



UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

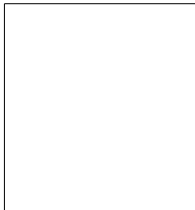
ANA VIRGÍNIA TERRANOVA DE CARVALHO

**MODELAGEM DO RENDIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA
E A SUA APLICABILIDADE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
PRODUTIVA E DO RISCO CLIMÁTICO NO ESTADO DA
BAHIA**

JUAZEIRO – BA
2014

49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Ana Virgínia Terranova de Carvalho
Modelagem do rendimento da palma forrageira e a



66
67 **UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO**
68 **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**
69

70
71
72
73
74
75 **ANA VIRGÍNIA TERRANOVA DE CARVALHO**
76

77
78
79
80
81
82 **MODELAGEM DO RENDIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA**
83 **E A SUA APLICABILIDADE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA**
84 **PRODUTIVA E DO RISCO CLIMÁTICO NO ESTADO DA**
85 **BAHIA**
86

87
88
89
90
91
92
93 **Dissertação apresentada a Universidade**
94 **do Vale do São Francisco - UNIVASF,**
95 **Campus Juazeiro, como requisito para a**
96 **obtenção do título de Mestre em**
97 **Engenharia Agrícola.**

98 **Prof. Orientador: Thieres George Freire**
99 **da Silva**

100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111 **JUAZEIRO – BA**
112 **2014**
113

114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134

Carvalho, Ana Virgínia Terranova de.
S725m Modelagem do rendimento da palma forrageira e a sua aplicabilidade na análise da eficiência produtiva e do risco climático no estado da Bahia /Ana Virgínia Terranova de Carvalho. – – Juazeiro, 2014.
81 f. : il. ; 29 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2014.

Orientador: prof. DSc. Thieres George Freire da Silva.

Inclui referências.

1. Palma forrageira - modelo zona agroecológica. 2. Produtividade potencial. I. Título. II. Thieres George Freire da Silva. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

CDD 639.3758

135
136

137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF
Bibliotecário: Renato Marques Alves

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANA VIRGÍNIA TERRANOVA DE CARVALHO

MODELAGEM DO RENDIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA E A SUA
APLICABILIDADE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA E DO RISCO
CLIMÁTICO NO ESTADO DA BAHIA

Thieres George Freire da Silva, Prof. Adjunto da UFRPE/UAST. Orientador.

184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233

Sergio Zolnier Prof. Associado do Colegiado de Engenharia
Agrícola/UFV/Viçosa(MG). Examinador Externo.

Marlon da Silva Garrido, Prof. Adjunto do Colegiado de Engenharia
Agrícola/UNIVASF/Juazeiro(BA).

Juazeiro, 24 de Fevereiro de 2014.

234

235

236

237

238

239 Aos meus pais, José Virgílio de Carvalho e Nilza Terranova de Carvalho (*in*
240 *memorian*), por me apoiarem incondicionalmente em minhas decisões.

241

242

243 A minha filha, Clarice Terranova Agostinho, por ter tolerado pacientemente
244 minha ausência durante o decorrer do curso.

245

246

247

Dedico

248

249

250

251

252

253

254

AGRADECIMENTOS

255

256 Primeiramente, agradeço a Deus, o Grande Autor da vida! O Grande “Eu Sou”!
257 Dono de todas as coisas e que dá no momento oportuno. Obrigada meu Senhor!

258 Aos meus pais, José Virgílio de Carvalho e Nilza Terranova de Carvalho (*in*
259 *memorian*) e irmãos, Vanessa Terranova e Ricardo Terranova por toda paciência,
260 carinho, confiança, e amor a mim dedicados. Sem essa base familiar, jamais teria
261 chegado onde estou.

262 A minha filhota Clarice, que durante alguns momentos suportou minha
263 ausência com sabedoria e coragem. Você é que me fortalece todos os dias. A razão
264 de minhas lutas e conquistas.

265 A Laete Valentim, por ter suportado com paciência meus momentos de
266 estresse, pelo carinho e confiança depositados em mim sempre.

267 Aos demais familiares (tios, tias, primas e primos) que me apoiaram neste
268 caminho árduo, mas com muitas alegrias.

269 Ao meu mestre Prof. DSc. Thieres G. F. da Silva pela orientação, amizade, voto
270 de confiança, paciência e apoio. Será sempre um referencial em minha vida
271 acadêmica.

272 A inesquecível Prof. DSc Sílvia Helena N. Turco que desde a graduação, para
273 mim, foi um exemplo de mestre.

274 Aos meus inesquecíveis amigos da UNIVASF: Alencar, Fábio/Adriana, Fátima,
275 Francisco, Flávia e Marcos Alexandre pela grande amizade, pelo apoio, motivação e
276 carinho, sem esquecer os poucos momentos de grande descontração. Vocês são os
277 melhores!

278 A Carolina Oliveira, secretária do curso de mestrado, pela amizade e
279 companheirismo sem igual. Ganhei uma grande amiga.

280 A UNIVASF, todos os professores do curso de mestrado que contribuíram para
281 minha formação científica. São incontestavelmente os melhores.

282 A FAPESB pelo apoio financeiro e pela confiança do ingresso na pesquisa.

283

284

285

286

287

288

289 CARVALHO, A. V. T. Universidade Federal do Vale São Francisco, 2014.

290 **Modelagem do rendimento da palma forrageira e a sua aplicabilidade na**
291 **análise da eficiência produtiva e do risco climático no estado da Bahia.**

292 Orientador: DSc. Thieres George Freire da Silva.

293

294

295

RESUMO

296

297 Dois trabalhos foram realizados na aplicação do modelo denominado Zona
298 Agroecológica - ZAE da FAO 33, visando determinar a produtividade potencial e
299 quebra da produtividade da palma forrageira no Estado da Bahia. No primeiro,
300 objetivou-se avaliar o desempenho do modelo original ZAE da FAO, além de propor
301 a sua modificação para a estimativa da produtividade da palma forrageira.
302 Inicialmente foi realizada a sua parametrização utilizando dados experimentais
303 obtidos em uma área irrigada com a cultura sob diferentes condições de
304 disponibilidade de água. Combinando dados experimentais e teorias da fisiologia da

305 palma, foram propostas duas modificações no modelo: 1ª Modificação (no parâmetro
306 C_{IAC} – coeficiente de correção do índice de área do cladódio) e a 2ª Modificação (no
307 parâmetro C_R – coeficiente de correção da respiração). Avaliou-se o uso das funções
308 para plantas do tipo C3 – inverno, C3 – verão e C4 na estimativa da produtividade
309 bruta. O estudo sugere que o modelo original ZAE da FAO apresenta baixo
310 desempenho na simulação da produtividade da palma forrageira, necessitando da
311 modificação dos parâmetros de correção do índice de área foliar (C_{IAC}) e da
312 respiração (C_R), que estão diretamente ligados às respostas da captação CO_2 e da
313 temperatura do ar, além da adoção das equações utilizadas em plantas C3 de
314 inverno. No segundo estudo, objetivou-se analisar a distribuição espacial da
315 produtividade da palma forrageira, a quebra de produtividade em decorrência das
316 condições climáticas e a eficiência da cultura no estado da Bahia. O Modelo da Zona
317 Agroecológica publicado no boletim 33 da FAO, calibrado e modificado previamente,
318 foi utilizado na estimativa da produtividade potencial e atingível da palma forrageira.
319 Para isso, usou-se um banco de dados climatológicos de 437 postos de observação
320 distribuídos pelo Estado. Os dados mensais da temperatura efetiva do ar e da
321 precipitação, assim como dados da cultura, foram utilizados para a estimativa da
322 evapotranspiração real. Foram calculados os valores da quebra da produtividade e
323 da eficiência produtiva da palma forrageira para cada um dos postos de observação,
324 e, em seguida, regionalizados por meio de um Sistema de Informações Geográficas.
325 Verificou-se que a Bahia possui potencial produtivo variando entre 200 e 300 t MV
326 $ha^{-1} 2anos^{-1}$, a depender da região do Estado. A quebra da produtividade é baixa,
327 atingindo valores inferiores a 16%, mesmo com a redução relativa da
328 evapotranspiração alcançando valores estimados de 40%. Os municípios situados
329 no Centro e Centro Sul do Estado são aqueles que favorecem as maiores eficiências
330 produtivas da cultura, em decorrência dos regimes térmicos e hídricos mais
331 adequados às exigências da cultura. Todavia, em uma ampla faixa do Estado,
332 localizada ao Norte, Oeste e áreas de transição com o litoral, há plenas
333 possibilidades de cultivo dessa espécie, com a obtenção de ótimos desempenhos
334 produtivos.

335

336 **Palavras-chave:** cactáceas, calibração, modelagem, Eficiência do uso da água.
337 SIG.

338

339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356

357 CARVALHO, A. V. T. Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2014. **Yield**
358 **modeling of the cactus forage and its applicability in the analysis of productive**
359 **efficiency and climate risk of the State of Bahia.** Advisor: DSc. Thieres George
360 Freire da Silva.

361
362

363

ABSTRACT

364

365 Two studies were conducted in the application of model called Agroecological Zone -
366 FAO ZAE 33, to determine the potential productivity and drop in productivity of cactus
367 pear in the State of Bahia. At first we aimed to evaluate the performance of the
368 original model ZAE FAO, and propose changes to estimate the productivity of cactus
369 pear. Initially its parameterization was performed using experimental data obtained in
370 an irrigated area with the culture under different conditions of water availability.
371 Combining experimental data and theories of the physiology of palm, two
372 modifications to the model have been proposed: Modified 1st (the C_{IAC} parameter -

373 correction coefficient area index of cladodes) and the 2nd Amendment (the C_R
374 parameter - correction coefficient of breath). We evaluated the use of functions for
375 the type C3 plants - winter, C3 - C4 in the summer and estimated gross productivity.
376 The study suggests that the original model ZAE FAO has low performance in
377 simulation productivity of cactus pear, requiring the modification of the correction
378 parameters of leaf area index (C_{IAC}) and respiration (C_R), which are directly linked to
379 the answers CO_2 capture and air temperature, besides the adoption of the equations
380 used in C3 plants winter. In the second study aimed to analyze the spatial distribution
381 of productivity of cactus pear, the productivity loss due to the weather conditions and
382 the efficiency of culture in the state of Bahia. The Model Agroecological Zone
383 published in the bulletin of the FAO 33, previously calibrated and modified, was used
384 to estimate the potential and attainable yield of cactus pear. For this, we used a
385 database of climatological data from 437 observation points distributed by the state.
386 The monthly data of the actual air temperature and precipitation, as well as culture
387 data, were used to estimate evapotranspiration. The values of the drop in productivity
388 and productive efficiency of cactus pear for each observation posts, were calculated
389 and then regionalized through a Geographic Information System. It was found that
390 the yield potential Bahia has varying between 200 and 300 t ha⁻¹ 2years MV⁻¹,
391 depending on the state of the region. The drop in productivity is low, reaching values
392 lower than 16%, even with the relative reduction in evapotranspiration estimated
393 values reaching 40%. The municipalities located in Central and South Central State
394 are those who favor the larger production efficiencies of culture, due to the demands
395 of the most suitable culture thermal and water regimes. However, in a wide range of
396 the state, located in the North, West and transition areas to the coast, there are full
397 chances of growing this species, with obtaining optimal production performance.

398

399 **Keywords:** cacti, calibration, modeling, water Efficiency use, SIG.

400

401

402

403

404

405

406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 - Modificação e avaliação do modelo original da zona agroecológica da
FAO para simulação da produtividade da palma forrageira.

Tabela 1 - Simulações e o erro relativo (%) da estimativa da produtividade da palma
forrageira, considerando o modelo original do ZAE, a inserção do parâmetro C_{IAC}
modificados e os equações do três agrupamentos quanto ao tipo de processo
fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4).....Pág.49

Tabela 2 - Simulações e o erro relativo (%) da estimativa da produtividade da palma
forrageira, considerando o modelo modificado com a inserção individual e conjunta
dos parâmetros C_{IAC} e CR e os equações do três agrupamentos quanto ao tipo de
processo fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4).....Pág.49

438

439

LISTA DE FIGURAS

440

441 **ARTIGO 1** - Modificação e avaliação do modelo original da zona agroecológica da
442 FAO para simulação da produtividade da palma forrageira.

443

444 **Figura 1** - Representação esquemática do Modelo da Zona Agroecológica da FAO
445 adaptado para a simulação da produtividade potencial (PB_{PF}), real (PA_{PF}) e quebra
446 de produtividade ($Q(\%)_{PF}$) para a palma forrageira.....Pág.44

447 **Figura 2** - Relação entre a proporção da capacidade de assimilação de CO_2 pela
448 palma em relação ao IAC da cultura, de acordo com a teoria de Nobel
449 (1991).....Pág.45

450 **Figura 3** - Relação do C_{IAC} com a capacidade de assimilação de CO_2 (f_{IAC}) e o índice
451 de área do cladódio da palma forrageira.....Pag.46

452 **Figura 4** - Relação da captação atmosférica diária de CO_2 por unidade de área de
453 cladódio da palma forrageira com a temperatura do ar.....Pag.47

454 **Figura 5** - Relação do C_R com a capacidade de assimilação de CO_2 (f_{IAC}) da palma
455 forrageira e com a temperatura do ar.....Pag.48

456

457

458 **ARTIGO 2** - Aplicabilidade do modelo ZAE/FAO-33 na estimativa espacial da
459 produtividade e da eficiência da palma forrageira no estado da Bahia

460

461 **Figura 1** - Distribuição espacial dos valores médios anuais da precipitação
462 pluviométrica para o estado da Bahia.....Pag.68

463 **Figura 2** - Distribuição espacial dos valores médios anuais da temperatura do ar
464 para o estado da Bahia.....Pag.69

- 465 **Figura 3** - Distribuição espacial da produtividade potencial da palma forrageira (em
466 toneladas por hectares), em base verde estimada para o estado da Bahia por meio
467 do Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a cultura.....Pag.70
- 468 **Figura 4** - Distribuição espacial da produtividade potencial da palma forrageira (em
469 toneladas por hectares), em base seca estimada para o estado da Bahia por meio
470 do Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a cultura.....Pag.71
- 471 **Figura 5** - Distribuição espacial da produtividade atingível da palma forrageira (em
472 toneladas por hectares), em base verde, estimada para o estado da Bahia por meio
473 do Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a cultura.....Pag.72
- 474 **Figura 6** - Distribuição espacial da produtividade atingível da palma forrageira (em
475 toneladas por hectares), em base seca, estimada para o estado da Bahia por meio
476 do Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a cultura.....Pag.73
- 477 **Figura 7** - Regionalização da quebra da produtividade da palma forrageira estimada
478 para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e
479 modificado para a cultura.....Pag.74
- 480 **Figura 8** - Regionalização da relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e da
481 cultura (ET_c) da palma forrageira, estimada para o estado da Bahia por meio do
482 Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a cultura.....Pag.75
- 483 **Figura 9** - Regionalização da eficiência produtiva da palma forrageira (kg de matéria
484 seca m⁻³), estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33 que
485 foi calibrado e modificado para a cultura.....Pag.76

SUMÁRIO

486	
487	
488	
489	
490	
491	1. INTRODUÇÃO.....16
492	2. REVISÃO DE LITERATURA.....18
493	2.1 A IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA.....18
494	2.2 ASPECTOS FISIOLÓGICOS.....18
495	2.3 EFEITO DO AMBIENTE SOBRE O CRESCIMENTO.....19
496	2.4 EFICIÊNCIA PRODUTIVA E MODELAGEM.....19
497	2.5 ZONEAMENTO AGRÍCOLA.....21
498	ARTIGO 1.....22
499	ARTIGO 2.....50
500	3. CONCLUSÃO GERAL.....77
501	4. BIBLIOGRAFIA.....78

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

1. INTRODUÇÃO GERAL

519

520

521 Atualmente, a palma forrageira se tornou a mais importante alternativa no que
522 se refere à alimentação forrageira no semiárido brasileiro. Cultivada em diversos
523 estados do nordeste, apresenta grande relevância socioeconômica para o semiárido,
524 servindo de alimentação para os rebanhos nos períodos de estiagem, principalmente
525 as prolongadas, devido a sua enorme capacidade de armazenamento de água em
526 seus cladódios. Entretanto, o agricultor adota um sistema de cultivo marcado pela
527 utilização de pouquíssima tecnologia, seja por baixa capacidade gerencial ou de
528 investimento financeiro, obtendo-se produtividades bem abaixo do seu potencial
529 genético da palma forrageira. No nordeste, geralmente o plantio é realizado em
530 solos menos férteis, porém, estima-se que esta região tenha o maior cultivo de
531 palma do mundo.

532 *A opuntia fícus-indica* está entre as espécies indispensáveis para a produção
533 no semiárido brasileiro, por possuir características que lhe conferem boa aceitação
534 como alimento forrageiro, alto valor comercial e excelente conversão alimentar.
535 Estes atributos proporcionam ao pecuarista custos de produção relativamente
536 baixos, especialmente nos países em desenvolvimento, além de proporcionar a
537 conservação do solo, sendo considerada uma consequência positiva para o meio
538 ambiente. Dependendo do manejo aplicado, pode tornar-se uma alternativa
539 sustentável e de preservação ambiental.

540 O semiárido brasileiro é caracterizado pela baixa pluviosidade e pela
541 concentração da mesma em um único período (novembro a março). Sendo assim, a
542 palma forrageira, por possuir requisitos para suportar as condições de zonas
543 semiáridas, tem sido uma alternativa promissora de cultivo. Como para outras
544 culturas de grande valor econômico, alguns estudos têm sido desenvolvidos para a
545 palma forrageira visando estimar a produtividade, paralelamente, estudos de
546 zoneamento agrícola foram realizados para determinação das melhores regiões de
547 cultivo, já que os elementos do clima são de grande importância para potencializar a
548 produtividade de qualquer espécie em campo. O zoneamento fornece informações
549 que, se forem aplicadas em escala regional, servem para a identificação de áreas
550 com potencial comercial para exploração agrícola, melhor época de plantio e
551 permitem caracterizar o risco climático de uma região. Por sua vez, também é
552 imprescindível para o planejamento financeiro e concessão de crédito aos
553 agricultores.

554 Nos dias de hoje, existe uma quantidade bem distinta de modelos matemáticos
555 que são utilizados para a determinação da produtividade de diversos tipos de
556 culturas. No entanto, como estudos referentes à palma forrageira ainda são
557 incipientes, não existe um modelo elaborado especificamente para essa cultura,
558 deixando apenas duas alternativas para estimar a produtividade potencial e quebra
559 de produtividade da palma. Uma alternativa é a aplicação do método subjetivo
560 (geralmente utilizado pelos órgãos estaduais) e outra é a aplicação do método
561 elaborado pela FAO denominado de Zona Agroecológica – ZAE (método científico).
562 Neste contexto, objetivou-se avaliar o desempenho de um modelo de simulação do
563 rendimento da palma forrageira, visando a sua aplicabilidade na análise da eficiência
564 produtiva e do risco climático do estado da Bahia para o cultivo dessa espécie
565 através de dois estudos. Estudo I: Avaliar o desempenho do modelo original ZAE da
566 FAO, além da proposição de sua modificação para a estimativa da produtividade da
567 palma forrageira. Estudo II: Propor a regionalização e estimativa da quebra da
568 produtividade da palma forrageira no estado da Bahia, onde o seu cultivo tem se
569 tornado mais intenso, devido a sua grande capacidade como suporte forrageiro para
570 os agricultores e pecuaristas nos períodos de estiagem.

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

2. REVISÃO DE LITERATURA

588 2.1 IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA

589

590 Existem diversas espécies adequadas para o cultivo no nordeste e ente essas
591 está a Palma Forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill), uma cactácea que constitui uma
592 importante alternativa (MOURA et al., 2011) e é amplamente utilizada para
593 alimentação animal, que suporta longos períodos de falta d'água e altas
594 temperaturas. Apesar de possuir baixos teores de proteína, a palma forrageira tem
595 alta produção de matéria seca digestível, especialmente em ecossistemas
596 semiáridos (VIEIRA, 2006).

597 Segundo Santos et al. (2006), no Brasil, onde se estima que há plantados
598 500.000 ha, a sua maior área de cultivo está concentrada entre os estados de
599 Alagoas, Paraíba e Pernambuco, onde tem sido utilizada principalmente para a
600 alimentação animal. Na Bahia, tem sido bastante utilizada nas áreas de sequeiro nos
601 municípios situados no Semiárido, comumente adotando pouca tecnologia no
602 sistema de produção (ALMEIDA, 2011). Essa forrageira que contém em média 90%
603 de água representa, para o Semiárido, uma valiosa contribuição no suprimento
604 desse líquido para os animais (SANTOS et al.,2006).

605

606 2.2 ASPECTOS FISIOLÓGICOS

607

608 A palma forrageira é uma espécie de metabolismo fotossintético CAM
609 (Crassulacean Acid Metabolism), que captura a energia solar durante o dia e realiza
610 a fixação do CO₂ à noite através da abertura dos estômatos, o que a diferencia da
611 maioria das plantas (FALCÃO et al., 2011). Entretanto, além da capacidade da planta
612 em captar a radiação fotossinteticamente ativa, a fotossíntese depende de adequada
613 disponibilidade de água. Cada órgão das plantas de palma possui adaptações de
614 extrema eficiência no aproveitamento de água, principalmente o sistema radicular e
615 os cladódios, onde está localizado o aparelho fotossintético (SAMPAIO, 2005). A
616 área total de cladódio é uma medida útil para estimar a capacidade fotossintética
617 dessa cactácea, sendo uma das variáveis utilizadas para mensurar o crescimento
618 vegetativo. Entretanto, o conhecimento desses aspectos ecofisiológicos na cultura

619 da palma é escasso, particularmente em cultivos com diferentes densidades
620 populacionais.

621

622

623 **2.3 EFEITO DO AMBIENTE SOBRE O CRESCIMENTO**

624

625 Em condições de baixa umidade relativa do ar e temperaturas noturnas
626 elevadas, essa cactácea pode apresentar baixa resposta produtiva. A temperatura
627 ideal requerida pela cultura está em torno de 25°C durante o dia e 15°C durante a
628 noite (NOBEL, 2001), sendo as regiões mais propícias para o seu desenvolvimento
629 aquelas que apresentam noites frias, umidade relativa do ar elevada e com a
630 presença de orvalhos. Temperaturas noturnas elevadas e umidade do ar baixa
631 afetam seu desenvolvimento devido à alta perda de água (SAMPAIO, 2005). Ainda
632 apresenta exigência nutricional, sobretudo de fósforo, requerendo, além disso, solos
633 bem drenados e com um percentual de argila abaixo de 20%, por ser muito
634 suscetível ao ataque de patógenos de raízes (DUBEUX JÚNIOR; SANTOS, 2005;
635 DUBEUX JÚNIOR et al., 2006; OLIVEIRA, 2008). Entretanto, o fator que mais
636 interfere no desenvolvimento da maioria das culturas é o déficit hídrico, logo que,
637 sofre alterações morfológicas e fisiológicas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

638

639

640 **2.4 EFICIÊNCIA PRODUTIVA E MODELAGEM**

641

642 A resposta das espécies às diferentes condições de cultivo tem sido avaliada
643 por meio de modelos de simulação, que incorporam simplificações dos processos de
644 crescimento das plantas e das suas interações com o ambiente, estes modelos com
645 dados de campo e parametrizações, permitem aumentar o entendimento de
646 processos específicos da cultura. Sua utilização é aceita mundialmente como uma
647 ferramenta de fácil aplicação para propósitos de pesquisa e de práticas
648 agrônômicas, pois possibilita entender a resposta das plantas a diferentes condições
649 ambientais e, posteriormente, prever a produtividade das culturas. Contudo, o
650 sucesso da aplicação de modelos matemáticos depende substancialmente das
651 calibrações realizadas localmente e, conseqüentemente, da qualidade dos dados
652 usados em tais procedimentos de calibração (LISSON et al., 2005).

653 Os resultados obtidos a partir da geração dos modelos podem ser utilizados
654 como ferramentas de planejamento agrícola e de tomada de decisão, pois permitem
655 reduzir os custos e aumentar sustentabilidade do sistema por meio da maximização
656 do uso dos recursos naturais e da diminuição dos impactos sobre o meio ambiente
657 (KEATING et al., 1999). Quando bem elaborados, podem ser utilizados para a
658 definição das melhores datas de plantios para culturas sob condições irrigadas e de
659 sequeiro (SOLER; SENTELHAS; HOOGENBOOM, 2007); avaliação de estratégias
660 de aplicação de água e nutrientes (RINALDI; VENTRELLA; GAGLIANO, 2007);
661 previsão de safras (YUN, 2003); requerimento de água em escala regional
662 (HEINEMANN; HOOGENBOOM; FARIA, 2002); e para a avaliação dos impactos dos
663 cenários de mudanças climáticas sobre a produção agrícola, uso da terra e ações
664 políticas (OLESEN; BINDI, 2002). Todas essas informações são imprescindíveis aos
665 produtores e ao governo com o objetivo de auxiliar no planejamento das atividades
666 agrícolas e reduzir os riscos nas plantações (HOOGENBOOM, 2000). A calibração e
667 avaliação de modelos de simulação para a palma forrageira são incipientes.

668 Um modelo bastante utilizado para definir zonas de aptidão para as culturas é o
669 da Zona Agroecológica (ZAE) da FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Inicialmente
670 foi desenvolvido visando prever o rendimento das culturas em base continental.
671 Porém, pode ser adotado um nível de detalhamento maior, de modo a ajustar os
672 seus resultados para escala local e regional. O modelo ZAE permite estimar a
673 produtividade de uma cultura altamente produtiva e adaptada ao ambiente de
674 cultivo, utilizando características genéticas da espécie, fatores ambientais e
675 considerando a ausência de restrições hídricas, nutricionais e fitossanitárias
676 (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Contudo, faz-se necessário também incluir
677 submódulos que permitam prever os efeitos das adversidades das áreas de
678 produção, tais como estresse hídrico e térmico, a fim de se obter resultados mais
679 próximos à realidade (PORTER; BRAGA; JONES, 1999).

680 A partir dos resultados dos modelos de simulação, é possível estabelecer
681 diferentes cenários de disponibilidade de água e, conseqüentemente, de eficiência
682 produtiva da cultura. Para isso, quantifica-se a eficiência do uso de água (EUA), que
683 relaciona a produção de biomassa seca e, ou, produção comercial, com a
684 quantidade de água aplicada ou evapotranspirada (LIU; STÜTZEL, 2004; PUPPALA
685 et al., 2005). A partir da EUA também é possível analisar a resposta produtiva ao
686 suprimento de água da cultura (IGBADUN et al., 2006), podendo-se determinar as

687 condições de disponibilidade de água favoráveis ou limites para o cultivo de uma
688 determinada espécie (KO; PICCINNI, 2009). Quase que inexistentes são os registros
689 sobre a eficiência do uso de água da palma (HAN; FELKER, 1997), especialmente
690 no Nordeste brasileiro.

691

692

693 **2.5 ZONEAMENTO AGRÍCOLA**

694

695 Nos últimos anos, o zoneamento agrícola tem se tornado uma ferramenta de
696 importância singular no planejamento da agricultura, a qual baseia-se no
697 levantamento dos fatores e dados climáticos que definem as aptidões agrícolas
698 encontradas em diferentes locais (MOURA et al., 2011). Estudos realizados por Silva
699 (2007) mostram que o zoneamento agroclimático fornece subsídios à identificação
700 de áreas com potencial ao desenvolvimento de uma cultura, além de ser uma
701 ferramenta imprescindível para o seguro rural, uma vez que facilita a adoção de
702 técnicas adequadas para diminuir riscos e aumentar a produtividade e a concessão
703 de crédito ao agricultor. Por outro lado, um estudo agroclimático contribui para
704 estabelecer o potencial de uma região utilizando mecanismos como o melhoramento
705 genético para a obtenção de variedades mais adaptadas.

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

ARTIGO I

735

736

737

738

MODIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO ORIGINAL DA ZONA

739

AGROECOLÓGICA DA FAO PARA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA PALMA

740

FORRAGEIRA

741

742

743

744

745

746 **Modificação e avaliação do modelo original da zona agroecológica da FAO para**
747 **simulação da produtividade da palma forrageira**

748

749 **RESUMO:** Um modelo bastante utilizado para definir zonas de aptidão para as culturas é o
750 Zona Agroecológica (ZAE) da FAO. Esse modelo foi elaborado para plantas tipo C3 e C4, e
751 até então não foi aplicado na simulação do rendimento de plantas MAC (Metabolismo Ácido
752 das Crassuláceas). Assim, objetivou-se realizar a modificação e avaliação do modelo ZAE
753 para a estimativa da produtividade da palma forrageira. Para a parametrização do modelo
754 foram utilizados dados experimentais de área irrigada, com diferentes condições de
755 disponibilidade de água, as quais foram usadas na definição de parâmetros hídricos da cultura,
756 além dos coeficientes de correção da colheita (C_{COL}) e da umidade residual (C_{UM}). Combinado
757 os dados experimentais e teorias da fisiologia da palma foram propostas duas modificações no
758 modelo: 1ª (no parâmetro C_{IAC} – coeficiente de correção do índice de área do cladódio) e 2ª
759 (no parâmetro C_R – coeficiente de correção da respiração). Avaliou-se o uso das funções para
760 as plantas C3 – inverno; C3 – verão; C4 na estimativa da produtividade bruta da palma
761 forrageira. Finalmente foi avaliado o desempenho do uso dos agrupamentos com e sem a
762 modificação dos parâmetros C_{IAC} e C_R , por meio do erro relativo. Conclui-se que, o modelo
763 original da Zona Agroecológica - ZAE da FAO apresenta baixo desempenho na simulação da
764 produtividade da cultura, necessitando a modificação dos parâmetros de correção do índice de
765 área foliar (C_{IAC}) e da respiração (C_R), que estão diretamente ligados às e a temperatura do
766 ar, e da adoção das equações de plantas C3 de inverno.

767 **Palavras-chave:** Cactáceas. Calibração. Modelagem. *Opuntia* sp. Rendimento.

768

769

770 ***Modification and evaluation of the FAO agroecological zone model for simulation of***
771 ***yield of Cactus pear forage***

772

773 **ABSTRACT:** A model used to define suitability zones for crops is the Agroecological zone
774 of FAO (ZAE). However, this model has been developed for plants with photosynthetic
775 process C3 and C4, and even then was not applied in the simulation of CAM plants
776 (Crassulacean Acid Metabolism). Thus, the objective of this work was performing the
777 parameterization and modification of the ZAE model for the estimation of productivity of
778 Cactus forage. On the parameterization of the model were used experimental data of an
779 irrigated area, with different water availability conditions, which were used in the definition
780 of crop water parameters, in addition to the correction harvest coefficients (C_{COL}) and the
781 residual moisture (C_{UM}). Combined experimental data and physiology theories of cactus were
782 proposed two modifications to model ZAE: 1st modification (in the C_{IAC} parameter –
783 correction coefficient of the cladode area index) and the second modification (C_R – correction
784 coefficient of the respiration). It was assessed the use of functions for the groupings on the
785 photosynthetic process type (C3-winter; C3-summer; C4) in estimating the gross productivity
786 of cactus forage. The end was rated the performance of the use of groups with and without
787 modifying the C_{IAC} and C_R parameters. As results, the use of the FAO Agroecological zone
788 model (ZAE) in the estimation of productivity of cactus forage is conditioned? to the use of
789 the functions of C3 plants of winter and the modification of the calculation of the correction
790 factors C_{IAC} and C_R in function not only the evolution of IAC and the values of air
791 temperature, but also the proportion of CO₂ assimilation capacity by crop.

792 **Key-words:** Cactaceae. Calibration. Modeling. *Opuntia sp.* Yield.

793

794

795

INTRODUÇÃO

796

797 A utilização de espécies mais adaptadas às condições edafoclimáticas do Semiárido
798 brasileiro, como a palma forrageira, tem sido praticada pelos produtores, visando reduzir as
799 perdas do sistema de produção agropecuário. Isso se deve à alta variabilidade temporal e
800 espacial das chuvas e à alta demanda hídrica, que resultam em uma elevada deficiência de
801 água no solo ao longo de vários períodos do ano. Como consequência, comumente verifica-se
802 que as plantas sofrem estresse hídrico durante as suas fases fenológicas críticas, sobretudo no
803 período de estiagem. O estresse hídrico compromete a produção e também pode afetar o valor
804 nutritivo dos alimentos (LIMA *et al.*, 2004).

805 Dentre as espécies com potencial para utilização no Semiárido brasileiro, tem-se a
806 palma (*Opuntia ficus indica* L.), que é amplamente cultivada, sobretudo nos estados de
807 Pernambuco e Alagoas, onde é empregada na alimentação animal. É uma cultura que possui
808 uma boa adaptação às condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro. Assim como
809 qualquer outra cultura, essa planta tem uma necessidade hídrica específica, exigência
810 nutricional e condições ambientais adequadas ao seu desenvolvimento. Estudos realizados por
811 Oliveira *et. al.* (2010) demonstraram que, em condições de baixa umidade relativa do ar e
812 temperaturas noturnas elevadas, as Opuntias apresentam baixa resposta produtiva. Conforme
813 Nobel (2001), a temperatura ideal requerida pela cultura está em torno de 25°C durante o dia
814 e 15°C durante a noite, sendo as regiões mais propícias para o seu desenvolvimento aquelas
815 que apresentam noites frias, umidade relativa do ar elevada e com a deposição de orvalho.
816 Temperaturas noturnas elevadas e umidade do ar baixa afetam seu desenvolvimento devido à
817 alta perda de água (SAMPAIO, 2005). Entretanto, o fator que mais interfere no
818 desenvolvimento das diferentes culturas é o déficit hídrico, logo que sobre alterações
819 morfológicas e fisiológicas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

820 A resposta das espécies às diferentes condições de cultivo tem sido avaliada por meio de
821 modelos de simulação, que incorporam simplificações dos processos de crescimento das
822 plantas e das suas interações com o ambiente. Estes modelos em conjunto com dados de

823 campo e parametrizações, permitem aumentar o entendimento de processos específicos da
824 cultura. Sua utilização é aceita mundialmente como uma ferramenta de fácil aplicação para
825 propósitos de pesquisa e de práticas agronômicas, pois possibilita entender a resposta das
826 plantas a diferentes condições ambientais e, posteriormente, prever a produtividade das
827 culturas. Contudo, o sucesso da aplicação dos modelos depende substancialmente das
828 calibrações realizadas localmente e, conseqüentemente, da qualidade dos dados usados em
829 tais procedimentos de calibração (LISSON *et al.*, 2005).

830 Os resultados obtidos a partir da utilização dos modelos podem ser utilizados como
831 ferramentas de planejamento agrícola e de tomada de decisão, permitindo reduzir os custos e
832 aumentar sustentabilidade do sistema, por meio da otimização do uso dos recursos naturais e
833 minimizar os impactos sobre o meio ambiente, como afirmam Keating *et al.* (1999). Quando
834 bem elaborados, os modelos podem ser utilizados para as diversas aplicações, que incluem a
835 definição das melhores datas de plantios para culturas sob condições irrigadas e também de
836 sequeiro (SOLER; SENTELHAS, HOOGENBOOM, 2007); avaliação de estratégias de
837 aplicação de água e nutrientes (RINALDI *et al.*, 2007); previsão de safras (YUN, 2003);
838 requerimento de água em escala regional (HEINEMANN; HOOGENBOOM, FARIA., 2002);
839 e para a avaliação dos impactos dos cenários de mudanças climáticas sobre a produção
840 agrícola, uso da terra e ações políticas (OLESEN; BINDI, 2002). Todas essas informações são
841 de fundamental importância aos produtores e ao governo, com o objetivo de auxiliar no
842 planejamento das atividades agrícolas e reduzir os riscos climáticos (HOOGENBOOM,
843 2000). A calibração e avaliação de modelos de simulação para a palma forrageira ainda são
844 incipientes.

845 Um modelo bastante utilizado para definir zonas de aptidão para as culturas é conhecido
846 como Zona Agroecológica (ZAE) da FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Este modelo
847 inicialmente foi desenvolvido visando prever o rendimento das culturas em base continental.
848 Porém, pode ser adotado um nível de detalhamento maior, de modo a ajustar os seus

849 resultados para escala local. O modelo ZAE permite estimar a produtividade de uma
850 determinada cultura padrão, altamente produtiva e adaptada ao ambiente de cultivo, utilizando
851 características genéticas da espécie, fatores ambientais e considerando a ausência de restrições
852 hídricas, nutricionais e fitossanitárias (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Todavia, esse
853 modelo foi elaborado para espécies com processo fotossintético C3 e C4, e até então não foi
854 aplicado na simulação de plantas MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), conforme
855 proposto.

856 A partir dos resultados dos modelos de simulação, é possível estabelecer diferentes
857 cenários de disponibilidade de água e, conseqüentemente, de eficiência produtiva da cultura.
858 Para isso, quantifica-se a eficiência do uso de água (EUA), que relaciona a produção de
859 biomassa seca e, ou, produção comercial, com a quantidade de água aplicada ou
860 evapotranspirada (LIU; STÜTZEL, 2004; PUPPALA *et al.*, 2005). A partir da EUA também é
861 possível analisar a resposta produtiva ao suprimento hídrico (IGBADUN *et al.*, 2006), a fim
862 de se determinar as condições de disponibilidade de água favoráveis ou limites para o cultivo
863 de uma determinada espécie (KO; PICCINNI, 2009). Poucos são os registros sobre a
864 eficiência do uso de água da palma (HAN; FELKER, 1997), especialmente no Nordeste
865 brasileiro.

866 Essas informações, quando aplicadas em escala regional, fornecem subsídios para a
867 identificação de áreas com potencial climático e pedológico na expansão comercial de uma
868 cultura específica, logo que permitem caracterizar o risco climático de uma determinada
869 região. Por sua vez, também é imprescindível para a seguridade rural e concessão de crédito
870 aos produtores.

871 Diante do exposto, objetivou-se avaliar o desempenho do modelo original ZAE da FAO,
872 assim como a proposição de sua modificação para a estimativa da produtividade da palma
873 forrageira.

874

875

876

MATERIAL E MÉTODOS

877

878 *Descrição do modelo ZAE original*

879 O modelo da Zona Agroecológica (ZAE) possui três principais compartimentos de
 880 simulação, que permitem estimar a produtividade potencial, atingível e a quebra de
 881 rendimento da cultura, conforme descrito no documento FAO-33, por Doorenbos e Kassam
 882 (1979). No presente estudo o modelo ZAE foi modificado, por meio da incorporação de
 883 outros submodelos, com calibração de parâmetros específicos para a palma forrageira. Além
 884 disso, foram consideradas as simplificações propostas por Barbieri & Tuon (1992), de modo
 885 que, em seguida, seja estruturado no software Model Maker 3.0.

886 O módulo da produtividade potencial da cultura (PP) é calculado por meio da taxa de
 887 produtividade bruta de uma cultura padrão corrigida por fatores adimensionais, sendo
 888 representado por:

889

$$890 \quad PP = PB * C_{IAF} * C_R * C_C * C_{UM} * ND \quad (1)$$

891

892 Em que, PB = produtividade bruta de matéria seca (kg MS ha⁻¹dia⁻¹); C_{IAF} = coeficiente
 893 de correção do índice de área foliar (IAF); C_R = coeficiente de correção da respiração; C_C =
 894 coeficiente de correção da fração colhida (índice de colheita); C_{UM} = coeficiente de correção
 895 da umidade da fração colhida; e, ND = número de dias do ciclo.

896 A PB no modelo ZAE considera um componente relativo ao período nublado (PB_n, kg
 897 MS ha⁻¹dia⁻¹) e outro ao período de céu claro (PB_c, kg MS ha⁻¹dia⁻¹), os quais são estimados
 898 em função da razão de insolação (n/N), conforme:

899

$$900 \quad PB = PB_n + PB_c \quad (2)$$

901

902 Os valores de PB_n e PB_c podem ser estimados por:

903

$$904 \quad PB_n = (a + b * Q_o) * cTn.[1 - (n/N)] \quad (3)$$

905

$$906 \quad PB_c = (c + d * Q_o) * cTc * [(n/N)] \quad (4)$$

907

908 Sendo, Q_o = radiação solar extraterrestre, calculada utilizando as expressões citadas por
 909 Allen *et al.* (1998), cTn = correção relativa à temperatura do período nublado; N =
 910 fotoperíodo (em horas); e, cTc = correção relativa à temperatura do período de céu claro.

911 Os coeficientes cTn e cTc variam de acordo com a capacidade de acúmulo de matéria
 912 seca da espécie, que depende do tipo de mecanismo de fixação de carbono e da temperatura
 913 do ambiente de cultivo. Assim, os seus valores são obtidos pelas equações:

914

$$915 \quad cTn = \begin{cases} 15^\circ C < t < 20^\circ C; e + f * t_{\text{méd.}} + g * t_{\text{méd.}}^2 + h * t_{\text{méd.}}^3 \\ t < 15^\circ C \text{ ou } t > 20^\circ C; i + j * t_{\text{méd.}} + k * t_{\text{méd.}}^2 + l * t_{\text{méd.}}^3 \end{cases} \quad (5)$$

916

$$917 \quad cTc = \begin{cases} 15^\circ C < t < 20^\circ C; i + j * t_{\text{méd.}} + k * t_{\text{méd.}}^2 + l * t_{\text{méd.}}^3 \\ t < 15^\circ C \text{ ou } t > 20^\circ C; m + n * t_{\text{méd.}} + o * t_{\text{méd.}}^2 + p * t_{\text{méd.}}^3 \end{cases} \quad (6)$$

918

919 Os fatores adimensionais (C_{IAF} , C_R , C_C e C_{UM}) são determinados, nessa ordem,
 920 considerando dados relativos ao índice de área foliar máxima da cultura ($IAF_{\text{máx.}}$), a
 921 temperatura do ar no ambiente de cultivo (t , °C), a capacidade de produção de matéria seca
 922 economicamente rentável (MSR) em relação à massa seca total produzida (MST), ou seja, do

923 índice de colheita (adimensional), e em função da umidade residual retida na matéria seca da
 924 parte rentável (U%). Matematicamente, os coeficientes acima são obtidos pelas seguintes
 925 equações:

926

$$927 \quad C_{IAF} = \begin{cases} IAF_{m\acute{a}x.} < 5; n + o * IAF_{m\acute{a}x.} - p * IAF_{m\acute{a}x.}^2 \\ IAF_{m\acute{a}x.} \geq 5; 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

928

$$929 \quad C_R = \begin{cases} t < 20; 0,6 \\ t \geq 20; 0,5 \end{cases} \quad (8)$$

930

$$931 \quad C_C = \frac{MSR}{MST} \quad (9)$$

932

$$933 \quad C_{UM} = (1 - 0,01 * U\%)^{-1} \quad (10)$$

934

935 O m3dulo da produtividade ating3vel (PA) PR_{cana} 3 fun33o da PP e da penaliza33o por
 936 estresse h3drico; essa 3ltima obtida pelo d3ficit h3drico relativo, que ocorre em cada fase
 937 fenol3gica ou para o ciclo da cultura em fun33o da sua sensibilidade, representada pelo
 938 coeficiente de resposta relativa da produtividade ao d3ficit de 3gua no solo (K_y). No c3lculo
 939 de PA 3 usada a seguinte express3o:

940

$$941 \quad PA = PP * \{1 - K_y * [1 - (ET_r / ET_m)]\} \quad (11)$$

942

943 em que, ET_r = evapotranspira33o real da cultura; e, ET_m = evapotranspira33o m3xima da
 944 cultura.

945 A evapotranspira33o m3xima da palma forrageira (ET_m) 3 calculada por:

946

$$947 \quad ET_m = K_c * ET_o \quad (12)$$

948

949 Em que, ET_o = evapotranspiração de referência; e, K_c = coeficiente de cultura.

950 Por sua vez, a evapotranspiração real da cultura (ET_r) é quantificada pelo balanço

951 hídrico sequencial da cultura, pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), assumindo uma

952 capacidade de água disponível no solo de 100 mm (CAD, mm).

953 O módulo da quebra de rendimento $Q(\%)$ é obtido a partir dos dados de PP e PA,

954 utilizando a equação:

955

$$956 \quad Q(\%) = [1 - (PA/PP)] * 100 \quad (13)$$

957

958 ***Parametrização do Modelo ZAE para a palma forrageira***

959 A parametrização do modelo foi realizada por meio de dados coletados em um

960 experimento conduzido em condições irrigadas na Estação Experimental do município de

961 Serra Talhada, Pernambuco, pertencentes ao Instituto Agrônômico de Pernambuco

962 (QUEIROZ, 2014, dados não publicados). Nesse experimento, o clone Orelha de Elefante

963 Mexicana do gênero *Opuntia* sp., submetido a cinco condições de disponibilidade de água

964 (976, 1048, 1096, 1152 e 1202 mm), foi cultivado em espaçamento 1,6 x 0,2 m, sob curva de

965 nível, em um solo do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico franco arenoso. O

966 experimento foi constituído de parcelas experimentais com fileiras de dimensões de 6,0 x 4,8

967 m, com quinze plantas cada, totalizando sessenta por parcela, sendo arranjado em blocos

968 casualizados com quatro repetições. Antes do plantio, realizou-se aragem e gradagem do solo.

969 Em seguida, foi feita uma adubação de fundação, conforme análise de solo. Tratos culturais,

970 utilizando capinas e a aplicação de herbicida (glifosato, 0,5%) e de inseticida, foram

971 realizados ao longo do ciclo. No experimento, foi monitorado o conteúdo de água no solo, por
972 meio de um sensor capacitivo (Diviner@2000), visando determinar a evapotranspiração da
973 cultura por meio do resíduo do balanço de água no solo, após a quantificação dos demais
974 componentes de entrada e saída do volume de controle. As características físico-hídricas do
975 solo foram obtidas para cada profundidade do perfil (a cada 0,10 m, até a profundidade de
976 0,90 m), usando o método do perfil instantâneo, conforme metodologias citadas por Libardi
977 (2005). Ao longo do tempo, também foram monitorados os dados biométricos da cultura, em
978 intervalos de 30 dias, após o início do período experimental, e na ocasião da colheita foi
979 quantificado o rendimento da cultura em base fresca e seca. Essa última foi obtida por meio
980 de plantas representativas da área útil, nas quais os cladódios foram cortados e colocados em
981 saco de papel identificado, secados em uma estufa de ventilação forçada com temperatura
982 regulada entre 65 e 70°C, até se obter peso constante. Os dados meteorológicos ao longo do
983 experimento foram adquiridos de uma estação automática do Instituto Nacional de
984 Meteorologia, situada a 1400 m da área experimental, que permitiu a medição e o
985 armazenamento de dados de radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar,
986 chuva, pressão atmosférica e velocidade do vento. Estes dados também foram utilizados para
987 a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), por meio do método de Penman
988 Monteith, parametrizado conforme o boletim 56 da FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Nos cálculos
989 de PB_n e PB_c , que requerem dados da razão de insolação (n/N), devido à ausência do
990 heliógrafo para medição do brilho solar (“n”), “n” foi estimado a partir dos valores de
991 radiação solar global, do fotoperíodo (N) e dos coeficientes de absorção e difusão de radiação
992 ($a = 0,29 \cdot \cos(\text{latitude local})$; $b = 0,52$). Assim, a equação invertida de Angstrom e Prescott
993 (ALLEN *et al.*, 1998) pode ser escrita como:

994

$$n = \left(\frac{Rg}{Qo} - a \right) N / b \quad (14)$$

996

997 Por meio dos dados experimentais, foi obtido o coeficiente de cultura anual da palma
 998 forrageira (K_c) e o coeficiente de resposta relativa da produtividade ao déficit de água (K_y).
 999 Além disso, obteve-se os valores médios do coeficiente de colheita (C_C) e o coeficiente de
 1000 correção da umidade da fração colhida (C_{UM}). Os demais parâmetros do Modelo ZAE foram
 1001 estabelecidos por meio das suas modificações, conforme descrito em seguida. Na Figura 1 são
 1002 demonstradas as etapas de simulação da produtividade da palma forrageira.

1003

1004 **Modificação do modelo ZAE**

1005 1ª Modificação (C_{IAF}): C_{IAF} é utilizado na caracterização do desenvolvimento da cultura,
 1006 atingindo um valor máximo ao final do ciclo, logo que para a cultura padrão do modelo, o
 1007 IAF é igual a 5 e constante ao longo do tempo. Acima desse valor, o C_{IAF} é igual a 0,5,
 1008 conforme a Equação 5, representando que 50% o IAF é efetivamente responsável pela a
 1009 produtividade bruta. Para a *Opuntia ficus-indica* Mill., Nobel (2001) cita que os cultivos
 1010 muito adensados, ou seja, com magnitudes de IAC elevadas (a partir deste ponto,
 1011 substituiremos as iniciais IAF por IAC em referência ao Índice de área do Cladódio), ocorre
 1012 uma rápida redução da assimilação de CO_2 pela planta, em decorrência do auto sombreamento
 1013 dos cladódios. A máxima assimilação de CO_2 por unidade de água, ou seja, a maior
 1014 produtividade ocorre quando o IAC é de 4 a 6 $m^2 m^{-2}$ (considerando os dois lados dos
 1015 cladódios como área fotossintetizante) (GARCÍA DE CORTÁZAR; NOBEL, 1991), havendo
 1016 aumento da capacidade máxima na proporção de 35%, 62% e 85% quando o IAC é 1,0, 2,0 e
 1017 3,0 $m^2 m^{-2}$ (NOBEL, 1991). É de grande relevância o conhecimento da variação do IAC ao
 1018 longo do ciclo da cultura como variável de entrada nos modelos agrônômicos (ABDEL-

1019 RAHMAN; AHMED, 2008; DORAISWAMY *et al.*, 2004; GOEL, 1988; TERUEL;
1020 BARBIERI; FERRARO, 1997; WIEGAND; RICHARDSON; NIXON, 1986).

1021 2ª Modificação (C_R): C_R reflete a relação da respiração da planta com a temperatura do
1022 ambiente. No modelo ZAE, o valor térmico de referencia é 20°C, podendo o valor de C_R ser
1023 igual a 0,6 (temperatura menores) e 0,5 (temperaturas maiores), o que representa que 40% ou
1024 50% dos fotoassimilados estão sendo utilizados no processo de respiração. Nobel e Hartssock
1025 (1984) relatam essa relação para a palma, que possui máxima taxa de assimilação de CO_2 por
1026 unidade de água em temperaturas diárias em torno de 20°C (25°C/15°C, diurna/noturna), e
1027 mínimo gasto com o processo de respiração, de tal modo que, de maneira análoga abaixo ou
1028 acima desse valor, a proporção de redução depende da temperatura. Por meio dos dados de
1029 assimilação de CO_2 e temperatura, citados por Nobel e Hartssock (1984), foi elaborado um
1030 modelo matemático para estimativa do C_R .

1031

1032 **Análises**

1033 Na análise do modelo ZAE para a estimativa da produtividade da palma forrageira,
1034 foram realizadas doze simulações, a partir dos cálculos da PB_n e PB_c , considerando os
1035 coeficientes: $a = 31,7$; $b = 0,219$; $c = 107,2$; $d = 0,36$ nas Equações 3 e 4, e os valores de cTn
1036 e cTc , com base no agrupamento e de acordo com o processo fotossintético (plantas C3
1037 cultivadas no inverno, C3 cultivadas no verão e C4 cultivada em ambas as estações). Nas três
1038 primeiras foram considerados os parâmetros originais (e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p) das
1039 equações cTn e cTc (Equações 5 e 6) para culturas C3 de inverno (0,7; 0,035; -0,001; 0,0;
1040 0,25; 0,0875; -0,0025; 0,0; -0,5; 0,175; -0,005; 0,0), C3 de verão (0,585; 0,014; 0,0013;
1041 -0,000037; -0,0425; 0,035; 0,00325; -0,0000925; -1,085; 0,07; 0,0065; -0,000185) e C4 (-
1042 1,064; 0,173, -0,0029; 0,0; -4,16; 0,4325; -0,00725; 0,0; -9,32; 0,865; -0,0145; 0,0), conforme
1043 os polinômios elaborados por Barbieri & Tuon (1992), a partir dos dados definidos por
1044 Doorenbos e Kassam (1994). Nas três próximas simulações, acrescentou-se a modificação da

1045 estimativa dos valores de C_R , mantendo o cálculo original de C_{IAC} , para os três agrupamentos
1046 de acordo com o tipo de processo fotossintético. Em seguida, o cálculo original de C_R foi
1047 mantido e inseriu-se a modificação de C_{IAC} . Finalmente, as modificações de C_R e C_{IAC} foram
1048 contempladas nas simulações. Para a análise estatística, foi considerado o erro relativo (%) a
1049 partir da produtividade de um experimento em sequeiro conduzido entre fevereiro de 2010 e
1050 março de 2012 (25 meses), na mesma área este experimento foi conduzido utilizado para
1051 parametrização do modelo ZAE, onde foi cultivado o clone Orelha de Elefante Mexicana,
1052 espaçado em 1,6 x 0,2 m, e adubado com 130 kg N ha⁻¹ antes do plantio. Mais detalhes
1053 experimentais podem ser obtidos em Araújo Primo (2013). Os valores de IAC, obtido no
1054 transcorrer no tempo de execução desse experimento, também foram utilizados para a
1055 representação do desenvolvimento da cultura e no cálculo do C_{IAC} .

1056

1057

1058

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1059

1060 Para a parametrização do modelo ZAE, foram utilizados os valores de K_y e K_c , sendo
1061 iguais a 0,31 e 0,50, nessa ordem, os quais representam no modelo a baixa sensibilidade ao
1062 estresse hídrico e baixa demanda de água da cultura. Deve-se levar em conta as variações nas
1063 características da cultura ao longo de todo seu ciclo, pois ocorrem determinadas mudanças no
1064 K_c do plantio até a colheita conforme relatado por Doorenbos e Kassam (1979), Doorenbos e
1065 Pruitt (1977), Pruitt (1986) e Snyder *et al.*, (1989), similarmente, as plantas de abacaxi, que
1066 possuem metabolismo semelhante e fecham os estômatos durante o dia têm coeficientes de
1067 cultura muito pequenos, como mostrado na FAO 56. Tal como a maioria das culturas, o K_c
1068 para o sisal depende da densidade do plantio e manejo de água, embora também tenha
1069 coeficientes muito baixos. Para a Palma foi obtida uma média do K_c . Conforme relatado na
1070 FAO N°33, valores de K_y são específicos para cada cultura e podem variar em função do

1071 crescimento. Geralmente, a diminuição na produtividade está mais associada aos períodos de
1072 florescimento, em comparação ao déficit de água durante o período vegetativo e de maturação
1073 é relativamente pequena (ALLEN *et. al.* 1998). De acordo com as tabelas publicadas no
1074 boletim da FAO 56, para muitas culturas, o K_y sazonal é quase 1 a exemplo do milho que é
1075 1,25 e da Alfafa que é 1,1. Outros dois dados de entrada considerados como parâmetros no
1076 modelo ZAE, foram C_{COL} e C_{UM} . Esses valores são específicos do clone e do gênero de palma
1077 forrageira, de tal modo que deve ser sempre ajustado na ocasião da simulação. O C_{COL} reflete
1078 o índice de colheita, e é modificado a depender do tipo de sistema adotado, quando se deixa
1079 os cladódios basais, primários ou secundários. Nessa primeira aproximação de
1080 parametrização, foi considerada a colheita de todos os cladódios da planta, mantendo-se
1081 apenas os basais. Assim, o dado de C_{COL} utilizado no modelo foi definido como sendo igual a
1082 0,93, ou seja, na colheita, em base seca, é considerado que 93% na produtividade da cultura é
1083 provenientes da parte aérea da planta. Por sua vez, C_{UM} que reflete a umidade residual foi
1084 estimado a partir da umidade retida pelo cladódio da planta ($U = 90,4\%$), resultando em um
1085 valor de 9,6%. Os outros dois parâmetros do modelo ZAE (C_{IAC} e C_R), que originalmente
1086 eram dependentes apenas da evolução do IAC da cultura e dos valores de temperatura do ar,
1087 passam a responder pela capacidade de assimilação de CO_2 por unidade de área do cladódio,
1088 conforme Nobel (1991). Com base na teoria desse autor, como demonstrado na Figura 2, vê-
1089 se que a capacidade de assimilação da cultura depende do seu IAC, sendo um parâmetro
1090 chave na avaliação do crescimento da planta. Porém, quando o mesmo diminui, a proporção
1091 de assimilação de CO_2 também será reduzida. Após o IAC alcançar valores superiores a 3,0
1092 $m^2 m^{-2}$, a assimilação de CO_2 tende a reduzir. Todavia, com o incremento de IAC, uma lenta
1093 evolução dessa proporção é verificada, apresentando um menor aumento após 2,0 $m^2 m^{-2}$.
1094 Com relação ao aumento do número de estômatos, Almeida *et al.* (2004) relatam que plantas
1095 adaptadas a climas áridos e semiáridos possuem folhas mais espessas, caracterizadas pela
1096 resistência estomática, como visto por vários autores. O aumento no número de

1097 estômatos/mm² nas folhas, geralmente, está associado à exposição das plantas ao sol, podendo
1098 ser um indicativo de um mecanismo de adaptação das plantas às condições de baixa
1099 disponibilidade hídrica no solo.

1100 De acordo com Nobel *et. al.*(2001), a produtividade depende da captação atmosférica
1101 diária do CO₂ e é um indicativo dos efeitos integrados do ambiente sobre o crescimento. Os
1102 fatores ambientais individuais que afetam a captação atmosférica do CO₂ da *Opuntia ficus-*
1103 *indica* interagem multiplicativamente para determinar essa captação.

1104 Além de sua inserção no cálculo do C_{IAC}, foi substituída a função de estimativa do IAC
1105 no transcorrer do tempo, que passa a ser uma função sigmoideal em vez de uma equação
1106 polinomial quadrática, conforme proposto originalmente por Barbieri & Tuon (1992). Na
1107 Figura 3 é demonstrada a relação entre os parâmetros C_{IAC}, f_{IAC} e IAC, onde se verifica que os
1108 maiores valores de C_{IAC}, ou seja, a fração do IAC que contribui efetivamente para o
1109 incremento produtivo da cultura deixa de depender apenas do estágio de desenvolvimento,
1110 mas também da sua capacidade de assimilação de CO₂. Baixos valores de IAC ou de f_{IAC}
1111 resultam em reduções abruptas do rendimento. Matematicamente, essa relação foi
1112 estabelecida por duas funções sigmoideais (uma na estimativa do IAC e outra para o cálculo de
1113 f_{IAC}) e pelo valor máximo teórico de IAC da cultura (IAC_{máx.}), assumido igual 3,0 m² m⁻². O
1114 IAC real é estimado a partir da idade da cultura, representada pelos dias após o corte ou
1115 plantio (DAC), usando três parâmetros (a = 1,7144; b = 77,7549; c = 426,9959). A função de
1116 estimativa do C_{IAC} pode ser vista na Equação 16.

1117 Semelhante a essa variável, a estimativa do C_R também contempla a junção de duas
1118 equações, porém uma sigmoideal e a outra gaussiana. A primeira devido o C_R também
1119 depender do f_{IAC}, logo que a magnitude da respiração da cultura é afetada pelo seu estágio de
1120 desenvolvimento e, conseqüentemente, pela sua capacidade de assimilação de CO₂. A segunda
1121 função reflete a influência da temperatura nesse processo de respiração, que é considerado
1122 fixo pelo método original do modelo ZAE, todavia propõem a sua variação. Na Figura 4,

1123 percebe-se que, de acordo com Nobel e Hartsock (1984), a captação atmosférica diária de CO₂
1124 depende da temperatura do ar, de tal maneira que valores baixos ou elevados reduzem a
1125 atividade fotossintética da planta. Por outro lado, quanto maior for a temperatura, maior será a
1126 perda respiratória e, assim ocorrerá a diminuição da assimilação de CO₂ pela cultura.
1127 Originalmente, no modelo ZAE, assume-se que o aumento da temperatura reduz os valores de
1128 C_R, elevando a penalização no incremento de produtividade, em decorrência do gasto de CO₂
1129 na respiração; todavia, não considera que a redução da captação de CO₂ também tende a
1130 diminuir a atividade da respiração. Com isso, pela Figura 5, é notável a variação dos dados de
1131 C_R, apresentando menores magnitudes quando a capacidade de assimilação de CO₂, ou seja,
1132 f_{IAC} , é maior, e as temperaturas são menores. Os valores de C_R podem ser obtidos por meio da
1133 Equação 17.

1134 Nas Tabelas 1 e 2 são demonstradas as análises do desempenho do modelo ZAE,
1135 assumindo os três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético, e a modificação de
1136 estimativa dos parâmetros C_{IAC} e C_R em relação ao modelo original. Com base nos resultados
1137 obtidos, percebe-se que a estimativa da produtividade da palma forrageira, usando o modelo
1138 ZAE original, promove erros relativos elevados, independente das funções dos agrupamentos.
1139 Os maiores erros são verificados com as funções das plantas C4, mesmo com a modificação
1140 dos parâmetros C_{IAC} e C_R. As melhores estimativas foram obtidas com as modificações desses
1141 parâmetros, sendo encontrados erros relativos inferiores a 5%. Porém, a modificação apenas
1142 do parâmetro C_{IAC} resultou em erros ainda menores.

1143

1144

1145

CONCLUSÕES

1146

1147 O modelo original da Zona Agroecológica - ZAE da FAO apresenta baixo desempenho
1148 na simulação da produtividade da palma forrageira, necessitando a modificação dos

1149 parâmetros de correção do índice de área foliar (C_{IAC}) e da respiração (C_R). estes coeficientes
1150 estão diretamente ligados às respostas de captação atmosférica do dióxido de carbono e ao
1151 efeito da temperatura do ar. Além disso, é necessário incorporar equações do agrupamento do
1152 processo fotossintético C3 de inverno, de modo a se obter melhores estimativas de
1153 produtividade da cultura.

1154

1155

1156

REFERÊNCIAS

1157

1158 ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to
1159 sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature. *International*
1160 *Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, July 2008.

1161 ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines
1162 for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 326 p. (FAO. Irrigation and
1163 Drainage Paper, 56).

1164 ALMEIDA, L. P.; ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; ZANELA, S. M.; VIEIRA, C. V.
1165 Crescimento inicial de plantas de *Cryptocaria aschersoniana* Mez. submetidas a níveis de
1166 radiação solar. *Ciência Rural*, Santa Maria, 34 (1): 83-88. 2004.

1167 BARBIERI, V.; TUON, R. L. Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas
1168 culturas. Piracicaba: ESALq, Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 17p.

1169 DOORENBOS, J. AND KASSAM, A.H. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper
1170 No. 33, FAO, Rome, Italy. 1979, 193p.

1171 DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas Estudos de
1172 FAO: Irrigação e Drenagem, 33, Campina Grande: UFPB, 1994, 306p.

1173 DOORENBOS, J. AND PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements,
1174 Irrigation and Drainage. 1977.

- 1175 DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.;
1176 STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and Modis. *Remote Sensing*
1177 *of Environment*, v. 92, p. 548-559, Sept. 2004.
- 1178 GARCÍA DE CORTÁZAR, V.; NOBEL, P. S. Prediction and measurement of high annual
1179 productivity for *Opuntia ficus-indica*. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.56, p. 261-272,
1180 1991.
- 1181 GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of
1182 biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, v. 4, n. 1, p. 1-212,
1183 1988.
- 1184 HAN, H.; FELKER, P. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia*
1185 *ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, v.36, p.133-148, 1997.
- 1186 HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. de. Determination of spatial water
1187 requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for the
1188 state of Parana, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.52, p.177-196, 2002.
- 1189 HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production
1190 and its applications. *Agricultural Forest Meteorology*, v.103, p.137-157, 2000.
- 1191 IGBADUN, H. E.; MAHOO, H. F.; TARIMO, ANDREW K. P. R.; BAANDA A. S. Crop
1192 water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha
1193 River Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, v. 85, p.141-150, 2006.
- 1194 KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling
1195 sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module.
1196 *Field Crops Research*, v.61, p.253-271, 1999.
- 1197 KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation
1198 management. *Agricultural Water Management*, v.96, p.799-808, 2009.
- 1199 LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo,
1200 2005, p.41-277. (Acadêmica; 61)

- 1201 LIMA, C. D. S.; GOMES, H. de S.; DETONI, C. E. Adição de ureia e da levedura
1202 *Saccharomyces cerevisiae* no enriquecimento protéico da palma forrageira (*Opuntia ficus*
1203 *indica* L.) cv. miúda. *Magistra*, v.16, n.1, p.01-08, 2004.
- 1204 LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; KEATING, B.A. The
1205 historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane
1206 production systems. *Field Crops Research*, v.92, p.321-335, 2005.
- 1207 LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of
1208 vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*,
1209 v.102, p.15-27, 2004.
- 1210 NOBEL, P. S. Environmental productivity indices and productivity for *O. ficus-indica* under
1211 current and elevated atmospheric CO₂ levels. *Plant Cell Environmental*, v.14, p.637-646,
1212 1991.
- 1213 NOBEL, P. S. *Biologia ambiental. In: Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira.*
1214 Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB, p. 36-48. 2001.
- 1215 NOBEL, P.S.; HARTSOCK, T. L. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth
1216 temperature. *Physiol. Plant.*, v.60, p.98-105, 1984.
- 1217 OLESEN, J. E.; BINDI, M. Review: Consequences of climate change for European
1218 agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, v.16, p.239-
1219 262, 2002.
- 1220 OLIVEIRA, F. T.; SOUTO, J. S.; SILVA, R. P.; ANDRADE FILHO, F. C.; PEREIRA
1221 JÚNIOR, E. B. Cactus pear: adaptation and importance for ecosystem arid or semiarid.
1222 *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.5, p.27-37, 2010.
- 1223 PRUITT, W.O. "Traditional methods 'Evapotranspiration research priorities for the next
1224 decade'." ASAE Paper No. 86-2629. 1986, 23 p.

- 1225 PUPPALA, N.; FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L.
1226 Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at
1227 different growth stages. *Industrial Crops and Products*, v.21, p.33-47, 2005.
- 1228 RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation
1229 strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. *Agricultural*
1230 *Water Management*, v.87, p.91-105, 2007.
- 1231 SAMPAIO, E. V. S. B. Fisiologia da Palma. A palma do Nordeste do Brasil: Conhecimento
1232 atual e novas perspectivas de uso. Editores: Rômulo S. Menezes, Diogo A. Simões, Everardo
1233 V. S. B. Sampaio. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. 258 p.
- 1234 SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a
1235 déficit hídrico em diferentes solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,
1236 *Campina Grande*, v. 3, n. 1, p. 1-6, 1998.
- 1237 SOLER, C. M. T; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the
1238 CSMCERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown
1239 off-season in a subtropical environment. *European Journal Agronomy*, v.27, p.165–177, 2007.
- 1240 SNYDER, R.L., LANINI, B.J., SHAW, D.A., AND PRUITT, W.O. Using reference
1241 evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for
1242 agronomic crops, grasses, and vegetable crops. Cooperative Extension, Univ. California,
1243 Berkeley, CA, Leaflet No. 21427, 1989. 12 p.
- 1244 TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JR., L. A. Sugarcane leaf area index modeling
1245 under different soil water conditions. *Scientia Agricola*, v. 54, n. spe, p. 39-44, Jun. 1997.
- 1246 THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. *Publications in Climatology*.
1247 New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.
- 1248 WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J.; NIXON, P. R. Spectral components analysis: A
1249 bridge between spectral observations and agrometeorological crop models. *IEEE Transactions*
1250 *on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, n. 1, p. 83-89, Jan. 1986.

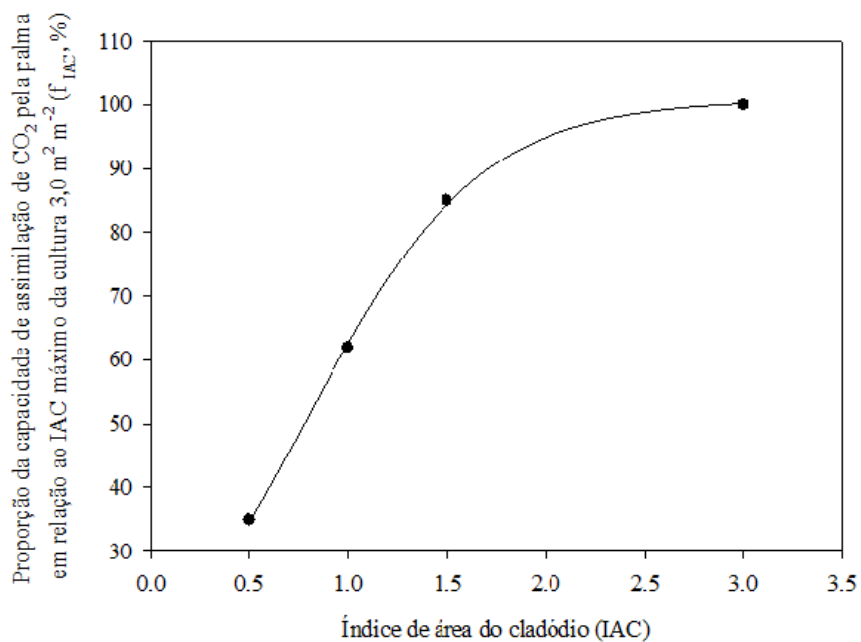
1251 YUN, J. I. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-
1252 growth modeling. *Agricultural System*, v.77, p.23-38, 2003.

1253

1254 **Figura 1.** Representação esquemática do Modelo da Zona Agroecológica da FAO, adaptado
1255 para a simulação da produtividade potencial (PB_{PF}), real (PR_{PF}) e quebra de produtividade
1256 ($Q(\%)_{PF}$) para a palma forrageira.

1257

1258



1259

1260

1261 **Figura 2.** Relação entre a proporção da capacidade de assimilação de CO₂ pela palma em
 1262 relação ao IAC da cultura, de acordo com a teoria de Nobel (1991).

1263

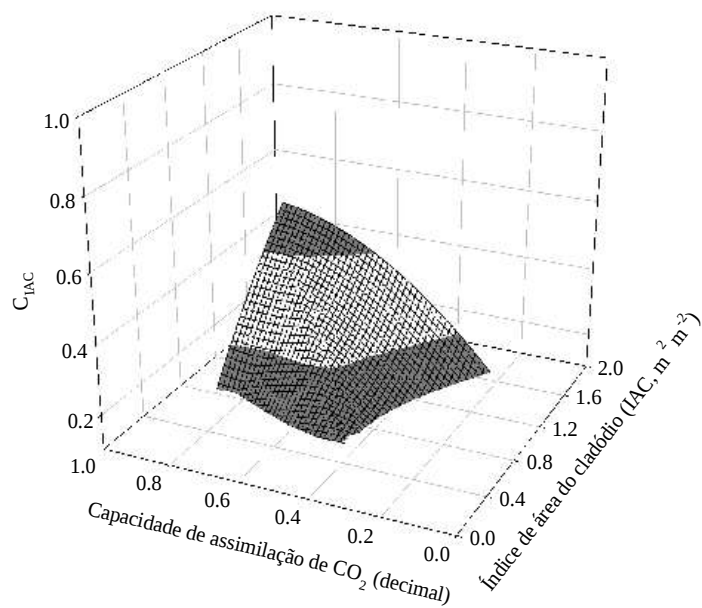
$$f_{IAC} = \left[\frac{100,8355}{\left(1 + \exp\left(-\frac{(IAC_i - 0,7831)}{0,4379}\right) \right)} \right]$$

1264

(15)

1265

1266



1267

1268

1269 **Figura 3.** Relação do CIAC com a capacidade de assimilação de CO₂ (fIAC) e o índice de
 1270 área do cladódio da palma forrageira.

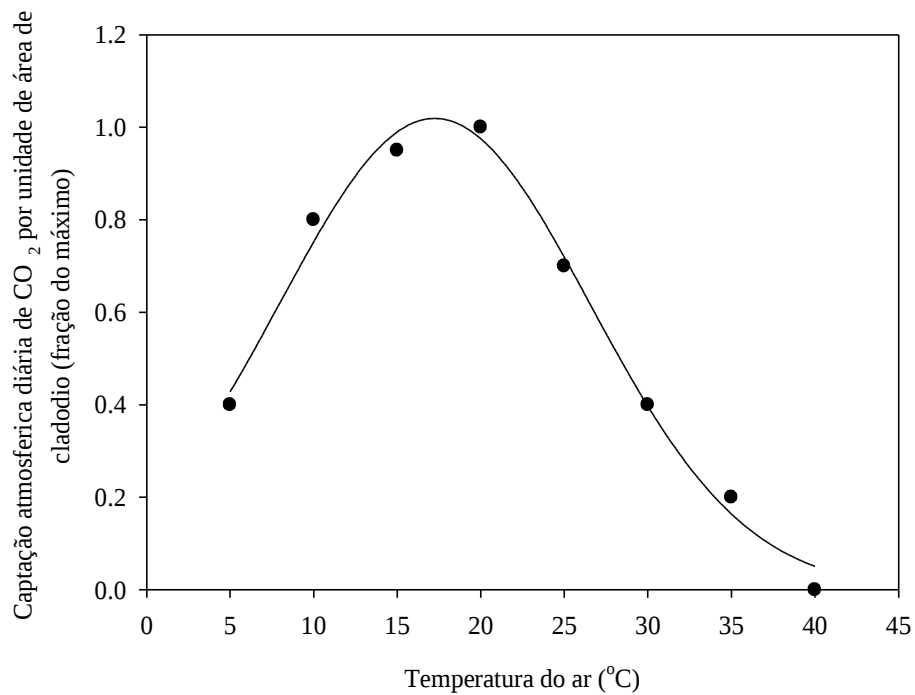
1271

$$C_{IAC} = \frac{\left[\frac{a}{\left(1 + \exp\left(-\frac{(DAC - c)}{b}\right)\right)} \right]}{IAC_{m\acute{a}x}} * f_{IAC}$$

1272

(16)

1273



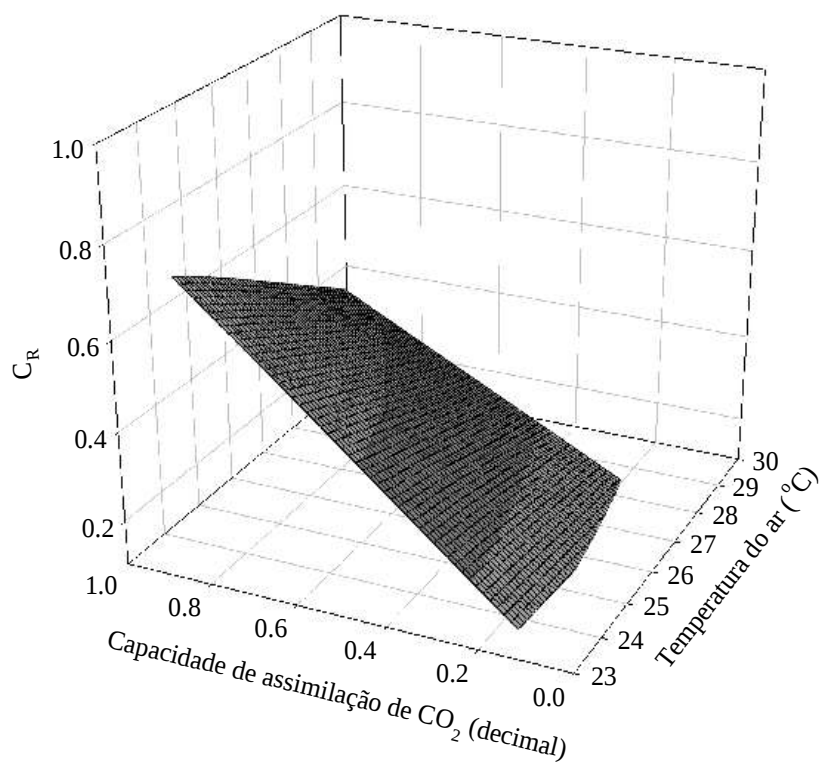
1274

1275

1276 **Figura 4.** Relação da captura atmosférica diária de CO₂ por unidade de área de cladódio da
1277 palma forrageira com a temperatura do ar, de acordo com Nobel e Hartsock (1984).

1278

1279



1280

1281

1282 **Figura 5.** Relação do parâmetro C_R com a capacidade de assimilação de CO_2 (f_{IAC}) pela palma
 1283 forrageira e com a temperatura do ar.

1284

$$1285 \quad C_R = \left(1,019 * \exp\left(\frac{-0,5 * (tméd. - 17,2385)}{9,2916}\right)^2 \right) * f_{IAC}$$

(17)

1286

1287

1288

1289

1290

Tabela 1. Simulações e o erro relativo (%) da estimativa da produtividade da palma forrageira, considerando o modelo original do ZAE, a inserção do parâmetro C_{IAC} modificados e os equações do três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4)

Referência	Variável	Medido	Parâmetros originais			Parâmetro modificado (C_{IAC})		
			ZAE C3	ZAE C3	ZAE	ZAE C3	ZAE C3	ZAE C4
			Inverno	Verão	C4	Inverno	Verão	
Produtividade	Biomassa verde	163,0	110,6	201,5	288,2	160,52	290,86	416,70
e (ton. ha ⁻¹)	Biomassa seca	15,6	10,6	19,3	27,7	15,41	27,92	40,00
Erro relativo (%)	Biomassa verde	-	-32,1%	23,6%	76,8%	-1,5%	78,4%	155,6%
	Biomassa seca	-	-31,9%	24,0%	77,4%	-1,2%	79,0%	156,4%

1291

1292

Tabela 2. Simulações e o erro relativo (%) da estimativa da produtividade da palma forrageira, considerando o modelo modificado com a inserção individual e conjunta dos parâmetros C_{IAC} e C_R e os equações do três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4)

Referência	Variável	Medido	Parâmetro modificado (C_R)			Parâmetros modificados (C_{IAC} , C_R)		
			ZAE C3	ZAE C3	ZAE	ZAE C3	ZAE C3	ZAE C4
			Inverno	Verão	C4	Inverno	Verão	
Produtividade	Biomassa verde	163,0	108,47	190,74	271,94	170,5	301,4	430,5
e (ton. ha ⁻¹)	Biomassa seca	15,6	10,41	18,31	26,11	16,4	28,9	41,3
Erro relativo (%)	Biomassa verde	-	-33,5%	17,0%	66,8%	4,6%	84,9%	164,1%
	Biomassa seca	-	-33,3%	17,4%	67,3%	4,9%	85,5%	165,0%

C_{IAC} = Coeficiente de correção do índice de área do cladódio, C_R = índice de correção da respiração.

1293

ARTIGO II

APLICABILIDADE DO MODELO ZAE/FAO-33 NA ESTIMATIVA ESPACIAL DA
PRODUTIVIDADE E DA EFICIÊNCIA DA PALMA FORRAGEIRA NO ESTADO DA
BAHIA

1294 **Aplicabilidade do modelo ZAE/FAO-33 na estimativa espacial da produtividade e**
1295 **da eficiência da palma forrageira no estado da Bahia**

1296

1297 **Resumo:** Embora adaptada a ambientes áridos e semiáridos, a palma forrageira pode ser
1298 explorada em diferentes condições de cultivo. Todavia, a avaliação da aptidão de uma região
1299 para a sua exploração comercial deve ser feita mediante diagnóstico. Nesse caso, a estimativa
1300 da produtividade por meio de modelos matemáticos e o uso de Sistemas de Informações
1301 Geográficas são ferramentas importantes. Assim, o objetivo desse trabalho foi analisar a
1302 distribuição espacial da produtividade da palma forrageira, a quebra de produtividade em
1303 decorrência das condições climáticas e a eficiência da cultura no estado da Bahia. O Modelo
1304 da Zona Agroecológica publicado no boletim 33 da Organização das Nações Unidas para
1305 Agricultura e Alimentação (ZAE FAO-33), calibrado e modificado previamente, foi utilizado
1306 na estimativa da produtividade potencial e atingível da palma forrageira. Para isso, usou-se
1307 um banco de dados climatológicos de 437 postos de observação distribuídos pelo Estado. Os
1308 dados mensais da temperatura efetiva do ar e da precipitação, assim como dados da cultura
1309 (duração do ciclo de dois anos e coeficiente de cultura), foram utilizados para a estimativa da
1310 evapotranspiração real. Foram calculados os valores da quebra da produtividade e da
1311 eficiência produtiva da palma forrageira para cada um dos postos de observação e, em
1312 seguida, regionalizados por meio de um Sistema de Informações Geográficas. Com base nos
1313 resultados obtidos, verificou-se que a Bahia possui potencial produtivo variando entre 200 e
1314 300 t MV ha⁻¹ 2anos⁻¹, a depender da região do Estado. A quebra da produtividade é baixa,
1315 atingindo valores inferiores a 16%, mesmo com a redução relativa da evapotranspiração
1316 alcançando valores estimados de 40%. Os municípios situados no Centro e Centro Sul do
1317 Estado são aqueles que favorecem às maiores eficiências produtivas da cultura (> 6 kg MS m⁻
1318 ³), em decorrência dos regimes térmicos e hídricos mais adequados às exigências da cultura.
1319 Todavia, em uma ampla faixa do Estado, localizada ao Norte, Oeste e áreas de transição com

1320 o litoral, há plenas possibilidades de cultivo dessa espécie, com a obtenção de ótimos
1321 desempenhos produtivos.

1322

1323 **Palavras-chave:** eficiência do uso da água, modelagem, regionalização, SIG

1324

1325 **Applicability of the ZAE/FAO-33 model on spatial estimation of yield and forage**
1326 **cactus efficiency in the State of Bahia**

1327

1328 **Abstract:** Although adapted to arid and semi-arid environments, the forage cactus can be
1329 exploited in different cultivation conditions. However, the assessment of the suitability of an
1330 area for its commercial exploitation should be made previously. In this case, the estimate of
1331 the yield by means of mathematical models and the use of geographic information systems are
1332 important tools. Thus, the objective of this work was to analyze the spatial distribution of the
1333 forage cactus yield, reduction of the yield due to the climatic conditions and the crop
1334 efficiency in the State of Bahia. The Agroecological Zone Model published in bulletin 33 of
1335 the Organization Nations United for Food and Agriculture (FAO ZAE-33), calibrated and
1336 modified previously, was used in the estimate of potential yield and attainable of the forage
1337 cactus. For this, it used a database of 437 climatological observation posts. The monthly data
1338 of air effective temperature and rainfall, and crop data (duration of the two-year cycle and
1339 crop coefficient) were used for the estimation of crop actual evapotranspiration. Were
1340 calculated the values of the reduction of the yield, and the productive efficiency of forage
1341 cactus in the State. With results it was found that Bahia has productive potential varying
1342 between 200 and 300 t green matter ha⁻¹ 2years⁻¹, depending on the region of the State. The
1343 reduction of the yield was low, reaching values of less than 16%, even the estimative of the
1344 relative reduction of the evapotranspiration reaching 40% values. The districts situated in the
1345 Centre and Centre South of the State are those who favor the largest productive crop

1346 efficiencies ($> 6 \text{ kg DM m}^{-3}$), because the best thermal and water regimes. However, a wide
1347 area the State located North, West and transition areas there are full possibilities of cultivation
1348 for this species, favoring great performances.

1349

1350 **Key-words:** water efficiency use, modelling, regionalization, SIG

1351

1352

1353

INTRODUÇÃO

1354

1355 A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO reconhece o
1356 potencial da palma e sua importância para contribuir com o desenvolvimento das regiões
1357 áridas e semiáridas. Este potencial é especialmente nos países em desenvolvimento, a partir da
1358 exploração econômica de várias espécies, com atributos excelentes para o meio ambiente e
1359 para segurança alimentar. No Brasil, várias espécies de palma já foram introduzidas, sendo as
1360 mais comuns a gigante (*Opuntia* sp.), miúda (*Nopalea cochenillifera*, Salm-Dyck) e a redonda
1361 (*Opuntia* sp.) (CHIACCHIO *et al.*, 2006; SOBREIRA FILHO, 1992).

1362 A palma forrageira é uma espécie de metabolismo fotossintético CAM (Crassulacean
1363 Acid Metabolism), originária do México. No Brasil, a sua maior área de cultivo está
1364 concentrada entre os estados de Pernambuco e Alagoas, onde tem sido utilizada especialmente
1365 para a alimentação animal. É uma cultura que possui uma boa adaptação às condições
1366 edafoclimáticas do Nordeste brasileiro. Na Bahia, tem sido bastante utilizada em sequeiro nos
1367 municípios situados no Semiárido, comumente adotando pouca tecnologia no sistema de
1368 produção (ALMEIDA, 2011).

1369 Embora adaptada às condições semiáridas, maiores produtividades da palma forrageira
1370 estão diretamente relacionadas com a pluviosidade local, requerendo uma lâmina anual de 400
1371 a 800 mm e umidade relativa do ar acima de 40%. Estudos têm demonstrado que em

1372 condições de baixa umidade relativa do ar e temperaturas noturnas elevadas, essa espécie
1373 apresenta baixa resposta produtiva (OLIVEIRA *et al.*, 2010). A temperatura ideal requerida
1374 pela cultura em torno de 25°C durante o dia e de 15°C durante a noite (NOBEL, 2001), sendo
1375 as regiões mais propícias para o seu desenvolvimento aquelas que apresentam noites frias,
1376 umidade relativa do ar elevada e com a presença de orvalho. Temperaturas noturnas elevadas
1377 e umidade do ar baixa afetam seu desenvolvimento devido a alta perda de água (SAMPAIO,
1378 2005). Apresenta grande exigência nutricional, sobretudo no elemento fósforo, sendo os solos
1379 mais indicados para a cultura aqueles com profundidade entre 60 e 70 cm, bem drenados e
1380 com um percentual de argila abaixo 20%, devido ao favorecimento do ataque de patógenos
1381 das raízes (DUBEUX JÚNIOR & SANTOS, 2005; DUBEUX JÚNIOR *et al.*, 2006;
1382 OLIVEIRA, 2008). Entretanto, o fator que mais interfere no desenvolvimento das diferentes
1383 culturas é o déficit hídrico, logo que a planta sofre alterações morfológicas e fisiológicas
1384 (SANTOS & CARLESSO 1998).

1385 De acordo com Pereira *et al.* (2007), o ambiente controla o crescimento e o
1386 desenvolvimento das plantas, de tal modo que as condições de cultivo devem ser
1387 adequadamente avaliadas antes de se implantar uma atividade agrícola. Esse conhecimento
1388 permite escolher as culturas mais apropriadas, as melhores épocas de plantio e os sistemas de
1389 cultivos mais adequados (CAMARGO *et al.*, 1974; PEREIRA *et al.*, 2002; FEITOSA *et al.*,
1390 1979).

1391 A avaliação espacial do efeito das diferentes condições ambientais sobre a
1392 produtividade das culturas pode ser obtida mediante modelos matemáticos e o uso de
1393 Sistemas de Informações Geográficas - SIG. Segundo Sugawara (2010), os modelos
1394 agronômicos para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas representam, de forma
1395 simplificada, os principais processos envolvidos no crescimento. Oliveira *et al.* (2012) citam
1396 que, dentre os modelos de simulação de produtividade disponíveis, o Método da Zona
1397 Agroecológica (ZAE), desenvolvido por Kassam, pode ser utilizado de maneira precisa para a

1398 estimativa da produtividade potencial e atingível das culturas em função do clima. Esse
1399 modelo é de fácil entendimento e aplicação em razão da baixa exigência de dados de entrada
1400 (dados meteorológicos e da cultura), apresentando resultados bastante consistentes, que se
1401 aproximam da realidade, além de serem rápidos e de baixo custo. Porém, o modelo apresenta
1402 limitações, devido não contemplar a ocorrência de pragas e doenças e os efeitos da fertilidade
1403 do solo. A simplicidade e bom desempenho são as justificativas para o seu amplo uso na
1404 simulação regional da produtividade de culturas agrícolas (MONTEIRO, 2012; SANTOS e
1405 SENTELHAS, 2013).

1406 A partir dos resultados dos modelos de simulação, é possível estabelecer diferentes
1407 cenários de eficiência produtiva da cultura. Para isso, quantifica-se a eficiência do uso de água
1408 (EUA), que relaciona a produção de biomassa seca e, ou, produção comercial, pela quantidade
1409 de água aplicada ou evapotranspirada (LIU e STÜTZEL, 2004; PUPPALA *et al.*, 2005). A
1410 partir da EUA também é possível analisar a resposta produtiva ao suprimento de água da
1411 cultura (IGBADUN *et al.*, 2006), a fim de se determinar as condições de disponibilidade de
1412 água favoráveis ou os limites para o cultivo de uma determinada espécie (KO & PICCINNI,
1413 2009).

1414 Com base no exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a aplicabilidade do modelo
1415 ZAE FAO-33 para estimativa da produtividade potencial e atingível da palma forrageira, a
1416 quebra de produtividade em decorrência das condições climáticas e a eficiência da cultura no
1417 estado da Bahia.

1418

1419

MATERIAL E MÉTODOS

1420

1421 A aplicabilidade do modelo ZAE foi feita mediante a extrapolação de seus resultados
1422 em escala regional, a fim de se estimar a produtividade potencial e atingível da palma

1423 forrageira, a quebra de produtividade em decorrência das condições climáticas e a eficiência
1424 produtiva da cultura nas diferentes regiões do estado da Bahia.

1425 As informações regionalizadas foram previamente processadas em uma planilha em
1426 ambiente do Software Excel, que permitiu a realização do Balanço Hídrico Climatológico e,
1427 posteriormente, a sua inserção em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Nesta
1428 planilha, foram incorporadas as equações do modelo ZAE calibrado e modificado para a
1429 palma forrageira além das variáveis de entrada, referentes ao clima do estado da Bahia.

1430 Os dados climáticos, compostos pela precipitação, temperatura do ar, radiação solar
1431 global e brilho solar, foram elaborados em escala mensal para 437 postos de observação
1432 distribuídos ao longo do Estado, com seus respectivos dados geográficos (latitude, longitude e
1433 altitude). Deste total, 33 estações meteorológicas são pertencentes ao Instituto Nacional de
1434 Meteorologia e 404 postos pluviométricos são oriundos do banco de dados da Agência
1435 Nacional das Águas (www.hidroweb.ana.gov.br). Nos postos pluviométricos, os valores de
1436 temperatura do ar (mínima, média e máxima) foram estimados ao longo do ano por meio de
1437 equações matemáticas propostas por Alvarez *et al.* (2013), que utilizam dados geográficos e
1438 coeficientes de regressão para quantificar os valores mensais para todo o território brasileiro.
1439 Os valores de radiação solar global foram estimados pela a equação de Bristow & Campbell
1440 (1984), que depende da radiação solar extraterrestre e da amplitude térmica (temperatura
1441 máxima menos a mínima). Esses foram calculados conforme sugerido por Pereira *et al.*
1442 (2002). Para o brilho solar, foi realizada a inversão da equação de Angstrom & Prescott, citada
1443 por Pereira *et al.* (2002).

1444 Por meio da temperatura máxima e mínima do ar, foram estimados os valores da
1445 temperatura efetiva para a correção do cálculo da evapotranspiração potencial mensal pelo
1446 método de Thornthwaite (1948), conforme sugerido por Pereira *et al.* (2002). Esse método
1447 requer o cálculo da evapotranspiração padrão por meio de equações lineares e não lineares, e
1448 o ajuste por um fator de correção dependente do número de dias do mês e do fotoperíodo. A

1449 evapotranspiração potencial foi usada no cálculo da evapotranspiração da palma forrageira
1450 (ET_c), a partir de seu produto com o coeficiente de cultura, que segundo Queiroz (2014) é de
1451 0,53 durante o primeiro ano de produção. Em conjunto com os dados de precipitação, a ET_c
1452 foi usada na quantificação do balanço hídrico climatológico, assumindo uma capacidade de
1453 água disponível (CAD) de 100 mm. A partir desses dados, foram estimados os valores da
1454 evapotranspiração real da palma forrageira (ET_r).

1455 As produtividades potencial e atingível da palma forrageira foram estimadas por meio
1456 do modelo da Zona Agroecológica, publicado no boletim 33 da Organização das Nações
1457 Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO. Esse modelo foi previamente calibrado e
1458 modificado para a estimativa da produtividade da palma forrageira. A produtividade potencial
1459 da cultura, em base seca (PP_{BS} , toneladas por hectare), foi estimada em função da
1460 produtividade bruta de matéria seca, adotando-se as equações do agrupamento do processo
1461 fotossintético C3 de inverno. Além disso, foram incorporados os fatores de correção para o
1462 índice de área do cladódio, respiração e índice de colheita (93,7%), e integração dos valores
1463 diários estimados para a duração total do ciclo da cultura, que nesse estudo foi considerado de
1464 dois anos. A produtividade potencial da cultura, em base verde (PP_{BV} , toneladas por hectare)
1465 foi estimada usando os valores do fator de correção da umidade da fração colhida (90,4%). Os
1466 fatores de correção do índice de área do cladódio e da respiração foram calculados em função
1467 de novos modelos propostos, que estão diretamente ligados às respostas da captação
1468 atmosférica de dióxido de carbono e temperatura do ar. Detalhes da calibração do modelo são
1469 destacados no Artigo 1. A produtividade atingível (PA, em toneladas por hectare) pela cultura
1470 foi estimada pela expressão:

1471

$$1472 \quad PA = PP * \{1 - Ky * [1 - (ET_r / ET_m)]\}$$

(1)

1473

1474 Em que, $PP = PP_{BS}$ ou PP_{BV} , em toneladas por hectare; K_y = coeficiente de resposta da
 1475 produtividade ao déficit de água, adotado-se o valor 0,31; ET_r = evapotranspiração real da
 1476 cultura (mm); e, ET_m = evapotranspiração máxima da cultura (mm).

1477 A quebra de produtividade $Q(\%)$ da palma forrageira em decorrência das condições
 1478 meteorológicas é obtida a partir dos dados de PP e PR , utilizando a equação:

$$1480 \quad Q(\%) = [1 - (PA/PP)] * 100 \quad (2)$$

1481

1482 A eficiência produtiva da palma forrageira (EP_{PF} , em $kg\ m^{-3}$) foi estimada assumindo a
 1483 relação entre os valores da produtividade atingível e a evapotranspiração real da cultura,
 1484 conforme equação abaixo:

1485

$$1486 \quad EP_{PF} = [PA_{MS}/ET_r] * 100 \quad (3)$$

1487

1488 Com os resultados do modelo e com os dados de clima do estado da Bahia, foram
 1489 realizadas simulações da produtividade potencial e atingível para os municípios dos 437
 1490 postos de observação. Os resultados foram regionalizados por meio do software ArcGIS 9.3,
 1491 utilizando modelos ajustados através do semivariograma, bem como o método de interpolação
 1492 denominado “krigagem ordinária”.

1493

1494

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1495

1496 Nas Figuras 1 e 2 são demonstradas a variação espacial da precipitação pluviométrica e
 1497 da temperatura média anual no estado da Bahia. Ampla área central do Estado é caracterizada
 1498 por níveis pluviométricos abaixo de 900 mm, com destaque para a região mais ao norte, onde

1499 são inferiores a 600 mm. O oeste da Bahia possui precipitação entre 1200 e 1500 mm; faixa
1500 essa compreendida também nas áreas de transição para o litoral. Nessa última, são verificados
1501 valores acima de 1500 mm. De acordo com Queiroz (2013) – dados não publicados – lâminas
1502 acima de 1096 mm causam reduções na produtividade da palma forrageira, logo que o
1503 excesso de água é um fator limitante para essa cultura.

1504 Em termos térmicos, a Bahia possui maiores magnitudes no Oeste, Norte e Litoral Sul
1505 do Estado. As temperaturas mais amenas são verificadas no Centro e Centro-sul, com valores
1506 médios anuais abaixo de 23°C. Conforme estudo climatológico realizado por Moura *et al.*
1507 (2011), com as localidades de origem e dispersão da palma forrageira, o limite ideal de
1508 temperatura média do ar está entre 16,1°C e 25,4°C. De acordo com Nobel & Hartsock
1509 (1984), a temperatura pode afetar bastante a absorção de CO₂. Esses autores, considerando
1510 diferentes associações da temperatura noturna e diurna sobre a fotossíntese da palma
1511 forrageira, verificaram, em casa-de-vegetação, que a combinação das temperaturas de 25°C
1512 durante o dia e 15°C durante a noite permitiu a máxima captação de CO₂.

1513 O modelo ZAE/FAO-33 possibilita estimar a produtividade potencial de uma cultura
1514 sem limitações de fatores bióticos e abióticos (DOORENBOS; KASSAM, 1994; PEREIRA *et*
1515 *al.*, 2007), utilizando apenas a disponibilidade de radiação solar e a condição térmica no
1516 ambiente. Com base nessas informações, percebe-se que a Bahia possui potencial produtivo
1517 de palma forrageira variando entre 200 e 400 t MV ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 2). As maiores
1518 produtividades podem ser obtidas, sobretudo nas regiões Centrais e Oeste-Sul do Estado, onde
1519 as temperaturas são mais amenas. Os menores valores são constatados no Litoral, em que há
1520 menor disponibilidade de radiação, em relação às demais regiões do Estado, devido o efeito
1521 da nebulosidade. Em termos de matéria seca, essa produtividade é estimada na ordem de 20 a
1522 36 t MS ha⁻¹ 2anos⁻¹.

1523 Com base no efeito da disponibilidade de água, a produtividade atingível da palma
1524 forrageira foi estimada variando entre 200 e 300 t MV ha⁻¹ 2anos⁻¹. As maiores produtividades

1525 (> 250 t MV ha⁻¹ 2anos⁻¹) são obtidas em áreas do Semiárido, nas transições com o litoral e no
1526 Oeste da Bahia. No Norte do Estado, os menores desempenhos produtivos (< 225 t MV ha⁻¹
1527 2anos⁻¹) estão associados aos altos valores de temperatura do ar. Por sua vez, no Litoral, como
1528 o modelo ZAE FAO-33 não contempla as penalizações referente ao excesso de água, as
1529 menores produtividades estão associadas ao efeito da nebulosidade, que reduz a
1530 disponibilidade de radiação para a cultura. Segundo Almeida (2011), a área plantada com
1531 palma forrageira na Bahia é de 137.953 ha, ou seja, dos 500 mil ha cultivados no Nordeste
1532 28% está na Bahia, e a produtividade média está em 154 t ha⁻¹ 2anos⁻¹, em áreas de produção
1533 sem adubação e sem o emprego de nenhuma tecnologia aplicada ao manejo, além de
1534 espaçamentos de 1,0 x 1,0 m. Donato (2011), conduzindo experimento com palma forrageira,
1535 sob diferentes níveis de esterco e espaçamentos, durante 600 dias, entre outubro de 2009 e
1536 maio de 2011, encontrou produtividade em torno de 21,5 t MS ha⁻¹ e 18,6 t MS ha⁻¹, para os
1537 espaçamentos de 1,0 x 0,5 m (20.000 plantas ha⁻¹) e 2,0 x 0,25 m (20.000 plantas ha⁻¹),
1538 respectivamente, e de 14,7 t ha⁻¹ em fileira dupla, com espaçamento de 3,0 x 1,0 x 0,25 m
1539 (13.333 plantas ha⁻¹).

1540 O experimento foi conduzido sob condições climáticas de Guanambi, BA, onde a
1541 normal climatológica da precipitação é de 671,8 mm e da temperatura do ar de 26°C. O
1542 modelo ZAE FAO-33 não considera os efeitos da adubação, e do espaçamento, sendo
1543 refletido indiretamente nos valores do índice de área do cladódio, que na sua calibração foi
1544 considerado 1,6 x 0,2 m (31.250 plantas ha⁻¹). Apesar das peculiaridades das informações
1545 citadas acima e das diferenças de produtividade em relação aos valores estimados pelo
1546 modelo ZAE FAO-33, percebe-se a sua capacidade em detectar a variação espacial dentro do
1547 estado da Bahia. Estes resultados mostram que o modelo apresenta eficiência para auxiliar no
1548 planejamento agrícola. Diversos autores, como Alfonsi (2008), Monteiro (2012) e Oliveira *et*
1549 *al.* (2012), também obtiveram bons resultados no uso do modelo para a cana-de-açúcar em
1550 macroescala.

1551 Na estimativa da produtividade atingível da cultura, em que se considera a penalização
1552 pelo estresse hídrico, percebe-se que a quebra de rendimento da palma forrageira na Bahia
1553 não é elevada, atingindo valores até 16% (Figura 7), mesmo com reduções de até 40% nos
1554 valores de evapotranspiração real (Figura 8). A resposta produtiva da cultura ao suprimento de
1555 água no solo no modelo ZAE FAO-33 é expressa pelo fator k_y , que relaciona a redução
1556 relativa do rendimento ao déficit relativo da evapotranspiração (SHRESTHA *et al.*, 2009),
1557 que pode ser classificada como baixa ($k_y < 0,85$); baixa/média ($0,85 < k_y < 1,00$); média/alta
1558 ($1,00 < k_y < 1,15$) e alta ($k_y > 1,15$), ou seja, quando o valor de k_y de uma cultura é superior a
1559 1, a mesma é considerada sensível ao déficit hídrico e pelo contrário, quando o valor é inferior
1560 a 1, a cultura é resistente ao estresse hídrico (POSSE *et al.*, 2009). No modelo ZAE FAO-33,
1561 esse valor é igual a 0,31 para a palma forrageira, demonstrando a sua alta resistência à
1562 escassez de água, o que justifica a baixa quebra da produtividade. Essa resistência também
1563 está associada à baixa demanda de água pela cultura, representada pelo valor K_c inserido no
1564 modelo, o qual é igual a 0,53. Observa-se ainda na Figura 7, que a redução na produtividade
1565 da palma é maior (12-16%) no litoral em direção à região de transição para o interior do
1566 Estado. Em contraste, ao norte a redução é menor, com valores variando entre 0 e 8%. Vale
1567 ressaltar que, devido o modelo ZAE FAO-33 não contemplar diretamente as perdas de
1568 produtividade pelo excesso de água, os decréscimos no rendimento nas regiões mais chuvosas
1569 podem suspostamente ser apenas reflexos da redução da disponibilidade de radiação solar,
1570 como antes abordado. A redução relativa da evapotranspiração da palma forrageira (ET_r/ET_c)
1571 foi superior nas áreas ao Norte, avançando para o Oeste e Centro Sul do Estado, sendo reflexo
1572 dos baixos níveis pluviométricos, apesar da redução da exigência hídrica da cultura sendo
1573 reduzida.

1574 Esses resultados, associados ao potencial produtivo atingível pela cultura, identificaram
1575 as áreas Centrais e Centro Sul do Estado como aquelas em que a palma forrageira possui a
1576 maior eficiência de conversão de água em biomassa, ou seja, com maior eficiência produtiva

1577 (> 6 kg MS m⁻³) (Figura 9). Todavia, uma ampla área situada entre o Norte, Oeste e regiões de
1578 transição com o litoral do Estado, apresentou altos valores de eficiência produtiva (4 - 6 kg
1579 MS m⁻³). O litoral caracterizou-se como uma região em que as condições do ambiente podem
1580 limitar a eficiência da cultura. HAN & FELKER (1997) encontraram, nas condições
1581 semiáridas de kingsville, Texas - USA, para a palma *Opuntia ellisiana* L., com produção de
1582 biomassa seca na ordem de 14,3 t ha⁻¹, eficiência do uso de água igual a 2,54 Kg MS m⁻³. Por
1583 sua vez, no quarto ano produtivo, quando a produção foi de 17,6 t ha⁻¹, a eficiência atingiu
1584 3,51 kg MS m⁻³. Nas condições climáticas de Sicily, Itália, região Mediterrânea, Console *et al.*
1585 (2013) avaliaram a *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.), com plantas de três metros de altura e dez
1586 anos de idade, cultivada para fins de produção de fruto, e os autores verificaram eficiência do
1587 uso da água de 4,6 kg m⁻³ e 4,4 kg m⁻³, nos respectivos anos avaliados. No Semiárido
1588 pernambucano, que possui condições climáticas semelhantes às observadas no Semiárido da
1589 Bahia, Araújo Filho (2013) encontrou valor igual a 0,91 kg MS m⁻³.

1590

1591

1592

1593

CONCLUSÕES

1594

1595 Aplicando-se o modelo ZAE FAO-33, na estimativa da produtividade da palma
1596 forrageira, foi possível verificar as variações espaciais do potencial produtivo das diferentes
1597 regiões da Bahia, identificando a baixa quebra do rendimento da cultura no Estado. Foi
1598 constatado também que os municípios situados no Centro e Centro Sul do Estado
1599 proporcionam as maiores eficiências produtivas em decorrência da melhor disponibilidade
1600 hídrica e condição térmica mais apropriada. Todavia, em uma ampla faixa do Estado,
1601 localizada ao Norte, Oeste e áreas de transição com o litoral há plenas possibilidades de
1602 cultivo dessa espécie, com a obtenção de ótimos desempenhos produtivos.

1603

1604

1605

REFERÊNCIAS

1606

1607 ALFONSI, E. L. Uso de índices fenológicos em modelos de previsão de produtividade do
1608 cafeeiro. Tese (Doutorado – Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
1609 Piracicaba, 2008. 104 p.

1610 ALMEIDA, J. de. A palma forrageira na região semiárida do estado da Bahia: diagnóstico,
1611 crescimento e produtividade. 95p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da
1612 Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, 2011.

1613 BRISTOW, K., CAMPBELL, G. On the relationship between incoming solar radiation and
1614 daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, n.31, p.159-
1615 166, 1984.

1616 CAMARGO, A. P.; PINTO, H. S.; PEDRO JUNIOR, M. J. Aptidão climática de culturas
1617 agrícolas. São Paulo: Secretaria de Agricultura. Zoneamento Agrícola do Estado de São
1618 Paulo, São Paulo, CATI, Campinas, v. 1, p 109-149, 1974.

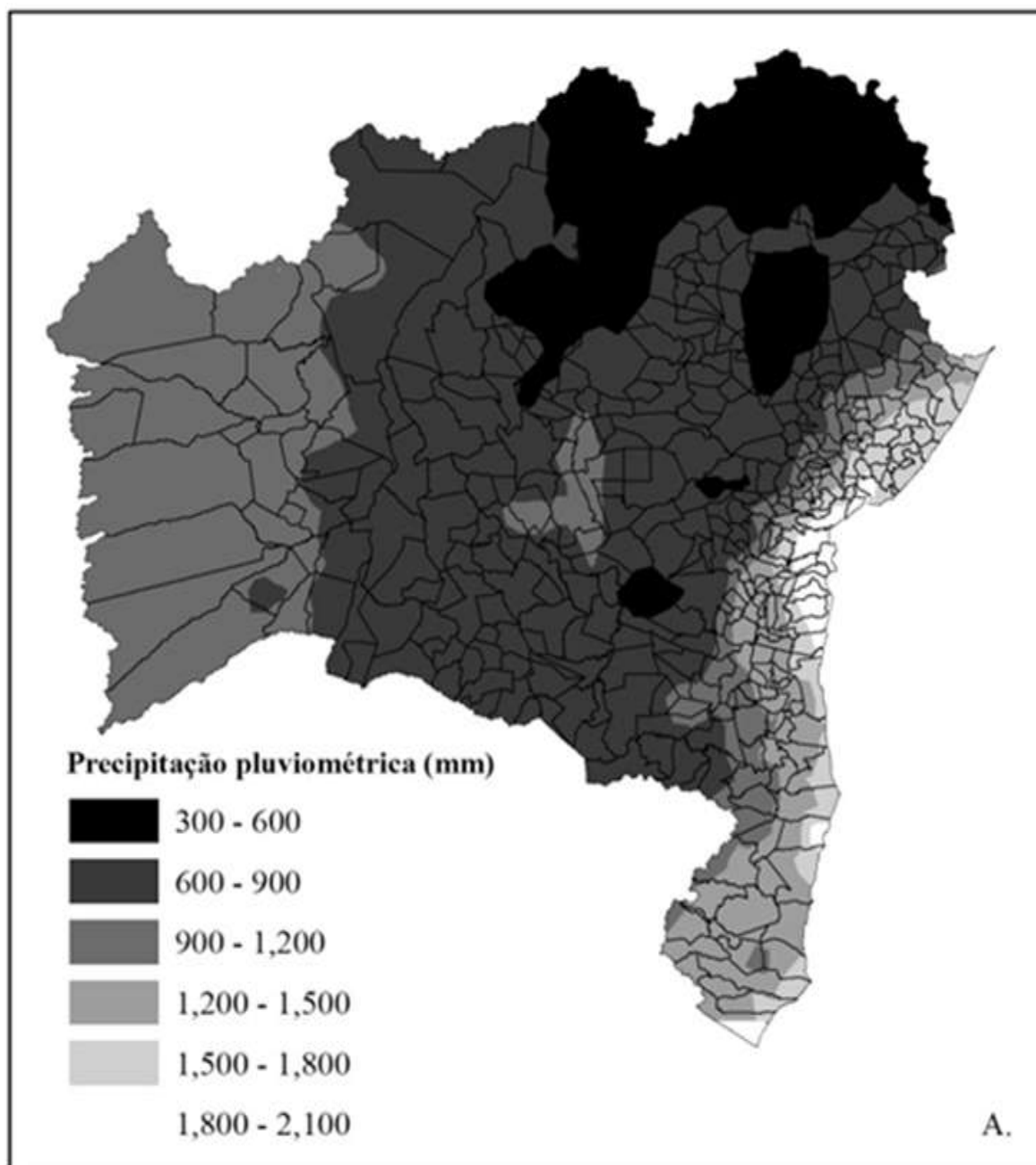
1619 CHIACCHIO, F. P. B.; MESQUITA, A. S.; SANTOS, J. R. dos. Palma forrageira: uma
1620 oportunidade econômica ainda desperdiçada para o Semiárido baiano. *Bahia Agrícola*, v.7,
1621 n.3, 2006.

1622 CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of evapotranspiration and annual
1623 biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) orchard in a Semi-arid
1624 Environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Submitted September 18, 2012;
1625 January 31, 2013; posted ahead of print February 2, 2013. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-
1626 4774.0000589

- 1627 DONATO, P. E. R. Avaliação bromatológica, morfológica, nutri-cional e de rendimento em
1628 palma forrageira sob diferentes espaçamentos e doses de esterco bovino. 2011. 134p. Tese
1629 (Doutorado em Zootecnia). UESB, Itapetinga-BA, 2011.
- 1630 DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas Estudos de
1631 FAO: Irrigação e Drenagem, 33, Campina Grande: UFPB, 1994, 306p.
- 1632 DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F. dos. Exigências nutricionais da palma
1633 forrageira. In: MENEZES, R. S. C. et al. (eds). A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento
1634 atual e novas perspectivas de uso. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 105-127. 2005.
- 1635 DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F. dos; LIRA, M. de A.; SANTOS, D.C. dos;
1636 FARIAS, I.; LIMA, L.E.; FERREIRA, R.L.C.; Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L) Miller
1637 under different N and P fertilization and plant population in north- east Brasil. *Journal of Arid*
1638 *Environments*, v. 67, n. 3, p. 357-372, 2006.
- 1639 FEITOZA, L. R.; SCÁRDUA, J. A.; SEDIYAMA, C. G.; OLIVEIRA, L. M.; VALE, S. S.
1640 Estimativas das temperaturas médias mensal e anual do Estado do Espírito Santo. *Revista do*
1641 *Centro de Ciências Rurais, Santa Maria*, v.9, p. 279-291, 1979.
- 1642 HAN, H.; FELKER, P. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia*
1643 *ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, v.36, p.133-148, 1997.
- 1644 IGBADUN, H.E., MAHOO, H.F.; TARIMO, ANDREW K.P.R.; BAANDA A. S. Crop water
1645 productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River
1646 Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, v. 85, p.141-150, 2006.
- 1647 KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation
1648 management. *Agricultural Water Management*, v.96, p.799-808, 2009.
- 1649 LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of
1650 vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*,
1651 v.102, p.15-27, 2004.

- 1652 MONTEIRO, L. A. Modelagem agrometeorológica como base para definição de ambientes de
1653 produção para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Piracicaba-SP,
1654 ESALQ/USP, 2012.
- 1655 MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; SILVA SÁ, I. I. Zoneamento
1656 Agroclimático da Palma Forrageira para o Estado de Pernambuco. Petrolina: Embrapa
1657 Semiárido, 2011. Documentos 242. 28p.
- 1658 NOBEL S. P.; HARTSOCK T. L. Physiological response of *Opuntia ficus-indica* to growth
1659 temperature. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v. 60, p. 98-105, 1984.
- 1660 NOBEL, P.S. Biologia ambiental. In: Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira.
1661 Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB, p. 36-48. 2001.
- 1662 OLIVEIRA, F. T. de; SOUTO, J. S.; SILVA, R. P. da; FILHO, F. C. de ANDRADE; JÚNIOR,
1663 E. B. PEREIRA. Palma forrageira: Adaptação e importância para os ecossistemas áridos e
1664 semiáridos. *Revista Verde*, v.5, n.4, 2010.
- 1665 OLIVEIRA, F.T. de. Crescimento do sistema radicular da *Opuntia ficus -indica* (L.) Mill
1666 (palma forrageira) em função de arranjos populacionais e adubação fosfatada. 76f.
1667 Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia – Sistemas Agrosilvipastoris no Semiárido).
1668 Universidade Federal de Campina Grande, Patos – PB, 2008.
- 1669 PEREIRA, A. R.; ANGELLOCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: Fundamentos
1670 e Aplicações. Guaíba: Agropecuária, 478 p. 2002.
- 1671 PEREIRA, A. R.; ANGELLOCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. ESALQ,
1672 Piracicaba, 2007.
- 1673 POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; PEREIRA, M.G.; MONNERAT, P.H.;
1674 GOTTARDO, R.D. Relação entre a produtividade do mamoeiro e o déficit hídrico (ky) na
1675 região Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.2,
1676 p.158–164, 2009.

- 1677 PUPPALA, N.; FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L.
1678 Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at
1679 different growth stages. *Industrial Crops and Products*, v.21, p.33-47, 2005.
- 1680 SAMPAIO, E. V. S. B. *Fisiologia da Palma. A palma do Nordeste do Brasil: Conhecimento*
1681 *atual e novas perspectivas de uso*. Editores: Rômulo S. Menezes, Diogo A. Simões, Everardo
1682 V. S. B. Sampaio. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 258 p. 2005.
- 1683 SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a
1684 déficit hídrico em diferentes solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,
1685 Campina Grande, v.3, n.1, p.1-6, 1998.
- 1686 SHRESTHA, N.; GEERTS, S.; RAES, D.; HOREMANS, S.; SOENTJENS, S.; MAUPAS,
1687 F.; CLOUET, P. Yield response of sugar beets to water stress under Western European
1688 conditions, *Agricultural Water Management*, v.97, p.346-350, 2010.
- 1689 SOBREIRA FILHO, M.G. *Estudos sobre o aproveitamento da palma no Brasil, especialmente*
1690 *no Nordeste*. Recife-PE, 1992. p.37.
- 1691 SUGAWARA, L. M.; *Um Modelo Agrônômico*. Tese de Doutorado do Curso de Pós-
1692 *Graduação em Sensoriamento Remoto*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José
1693 *dos Campos*, 116 p. 2010.
- 1694 THORNTHWAITTE, C.W. *Na approach toward a rational classification of climate*.
1695 *Geographical Review*, v.38, p.55-94, 1948.
- 1696
- 1697



1698

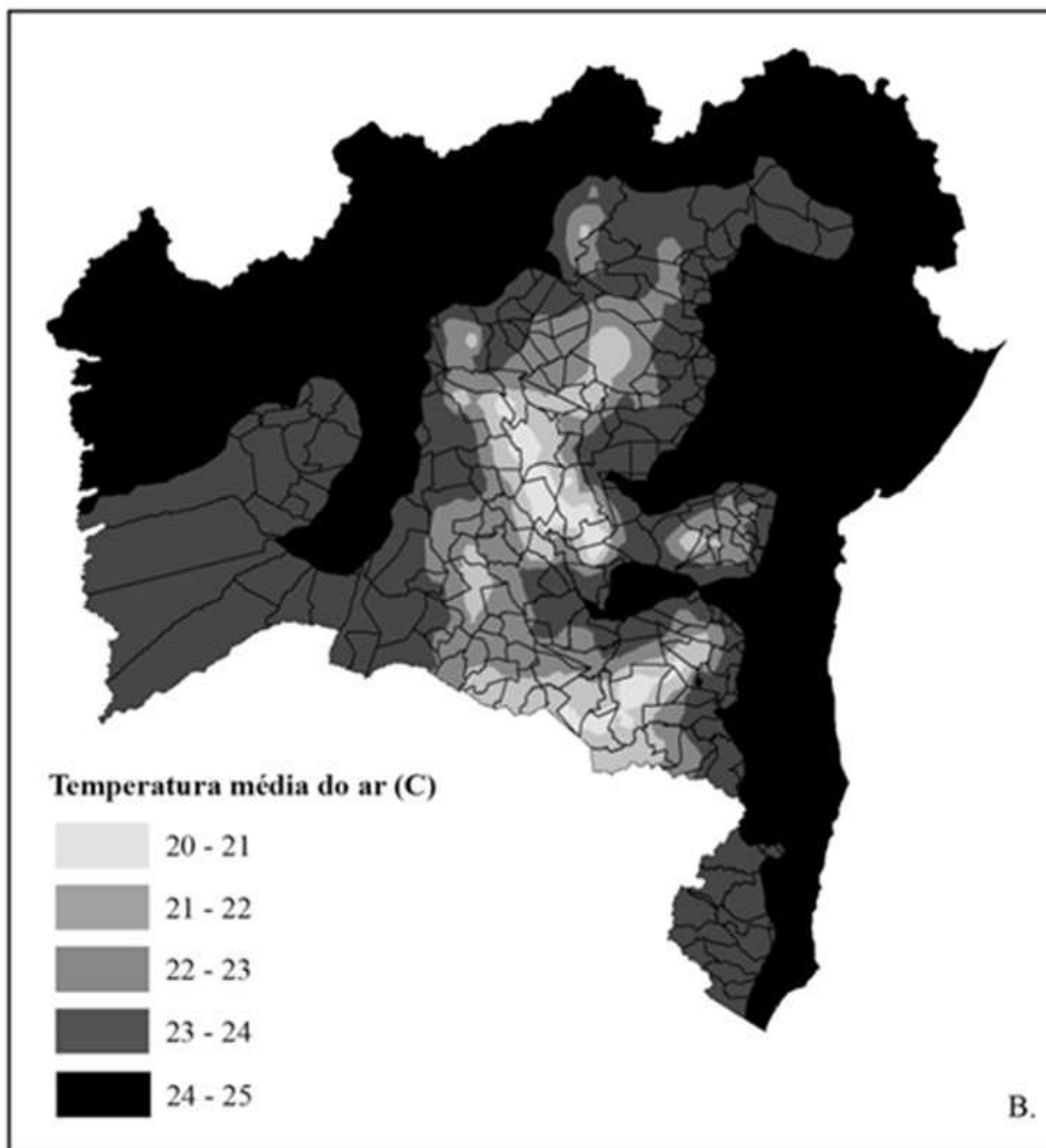
1699

1700 **Figura 1.** Distribuição espacial dos valores médios anuais da precipitação pluviométrica para

1701 o estado da Bahia.

1702

1703

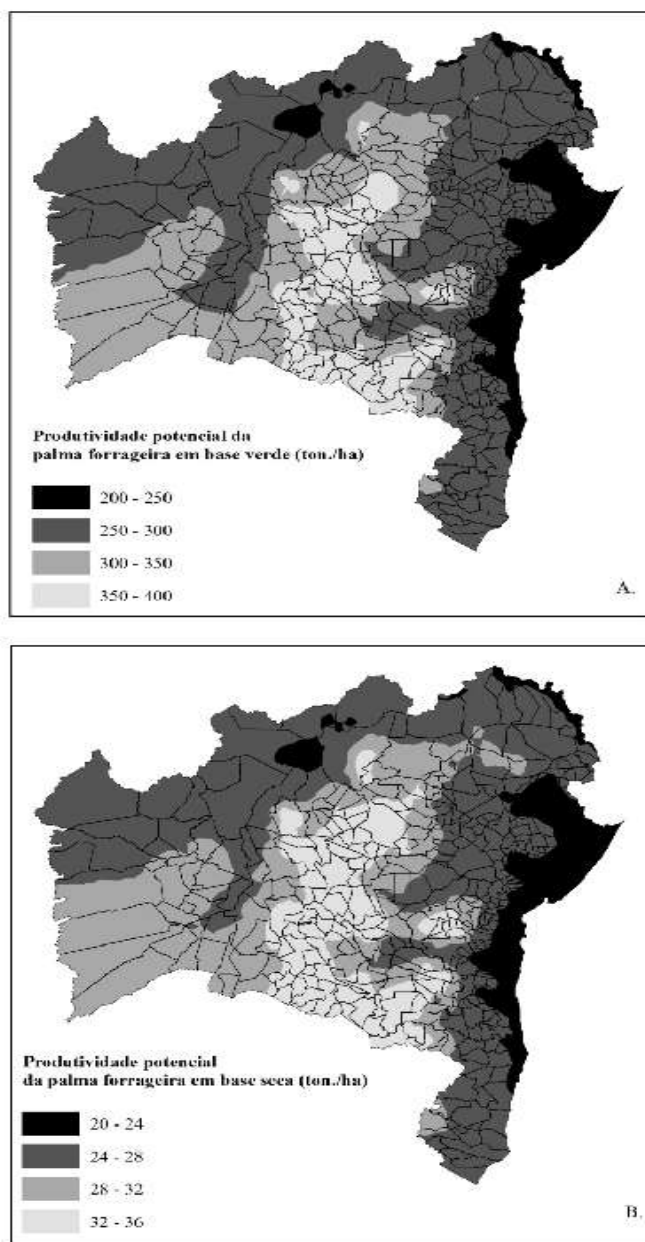


1704

1705

1706 **Figura 2.** Distribuição espacial dos valores médios anuais da temperatura do ar para o estado
1707 da Bahia.

1708



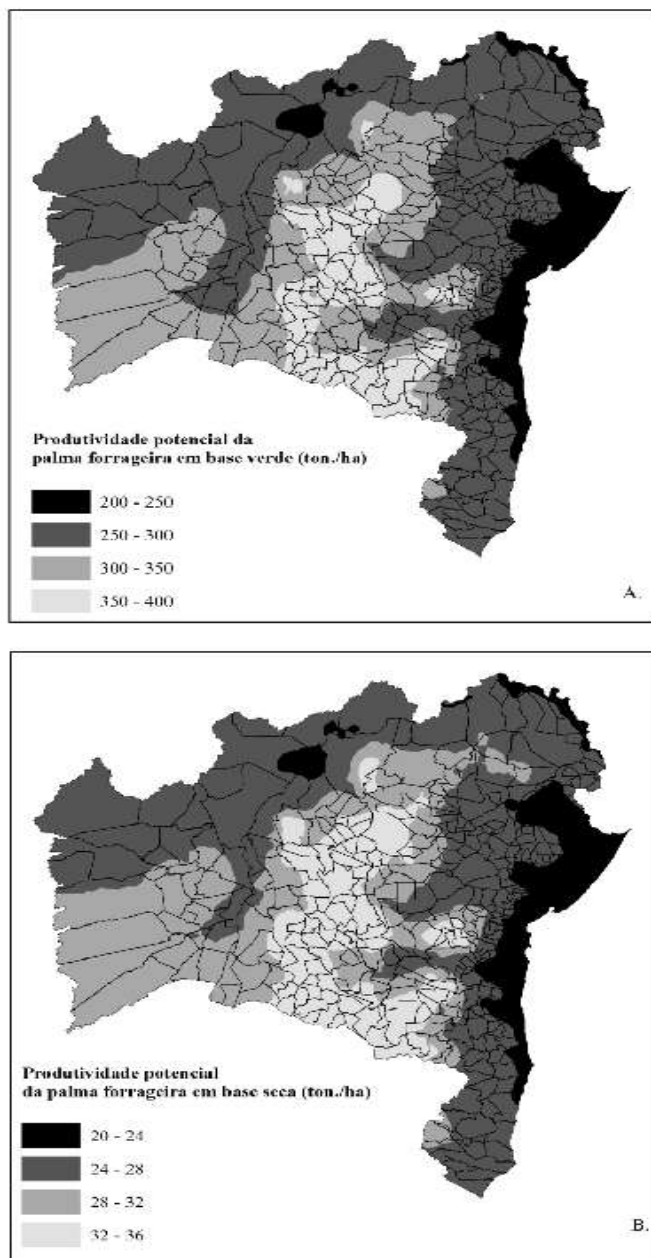
1709

1710

1711 **Figura 3.** Distribuição espacial da produtividade potencial da palma forrageira (em toneladas
1712 por hectares), em base verde estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-
1713 33, que foi calibrado e modificado para a cultura.

1714

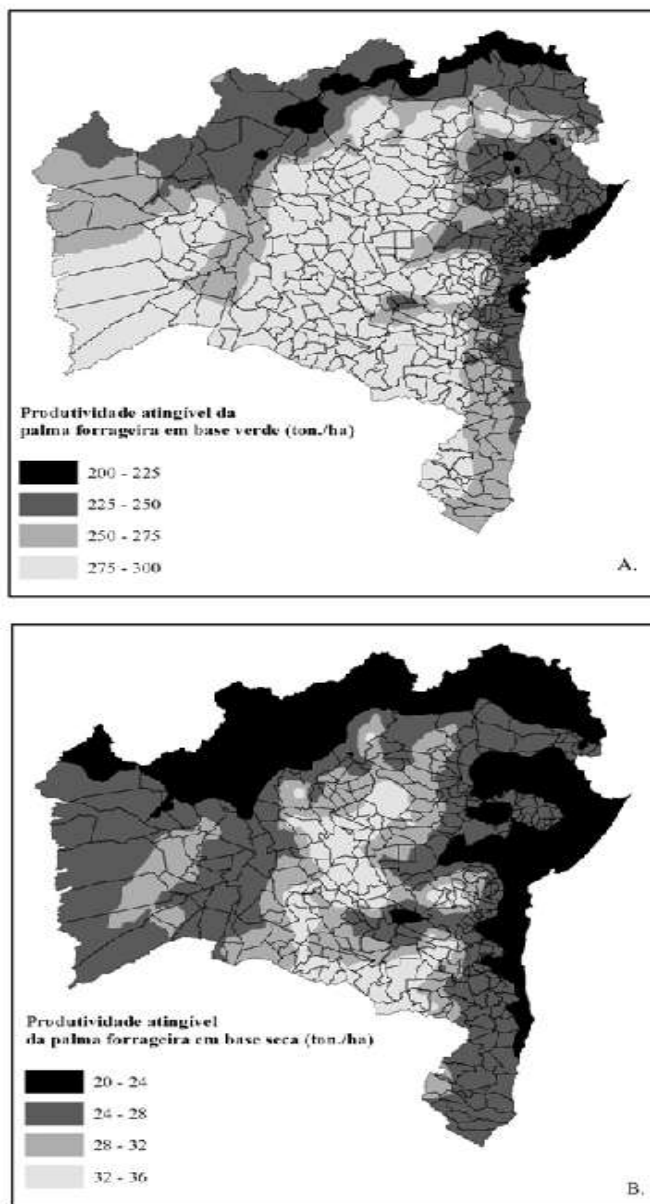
1715



1716

1717

1718 **Figura 4.** Distribuição espacial da produtividade potencial da palma forrageira (em toneladas
1719 por hectares), em base seca estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-
1720 33, que foi calibrado e modificado para a cultura.



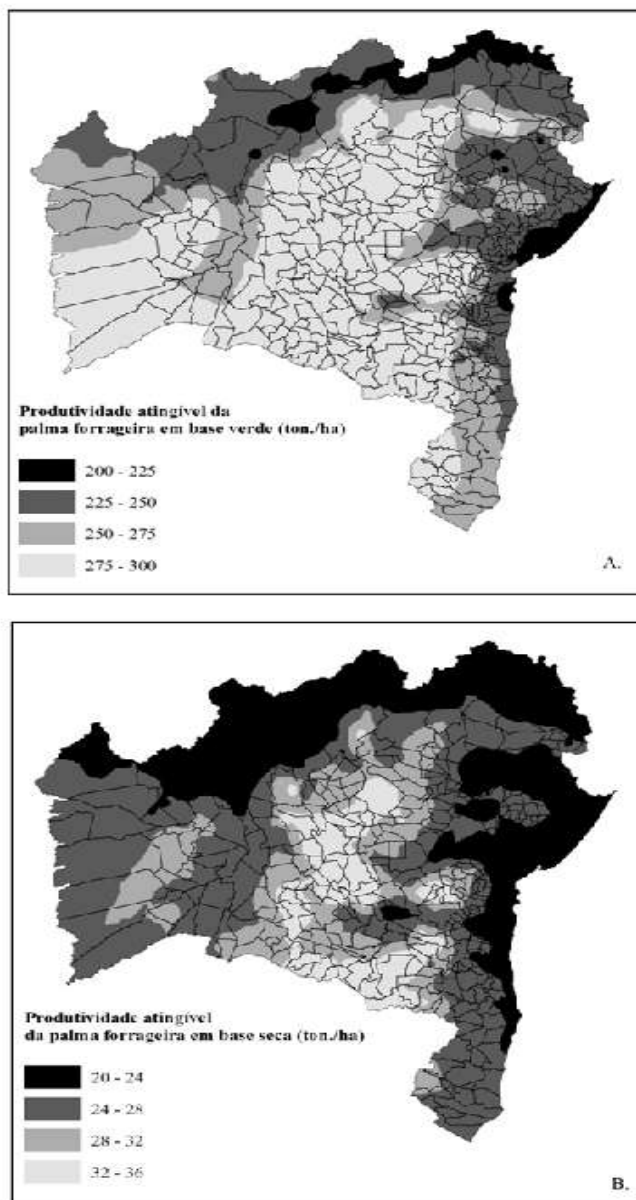
1721

1722

1723 **Figura 5.** Distribuição espacial da produtividade atingível da palma forrageira (em toneladas
1724 por hectares), em base verde, estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo
1725 ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a cultura.

1726

1727



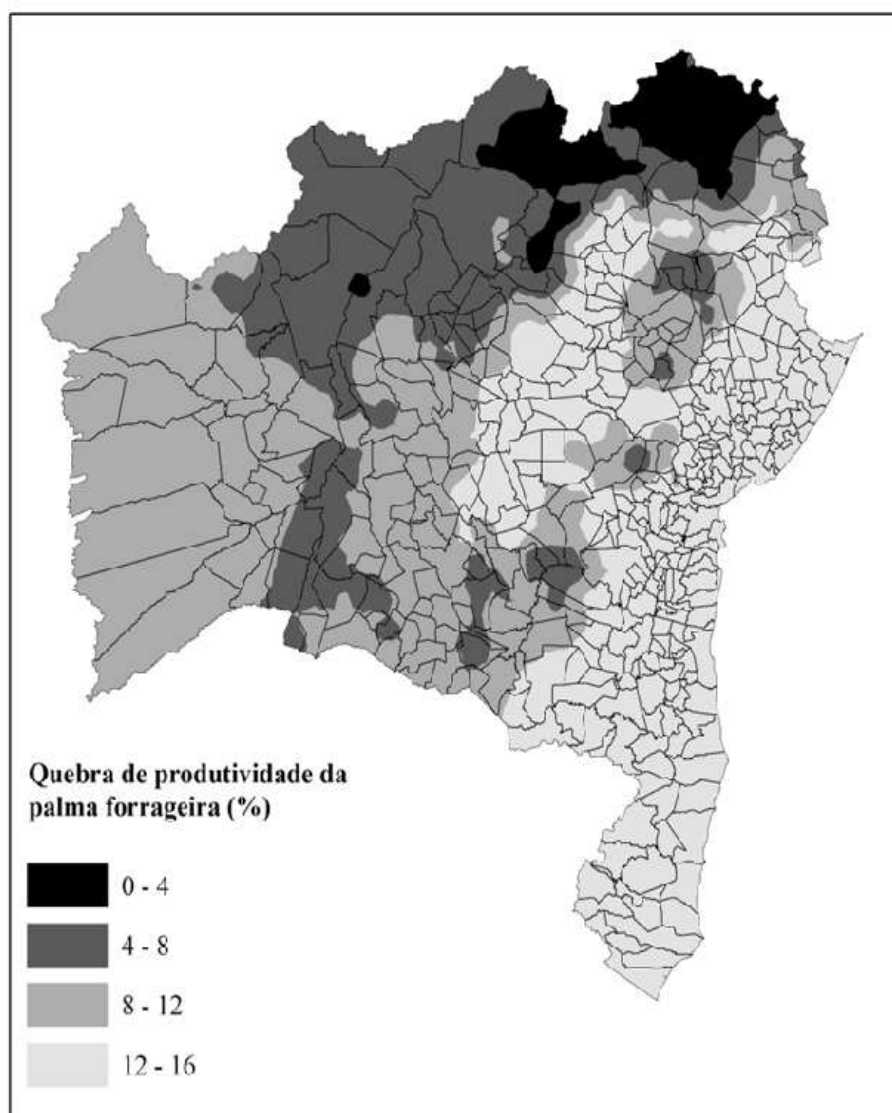
1728

1729

1730 **Figura 6.** Distribuição espacial da produtividade atingível da palma forrageira (em toneladas
1731 por hectares), em base seca, estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-
1732 33, que foi calibrado e modificado para a cultura.

1733

1734



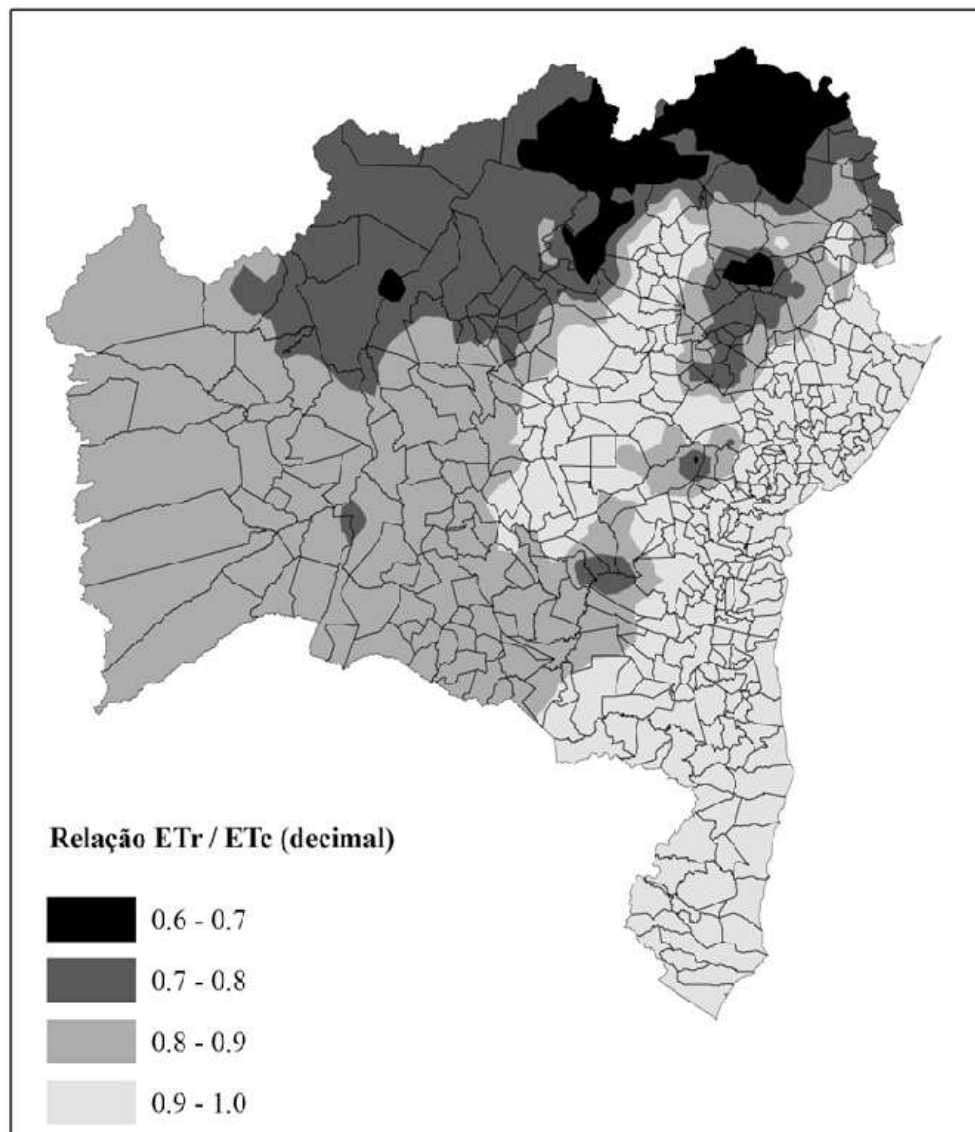
1735

1736

1737 **Figura 7.** Regionalização da quebra da produtividade da palma forrageira estimada para o
1738 estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, que foi calibrado e modificado para a
1739 cultura.

1740

1741



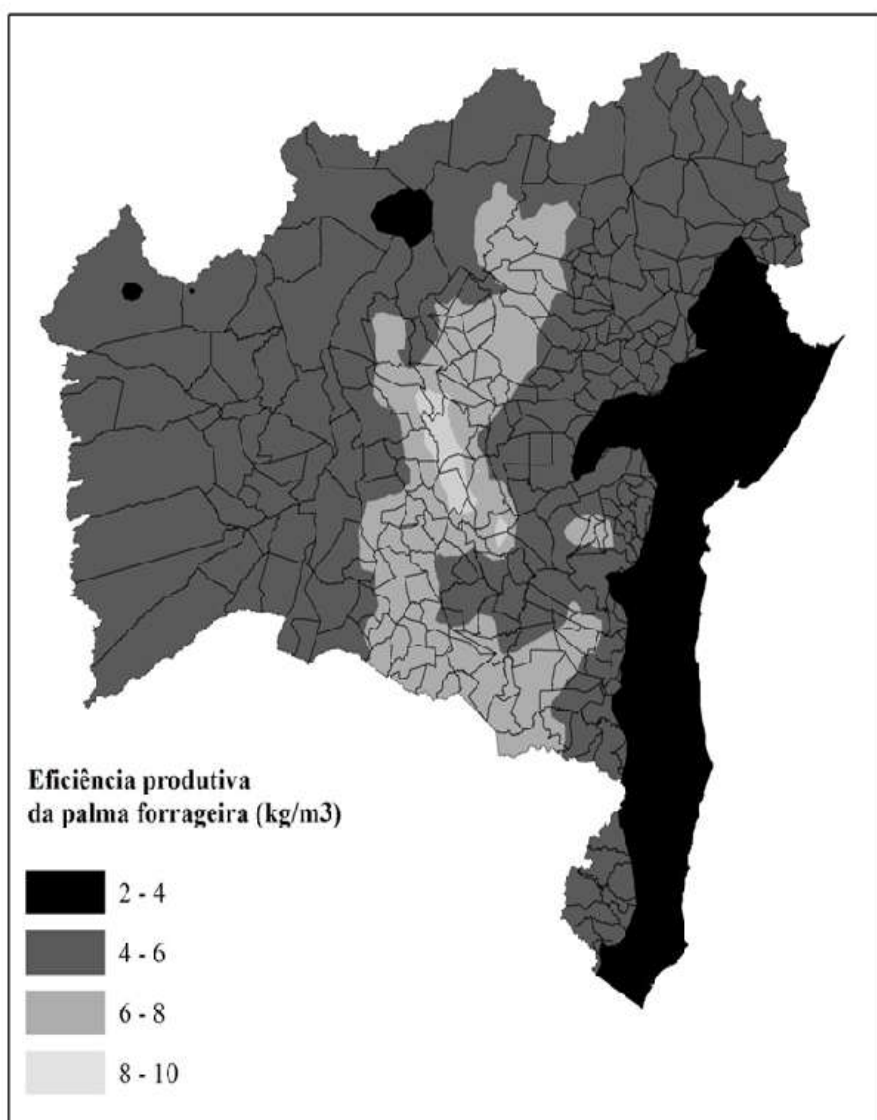
1742

1743

1744 **Figura 8.** Regionalização da relação entre a evapotranspiração real (ETr) e da cultura (ET_c) da
1745 palma forrageira, estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, que foi
1746 calibrado e modificado para a cultura.

1747

1748



1749

1750

1751 **Figura 9.** Regionalização da eficiência produtiva da palma forrageira (kg de matéria seca m⁻³), estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33 que foi calibrado e
1752 ³), estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33 que foi calibrado e
1753 modificado para a cultura.

3. CONCLUSÃO GERAL

O modelo da Zona Agroecológica - ZAE pode auxiliar o agricultor na tomada de decisão, uma vez que possibilita estimar a produtividade potencial e a quebra do rendimento das diversas culturas. Para o caso específico da palma forrageira, o modelo ZAE original da FAO apresentou baixo desempenho na simulação da produtividade, necessitando a modificação dos parâmetros de correção do índice de área foliar (C_{IAC}) e da respiração (C_R), que estão diretamente ligados às respostas de captação atmosférica de dióxido de carbono e da temperatura do ar, além disso, é necessário adotar as equações do agrupamento do processo fotossintético C3 de inverno, de modo a se obter melhores estimativas de produtividade da cultura.

Após a aplicação das modificações dos parâmetros no modelo ZAE FAO-33, para a estimativa da produtividade da palma forrageira, foi possível verificar as variações espaciais do potencial produtivo das diferentes regiões da Bahia, identificando a baixa quebra do rendimento no Estado. Foi constatado também que os municípios situados no Centro e Centro Sul do Estado, são aqueles que favorecem as maiores eficiências produtivas, em decorrência dos regimes térmicos e hídricos mais adequados às exigências da cultura. Todavia, em uma ampla faixa do Estado, localizada ao Norte, Oeste e áreas de transição com o litoral há plenas possibilidades de cultivo dessa espécie, com a obtenção ótimos desempenhos produtivos.

4. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, J. de. A palma forrageira na região semiárida do estado da Bahia: diagnóstico, crescimento e produtividade. 2011. 95p. Tese (Doutorado) – UFRB,

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Estudos de FAO: Irrigação e Drenagem, 33, Campina Grande: UFPB,1994. 306p.

DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F. dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. In: MENEZES, R. S. C. et al. (eds). A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005, p.105-127.

DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M. de A.; SANTOS, D.C.; FARIAS, I.; LIMA, L.E.; FERREIRA, R.L.C. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brasil. Journal of Arid Environments, 2006, v. 67, n. 3, p. 357-372.

FALCÃO, H. M.; OLIVEIRA, M. T.; MERGULHÃO, A. C.; SILVA, M. V.; SANTOS, M. G. Atividade de PEP carboxilase e acúmulo de acidez noturna em genótipos de *Opuntia ficus-indica*. 2º Congresso brasileiro de palma e outras cactáceas. Resumos... Garanhuns-PE, Out, 2011. HAN, H.; FELKER, P. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. Journal of Arid Environments, 1997, v.36, p.133-148.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. de. Determination of spatial water requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for the state of Parana, Brazil. Agricultural Water Management, 2002, v.52, p.177-196.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. Agricultural Forest Meteorology, 2000, v.103, p.137–157.

IGBADUN, H.E.; MAHOO, H.F.; TARIMO, ANDREW K.P.R.; BAANDA A. S. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. Agricultural Water Management, 2006, v. 85, p.141-150.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, 1999, v.61, p.253-271.

KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management*, 2009, v.96, p.799-808.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 2004, v.102, p.15-27.

LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research*, 2005, v.92, p.321–335.

NOBEL, P.S. Biologia ambiental. In: *Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira*. Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB, 2001, p. 36-48.

OLESEN, J. E.; BINDI, M. Review: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 2002, v.16, p.239–262.

OLIVEIRA, F.T. de. Crescimento do sistema radicular da *Opuntia fícus -indica* (L.) Mill (palma forrageira) em função de arranjos populacionais e adubação fosfatada. 76f. Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia – Sistemas Agrosilvipastoris no Semiárido). Universidade Federal de Campina Grande, Patos – PB, 2008.

MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; SILVA SÁ, I. I. Zoneamento Agroclimático da Palma Forrageira para o Estado de Pernambuco. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. Documentos 242. 28p.

PORTER, C.H.; BRAGA, R.; JONES, J.W. An approach for modular crop model development. Gainesville, Florida: Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida. 1999. 15p.

PUPPALA, N. FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. *Industrial Crops and Products*, 2005, v.21, p.33-47.

RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 2007, v.87, p.91-105.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 1998, v. 3, n. 1, p. 1-6.

SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; ARRUDA, G. P.; COELHO, R. S. B.; DIAS, F. M.; MELO, J. N. Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em Pernambuco. Recife: IPA, 2006. 48p. (IPA. Documentos, 30).

SAMPAIO, E. V. S. B. Fisiologia da Palma. A palma do Nordeste do Brasil: Conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Editores: Rômulo S. Menezes, Diogo A. Simões, Everardo V. S. B. Sampaio. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005, 258p.

SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C. Estimativa e espacialização da umidade relativa do ar para os estados de Alagoas, Bahia e Sergipe. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 2007, v. 15, p.14-28.

SOLER, C. M. T; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSMCERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal Agronomy*, 2007, v.27, p.165–177.

VIEIRA, E. D. Adição de fibra em dietas contendo palma; forrageira (*Opuntia fícus* índica Mill) para caprinos. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2006. Tese (Doutorado em Zootecnia) Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2006.

YUN, J. I. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural System*, 2003, v.77, p.23-38.