$	0,0	0,0	50
Se $0 \leq T < 20$	0,0	0,3	10
Se $20 \leq T < 30$	-0,2	0,2	5
Se $30 \leq T < 35$	1,0	0,0	5
Se $35 \leq T < 40$	2,4	-0,2	5
Se $40 \leq T < 50$	4,0	-0,4	5
Se $T \geq 50$	0,0	0,0	50

Considerando-se a massa bruta de carboidrato produzido como sendo o valor médio diário para o ciclo inteiro (C , d), estimado a partir do número de graus-dia, da emergência ao florescimento (GD_f , $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$) e da duração da fase reprodutiva (D_{FR} , d), conhecendo-se o fotoperíodo médio do ciclo (H) e o índice de área foliar médio no ciclo (IAF , $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), pode-se estimar a produtividade de carboidrato total (Ψ , $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$), através das seguintes equações:

$$\Psi = \frac{36,585 \cdot \text{Adc} \cdot \text{IAF} \cdot C \cdot H}{T + 273} \quad (41)$$

$$C = \frac{GD_f}{(T - T_b)} + D_{FR} \quad (42)$$

$$H = \frac{24}{\pi} \arccos[-tg(\alpha).tg(\phi)] \quad (43)$$

em que T_b se refere à temperatura basal da cultura (VILLA NOVA et al., 1972), α à declinação solar (radianos) no dia mediano do ciclo, e ϕ à latitude (radianos) do local.

Para se transformar a massa bruta de carboidrato total final (Ψ , kg.ha⁻¹.C⁻¹) em massa de matéria seca dos diferentes órgãos (grãos, folhas, raízes, p.e.), é necessário que se façam algumas correções (DE WIT, 1965, 1978, 1982).

Com base no conceito de De Wit (1965, 1978, 1982), concebido para estimar produtividade potencial de uma cultura através da energia disponível no local considerado, e a partir de dados experimentais apresentados por Doorenbos e Kassam (1979, 1994), calibrados para ampla faixa de condições climáticas, chegou-se às correções necessárias para estimar a produtividade potencial das culturas de milho e de soja.

A correção para respiração de manutenção e crescimento corresponde à massa de matéria seca consumida nos referidos processos ao longo do desenvolvimento. Tal correção depende da temperatura média do ar (T , °C).

Pelo princípio da Lei de Beer-Bouguer-Lambert (OMETTO, 1981) é possível estimar a interceptação relativa da radiação solar fotossinteticamente ativa por uma comunidade de plantas, sendo a correção da radiação solar média absorvida (CR_s , J.J⁻¹), obtida em função do índice de área foliar médio da cultura durante o ciclo.

$$CR_s = 1 - e^{-k.IAF} \quad (44)$$

em que k (m².m⁻²) se refere ao coeficiente de extinção da radiação fotossinteticamente ativa.

Durante o ciclo de desenvolvimento das culturas de soja e de milho, ocorre a partição de fotoassimilados para os diferentes órgãos (DE WIT, 1965, 1978, 1982). Sendo assim, para o cálculo da fitomassa seca da parte aérea (FSa , kg.ha⁻¹.dia⁻¹) produzida, tem-se a seguinte expressão:

$$FSa = \Psi.CRmc.CR_s.(1 - pR).eA \quad (45)$$

em que pR se refere à alocação de carboidrato (kg.kg⁻¹) ao sistema radicular, eR e eA às eficiências de conversão de carboidrato em massa de matéria seca de raiz e de parte aérea, respectivamente, em função da composição da matéria e da eficiência bioquímica de converter carboidrato em proteína, lipídio, lignina e ácido orgânico, principalmente (PENNING DE VRIES; LAAR; CHARDON, 1983).

O índice de colheita (IC, kg.kg⁻¹) se refere à fração da massa de matéria seca de grãos de soja (ou de milho) em relação à massa matéria seca total (DOORENBOS; KASSAM, 1994; LIMA, 1995; GADIOLI, 1999; BARROS, 1998; SÁ, 2001).

A produtividade potencial de grãos (Γ , kg.ha⁻¹) pode então assim ser calculada:

$$\Gamma = \frac{FS_a \cdot IC}{1 - u} \quad (46)$$

em que u se refere ao teor de água (g.g⁻¹) no grão de soja (ou de milho).

3.7.2 Produtividade atingível

Após a determinação da produtividade potencial para condições adequadas de suprimento de água, corrigiu-se o resultado considerando condições de agricultura de sequeiro, isso é, de acordo com a disponibilidade hídrica pluvial local, e depleção pelas limitações presentes de disponibilidade de nutrientes e também por fatores de perda relacionados ao manejo, incluindo as dificuldades impostas pela declividade do terreno e restrições edáficas (profundidade, drenagem, textura e estrutura) sob uma condição de alto emprego de tecnologia e insumos.

Para estimativa da produtividade atingível foi utilizado o modelo proposto por Doorenbos e Pruitt (1975) modificado por Dourado Neto et al. (2010). Para tal, foram utilizados os seguintes parâmetros: (i) evapotranspiração potencial, (ii) evapotranspiração real, (iii) coeficiente de sensibilidade (K_y) da espécie ao estresse hídrico, (iv) profundidade (cm) efetiva do sistema radicular (correspondente a 90% da evapotranspiração potencial) específica para cada espécie e (v) capacidade de retenção específica de água do solo. Para o cálculo da evapotranspiração real, armazenamento de água no solo, deficiência e excedente hídrico, foi realizado o balanço hídrico segundo metodologia proposta por Thornthwaite e Mather (1955, 1957) utilizando o critério de Mendonça (1958) para iniciar o balanço hídrico. O modelo de crescimento inclui uma rotina de simulação de semeadura em todos os meses do ano para seleção do período coincidente à menor restrição hídrica e, portanto, à maior produtividade atingível.

Para as culturas de soja e de milho, a produtividade atingível (Θ , kg.ha⁻¹) foi estimada utilizando o seguinte modelo determinístico:

$$\Theta = \Gamma \cdot \frac{ET_a}{ET_o} \cdot \Phi \cdot \varphi \quad (47)$$

em que Γ se refere à produtividade potencial (kg.ha⁻¹) de soja ou de milho, ET_o à evapotranspiração potencial de referência (mm.dia⁻¹), ET_a à evapotranspiração real (mm.dia⁻¹), Φ ao fator de depleção devido aos fatores redutores de produtividade (água e nutrientes) das culturas de soja e de milho (implementado com variação espacial estocástica) e φ ao fator de depleção de produtividade por qualidade de solos e relevo para as culturas de soja e de milho.

3.7.3 Produtividade real

Após a determinação da produtividade potencial dos cultivos, procedeu-se a depleção pelos fatores limitantes de disponibilidade de água e nutrientes, ambiente de produção e restrições de manejo (plantas daninhas, pragas e doenças, principalmente), sob condição de baixo emprego de tecnologias e insumos, a fim de estimar o valor da produtividade real (DOORENBOS; PRUITT, 1975; DOORENBOS; KASSAM, 1994).

A produtividade real das culturas está associada e condicionada ao manejo fitotécnico e sistema de produção adotado, que por sua vez são função de fatores culturais e socioeconômicos, que determinarão, em última instância, o pacote tecnológico a ser assumido dentro do modelo. Por isso, nesse estudo, como condicionante ao tipo de manejo para estimativa da produtividade real, foi efetuada modelagem adotando baixa adoção de tecnologia e insumos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização edáfica

4.1.1 Classes de solos

A Figura 17 ilustra as classes de solos encontrados na região da UEMOA. Observa-se, na Figura 17, que a região formada pelo sul do Níger, centro sul de Mali, centro norte de Burkina Faso e norte de Senegal, denominada cinturão de Sahel, é recoberta por extensa e larga faixa de Neossolo Quartzarênico (*Arenosols*) que, ao norte, no território do Níger e Mali, é substituído pelas dunas desérticas, com ocorrência de grandes áreas de Neossolo Litólico (*Leptosols*) e solos de origem calcítica (*Calcisols*), gypsítica (*Gypsisols*) e afloramentos rochosos.

Figura 17 - Classes de solos dos países que pertencem à União Econômica e Monetária do Oeste Africano (UEMOA): (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger pela classificação SiBCS (EMBRAPA, 2006) e WRB (FAO, 2006)

A área ao norte do paralelo 15° norte é predominantemente caracterizada por planícies com solos rochosos fracamente desenvolvidos (Neossolos regolíticos, Cambissolos e Neossolos litólicos) e dunas de areia, entrecortadas por solos salinos e acúmulo de gesso (*Solonchaks* e *Gypsisols*). Os solos pedregosos são formados onde rochas foram recobertas

por alguma vegetação, permitindo certo intemperismo in situ e os salinos através da evaporação de antigos lagos.

Ao sul da faixa de Sahel, região que engloba sul do Mali, Burkina Faso, Togo e Benim há a predominância de Argissolos (*Lixisols*). A Costa do Marfim também tem a maior parte do território tomada por Argissolos, mas nesse caso são os Acrisols, presentes juntamente com grandes áreas de Plintosolo, que cobrem a região centro-sul de Burkina Faso e central de Benim. Togo tem seu território quase todo recoberto por Argissolos (*Lixisols*) e Luvissolos.

Em Guiné Bissau há grandes extensões do território com Argissolos (*Lixisols* e *Acrisols*) associados ao Neossolo Litólico; enquanto Senegal apresenta variados tipos de solos, como num mosaico, mas com predominância dos Neossolos Quartzarênicos e Argissolos (*Lixisols* e *Acrisols*).

De forma geral observa-se que a região árida da UEMOA é altamente dominada por solos muito jovens e, em algumas localidades, ainda com afloramento de rochas; condição essa originada pelo escasso regime de chuvas local.

A região leste de Mali e norte de Níger apresenta domínio do deserto de Saara e grande extensão de área caracterizada por solos planos. Aridez e elevadas temperaturas são fatores preponderantes nessa região, cuja precipitação anual é extremamente irregular e inferior a 100 mm.ano^{-1} . Região de alta insolação, baixa umidade e elevadas temperaturas que podem chegar facilmente a 40° C durante o dia. Neossolos quartzarênicos recobrem quase toda metade norte dos territórios de Mali e Níger; os Neossolos litólicos são encontrados ao norte de Mali, nas Montanhas de Ahaggar, região vulcânica com cerca de 1.000 m de altitude. Ao norte do Níger há um grupo de montanhas graníticas, com picos agudos de 2.000 metros de altitude, dentro do deserto do Saara. Ao redor do deserto desprovido de vegetação, a elevação dessas faixas de montanhas possibilita um leve aumento na umidade e redução das temperaturas no verão. Como resultado, há formação de um ecossistema típico caracterizado por presença de arbustos e lagos secos.

Os Neossolos Quartzarênicos (*Arenosols*) são os solos dominantes na África e em todo mundo, ocupando 22% de todo território africano. De forma geral, revestem mais da metade de todo território da UEMOA (Figura 17). Na Mauritânia, país a oeste de Mali, as areias formam longas dunas que geralmente se estendem por mais de 10 km, podendo atingir até mais que cem metros de altura (JONES et al., 2013). A área rochosa, ao nordeste de Mali, dentro do deserto do Saara, na divisa com Argélia, é conhecida como Plateau de Tanezrouf, uma das áreas mais isoladas e quentes do planeta, chegando a temperaturas diárias de 50° C ,

noites extremamente frias, ausência total de vegetação e com raras ocorrências de chuvas, acumulando menos de 80 mm.ano^{-1} de precipitação.

Na região de fronteira entre Senegal e Mauritânia, o inverno um pouco mais úmido permite o desenvolvimento de vegetação e, conseqüentemente, maior formação de solos ao longo do Rio Senegal. A região de Gleissolos, Vertissolos e Neossolos flúvicos que cobrem extensa área do delta de Senegal e região alagada pelo rio são altamente produtivas e densamente povoadas. Os cultivos de milho, arroz e hortaliças são os principais cultivos, muito embora a salinização represente um problema. As flutuações do lençol freático, rico em ferro, aumentam as áreas de Plintossolos no Senegal ao norte, na divisa com a Mauritânia (JONES et al., 2013).

Os Gleissolos aparecem na região sudoeste de Níger, próximo ao rio Níger, que nasce nas montanhas na fronteira entre a Guiné e a Serra Leoa, dirige-se para norte e depois para nordeste, em forma de arco, passando pela capital do Mali e depois no meio do deserto do Saara passando pela capital do Níger e servindo de fronteira entre este país e o Benim e desagua no Golfo da Guiné, num enorme delta no sul da Nigéria onde inundações periódicas e acúmulo de material aluvial fazem dessa região a mais importante para a agricultura regional. Ao norte do Níger aparecem os solos calcáreos e afloramentos rochosos, solos rasos que dão à paisagem aparência de uma crosta avermelhada. A desertificação nessa área também é um problema, e visivelmente acelerada pela expansão do deserto nas áreas agricultáveis, acompanhada pela seca, fome e intensa convulsão social. Na segunda metade do século XX, o rápido crescimento populacional trouxe mais estresse na região do Sahel pois o intenso corte de árvores e arbustos, para serem usados como lenha, bem como o super pastejo, resultaram no descobrimento do solo, com posterior remoção dos horizontes superficiais pela ação da água da chuva e vento.

Áreas de Benim, Togo, Burkina Faso, sul de Mali e sul de Níger, próximo ao paralelo 15° norte, apresentam um padrão de distribuição que transita do semiárido de Sahel para o clima mais tropical do oeste da África, apresentando também material parental derivado da West African Shield, formação rochosa que conta com 3 bilhões de anos, composta por granitos e gnaisses.

Em direção ao sul do paralelo 10° norte, os níveis de precipitação são significativamente mais altos, ao sul de Benim e Gana as chuvas atingem $2.000 \text{ mm.ano}^{-1}$, suportando vegetação mais densa e perene e florestas tropicais semidecíduas. Os solos de Burkina Faso e alguns pontos de Togo e Benim refletem intensa lixiviação nas rochas da

West African Shield, garantindo extensas áreas de Argissolos e Vertissolos, em conjunto com Planossolos; Plintossolos também são altamente abundantes nessa área.

Costa do Marfim, Togo e Benim apresentam solo com intenso intemperismo nas rochas da West African Shield, devido condições de elevada umidade e temperatura.

A distribuição dos diferentes tipos de solo reflete a interconexão entre material de origem, topografia e clima. No oeste do continente africano, a intensa intemperização da West African Craton deu origem a suave ondulação da paisagem onde os *Acrisols* se desenvolveram a partir de granitos enquanto os *Alissols* de rochas mais básicas, ambos considerados Argissolos. Dos sedimentos aluviais na Costa do Marfim e Togo, foram desenvolvidos sob áreas de florestas, profundos amarelos e vermelhos *Ferralsols*, os Latossolos. Os Nitossolos são encontrados em encostas suaves entre as planícies costeiras e o platô do interior do Benim e Togo, enquanto Plintossolos também são encontrados em paisagens com ondulações suaves.

O processo de desertificação na UEMOA está visivelmente acelerado, com a tomada das áreas agrícolas pelo deserto. Associado a isso, tem-se o clima árido, o aumento da pressão de uso dos solos já susceptíveis, o desmatamento e a prática comum da queima dos restos das árvores não utilizados, bem como o aumento da população com consequente aumento da demanda de madeira para lenha e construção civil (JONES et al., 2013).

O deserto de Kalahari, situado ao sul da África, é considerado a maior extensão contínua de areia no mundo. Solos considerados jovens apresentam baixo nível de intemperismo e são extremamente susceptíveis à erosão eólica. Uma vez vegetados, há acúmulo de matéria orgânica na proximidade das plantas, com a possibilidade de formação de complexos de húmus e alumínio, melhorando sua estrutura e iniciando pedogênese (JONES et al., 2013).

A litologia descreve a composição mineral e estrutura do material geológico no qual houve a formação da rocha. A ocorrência de transporte de sedimentos carregados pelo vento no continente africano é considerada elevadíssima, tal qual ocorre em áreas vulcânicas (JONES et al., 2013).

Planícies no sul do Mali e Níger são cobertos por depósitos de areia; as topografias mais onduladas dão origem aos Neossolos regolíticos, que são solos pouco desenvolvidos e Neossolos litólicos, pedregosos em solo plano e cobertos por muitos depósitos de areia. Os Gleissolos da região oeste de Senegal e Mali são resultados de períodos de inundação no delta do Rio Níger, sendo solos extremamente importantes para a agricultura. Ainda, áreas de

Nitossolos foram desenvolvidas em depósitos ígneos localizados randomicamente no sul de Mali e Burkina Faso.

Neossolos quartzarênicos são solos arenosos que podem ter resultado da intemperização do material de origem local, desenvolvidos a partir de depósitos recentes de areia, assim como ocorre em desertos e praias. São solos profundos, com mais de um metro de profundidade de horizonte arenoso, ocorrem geralmente em ambientes extremos, de áridos a perhúmidos; formando paisagens que vão das recentes dunas de areias em praias com vegetação esparsa até áreas antigas e planas, sob florestas (INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE, 2001). Geralmente os Neossolos quartzarênicos são utilizados, nas regiões áridas, para o pastejo extensivo errante ou cultivos irrigados; nas regiões perhúmidas, devido serem altamente sensíveis à erosão são considerados inaptos à agricultura.

Os Neossolos quartzarênicos fazem parte de um dos grupos de solos com maior extensão na superfície terrestre, chegando a cerca de 7% de toda superfície, 22% de toda superfície do continente africano. As dunas ativas (*Dunes Sands*) não são consideradas solos, mas se fossem incluídas atingiriam 10% da superfície. Vastas áreas de solos profundos de areia são encontradas na África, como no deserto de Kalahari e na região do Sahel, bem como em diversas áreas no deserto do Saara (INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE, 2001).

A pedogênese dos Neossolos quartzarênicos em zonas áridas é completamente diferente das zonas tropicais. Em zonas áridas mostram um mínimo de desenvolvimento devido processos de formação que duraram longos períodos de seca e/ou devido o material de origem ser de eras recentes. Nas zonas tropicais podem ser formados sobre depósitos de areia – solos considerados jovens ou, no outro extremo, formações muito antigas. Nas zonas áridas os Neossolos quartzarênicos estão associados às dunas ativas. Evidentemente a formação de solos em tais dunas é irrisório até que as dunas sejam colonizadas por vegetação e percam mobilidade, quando o horizonte superficial começa a ter condições de se desenvolver (INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE, 2001).

Em zonas úmidas os Neossolos quartzarênicos apresentam desenvolvimento mais avançado que nas regiões áridas, podendo apresentar-se como solos extremamente jovens, formados por deposições eólicas, lacustres ou aluviais ou extremamente antigos, como resíduos de rochas intemperizadas que perderam todos os minerais primários, apenas com a presença de quartzo. Jovens Neossolos quartzarênicos são encontrados em praias e na zona

costeira; antigos Neossolos quartzarênicos são solos profundos, com mais de um metro de profundidade, que resultam de intensa e prolongada dissociação e translocação dos minerais devido intemperismo. São solos considerados extremamente permeáveis à água (INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE, 2001).

Argissolos, de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006), são solos medianamente profundos a profundos, moderadamente drenados, com horizonte subsuperficial com incremento no teor de argila que apresenta-se de baixa atividade, e elevada saturação por bases. São solos que desenvolvem-se a partir de diversos materiais de origem, em áreas de relevo plano a montanhoso. Na classificação da Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006), os Argissolos são subdivididos em *Acrisols* e *Lixisols*.

Os *Acrisols* são solos caracterizados pelo acúmulo de argila de baixa atividade em horizonte subsuperficial e pelo baixo nível de saturação de bases. Em classificação anterior, no Brasil, eram conhecidos como Podzólico vermelho-amarelo distrófico. Apresentam horizonte argílico a 1 ou 2 metros de profundidade, com CTC inferior a $24 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ e com saturação de bases inferior a 50%. São solos altamente intemperizados, ácidos, com baixos níveis de saturação de bases; encontrados sobre rochas ácidas, argilosas e extremamente intemperizadas; estão presentes em paisagens montanhosas ou topografia ondulada, em regiões tropicais ou clima de monção, subtropical ou regiões temperadas mais quentes. Devido baixa disponibilidade de nutrientes, bem como presença de alumínio tóxico, alta fixação de fósforo e susceptibilidade a erosão, são solos com severas restrições de uso. Na África são usados para agricultura de subsistência, em sistemas de rotação. Não são solos considerados muito produtivos, mas com melhor aproveitamento quando cultivados com culturas que apresentam tolerância ao alumínio. Os *Acrisols* são solos encontrados associados ou alternados com os *Nitisols*, *Ferralsols* e *Lixisols* (JONES et al., 2013).

Os *Lixisols* também apresentam horizonte subsuperficial argiloso sendo a argila de baixa atividade, mas apresentam alta a moderada saturação de bases. No Brasil, eram os chamados Podzólicos vermelho-amarelo eutróficos. São encontrados em regiões tropicais, subtropicais ou de clima temperado quente que apresentam pronunciada estação seca. Devem ser preferencialmente cultivados com florestas, cultivos perenes, pois são susceptíveis à erosão quando em declives. São solos que cobrem área de cerca de 430 milhões de hectares no mundo, sendo que mais da metade dessa área se encontrada na faixa de Sahel (JONES et al., 2013).

Os *Lixisols* apresentam saturação de bases e horizonte textural mais estruturado que os *Acrisols* e, quando cultivados, exigem medidas adicionais de conservação, como técnicas de terraceamento. Essa classe de solos pode ser encontrada junto com outros solos que apresentam horizonte B textural, como os *Alisols*, *Acrisols* e *Luvisols* cujas diferenças são inteiramente baseadas em propriedades químicas analíticas, o que dificulta sobremaneira a classificação feita apenas no campo. Os *Lixisols* tiveram o início de seu desenvolvimento sob condições de clima mais úmido que o atual; a intemperização sofrida durante os estágios iniciais de formação podem ter seguido por um enriquecimento químico em eras mais recentes, isto é, após mudança do clima com maior evaporação (INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE, 2001).

Outra classe de solos encontrada na UEMOA é a dos Neossolos Litólicos (*Leptosols*), que são caracterizados por serem muito rasos, recobrendo material rochoso ou calcário, mas também podem ser profundos e extremamente pedregosos. O horizonte rochoso deve se apresentar a menos de 25 cm da superfície do solo ou não apresentar horizontes classificados como mólico, ócrico, úmbrico ou vermítico. São solos encontrados em áreas de alta ou média altitude, com topografia acidentada, em todos os tipos de zonas climáticas, em áreas fortemente erodidas. Com relação ao manejo, são de baixo ou limitado potencial produtivo para cultivos ou pastejo itinerante, devem ser mantidos recobertos com florestas.

Os Neossolos Litólicos são os mais recorrentes da superfície terrestre, cobrindo cerca de 1655 milhões de hectares; encontrados desde os trópicos até os círculos polares, desde o nível do mar até as mais altas montanhas do planeta, estão espalhados em diversas áreas, também no deserto do Saara e desertos da Ásia. São solos jovens e as evidências de formação são limitadas a um horizonte A pouco pronunciado, sobre um horizonte B incipiente ou inexistente, quando está diretamente sobre material de origem não intemperizado. As características químicas e físicas dessa classe de solos são bastante variáveis; contudo quando em encostas, são mais férteis, porém, com maior susceptibilidade a erosão.

Na superfície recoberta pelos países da UEMOA, encontram-se ainda os Luvisolos (*Luvisols*) que apresentam a característica dominante da diferenciação textural entre os horizontes, com o horizonte superficial sendo deplecionado de argila que se acumula em subsuperfície, num horizonte argílico. São solos que apresentam argila de alta atividade, igual ou superior a $24 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, mas com horizonte subsuperficial não tão abrupto como ocorre nos Planossolos. Os Luvisolos ocorrem em regiões planas ou com leve ondulação, em regiões temperadas com estações seca e chuvosa bem distintas. São solos que apresentam boa

drenagem, boa aeração e boa capacidade de armazenamento de água; com alto potencial de uso na agricultura, visto as excelentes características físico-químicas, que dependem diretamente do material de origem.

Já os chamados Plintossolos (*Plintosols*) são caracterizados por conterem uma camada dura, denominada petroplintita, constituída por uma mistura de ferro, caulinita, quartzo e outros constituintes e que se mantém estável sob condições áridas e úmidas ou uma camada suave, denominada plintita, a pouca profundidade. No Brasil são os solos antigamente denominados Lateritas. A formação da camada de plintita está associada com encostas suaves onde há flutuação do nível do lençol freático. Os Plintossolos com a camada de plintita mais suave estão associados a áreas de florestas tropicais, como encontrados na costa leste da floresta Amazônica, enquanto que a petroplintita a solos em regiões mais secas, como na área sul de Sahel. O uso desses solos é restrito devido a presença da camada de plintita, bem como a susceptibilidade ao alagamento ou ao excesso de material pedregoso.

Em relação aos *Calcisols*, que não apresentam correlatos no SiBCS, são solos originados de rochas calcáreas e que ainda apresentam substancial acúmulo de calcário; comumente encontrados em regiões áridas ou semiáridas. São solos que apresentam horizonte cálcico ou petrocálcico até um metro da superfície e horizontes diagnósticos como ócrico ou câmbico, e horizonte argílico (cálcico, vértico ou gypsico). Geralmente é recoberto por vegetação esparsa, dominada por arbustos xerófitos; apresenta uso agrícola limitado e totalmente depende do manejo, contudo, sob irrigação e drenagem, a fim de evitar a ocorrência de salinização, pode ser considerado altamente produtivo. São solos bastante recorrentes na África, que recobrem 6% do continente (JONES et al., 2013), encontrados na região norte e no deserto do Saara, onde o clima é seco o suficiente para permitir o acúmulo de carbonato de cálcio no solo. São formados através da lixiviação de carbonatos na água de superfície que se precipitam no subsolo quando esse encontra-se saturado ou pela evaporação da água que dissolvia o carbonato. O precipitado de carbonato de cálcio pode preencher os poros do solo, agindo como um cimentante. São solos pouco explorados devido a barreira física representada pela camada de carbonato de cálcio, o que prejudica sobremaneira a penetração das raízes; na África é utilizado apenas no pastejo extensivo.

Muitas partes do Oeste Africano são compostas por rochas cristalinas, sendo resistentes a erosão e intemperismo, formando as terras altas de Guiné, Camarões e Benim. Igualmente resistentes são as rochas sedimentares mais antigas, principalmente os arenitos que também formam as terras altas presentes em Guiné e Mali, as rochas sedimentares mais jovens cobrem extensivamente áreas ao sul da Nigéria, Togo e Benim.

Outra classe sem correspondência direta no SiBCS é a dos *Gypsisols*, solos caracterizados pelo acúmulo de sulfato de cálcio. Esses são encontrados nas partes mais secas na zona de clima árido, predominantemente ao norte do Saara, recobrendo 2% do continente Africano (JONES et al., 2013).

Esses solos ocorrem em depressões de antigos lagos que foram secos por evaporação; o processo de formação dos *Gypsisols* é similar ao dos *Calcisols*, também apresentando uma camada dura que bloqueia a passagem e desenvolvimento de raízes.

4.1.2 Capacidade de água disponível

A Figura 18 ilustra a capacidade de água disponível (CAD, mm) dos solos dos países pertencentes a UEMOA. Mesmo sendo desértica, a região norte de Mali possui CAD elevado devido às formações marinhas e solo calcário.

Figura 18 – Capacidade de água disponível (CAD, mm) dos solos dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

A área ao sul do paralelo 15° norte apresenta os maiores níveis de CAD da UEMOA, mas numa composição em mosaico, variando de 50 mm a valores superiores a 125 mm. Observa-se que Guiné Bissau e Senegal apresentam a maior parte de seus territórios recoberta por solos de elevada CAD, acima de 100 mm.

A área ao norte ao paralelo 15° norte, no território de Mali e de Níger, apresenta CAD elevada nas regiões cobertas por solos calcáreos ou com sulfato de cálcio, bem como em solos salinos e Organossolos. De forma inesperada, Neossolos da área desértica de Mali e Níger apresentam CAD da ordem de 100 mm, o que pode ser explicado por estarem presentes na mesma paisagem, conjugados a Vertissolos e Gleissolos, os quais podem ser encontrados ao longo do Rio Níger, que atravessa o território de Níger e de Mali, bem como na região do Lago Chad, extremo sudeste de Níger em divisa com Chad, Camarões e Nigéria.

4.1.3 Relevo

A Figura 19 ilustra a variação do relevo dos países pertencentes a UEMOA, em metros acima do nível do mar, estando em marrom mais escuro as áreas mais elevadas, enquanto que em verde, as áreas inferiores a 400 metros. As regiões do paralelo 20° norte, do centro norte do território do Níger e extremo nordeste de Mali apresentam as maiores altitudes da UEMOA, com picos superiores a 1000 metros.

Figura 19 - Relevo da superfície (altitude, m) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

A topografia é um fator chave na formação dos solos e tem grande influência no clima local, na vegetação e no movimento de água. Montanhas podem afetar o volume e a

intensidade de precipitação, além do crescimento da vegetação, ainda que localmente, e a inclinação do terreno afeta a drenagem e o movimento dos materiais intemperizados. Mesmo pequenas variações na elevação podem ser importantes em áreas planas. Terraços de rios ou pequenas depressões podem criar condições para aumento da drenagem local ou *waterlogging*, respectivamente. A microtopografia pode afetar a taxa de evaporação, bem como ser particularmente importante se águas subterrâneas salinas ocorrem próximas à superfície.

A posição na paisagem também é muito importante. Geralmente, solos encontrados no topo de encostas tendem a ser facilmente drenados enquanto aqueles na parte inferior da encosta ou parte baixa dos vales geralmente apresentam drenagem prejudicada. Em alguns casos, o nível da água pode chegar próxima a superfície, nesses casos diferentes tipos de solo podem ocorrer do mesmo material parental, clima e mesmo tipo de vegetação. Solos que ocorrem na metade da encosta recebem sedimentos e soluções da parte mais alta, contudo, ao mesmo tempo, perdem materiais para os solos em posição inferior. Nesses casos, a forma atual da encosta é importante, podendo ser suave, irregular, convexa ou côncava resultando em solos com diferentes características (JONES et al., 2013).

A altitude média do continente africano é de aproximadamente 600 metros acima do nível do mar. Em comparação com outros continentes, a África caracteriza-se por pequenas áreas com elevações extremamente altas ou baixas; apenas 6% do território Africano apresenta elevação inferior a 100 metros. A região do noroeste africano apresenta menores altitudes quando comparada ao restante do território.

As regiões mais elevadas da UEMOA encontram-se ao noroeste e ao nordeste de Níger, respectivamente divisas com a Argélia e a Líbia. Dentro do deserto do Saara encontram-se as Air Mountains, com altitude média de 500 a 900 metros, mas com picos que superam 1800 metros, que se estendem por mais de 84 mil km² e o Tassilin n'Ajjer, com picos de elevação de 2000 metros (WIKIPEDIA, 2014). O território de Mali, Burkina Faso e sul de Níger apresenta altitude de cerca de 200 metros nas proximidades do Rio Níger, bem como Senegal e Guiné Bissau, que apresentam altitude inferior a 200 metros em todo território, recortado pelo Rio Senegal e outros rios de menor proporção; áreas do interior da Costa do Marfim, Togo e Benim caracterizam-se, de forma geral, por altitudes inferiores a 300 metros.

A diversidade topográfica é aproximadamente refletida na distribuição dos diferentes tipos climáticos, o que poderá ser comprovado quando da abordagem da classificação

climática. Consequentemente, o mapa topográfico pode atuar de certa forma como um guia para a melhor interpolação da classificação climática numa dada área. Por exemplo, elevações de relevo são usualmente correlacionadas com baixos níveis de evapotranspiração potencial, baixa deficiência hídrica e elevado excedente hídrico.

O padrão de evapotranspiração potencial reflete com certa proximidade a diversidade topográfica de uma região, embora não exista sempre correspondência exata com o contorno dessas elevações. O excedente e a deficiência hídrica resultam da comparação direta entre a evapotranspiração potencial e a precipitação, parâmetros esses que sofrem influência direta da condição topográfica local (CARTER, 1948).

4.1.4 Ambientes de produção para as culturas de milho e soja

A Figura 20 ilustra as classes de aptidão física dos solos encontrados na região da UEMOA, onde observa-se que 32% da área é considerada inapta a agricultura, notadamente no território de Mali e Níger, ao norte do paralelo 15° norte; 5% é considerada de baixa aptidão, encontrada no sudoeste de Mali, sudoeste de Senegal, interior da Costa do Marfim, de Togo e Benim e solos salinos do Níger e Mali.

Áreas com aptidão média são encontradas em 19% do território, mescladas com as áreas de baixa aptidão, com quase a mesma distribuição geográfica; as melhores áreas, consideradas de aptidão moderada e alta perfazem, respectivamente, 32 e 11,8% do território da UEMOA. Países como Guiné Bissau possuem a maior parte de seu território com solos de alta e moderada aptidão ao cultivo de anuais, bem como região centro sul de Mali, Costa do Marfim, Togo, Benim e sul de Níger (região cortada pelo rio Níger e próxima ao Lago Chad).

Figura 20 - Ambientes de produção dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger (BNDES, 2013)

4.2 Elementos do clima

4.2.1 Temperatura

A Figura 21 e a Figura 22 apresentam as temperaturas mensais médias ($^{\circ}\text{C}$) para a região da UEMOA referentes aos meses de janeiro a junho e julho a dezembro, respectivamente.

A região da UEMOA está compreendida entre a linha do Equador e o Trópico de Câncer, o que faz com que as temperaturas sejam permanentemente elevadas devido a intensa e frequente radiação solar, como consequência, a variação climática no continente se dá fortemente em função do volume e distribuição das chuvas.

Na Figura 21 e Figura 22, observa-se que o território composto pelos países da UEMOA pode ser dividido em três faixas quase horizontais e paralelas ao Equador, sendo a primeira ao sul do paralelo 10° norte, formada pela Costa do Marfim, Togo e Mali; uma faixa mais central, entre os paralelos 10° norte e 15° norte, formada pela Guiné Bissau, Senegal, sul de Mali, Burkina Faso e sul do Níger; e a última, ao norte do paralelo 15° norte, formada pelo centro norte de Mali e do Níger.

Observa-se na Figura 21 que a região formada pelo norte de Mali e norte de Níger, norte do paralelo 15° norte, dentro do deserto do Saara, apresenta as menores temperaturas médias dentro do território compreendido pela UEMOA, atingindo cerca de 17°C durante o mês de janeiro, por ocasião do inverno; nessa mesma região, temperaturas abaixo de 17°C são encontradas nas regiões mais montanhosas. A partir dos meses seguintes, a temperatura média sobe e atinge cerca de 35°C nos meses de maio e junho, enquanto que nas regiões setentrionais e de baixa altitude em Mali, Níger e Burkina Faso a temperatura média no inverno é de 20 a 27°C e permanece nessa faixa na chegada do verão.

Podemos observar na Figura 21 e na Figura 22 que os países litorâneos, como Togo, Benim, Costa do Marfim, Guiné Bissau e Senegal (com exceção da parte norte) apresentam as menores amplitudes térmicas ao decorrer do ano, oscilando entre 20°C e 30°C, bem como é uma das regiões de maior precipitação, conforme demonstrado na Figura 26. As menores amplitudes térmicas são devidas ao poder tampão da água. Considerando um solo em capacidade de campo, praticamente toda a radiação líquida é usada na evapotranspiração da água e apenas uma pequena fração permanece no solo ou aquece o ar.

Figura 21 - Temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger, referente aos meses de [A] janeiro, [B] fevereiro, [C] março, [D] abril, [E] maio e [F] junho

Figura 22 - Temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger, referente aos meses de [A] julho, [B] agosto, [C] setembro, [D] outubro, [E] novembro e [F] dezembro

As temperaturas mais altas da África ocorrem fora da região da UEMOA, na Mauritânia, Etiópia e Somália. A temperatura mais elevada registrada no mundo ocorreu na África, atingindo 58°C à sombra, em Al Aziziyah, na Líbia, em 13 de setembro de 1922. O deserto do Saara apresenta a maior amplitude de temperatura sazonal: temperaturas de inverno ficam entre 10 e 16°C e, no verão superam 35°C . Próximo ao Equador, as temperaturas não são excessivamente altas, com médias diárias de 24 a 27°C em todo ano; sendo que o tempo nublado e chuvas torrenciais previnem que as temperaturas ultrapassem os 33°C , dessa forma, a amplitude entre temperatura diurna e noturna é usualmente entre 2 e 5°C .

As regiões mais frias da África são no noroeste de Marrocos (região de montanhas) e sul da África do Sul (JONES et al., 2013).

Na Figura 23, observam-se que as temperaturas médias anuais do ar da região da UEMOA oscilam entre 20°C e 30°C. As temperaturas mais altas encontram-se na faixa central e ao norte do território UEMOA, isto é, ao nordeste de Senegal, centro norte de Mali, Burkina Faso e centro oeste de Níger, região compreendida pela faixa de Sahel e deserto do Saara.

Figura 23 - Temperatura média anual do ar (°C) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Os países litorâneos e quase todo território do Níger apresentam temperatura média de 26°C, com as menores temperaturas (20° C) nas regiões montanhosas. A Costa do Marfim, Togo e Benim apresentam as menores amplitudes térmicas, com a temperatura média de 26°C e mínima de 21°C, na zona litorânea.

Todo padrão climático apresenta um alinhamento com o esboço topográfico de uma dada região. Regiões com elevada amplitude topográfica apresentam as maiores diversidades climáticas enquanto áreas de planícies são notadamente distintas devido sua relativa uniformidade climática. A correlação entre os parâmetros de classificação climática e a altitude das montanhas aumenta com a altitude dessas (CARTER, 1948).

Na Figura 24, observam-se que as temperaturas mínimas anuais do ar da região da UEMOA oscilam entre 15°C e 20°C. As temperaturas mais baixas encontram-se na região mais árida, compreendida pela faixa de Sahel e deserto do Saara. O extremo norte do Níger e de Mali apresenta temperaturas mínimas inferiores a 17°C, o que proporciona amplitudes térmicas superiores a 30°C quando comparamos as temperaturas de inverno com as de verão, estação em que temperaturas apresentam-se superiores a 35°C (Figura 21-E, Figura 21-F, Figura 22-A, Figura 22-B).

Figura 24 - Temperatura mínima anual do ar (°C) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Na Figura 25 estão representadas as temperaturas máximas anuais do ar da região da UEMOA, compreendidas na faixa de 28 a 48°C. As menores temperaturas estão na faixa mais ao sul, oscilando entre 28°C e 33°C; na faixa central, no Sahel, temperaturas da ordem de 35°C a 40°C e, ao norte, na área desértica, as temperaturas podem atingir até mais de 45°C; alguns pontos de exceção, com temperaturas máximas mais baixas são encontradas em formações montanhosas.

Figura 25 - Temperatura máxima anual do ar ($^{\circ}\text{C}$) dos países que pertencem à UEMOA (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Com a linha do Equador se projetando bem em seu centro, a África é o continente com maior área tropical do mundo. Nas poucas montanhas com picos, temperaturas mais amenas podem ser encontradas, mesmo na faixa do Equador. As grandes amplitudes térmicas dependem das estações do ano e da radiação solar, que depende da latitude, altitude e proximidade com o oceano.

Os parâmetros climáticos que resultam das condições térmicas devem sofrer, ao longo das costas marítimas, o resfriamento proporcionado pela brisa do mar, que efetivamente é menor no interior, todavia, a influência do mar é provavelmente menos efetiva ao longo das costas litorâneas excessivamente úmidas devido à similaridade dos parâmetros térmicos entre oceano e zona costeira (CARTER, 1948).

4.2.2 Precipitação

Na Figura 26, observa-se a média anual de precipitação nos países da UEMOA. Uma das principais características descrita por diversos autores é a grande diferença entre os volumes de chuva encontrados nas diferentes partes do continente Africano (CARTER, 1948), e o mesmo ocorre nos países pertencentes à UEMOA. Na região do deserto do Saara, a precipitação média é inferior a 100 mm.ano^{-1} , enquanto na faixa litorânea de Guiné Bissau e da Costa do Marfim as precipitações são superiores a 1500 mm.ano^{-1} . Contudo, independente

do volume histórico da precipitação, tem-se que, na maior parte desses países, a ocorrência das chuvas está limitada a poucos meses do ano.

Figura 26 - Precipitação média anual (mm.ano^{-1}) nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Os maiores níveis de pluviosidade se concentram na faixa sul do paralelo $12^{\circ} 30'$ norte, na região litorânea de Guiné Bissau, costa oeste e litorânea da Costa do Marfim, região central de Togo e extremo sudeste de Benim. A maior precipitação na parte continental de Togo, se dá por chuvas de relevo em função da presença da cadeia de montanhas Togo Mountains. Em contrapartida, a região norte ao paralelo 15° norte, que contempla também o deserto do Saara, apresenta extrema aridez, com precipitação inferior a 100 mm.ano^{-1} ; a faixa de Sahel, ao sul dessa, apresenta média de 400 a 500 mm.ano^{-1} .

De forma geral, nos países da UEMOA, observa-se a ocorrência de duas estações bem definidas: uma chuvosa e outra seca. A estação das chuvas coincide com o período de verão, sendo que a distribuição das chuvas ao longo dos meses é diferente em cada um dos países. Na Costa do Marfim (Figura 4) e em Togo (Figura 9) a estação chuvosa é mais marcante que nos demais países, visto que as chuvas apresentam-se melhor distribuídas ao longo do ano, iniciando em abril e indo até outubro.

A ocorrência das chuvas é a responsável pela redução das elevadas temperaturas nos países da UEMOA; de forma geral observa-se que, durante os meses mais chuvosos, a

temperatura chega a ser reduzida na ordem de 8°C , quando comparamos as médias das temperaturas das estações seca e chuvosa. Níger e Mali são os países com a menor incidência de chuvas dentro da UEMOA, por apresentarem grande parte de seu território dentro da área de aridez, onde os volumes históricos médios de precipitação são baixíssimos. Exceção deve ser considerada para o extremo sul de ambos os territórios, já na faixa de Sahel, onde a pluviosidade média apresenta-se acima de 500 mm.ano^{-1} .

No método de classificação climática proposta por Köppen (1900), a média anual de precipitação é um dos critérios mais importantes, contudo, na classificação por Thornthwaite (1948) esse dado não é utilizado diretamente, mas sim comparado com a evapotranspiração potencial e capacidade de armazenamento da água no solo na determinação da deficiência e excedente hídrico.

4.3 Evapotranspiração

4.3.1 Evapotranspiração potencial

A Figura 27 ilustra a média anual de evapotranspiração potencial dos países da UEMOA. As áreas com os menores níveis de evapotranspiração potencial, ao redor de 1300 mm.ano^{-1} , coincidem com as costas litorâneas do Senegal, Guiné Bissau, Costa do Marfim, Togo e Benim, bem como com o extremo norte de Níger e de Mali. Nas regiões litorâneas a evapotranspiração potencial se mostra mais baixa do que no interior do continente visto as menores temperaturas dessa região; no extremo norte de Níger e de Mali devido condição de relevo com maiores altitudes.

Os resultados encontrados corroboram com os apresentados por Virmani, Reddy e Bose (1980), quando esses observaram que a evapotranspiração potencial no oeste Africano era inversamente proporcional à distribuição das chuvas, com os menores valores de evapotranspiração nas áreas com maior precipitação, onde está o litoral, mas aumentando em direção ao Sahel.

A região representada em matizes de azul, do paralelo 10° norte ao 20° norte, é a que apresenta as maiores médias de evapotranspiração potencial, chegando a volumes de 1700 mm.ano^{-1} . É a região representada pelas mais elevadas temperaturas mensais médias durante o verão (Figura 21E e Figura 21F), compreendendo toda a faixa semi desértica e desértica, onde a evapotranspiração potencial calculada por Thornthwaite (1948) ultrapassa em muito os volumes de precipitação, o que fica claramente demonstrado na Figura 27. Walker (1962)

calculou valores de evapotranspiração potencial para o deserto do Saara da ordem de 2000 mm.ano^{-1} .

Figura 27 - Evapotranspiração potencial de referência (ET_o , mm.ano^{-1}) média anual dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

4.3.2 Evapotranspiração real

A Figura 28 apresenta as médias da evapotranspiração real para os países da UEMOA, onde é possível observar-se que a região norte do paralelo 15° norte apresenta evapotranspiração real inferior a 100 mm.ano^{-1} , devido a condição de extrema limitação hídrica. Todavia, na faixa litorânea da Costa do Marfim, Togo e Benim, a evapotranspiração real se iguala a potencial que é de 1300 mm.ano^{-1} (Figura 27), demonstrando que, num contexto geral, nessas áreas não há problema de restrição hídrica.

Na transição entre as regiões sul e norte do paralelo 15° norte, ilustrado na cor amarela, encontra-se a faixa de Sahel, cuja evapotranspiração real anual está entre 300 e 500 mm.ano^{-1} , o que demonstra claramente a redução da disponibilidade hídrica quando partimos da linha do Equador rumo paralelo 20° norte.

Figura 28 - Evapotranspiração real média anual (ETa , mm.ano^{-1}) dos países que pertencem à UEMOA): (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

4.4 Balanço hídrico cíclico

4.4.1 Deficiência hídrica

Na Figura 29, observa-se que a deficiência hídrica, em maior ou menor grau, prevalece em todo o território composto pelos países da UEMOA, compreendendo também a região litorânea da Costa do Marfim, Togo e Benim, onde o volume de precipitação atinge níveis superiores a 1500 mm.ano^{-1} (Figura 26).

A região compreendida ao norte do paralelo 15° norte apresenta deficiência hídrica superior a 1000 mm.ano^{-1} . As zonas litorâneas da Costa do Marfim, Togo e Benim apresentam deficiência hídrica relativamente menos intensa, de 100 mm.ano^{-1} , ao menos em uma época do ano; na zona litorânea de Senegal e Guiné Bissau, a deficiência hídrica é maior, chegando a 1000 mm.ano^{-1} , o que demonstra que a faixa da condição climática na qual esses países se encontram impõe características climáticas mais marcantes que aquelas proporcionadas pela proximidade com o mar.

Figura 29 - Deficiência hídrica média anual (DH, $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) dos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

A deficiência hídrica representa a demanda de umidade, para armazenamento no solo, que não foi suprida pela precipitação. A Figura 29 demonstra que, mais da metade de todo território composto pelos países da UEMOA apresenta deficiência hídrica de, pelo menos, $400 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$; o mesmo ocorre com o restante do continente Africano, segundo Carter (1948).

Os maiores níveis de deficiência hídrica ocorrem no deserto do Saara, onde mais de $1400 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ de água por ano seriam necessários a fim de corrigir a condição de seca. O deserto do Saara apresenta os maiores níveis de deficiência hídrica em toda região, com cerca de $1500 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, média próxima àqueles apresentados no cálculo da evapotranspiração potencial (1600 a $1700 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$).

4.4.2 Excedente hídrico

Na Figura 30, observa-se que há excedente hídrico no território da UEMOA, em menor ou maior grau, apenas na região formada ao sul do paralelo 15° norte, compreendendo o sul de Senegal, Guiné Bissau, extremo sudoeste de Mali, centro sul de Burkina Faso, Costa do Marfim, Benim e Togo. Ao norte dessa área, não há excedente hídrico, visto que a

ocorrência de precipitação inferior a 100 mm.ano^{-1} (Figura 26) não garante volume suficiente de água sequer, ao armazenamento de água no solo.

Figura 30 - Excedente hídrico médio anual (EH, mm.ano^{-1}) nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Na região com total ausência de excedente hídrico, ocorrem elevados níveis de deficiência hídrica, da ordem de 1500 mm.ano^{-1} (Figura 29), condição que domina a região norte de Senegal, norte de Burkina Faso, praticamente todo território de Mali e do Níger.

As áreas com excedente hídrico superior a 500 mm.ano^{-1} são extremo sul de Senegal, todo território de Guiné Bissau, extremo sul de Mali, região oeste e litoral da Costa do Marfim e região central de Togo.

A divisa ocidental da Costa do Marfim com Libéria e Guiné é recoberta por áreas de reserva natural, com cadeia de montanhas e o Monte Nimba, daí o maior excedente hídrico na região limítrofe entre esses.

O excedente hídrico representa o volume de precipitação que excede a demanda de água necessária para que o solo se mantenha na capacidade de campo, podendo ser equivalente ao escoamento superficial (CARTER, 1948). Contudo, o excedente hídrico também pode ter como destino a percolação profunda.

Frente ao exposto, o excedente hídrico de mais de 500 mm.ano⁻¹, por exemplo, em Guiné Bissau, certamente representa um sério problema local devido a elevada concentração das chuvas num só período, nesse caso, durante o verão, período que vai de junho a agosto.

4.5 Classificação climática por Köppen (1900)

A Figura 31 ilustra as classes climáticas propostas por Köppen (1900) para os países que pertencem à UEMOA, onde foram observados apenas os grupos climáticos A (tropical) e B (árido) subdivididos em seis tipos climáticos.

Figura 31 - Classes climáticas propostas por Köppen (1900) para os países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Sobre os seis tipos climáticos encontrados para os países pertencentes à UEMOA, temos que a primeira letra é um indicador de grupo e a segunda, um indicador de tipo. Em estudos de classificação climática em todo o continente Africano, Peel, Finlayson e McMahon (2007) encontraram três grupos climáticos (A, B e C), dos quais o dominante é o árido, representado pela letra B, com 52,7% do território, seguido do tropical representado por A (31,0%) e o temperado, representado por C (11,8%). Para a região da UEMOA, no presente estudo, apenas os grupos tropical e árido foram encontrados.

Segundo Peel, Finlayson e McMahon (2007) os cinco grupos climáticos descritos na classificação de Köppen (1900) são: tropical (A), árido (B), temperado (C), frio (D) e polar (E), cujos critérios de classificação seguem na Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15. Considerando as subordens, são ao todo 30 (trinta) tipos climáticos classificados, cujos principais critérios que estabelecem os limites de classificação são precipitação e temperatura.

A classificação climática que se inicia com a letra A indica grupo de clima tropical, caracterizado pela temperatura média superior a 18°C (ao nível do mar e a baixas altitudes) em todos os meses do ano, podendo ser subdividido em: (i) Af: clima de floresta tropical, que apresenta em todos os meses do ano precipitação média superior a 60 mm; ocorre usualmente próximos ao Equador, na faixa de 5 a 10° de latitude, não apresentando as estações do ano bem definidas, e (ii) Am: clima tropical de monções, caracterizado pelos ventos de monções que têm diferentes direções dependendo da estação do ano. Esse tipo climático apresenta o mês mais seco do ano com precipitação inferior a 60 mm.

O tipo climático floresta tropical (Af) foi determinado apenas em uma pequena região localizada na costa extremo sudoeste da Costa do Marfim; enquanto o clima tropical de monções (Am) cobre uma grande porção do território ao sul do paralelo 12° 30' norte, no território ao sul de Senegal e de Mali, Guiné Bissau, Costa do Marfim, sul de Burkina Faso, Togo e Benim.

A classificação que se inicia com a letra B indica grupo de clima árido, caracterizado por baixos níveis de precipitação, inferiores a valores críticos de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, demonstrados na Tabela 11.

Climas de deserto são tipicamente encontrados na faixa subtropical, onde a radiação solar é elevada durante todo o ano, com correntes de ar estáveis e alta pressão. Essas áreas estão localizadas entre 30° de latitude sul e norte, denominadas de “horse latitude”. Se, durante o dia a temperatura máxima pode chegar facilmente a mais de 40°C, durante os períodos mais frios do ano, as temperaturas noturnas podem chegar a níveis negativos devido a elevada perda de radiação decorrente da total ausência de nuvens.

Partindo do exposto acima, observa-se que a região da UEMOA encontra-se dividida em faixas climáticas quase paralelas ao Equador (Figura 31). Toda região da UEMOA, ao norte do paralelo 12° 30' norte, é classificada como clima árido (B). A faixa compreendida entre os paralelos 12° 30' norte e 15° norte representa o clima árido de estepe ou semiárido (BSw), que vai da costa oeste de Senegal, atravessando o território de Mali, norte de Burkina

Faso até o sul de Níger, o qual caracteriza-se por ser mais úmido do que o clima árido de deserto; mais ao norte dessa, encontra-se a classe climática de maior projeção na região da UEMOA e de todo continente Africano, conforme citado por diversos autores, que é o clima árido de deserto (*BW_w*), que prevalece desde o norte de Senegal, atravessando grande porção do território do Mali e dominando quase todo o território do Níger.

Mais ao norte do paralelo 20° norte, há ainda outros dois tipos de clima árido, a primeira de *BW_x* ocupando o norte de Mali e até uma pequena porção do território de Níger, seguida por *BWs*, no extremo norte de Mali.

De acordo com a classificação feita por Jones et al. (2013), o continente Africano está subdividido em faixas climáticas quase paralelas ao Equador, que atravessam todo o continente desde a costa banhada pelo Oceano Atlântico até o extremo leste, no Mar Vermelho e, mais ao sul, Oceano Índico. A partir do deserto do Saara, dentro do território de Mali e Níger, tem-se uma larga faixa classificada como clima árido quente, seguida rumo sul pelos climas semiárido, savana equatorial com inverno seco e equatorial de monções.

4.6 Classificação climática por Thornthwaite (1948)

A Figura 32 ilustra as classes climáticas de acordo com o sistema de Thornthwaite (1948) referente aos países que pertencem à UEMOA, onde foram observados cinco grandes grupos climáticos (Tabela 16 e Tabela 17) subdivididos em nove tipos de clima.

Figura 32 - Classes climáticas propostas por Thornthwaite (1948) referente aos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Segundo Rohli e Vega (2012) os cinco grupos climáticos descritos por Thornthwaite (1948) são: muito úmido (A), úmido (B), subúmido (C), semiárido (D) e árido (E), cujos critérios de classificação seguem na Tabela 16 e Tabela 17. Nesse caso, o principal critério que estabelece os limites de classificação é o índice hídrico que, quando igual a zero, divide as regiões entre úmidas e secas.

O clima muito úmido (A) foi detectado apenas em uma pequena porção no extremo sudoeste da Costa do Marfim, na divisa com a Libéria, cercado por áreas úmidas (B) que caracterizam a região limítrofe entre Costa do Marfim e Libéria, região litorânea da Costa do Marfim e todo território de Guiné Bissau. Outros blocos maiores são formados pelo clima subúmido (C), no interior da Costa do Marfim, Togo, Benim e faixa ao sul de Senegal, ao sul do paralelo 12° 30' norte.

Entre os paralelos 12° 30' norte e 15° norte, há a faixa de Sahel, representante local do clima semiárido (D), que atravessa desde a costa Atlântica de Senegal, incluindo a capital Dakar, até o extremo leste de Burkina Faso; essa é a faixa de transição entre os climas subúmidos (C) e a região árida (E) que recobre o deserto do Saara, dominando os territórios de Mali e Níger. Os climas semiárido e árido formam um grande bloco e ocupam mais de 50% do território composto pelos países membro da UEMOA, não havendo diferenciação

climática entre as áreas de planície e de montanhas. De acordo com Carter (1948), o regime árido também é dominante nas demais áreas do território Africano.

4.7 Produtividade potencial das culturas de milho e soja

O milho e a soja são espécies amplamente estudadas, o que possibilitou estimar a produtividade potencial (kg.ha^{-1}) a partir de um modelo determinístico de crescimento de cultura.

4.7.1 Produtividade potencial da cultura de milho

O mapa resultante da estimativa da produtividade potencial para a cultura de milho na região da UEMOA está apresentado na Figura 33.

Na Figura 33, observa-se que a produtividade potencial da cultura de milho na região da UEMOA é altamente promissora, com níveis superiores a $25.000 \text{ kg.ha}^{-1}$. Contudo, a região com os maiores potenciais produtivos, acima de $30.000 \text{ kg.ha}^{-1}$, está situada ao norte do paralelo 15° norte, região que enfrenta sérias restrições produtivas do ponto de vista da evapotranspiração real anual, representada pelo Sahel e áreas desérticas de Mali e Níger. A região litorânea dos países banhados pelo Atlântico apresenta os menores potenciais produtivos para essa gramínea, dentro da UEMOA, mas ainda com elevados níveis, alcançando $20.000 \text{ kg.ha}^{-1}$.

Esses elevados níveis de produtividade potencial alcançados são função das condições adequadas para o desenvolvimento de milho nessa região, podendo ser citadas: (i) temperatura do solo superior a 10°C por ocasião da semeadura; (ii) temperatura do ar por volta de 25°C durante o crescimento e desenvolvimento das plantas, abundância de luz; (iii) temperatura e luminosidade favoráveis (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Em virtude de pertencer ao grupo de plantas cujo mecanismo de concentração de carbono é reconhecido como C_4 , a planta de milho é afetada diretamente pela quantidade de radiação solar disponível. As maiores produtividades são alcançadas em condições de alta radiação, o que lhe confere alta produtividade biológica. Para esse cereal, em geral, a eficiência na conversão da radiação fotossinteticamente ativa em matéria seca é na ordem de 2,1 a 4,3 (média de 3,5) g.MJ^{-1} (KINIRY et al., 1989). O coeficiente de extinção de luz, segundo literatura específica, varia entre 0,49 e 0,67 (LINDQUIST et al., 2005).

Figura 33 - Produtividade potencial ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) da cultura de milho nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Inúmeras evidências experimentais apontam também que a temperatura constitui-se em um dos fatores de produção mais importantes e decisivos para o desenvolvimento do milho, embora a água e demais componentes climáticos exerçam diretamente sua influência no processo, contudo, importante lembrar que na estimativa da produtividade potencial, considerou-se o cultivo desse cereal na ausência de restrição hídrica. Regiões cuja temperatura média diária no verão é inferior a 19°C e temperatura média noturna abaixo de $12,8^{\circ}\text{C}$ não são recomendadas para o cultivo de milho (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Temperaturas do solo inferiores a 10°C e superiores a 42°C prejudicam sensivelmente a germinação das sementes, ao passo que aquelas situadas entre 25 e 30°C propiciam as melhores condições para o desencadeamento dos processos de germinação e emergência das plântulas. Por ocasião do período de florescimento e maturação, temperaturas médias diárias superiores a 26°C podem promover a aceleração dessas fases, da mesma forma que temperaturas inferiores a $15,5^{\circ}\text{C}$ podem prontamente retardá-las (BERGER, 1962). A elevação da temperatura contribui para a redução da taxa fotossintética líquida em função do aumento da respiração, interferindo diretamente na produção (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Temperaturas noturnas maiores que 24°C promovem um consumo energético elevado, em função do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados, com consequente queda na produtividade da cultura. Considerando a região desértica da UEMOA, a temperatura média noturna atinge os menores índices devido ausência do poder tampão promovido pela umidade do ar. Da mesma maneira, temperaturas acima de 32°C reduzem sensivelmente a germinação do grão de pólen, por ocasião de sua emissão (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). A maioria dos genótipos atuais não se desenvolve em temperaturas inferiores a 10°C, que é considerada a temperatura basal para a espécie.

De acordo com Shaw (1977), as maiores produções de milho ocorrem onde as temperaturas nos meses mais quentes oscilam entre 21°C e 27°C. Aparentemente, segundo o autor acima citado, não existe um limite máximo de temperatura para a produção de milho, no entanto, a produtividade tende a diminuir com o aumento da temperatura. A temperatura mínima para crescimento satisfatório do milho é de 10°C, a ótima varia de 28°C a 35°C e a máxima é de aproximadamente 45°C. Para o autor, as maiores taxas de crescimento foram alcançadas entre 29°C e 32°C.

O conceito de temperatura ótima deve ser visto com cautela, pois esta temperatura varia com o estágio de desenvolvimento da planta, por exemplo, a temperatura ótima para germinação não é a mesma para a floração ou frutificação, podendo ainda ser diferente da temperatura ótima para a fotossíntese (NUNES, 1993).

Com relação ao ciclo, a planta de milho é originalmente de dias curtos; portanto, a ocorrência de dias longos pode aumentar sua fase vegetativa e número de folhas. Contudo, trabalhos recentes demonstram que a resposta ao fotoperíodo só ocorre em latitudes superiores a 33° (VIEIRA JÚNIOR, 1999), o que não ocorre no território formado pela UEMOA. O fato fica bem evidenciado nos trabalhos citados por Nickell (1983), em que, com auxílio de refletores, foram cultivadas plantas em ambientes simulando dias curtos e longos até o início do florescimento. Posteriormente, as plantas foram transferidas para condições ambientes de fotoperíodo; as plantas cultivadas em períodos longos de iluminação eram maiores, apresentavam muitas folhas, maior índice de área foliar e maior rendimento de grãos do que as desenvolvidas sob períodos curtos de iluminação.

4.7.2 Produtividade potencial da cultura de soja

O mapa resultante da estimativa da produtividade potencial para a cultura de soja, na região da UEMOA, está apresentado na Figura 34, no qual observa-se que a região é altamente promissora para esse cultivo, com níveis superiores a 4.000 kg.ha⁻¹. A região com

os maiores potenciais, acima de $10.000 \text{ kg.ha}^{-1}$, é aquela situada ao sul do paralelo 15° norte até a linha do Equador. Rumo ao norte do paralelo 15° norte, a produtividade potencial da soja se reduz paulatinamente, chegando aos menores níveis, próximos a 5.000 kg.ha^{-1} ao norte de Mali; contudo, essa é a região com maiores restrições hídricas do ponto de vista da evapotranspiração real, conforme Figura 28.

A produtividade potencial de um determinado cultivo é função direta dos elementos do clima existentes em determinada região, sendo influenciada, principalmente, pela radiação solar e pelo regime térmico resultante do balanço energético, pela precipitação e pela disponibilidade hídrica, havendo ainda a influência do fotoperíodo, da umidade do ar e do solo, da velocidade e da direção do vento (HOOGENBOOM, 2000; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). No presente estudo, a produtividade potencial da cultura de soja foi estimada considerando condições adequadas de suprimento hídrico.

Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002) comentam que no cultivo de soja, além de fonte de energia para o processo de fotossíntese, a radiação solar fornece sinais ambientais para processos fisiológicos, determinantes em características morfológicas e fenotípicas, como estatura da planta, indução ao florescimento e ontogenia. Neste contexto, do uso da radiação solar e da eficiência fotossintética das plantas, salienta-se que as plantas de soja, por pertencerem à classe C_3 , apresentam menor eficiência no uso da radiação solar devido ao fato da enzima responsável pela carboxilação apresentar atividade carboxilase e oxigenase. A oxigenase é responsável pela diminuição da eficiência fotossintética, devido ao processo de fotorrespiração, o qual ocorre de forma insignificante em plantas C_4 , por exemplo, como o milho (TAIZ; ZEIGER, 2004). Para espécies do ciclo C_3 existe uma concentração crítica de CO_2 abaixo da qual a planta não consegue fotossintetizar o ácido 3-fosfoglicérico, cessando a fotossíntese líquida e aumentando a respiração de suas reservas, que também serão consumidas pela fotorrespiração, até que a planta morra de inanição. Para a soja, considera-se o ponto de compensação de CO_2 em 40 vppm de CO_2 em ambiente a 25°C .

Figura 34 - Produtividade potencial ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) da cultura de soja nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Em soja, a variação da eficiência do uso de radiação (EUR) se dá em função do estágio de desenvolvimento e da atividade metabólica da cultura. A EUR no período vegetativo aumenta a partir da emissão do quinto trifólio, quando a intensidade de acúmulo de fitomassa seca é alta, mantendo-se elevada até o enchimento de grãos, onde se acentua a translocação de fitomassa seca dos órgãos vegetativos para os reprodutivos (SCHÖFFEL; VOLPE, 2001). No período de enchimento de grãos, a EUR aumenta de forma linear, variando de $0,89 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ a $1,20 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Embora a planta apresente sombreamento e pequeno incremento de fitomassa seca de folhas, o aumento de translocação de fotoassimilados para os grãos é o principal responsável por esse comportamento (PENGELLY; BLAMEY; MUCHOW, 1999; PEREIRA, 2002). Confalone et al. (1997) observaram variação na EUR ao longo do ciclo da soja, encontrando valores próximos a $1,8 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ de radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

Salienta-se que EUR é condicionada por muitos fatores, como água, temperatura, CO_2 e nitrogênio; variando entre espécies como resultado de diferenças na capacidade fotossintética, e pelos componentes bioquímicos do produto da planta. A soja, devido produção de altos teores de proteínas e lipídeos, apresenta a menor EUR a taxas

fotossintéticas equivalentes quando comparada aos cereais que contém muito menos proteínas e lipídeos.

Quando há aumento da radiação solar em níveis máximos para a cultura da soja, Casaroli et al. (2007) observaram que uma das alternativas da planta para evitar danos é realizar a inclinação da folha para diminuir a interceptação luminosa, efeito que é de maior intensidade quando a alta luminosidade está associada a condições de baixa disponibilidade hídrica. Assim, a máxima EUR deve ser buscada para a cultura da soja através da identificação da resposta de cada cultivar e, principalmente, alterando as condições de manejo, como a população de plantas, o espaçamento entre linhas, a arquitetura de folha e a competição com plantas daninhas.

A temperatura é um dos elementos do clima mais importantes que afetam não só a fotossíntese, mas a respiração de manutenção, transpiração, o repouso vegetativo, a duração dos diferentes estádios de desenvolvimento, a indução ao florescimento, o conteúdo de óleo em grãos e a taxa de germinação de sementes, entre outros (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; MAVI; TUPPER, 2004). Tantas interferências tornam a temperatura um dos principais elementos do clima a ser considerado nos zoneamentos agroclimáticos, juntamente com a disponibilidade hídrica.

A condição ótima de temperatura do ar para crescimento e desenvolvimento da soja oscila entre 20°C e 30°C (EMBRAPA, 2011a, 2011b), sendo a temperatura adequada para seu desenvolvimento em torno de 30°C. Essa faixa de temperatura está associada ao máximo acúmulo de CO₂, obtida pela relação entre a fotossíntese bruta realizada pela planta em certa disponibilidade de energia (radiação solar) e a taxa de manutenção respiratória, função da temperatura do ar, balanço que resulta na fotossíntese líquida e no real acúmulo de CO₂ pela planta (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Como a fotossíntese bruta aumenta até certo ponto em função da temperatura do ar e a taxa respiratória aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura do ar, o ponto em que as retas da fotossíntese bruta e da taxa respiratória se cruzam, representam as temperaturas basais inferior e superior. O intervalo entre essas linhas é o total de fotossíntese líquida, ou seja, o que realmente poderá ser utilizado pela planta em seu crescimento, princípio base para os modelos de estimativa de produtividade.

A influência da temperatura na taxa de desenvolvimento da cultura é geralmente positiva (SETIYONO et al., 2007), mas também diminui sob valores extremos. Neumaier et al. (2000) destacam que se a temperatura do solo estiver acima de 55°C, plantas em fase

cotiledonar podem sofrer desestruturação das membranas celulares e desidratação, resultando em tombamento. Temperaturas do ar acima de 40°C têm efeito adverso na taxa de formação de nós e iniciação floral e resulta na abscisão da vagem.

O baixo desenvolvimento e crescimento da cultura à temperatura do ar inferior a 10°C está associada à temperatura basal da cultura, que se encontra entre 13°C (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009) e 14°C (CAMARGO et al., 1971), havendo a necessidade de que a temperatura do ar esteja acima da temperatura basal para que a floração seja induzida.

Segundo Castro, Kluge e Sestari (2008), eventuais diferenças nas datas de floração entre variedades cultivadas semeadas na mesma época podem ser decorrentes da variação de temperatura. Dessa forma, a floração precoce ocorre, na maior parte dos casos, devido a temperaturas mais elevadas, podendo levar à diminuição da altura da planta. No caso de deficiência hídrica ou de fotoperíodo crítico durante a fase de crescimento, esse problema pode ser agravado.

A maturação também pode ser acelerada em função de altas temperaturas. Quando associadas a períodos de umidade elevada, as altas temperaturas contribuem para a diminuição da qualidade da semente e, quando associadas às condições de baixa umidade, predispõem as sementes a danos mecânicos durante a colheita. Temperaturas baixas durante a colheita, associadas a período chuvoso ou de alta umidade, podem provocar atraso na data de colheita, assim como haste verde e retenção foliar.

Definido como o tempo em horas entre o nascer e o pôr-do-sol em um determinado lugar, o fotoperíodo é uma variável do ambiente, função da latitude local, que interfere tanto no crescimento quanto no desenvolvimento de algumas culturas, sendo a soja uma planta responsiva ao fotoperíodo.

A soja é considerada uma planta de dias curtos, o que infere a ocorrência da indução floral quando o comprimento do dia é inferior a um dado valor crítico, que pode variar entre 12 a 14 horas. Fietz e Rangel (2008) avaliaram o efeito do fotoperíodo para a cultura da soja em diferentes épocas de semeadura e observaram que quando a semeadura é realizada sob condição de fotoperíodo inferior ao crítico, as plantas de soja apresentam crescimento vegetativo insuficiente antes do florescimento. Contudo, em semeadura mais tardia, quando o fotoperíodo apresenta-se superior ao crítico, ocorre o máximo crescimento da cultura, com o aumento do período entre a emergência e o início de floração, quando comparada à semeadura precoce.

Câmara et al. (1997) trabalhando sob condição de casa de vegetação, observaram que quando o fotoperíodo é superior ao considerado crítico, as plantas apresentam maior altura devido a maior duração do subperíodo entre a emergência e o início da floração, tendo, conseqüentemente, maior acúmulo de fotoassimilados.

Ao avaliar a importância do fotoperíodo no desenvolvimento da soja, Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009) afirmam que seria impossível cultivá-la em condições de baixas latitudes com produtividade satisfatória devido ao baixo crescimento no período vegetativo. Porém, Hartwing e Kiihl (1979) identificaram que plantas de soja PI159925 apresentavam maior crescimento vegetativo e atraso da floração ainda que em ambientes sob fotoperíodo curto, característica que chamaram de longa juvenilidade. O desenvolvimento desta tecnologia descortinou a possibilidade de produção de soja em locais situados abaixo do paralelo 20° norte, incluindo áreas próximas à linha do Equador. As variedades de soja com período juvenil longo são especialmente importantes devido possibilidade de cultivo sob condições de baixas latitudes, bem como proporcionam maior flexibilidade no período de semeadura dentro da mesma latitude.

Rodrigues et al. (2001) afirmam que o estudo do tempo para o início da floração da soja, sob diferentes condições de fotoperíodo e temperatura do ar, são de suma importância para o manejo da cultura e no uso de modelos de crescimento e desenvolvimento. Em função da latitude e das variedades cultivadas, a duração do ciclo pode variar e, para um melhor entendimento, didaticamente utilizam-se classificações do material genético por grupos de maturação, o que também é utilizado nos Estados Unidos, englobando a interação dos fatores fotoperíodo, temperatura do ar e a adaptação do cultivar ao local de cultivo (ALLIPRANDINI et al., 2009).

A sensibilidade fotoperiódica da cultura de soja é uma restrição importante à sua adaptação em áreas de baixa latitude. Materiais cultivados fora de sua zona de adaptação florescem muito cedo ou muito tarde. Especialmente em áreas de latitude inferior a 20°, a magnitude fotoperiódica é baixa durante o ano; em geral, o alcance máximo da diferença da duração do dia a 10° de latitude é 1 hora e 10 minutos, mas a 45° chega a 6 horas e 55 minutos. Dessa forma, para o desenvolvimento do cultivo de soja na região da UEMOA, é imprescindível o desenvolvimento de materiais genéticos adaptados às condições locais e que apresentem longo período juvenil.

4.8 Produtividade atingível das culturas de milho e soja

A estimativa da produtividade atingível (kg.ha^{-1}) de milho e soja foi possível a partir de um modelo determinístico de crescimento da cultura que consistiu na determinação da produtividade potencial com a depleção pelas limitações hídrica e de nutrientes e também por fatores de perda relacionados à incidência de insetos-praga, doenças e plantas daninhas, incluindo as dificuldades impostas pela declividade do terreno e restrições edáficas, contudo, sob adoção de um cenário de uso de boas práticas agrônômicas, alto emprego de tecnologia e insumos.

4.8.1 Produtividade atingível da cultura de milho

O mapa de produtividade atingível da cultura de milho está apresentado na Figura 35, onde observa-se que a disponibilidade hídrica na região da UEMOA mostra-se como um fator preponderante para a redução da produtividade potencial estimada. A tendência de produtividade atingível mostra-se em proporção inversa à produtividade potencial, isto é, nas regiões onde a produtividade potencial era mais elevada, a atingível é a mais baixa. Ao norte do paralelo 15° norte, região considerada árida e desértica, a produtividade potencial mostrava-se superior a $30.000 \text{ kg.ha}^{-1}$, enquanto a atingível é inferior a 1.000 kg.ha^{-1} , tendo em vista a séria restrição hídrica que domina aquela região.

Do paralelo 15° norte ao 10° norte, sob clima considerado semiárido, a produtividade potencial apresentou-se em torno de $25.000 \text{ kg.ha}^{-1}$, enquanto a atingível mostra-se por volta de 3.000 kg.ha^{-1} ; mais ao sul do paralelo 10° norte, região considerada tropical, os menores níveis de produtividade potencial foram estimados, estando por volta de $20.000 \text{ kg.ha}^{-1}$, todavia, a produtividade atingível aponta níveis de 5.000 e 7.000 kg.ha^{-1} , que ainda são considerados bons do ponto de vista econômico.

Para o milho, as maiores exigências em água se concentram na fase de emergência, florescimento e formação do grão. Todavia, no período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina, o requerimento de um suprimento hídrico satisfatório aliado à ocorrência de temperaturas adequadas tornam tal período extremamente crítico. Daí, a razão pela qual a mencionada fase deve ser criteriosamente planejada, com o intuito de coincidir com período estacional que apresente temperaturas favoráveis (25°C a 30°C) e disponibilidade hídrica (FRATTINI, 1975).

Figura 35 - Produtividade atingível ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) da cultura de milho nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

Segundo Daker (1976), o consumo de água por parte da planta de milho nos estágios de crescimento, em clima seco e quente, não excede a $2,5 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$, mas pode atingir $6,5$ a $7,5 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ durante a floração e frutificação. De acordo com o mesmo autor, em condições de alta temperatura e baixa umidade o consumo máximo pode atingir $10 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$. Pesquisas mostram que a quantidade de água necessária durante o ciclo de vida da planta de milho está entre 500 e 800 mm (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Guiné Bissau, Costa do Marfim, extremo sul de Mali, Burkina Faso, Togo e Benim são os países que mais mostram aptidão para o cultivo de milho em condições de sequeiro. Claramente, a adoção da técnica por esses países exigiria levantamentos em menor escala a fim do melhor mapeamento das condições locais de cultivo.

4.8.2 Produtividade atingível da cultura de soja

O mapa de produtividade atingível da cultura de soja está apresentado na Figura 36, na qual observa-se que a produtividade atingível da cultura de soja na região da UEMOA mostra a mesma tendência geoespacial que a produtividade potencial; ao contrário do que ocorreu na estimativa das produtividades no caso do cultivo de milho.

Figura 36 - Produtividade atingível ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) da cultura de soja nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

A área ao norte do paralelo 15° norte, considerada de clima árido, indica a região com as menores produtividades atingíveis, função da séria restrição hídrica dominante nessa localidade.

Na região de transição entre o clima árido e o tropical, na faixa entre $12^\circ 30'$ norte e 10° norte, as produtividades atingíveis oscilam entre 1.500 e $3.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, que podem ser consideradas bastante interessantes, bem como as produtividades atingidas ao sul do paralelo 10° norte.

De forma geral, as produtividades atingíveis de soja mostram-se bastante factíveis com os níveis atualmente produzidos em propriedades comerciais em todo o mundo. Dessa forma, podemos elencar que os países de Guiné Bissau, sul de Mali, Costa do Marfim, Burkina Faso, Togo e Benim devem ser tidos como fortes candidatos ao cultivo dessa leguminosa, apresentando níveis de produtividade atingível superior a $3.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; lembrando que a produtividade média brasileira para a safra de 2013 foi por volta de $2.900 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

A água tem papel fundamental no desenvolvimento e crescimento da planta, pois atua em todos os processos fisiológicos e bioquímicos. A deficiência hídrica ocorre em razão da extração de água do solo pelas raízes não ser uma função linear e sim exponencial negativa

em relação ao armazenamento hídrico existente no mesmo, ou seja, começa a existir uma resistência à extração com a redução da umidade do solo, levando, conseqüentemente, ao fechamento estomático, fixando menos CO_2 , afetando negativamente a fotossíntese, acarretando em redução de produtividade (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

A água também atua como regulador térmico, agindo tanto no resfriamento quanto na manutenção e na distribuição do calor (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Chuvas excessivas também são prejudiciais, levando à redução da oxigenação dos solos, diminuindo a atividade radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas.

As fases mais críticas à disponibilidade hídrica na cultura de soja ocorrem entre a germinação e emergência e entre a floração e enchimento de grãos (CUNHA et al., 2001). No primeiro caso, tanto a deficiência quanto o excesso de água são prejudiciais à boa uniformidade na emergência de plantas, e a umidade do solo deve estar entre 50% e 85% da água disponível (FARIAS, NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). Embora as raízes possam atingir mais de 1,5 metros de profundidade, as atuais variedades cultivadas têm apresentado raízes pouco profundas, ficando a zona efetiva do sistema radicular ao redor de 40-50 cm. Solos pesados e compactados dificultam a penetração das raízes, reduzindo ainda mais a profundidade efetiva do sistema radicular das plantas de soja.

Como o consumo de água pela cultura da soja depende, além do estágio de desenvolvimento, da demanda evaporativa da atmosfera, o seu valor absoluto pode variar, tanto em função das condições climáticas de cada região como em função do ano e da época de semeadura na mesma região climática. Tem-se que a máxima exigência hídrica na soja ocorre nos estádios de floração e enchimento de grãos, decrescendo após esse período. Em estudos realizados no sul do Brasil, Berlato, Matzenauer e Bergamaschi (1986) obtiveram valores médios de evapotranspiração potencial da cultura (ETc , mm.dia^{-1}) ao redor de 6 mm.dia^{-1} . Segundo os mesmos autores, o menor consumo foi verificado no início do ciclo (2,7 mm.dia^{-1}) e o maior no início da floração até o início do enchimento de grãos (7,5 mm.dia^{-1}). Para todo o ciclo da cultura, foi obtida uma ETc de 827 mm.

Em trabalhos de zoneamento agroecológico, os coeficientes de cultura que melhor expressaram o consumo hídrico em cada estágio fenológico da cultura foram adaptados por Berlato, Matzenauer e Bergamaschi (1986) e por Doorenbos e Kassam (1979), resultando nos seguintes valores por período: 0,56 ($S-V_2$); 1,21 (V_2-R_1); 1,50 (R_1-R_5/R_6) e 0,90 (R_6-R_8) (FARIAS, NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

Trabalhos conduzidos por 15 safras na Embrapa Soja, em Londrina-PR, com a avaliação de diversas variedades cultivadas sob diferentes condições de disponibilidade hídrica, verificou-se que os maiores rendimentos de grãos foram obtidos com 650-700 mm de água bem distribuídos ao longo do ciclo. O volume adequado de água para atender às necessidades da cultura durante os estádios R₁-R₆ foi na ordem de 120 a 300 mm, bem distribuídos, variando de 30 a 60 dias a partir do início da floração, em função da variedade cultivada e das condições climáticas durante a estação de crescimento.

Segundo Melo, Fontana e Berlato (2004), a disponibilidade hídrica é o principal fator limitante na manutenção e obtenção de altas produtividades para a cultura da soja no Rio Grande do Sul, um dos principais estados produtores de soja no Brasil. Estima-se que 93% das perdas na safra de soja no Rio Grande do Sul ocorram em razão da deficiência hídrica (BERLATO; FONTANA, 2003), pois esta região está sob a influência do fenômeno El Niño Oscilação sul, que altera os padrões de precipitação na maioria dos anos, de forma positiva em anos da fase El Niño, e negativa em anos da fase La Niña (BERLATO; FARENZENA; FONTANA, 2005).

Importante notar que os países e regiões indicados para o cultivo de milho em condições de sequeiro, também são aqueles cujo cultivo de soja se mostra absolutamente viável do ponto de vista técnico, sendo eles: Guiné Bissau, sul de Mali, Costa do Marfim, Burkina Faso, Togo e Benim.

4.9 Produtividade real das culturas de milho e soja

A estimativa da produtividade real (kg.ha⁻¹) de milho e soja foi calculada a partir da produtividade potencial estimada com a depleção pelas limitações hídrica e nutricional, também por fatores de perda relacionados à incidência de insetos-praga, doenças e plantas daninhas, incluindo as dificuldades impostas pela declividade do terreno e restrições edáficas, considerando ainda a adoção de um cenário de baixo emprego de tecnologia e insumos; o que caracteriza a restrição sócio-econômica. Os resultados encontrados em ambos os cultivos foram, respectivamente, bastante similares àqueles indicados como produtividade média nos dados levantados pela FAO (2015).

4.9.1 Produtividade real da cultura de milho

O mapa de produtividade real para a cultura de milho está apresentado na Figura 37, onde observam-se que os níveis de produtividade real atingidos encontram-se na faixa de 500 a 3.000 kg.ha⁻¹, que podem ser considerados pertinentes aos níveis encontrados no continente

Africano, cuja produtividade média de milho para a safra de 2013 foi de 2.033 kg.ha^{-1} enquanto que a brasileira foi de 5.258 kg.ha^{-1} (FAO, 2015).

O mapa de produtividade real acompanha exatamente a mesma tendência de distribuição geoespacial que o mapa de produtividade atingível, isto é, com os países localizados ao norte do paralelo 15° norte, região considerada árida, os menores níveis de produtividade (inferiores a 500 kg.ha^{-1}); aqueles situados entre os paralelos 15° norte e $12^\circ 30'$ norte, faixa de clima semiárido, níveis aproximados de 1.500 kg.ha^{-1} e, aqueles ao sul do paralelo 10° norte, região tropical, os melhores níveis de produtividade, oscilando entre 2.500 e 3.500 kg.ha^{-1} .

Figura 37 - Produtividade real (kg.ha^{-1}) da cultura de milho nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

4.9.2 Produtividade real da cultura de soja

O mapa de produtividade real da cultura de soja está apresentado na Figura 38, na qual observa-se que a produtividade real para a cultura de soja na região da UEMOA mostra a mesma tendência geoespacial de distribuição que a produtividade potencial e a atingível; situação contrária ao que ocorreu na estimativa das produtividades no caso do cultivo de milho.

A área ao norte do paralelo 15° norte indica que a região árida apresenta as menores médias de produtividade real, cerca de 500 kg.ha⁻¹, função da séria restrição hídrica aí dominante. Contudo, do paralelo 15° norte ao 12° 30' norte, faixa de semiárido, os níveis de produtividade chegam a 1.000 kg.ha⁻¹, enquanto ao sul do paralelo 10° norte, já na região tropical atingem 2000 kg.ha⁻¹. A produtividade média de soja no Brasil, no ano de 2013 foi de 2.920 kg.ha⁻¹ e a da África foi de cerca de 1.800 kg.ha⁻¹.

Figura 38 - Produtividade real (kg.ha⁻¹) da cultura de soja nos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Benim, (vii) Togo e (viii) Níger

A afirmação de que, no continente Africano, a região oeste é a que melhor oferece condições para o desenvolvimento agrícola do ponto de vista climático (CARTER, 1948) pode ser em parte comprovada do ponto de vista absoluto visto os elevados níveis de produtividade potencial e produtividade atingível obtidos nos cultivos objetos desse estudo.

O desenvolvimento do setor agrícola dos países pertencentes à UEMOA é altamente desejável do ponto de vista de segurança alimentar desses, além de que fatores agrônômicos podem ser citados em favor da possível adoção do cultivo de milho-soja, principalmente em sistema de rotação; a saber: melhor adubação nitrogenada do milho devido aproveitamento do nitrogênio fixado pela soja; ambos podem ser considerados como de relativa facilidade de

cultivo e de baixo custo de produção; ambos apresentam ciclo relativamente curto e de elevado interesse no mercado local. Ainda, importante lembrar que do ponto de vista de zoneamento agrícola (perspectiva edafoclimática), as mesmas regiões e/ou países mostraram-se aptos ao cultivo de ambas as culturas. Todavia, o estabelecimento de áreas de exploração se confronta com a política fundiária vigente nesses países, que não garante a posse efetiva da terra aos produtores rurais, o que dificulta o investimento de terceiros em possível aquisição e investimento na produção agrícola.

Do ponto de vista edáfico, observa-se na Figura 17 que os Neossolos quartzarênicos ocupam a maior parte do território formado pelos países pertencentes a UEMOA. Países como Níger e Mali são quase totalmente recobertos pelos Neossolos, devido regime de baixa precipitação e elevadas temperaturas predominantes naquela região. Os Argissolos são o segundo tipo de solo que mais recobrem o território formado da UEMOA, estando presentes em Burkina Faso, Togo, Benim, Costa do Marfim e a região sul de Mali; em Guiné Bissau há grandes extensões do território associados ao Neossolo Litólico; Senegal apresenta variados tipos de solos, como num mosaico, mas com predominância dos Neossolos Quartzarênicos e Argissolos.

Considerando-se a variável climática temperatura, observa-se que o território da UEMOA está subdividido em três faixas quase paralelas e horizontais ao Equador, sendo a primeira ao sul do paralelo 10° norte, com as menores amplitudes térmicas, formada pela Costa do Marfim, Togo e Benim, região mais próxima ao litoral que, durante o inverno apresenta as maiores temperaturas, que oscilam por volta de 25°C mas, durante o verão, apresenta média de 20°C devido ao aumento da nebulosidade, redução da insolação e aumento da umidade do ar devido à maior ocorrência das precipitações nesse período. A faixa central está localizada entre os paralelos 10° norte e 15° norte, formada pela Guiné Bissau, Senegal, sul de Mali, Burkina Faso e sul do Níger, que apresenta temperatura média de 20°C durante o inverno e 25°C durante o verão; e a última, ao norte do paralelo 15° norte, formada pelo centro norte de Mali e do Níger, que apresenta as menores temperaturas de toda a UEMOA durante o inverno, chegando a 17°C, contudo, durante o verão, as maiores temperaturas, acima de 35°C (Figura 21 e Figura 22).

De acordo com o balanço hídrico, a evapotranspiração potencial apresenta os maiores valores para a região compreendida entre os paralelos 10° norte e 15° norte (1.700 mm.ano⁻¹), e as menores (1.300 mm.ano⁻¹) na região costeira de Senegal, Guiné Bissau, Costa do Marfim, Togo e Benim, bem como no extremo norte de Níger e de Mali; contudo, a

evapotranspiração real apresenta distribuição distinta, com os países da Costa do Marfim, Togo e Benim apresentando os maiores valores ($1.300 \text{ mm.ano}^{-1}$) devido maior pluviosidade, e a faixa compreendida entre os paralelos 10° norte a 15° norte, evapotranspiração de aproximadamente 500 mm.ano^{-1} . Ao norte do paralelo 15° norte, a evapotranspiração real mostra-se abaixo de 300 mm.ano^{-1} , o que inviabiliza totalmente a agricultura de sequeiro.

Na Figura 29 e Figura 30, através do mapa de deficiência hídrica e de excedente hídrico, é possível entender melhor a concentração das chuvas na região formada pela UEMOA, pois a região sul da Costa do Marfim, Togo e Benim, ainda que apresente os maiores índices de precipitação da UEMOA (Figura 26), tem a ocorrência de deficiência hídrica da ordem de 100 a 400 mm.ano^{-1} , em pelo menos algum período do ano; enquanto no período úmido, excedente hídrico superior a 400 mm.ano^{-1} . A região ao norte do paralelo 15° norte, apresenta deficiência hídrica da ordem de $1.500 \text{ mm.ano}^{-1}$, o que comprova o caráter árido da região, indicado também na classificação climática por Köppen (1990) e Thornthwaite (1948).

Considerando o uso relativo do solo como um indicador de nível de atividade econômica, tem-se que Burkina Faso é o país com maior aproveitamento do território com atividade agrícola (65%) seguido por Senegal (56%). Os demais países apresentam menos que 50% do território recoberto por atividades agrícolas, e a UEMOA, de forma geral, apenas 18%. Importante lembrar que Níger e Mali, apresentam, respectivamente, 72% e 65% de seus territórios ocupados por dunas ou áreas sem vegetação; de forma geral, o território da UEMOA apresenta 50% de seu território nessa mesma condição.

Apesar das excelentes condições climáticas vigentes em aproximadamente metade do território formado pela UEMOA, as produtividades reais dos cultivos de milho e soja apresentam-se em níveis considerados baixos, o que conflita com a elevada produtividade potencial e produtividade atingível simuladas. O aspecto do reduzido uso de tecnologias e de insumos é fator preponderante nesse aspecto, visto que em função do baixo nível de desenvolvimento econômico e social da região, a oferta de insumos e de tecnologia é incipiente, aliado ao baixo poder aquisitivo dos produtores, bem como falta de regulamentação de políticas que implementem a atividade agrícola na região.

Os níveis de produtividade real simulados nesse estudo são inteiramente pertinentes e comparáveis aos dados de produtividade levantados pela FAO (2015), contudo, importante citar que os níveis de produtividade atingíveis, embora realistas, ainda estão longe da realidade daquela região.

5 CONCLUSÕES

De todo território avaliado referente aos países que pertencem à UEMOA: (i) Senegal, (ii) Guiné Bissau, (iii) Mali, (iv) Burkina Faso, (v) Costa do Marfim, (vi) Togo, (vii) Benim e (viii) Níger, tem-se:

(A) quanto à classificação climática proposta por Köppen: (i) ao norte do paralelo 15° norte encontram-se, do norte para o sul, as seguintes classes: BWs, BWx' e BWw (classe predominante - clima árido), e (ii) ao sul do paralelo 15° norte encontram-se, do norte para o sul, as seguintes classes: BSw (clima semiárido), Am (classe predominante – clima tropical de monções) e Af (clima de floresta tropical – pequena área);

(B) quanto à classificação climática proposta por Thornthwaite: (i) ao norte do paralelo 15° norte encontram-se, do norte para o sul, as seguintes classes: E (classe predominante - clima árido), e (ii) ao sul do paralelo 15° norte encontram-se, do norte para o sul, as seguintes classes: D (clima semiárido), C (clima subúmido), B (clima úmido) e A (clima muito úmido – pequena área); e

(C) quanto ao zoneamento agrícola: (i) cerca de 50% da área pode ser considerada como inapta ao cultivo de milho e soja, devido, principalmente, a restrições de ordem climática e pedológica, bem como de natureza ambiental ou, ainda, por ser ocupada por aglomerados urbanos, (ii) do ponto de vista da avaliação pedológica, os países da UEMOA encontram-se em um território relativamente plano, com as regiões de maior altitude presentes, principalmente, em áreas que apresentam restrição à agricultura devido à condição climática de extrema aridez. Com relação à classificação e qualidade dos solos, essas apresentam grande variabilidade espacial, (iii) os valores médios de produtividade real referentes às culturas de milho e soja na região da UEMOA são inferiores às produtividades atingíveis indicando que o principal problema local é o baixo nível tecnológico utilizado, (iv) para os cultivos de milho e de soja, a maior produtividade atingível na região da UEMOA encontra-se ao sul do paralelo 15° norte, (v) os cultivos de milho e soja, em rotação, podem integrar sistemas agrícolas pré-existentes, que contemplem outros cultivos ou exploração pecuária, com maiores possibilidades de trazer benefícios aos produtores, bem como o aumento da produtividade e melhoria da segurança alimentar local, e (vi) possíveis programas de apoio dos governos locais devem assegurar aos pequenos produtores acesso a tecnologias de simples aplicação e de modelos de mercado que remunerem melhor a atividade agrícola.

REFERÊNCIAS

- AFRICAN DEVELOPMENT BANK. **Extension of the results based country strategy paper from 2005-2009 to 2010-2011**. Regional Department West I Orwa, 2010. Disponível em: <http://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Project-and-Operations/Burkinafaso_CSP_eng2011.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2015.
- ALLIPRANDINI, L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P.F.; CAVASSIM, J.E.; GABE, H.L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M.N.; OLIVEIRA, M.A.R. de; PITOL, C.; PRADO, L.C.; STECKING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: Environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 801-808, 2009.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Estudo de Viabilidade de Produção de Biocombustíveis na UEMOA (União Econômica e Monetária do Oeste Africano). Relatório 3: Coleta de dados e entendimento da situação atual**. Chamada Pública de Prospeção BNDES/FEP nº 2/2011. Rio de Janeiro, 2013. 477 p.
- BARROS, A.H.C. **Análise de crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura de milho (*Zea mays* L.): experimentos e modelos**. 1998. 85 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- BERGER, J. **Maize production and the manuring of maizes**. Geneva: Center d'Estudo de l'Azote, 1962.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 110 p.
- BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D.C. Associação entre El Niño oscilação sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 423-432, 2005.
- BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima do algodão e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.
- BERTELSMANN TRANSFORMATION INDEX. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Benim Country Report**. Gutersloh, 2014a. Disponível em: <http://www.bti-project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Benim.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.
- _____. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Burkina Faso Country Report**. Gutersloh. 2014b. Disponível em: <http://www.bti-project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Burkina_Faso.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2015.
- _____. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Cote d'Ivoire Country Report**. Gutersloh, 2014c. Disponível em: <http://www.bti-project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Cote_dIvoire.pdf>.

project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Cote_d_Ivoire.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2015.

_____. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Mali Country Report.** Gutersloh, 2014d. Disponível em: <http://www.bti-project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Mali.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2015.

_____. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Niger Country Report.** Gutersloh, 2014e. Disponível em: <http://www.bti-project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Niger.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2015.

_____. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Senegal Country Report.** Gutersloh, 2014f. Disponível em: <http://www.bti-project.de/uploads/tx_itao_download/BTI_2014_Senegal.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2015.

_____. **Bertelsmann Stiftung's Transformation Index, Togo Country Report.** Gutersloh, 2014g. Disponível em: <<http://www.bti-project.org/fileadmin/Inhalte/reports/2014/pdf/BTI%202014%20Togo.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2015.

BICHERON, P.; DEFOURNY, P.; BROCKMANN, C.; SCHOUTEN, L.; VANCUTSEM, C.; HUC, M.; BONTEMPS, S.; LEROY, M.; ACHARD, F.; HEROLD, M.; RANERA, F.; ARINO, O. **Products description and validation report.** Toulouse: European Space Agency, 2008. 47 p. (GlobCover Land Cover, 2).

BONTEMPS, S.; DEFOURNY, P.; VAN BOGAERT, E.; ARINO, O.; KALOGIROU, V.; RAMOS PEREZ, J.J. **GLOBCOVER 2009: products description and validation report; version 2.2.** Louvain: Université catholique de Louvain; Toulouse: European Space Agency, 2011. 53 p.

CÂMARA, G.M.S.; SEDIYAMA, T.; DOURADO NETO, D.; BERNARDES, M.S. Influence of photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 149-154, 1997.

CAMARGO, A.P.; CHIARINI, J.V.; DONZELI, P.L.; SICHMANN, W. **Zoneamento da aptidão ecológica para a cultura de soja, girassol e amendoim no Estado de São Paulo.** São Paulo: Secretaria da Agricultura, Instituto privado para o fomento de oleaginosas, 1971. 35 p.

CARTER, D.B. Climates of Africa and India according to Thornthwaite's classification. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 11, n. 4, 35 p. 1948.

CASAROLI, D.; FAGAN, E.B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S.P.; MANFRON, P.A.; DOURADO-NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de; MÜLLER, L.; MARTIN, T.N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja: uma revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiana, v. 14, p. 102-120, 2007.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A.; SESTARI, I. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos.** São Paulo: Ceres, 2008. 864 p.

COMPAGNIE SUCRIERE SENEGALAISE. 2015. Disponível em:
<<http://groupemimran.com/CSS.html?lang=en>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

CONFALONE, A.; COSTA, L. C.; PEREIRA, C. R. Eficiencia del uso de la radiación en soja en distintas fases fenológicas bajo estres hídrico. **Revista Facultad de Agronomía**, Maracaibo, v. 17, n. 1, p. 63-66, 1997.

COSTA, A.F.S. **Influência das condições climáticas no crescimento e desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.), avaliadas em diferentes épocas de plantio**. 1994. 109 p. Dissertação (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para o algodão no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 446-459, 2001.

DAKER, A. **A água na agricultura**: manual de hidráulica agrícola. 3. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. v. 3, 453 p.

De WIT, C.T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen: Pudoc, 1965. 57 p. (Agriculture Research Report, 663).

_____. **Simulation for assimilation, respiration, and transpiration of crops**. Wageningen: A Halsted Press book, John Wiley, 1978. 140 p.

_____. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Ed.). **Simulation of plant growth and crops production**, Wageningen: Pudoc, 1982. p. 3-8.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

_____. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994, 306 p. (Estudos FAO: irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1975. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BZEDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA. Special Publication, 35).

DOURADO NETO, D. **Modelos fitotécnicos referentes à cultura do milho**. 1999. 229 p. Tese (Livro Docência em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 87-95, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

_____. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Árvore do conhecimento**. Brasília, 2011a. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggzi02wx5ok01edq5sp172540.html>. Acesso em: 04 fev. 2015.

_____. Embrapa Soja. **Cultivares de soja 2011/2012**: Região Centro-sul do Brasil. Londrina, 2011b. 52 p.

EUROPEAN SPACE AGENCY. University Collge London. **GlobCover**: world land cover map, v.2.3. 2009. Disponível em: <<http://due.esrin.esa.int/globcover/>>. Acesso em: 02 set. 2013.

EVANS, L.T.; FISCHER, R.A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 1544-1551, 1999.

FANCELLI, A.F.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FAO. **FAO-AQUASTS**: rivers of Africa, land and water. 2000. (Digital Media Series, 13). Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dbase/index.stm>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

_____. **World reference base for soil resources**: a framework for international classification, correlation and communication. Rome, 2006. 145 p. (World Soil Resources Reports, 103).

_____. **Harmonized world soil database**: version 1.2. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis; ISRIC-World Soil Information; Institute of Soil Science; Chinese Academy of Sciences; Joint Research Centre of the European Commission, 2012. 50 p.

_____. **Food outlook**: biannual report on global food markets. 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/019/i3473e/i3473e.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2014.

_____. **Statistics division**. 2015. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

FARIAS, J.R.B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Soja. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 261-278.

FIETZ, C.R.; RANGEL, M.A.S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados-MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 666-672, 2008.

FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M. **Modelo para estimativa de produtividade da cultura de milho no estado de São Paulo**. 2004. 100 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FLORES, C.A.; ALBA, J.M.F.; GARRASTAZÚ, M.C. **Zoneamento edáfico para o eucalipto na região do Corede sul**. 2009. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/eucalipto/index.htm>. Acesso em: 5 ago. 2013.

FRATTINI, J.A. **Cultura do milho**: instruções sumárias, Campinas: CATI; COT, 1975. 26 p. (Mimeografado).

GADIOLI, J.L. **Estimativa de produtividade de grãos e caracterização fitotécnica da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 86 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 8 p. (Documento, 24).

GOUDRIAAN, J. Potential productivity process. In: PENNING de VRIES, F.W.T.; van LAAR, H.H. (Ed.). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 98-113.

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. **WorldClim**: Global Climate Data – Free Climate Data for Ecological Modeling and GIS. 2005a. Disponível em: <<http://www.worldclim.org/download>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

_____. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, London, v. 25, p. 1965-1978, 2005b.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest meteorology**, Davis, v. 103, p. 137-157, 2000.

INDUSTRIES CHIMIQUES DU SENEGAL. 2014. Disponível em: <<http://www.ics.sn/english/mines.html>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER. **World phosphate rock reserves and resources**. Muscle Shoals, 2010. Disponível em: <http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADW835.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2015.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF TROPICAL AGRICULTURE. 2014a. Disponível em: <<http://www.iita.org/maize>>. Acesso em: 25 out. 2014.

_____. 2014b. Disponível em: <<http://www.iita.org/soybean>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

INTERNATIONAL POVERTY REDUCTION CENTER IN CHINA. **Mali Sugar Conglomerate CLETC Project Case in Mali**. Beijing, 2010. Disponível em: <<http://www.iprcc.org/front/article/catalog.action?id=88>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE. **Major soils of the world**: world reference base for soil resources; atlas. 2001. Disponível em: <http://www.isric.org/isric/webdocs/docs//major_soils_of_the_world/start.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2015.

JONES, A.; BREUNING-MADSEN, H.; BROSSARD, M.; DAMPHA, A.; DECKERS, J.; DEWITTE, O.; GALLALI, T.; HALLETT, S.; JONES, R.; KILASARA, M.; LE ROUX, P.; MICHELI, E.; MONTANARELLA, L.; SPAARGAREN, O.; THIOMBIANO, L.; VAN RANST, E.; YEMEFACK, M.; ZOUGMORE, R. (Ed.). **Soil atlas of Africa**. Luxembourg: European Commission, Publications Office of the European Union, 2013. 176 p.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, defininition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.

KINIRY, J.R.; JONES, C.A.; O'TOOLE, J.C.; BLANCHET, R.; CABELGUENNE, N.; SPANEL, D.A. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 51-64, 1989.

KÖPPEN, W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. **Geographic Zeitschrift**, Stuttgart, v. 6, p. 657-679, 1900.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928. Wall-map 150 cm x 200 cm.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BZEDICEK, D.F.; STEWART, B.A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 37-52. (Special Publication, 35).

LIMA, M.G. **Calibração e validação do modelo Ceres-maize em condições tropicais do Brasil**. 1995. 119 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LINDQUIST, J.L.; ARKEBAUER, T.J.; WALTERS, D.T.; CASSMAN, K.G.; DOBERMAN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 72-78, 2005.

LOVENSTEIN, H.; LATINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. **Principles of production ecology**. Wageningen: Wageningen Agricultural University, Department of Theoretical Production Ecology, 1995. 121 p.

MAVI, H.S.; TUPPER, G.J. **Agrometeorology: principles and application of climate studies in agriculture**. New York: Food Products Press, 2004. 364 p.

MELO, R.W.D.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Indicadores de produção de algodão no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 1167-175, 2004.

MENDONÇA, P.V.E. Sobre o novo método de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather. In: CONGRESSO LUSO-ESPANHOL PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS, 1958, 24., 1958, Madrid. p. 415-425.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATTO, E.R. **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. cap. 1, p. 19-44.

NICKELL, L.G. **Plant growth regulating chemicals**. Boca Raton: CRC Press, 1983. 2 v.

NUNES, F.C.F.P. **Relações entre irregularidades pluviométricas, desenvolvimento fenológico e produtividade do milho (*Zea mays* L.) e probabilidade de frustração de safra**. 1993. 147 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1993.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 440 p.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; McMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, p. 439-473, 2007. Disponível em: <<http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/439/2007/hessd-4-439-2007.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

PENGELLY, B.C.; BLAMEY, F.P.C.; MUCHOW, R.C. Radiation interception and the accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 63, p. 99-112, 1999.

PENNING DE VRIES, F.W.T.; van LAAR, H.H.; CHARDON, M.C.M. Bioenergetics of growth of seeds, fruits and storage organs. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS, 1983, Los Baños. **Proceedings...** Los Baños, Philippines, IRRI, 1983. p. 37-59.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002, 478 p.

PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

PNUD BRASIL. **Desenvolvimento humano e IDH**. 2015. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/Default.aspx>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

PRADO, H. **Pedologia fácil: aplicações na agricultura**. Piracicaba, 2005. Disponível em: <<http://www.pedologiafacil.com.br/index.php>>. Acesso em: 29 jan. 2015.

_____. **Pedologia fácil: aplicações na agricultura**. Piracicaba: FUNEP, 2008. 180 p.

RODRIGUES, O.; DIDINET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; LUZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.

ROHLI, R.V.; VEGA, A.J. **Climatology**. Baton Rouge: Louisiana State University, 2012. 432 p.

ROLIM, G.S.; CAMARGO, M.B.P.; LANIA, D.G.R.; MORAES, J.F.L. Classificação climática de Koeppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, jun. 2007.

SÁ, M. **Aspectos morfológicos e fisiológicos de cultivares modernas e primitivas de milho**. 2001. 54 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

SAMPAIO, E. **Avaliação da aptidão das terras**: método recomendado pela FAO. Évora: Universidade de Évora, Departamento de Geociências, 2007. 27 p. Disponível em: <<http://home.dgeo.uevora.pt/~ems/files/Anexo%20B-02.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2014.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.

SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A.M.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, p. 257-271, 2007.

SHAW, R.H. Climatic requirements. In: SPRAGUE, G.F.; FUCCILLO, D.A.; PERELMAN, L.S.; STELLY, M. **Corn and corn improvement**. Madison: American Society of Agronomy, 1977. p. 591-623. (Agronomy, 18).

SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION. U.S. Department of the Interior | U.S. Geological Survey. 2010. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

SINGER, M.J.; EWING, S. Soil quality. In: SUMMER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York, CRC Press, 2000. Section G, p. 271-298.

SPAROVEK, G. **Recuperação de solos**. Piracicaba: ESALQ, 2014. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/gerd/Recuperacao/APOSTILA-Recup%20de%20Solos.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução de E.R. Santarém. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

THEMATIC MAPPING. **World borders**. 2009. Disponível em: <<http://www.mappinghacks.com/data/>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **Publication in Climatology**, New Jersey, v. 10, n. 3, p. 185-311, 1957.

_____. The water balance. **Laboratory of Climatology**, Centerton, n. 8, p. 1-104, 1955.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Human development reports**. 2015. Disponível em: <<http://hdr.undp.org/es/reports>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **The UNEP environmental data explorer, as compiled from United Nations Environment Programme/World Conservation Monitoring Center**. 2013. Disponível em: <http://geodata.grid.unep.ch>>. Acesso em 20 jan. 2015.

UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT. **Niger irrigation subsector assessment**: report. 1984. Disponível em: <http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAV061.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Global Agriculture Information Network (GAIN Report)**: Senegal – agricultural situation country report. Washington, 2007. 15 p.

VIEIRA JÚNIOR, P.A. Milho. In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. (Ed.). **Ecofisiologia dos cultivos anuais**. São Paulo: Nobel, 1999. p. 41-72.

VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Cadernos de Ciências da Terra**, São Paulo, v. 30, n. 8, 1972.

VIRMANI, S.M.; REDDY, S.J.; BOSE, M.N.S. **A handbook on the rainfall climatology of West África**: data for selected locations. Andhira Pradesh: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1980. (Information Bulletin, 7). Disponível em: <http://oar.icrisat.org/763/1/RA_00041.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2015.

WALKER, H.O. Weather and climate. In: WILLS, J.B. (Ed.). **Agriculture and land use in Ghana**. London: Oxford University Press, 1962. p. 7-59.

WIKIPÉDIA. **União econômica e monetária do oeste africano**. 2014. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Uni%C3%A3o_Econ%C3%B4mica_e_Monet%C3%A1ria_do_Oeste_Africano>. Acesso em: 12 mai. 2014.

WIKIPEDIA. **West African Economic and Monetary Union**. 2014. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/West_African_Economic_and_Monetary_Union>. Acesso em: 12 mai. 2014.

WORLD BANK. **Benin**: increased access to modern energy project. Washington, 2009. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/2009/05/10634396/benin-increased-access-modern-energy-project>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

_____. Cote d'Ivoire: second economic governance and recovery grant project. **Implementation Completion and Results Report**, v. 1, 2010. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/docsearch/projects/P112368>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

_____. **International bank for reconstruction and development**: world development indicators. Washington, 2013. Disponível em:

<<http://databank.worldbank.org/data/download/WDI-2013-ebook.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

_____. **Climate change knowledge portal for development practitioners and policy makers.** 2014. Disponível em: <<http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

_____. **Historical climate.** 2015. Disponível em:
<http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country_historical_climate&ThisRegion=África&ThisCCCode=CIV#>. Acesso em: 16 fev. 2015.

WORLD RAINFOREST MOVEMENT, Montevideo, n. 170, Sept. 2011. Disponível em:
<<http://wrm.org.uy/bulletins/issue-170>>. Acesso em: 21 jan. 2015.