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

**Mudanças climáticas e o acúmulo de forragem do capim-marandu:
cenários futuros para o Estado de São Paulo**

André Santana Andrade

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Ciência
Animal e Pastagens

**Piracicaba
2013**

André Santana Andrade
Engenheiro Agrônomo

**Mudanças climáticas e o acúmulo de forragem do capim-marandu: cenários futuros
para o Estado de São Paulo**

Orientador:
Profa. Dra. **PATRICIA MENEZES SANTOS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Ciência
Animal e Pastagens

**Piracicaba
2013**

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

Andrade, André Santana

Mudanças climáticas e o acúmulo de forragem do capim-marandu: cenários futuros para o Estado de São Paulo / André Santana Andrade. - - Piracicaba, 2013.
90 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.
Bibliografia.

1. *Brachiaria brizantha* 2. ETA 3. Gramínea tropical 4. Modelo empírico 5. PRECIS
6. *Urochloa brizantha* I. Título

CDD 633.2
A553m

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

*Aos meus pais Oliveiros Martins de Andrade e
Marilda Santana Andrade, pela presença e apoio
em qualquer que seja a situação ou dificuldade.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

O sucesso em qualquer trabalho, além de dedicação e competência, esta na eficiência da equipe e não apenas de um indivíduo. A todos que, de alguma forma participaram da equipe deste trabalho, muito obrigado!

Agradeço especialmente a Deus, por permitir a conclusão deste trabalho com vida e saúde. A família Oliveiros, Marilda, Clarice e Lucas pelo apoio imensurável. À orientadora Patricia Menezes Santos, pela oportunidade, visão crítica, confiança e incentivo à inovação. Ao pesquisador José Ricardo Macedo Pezzopane, pelo auxílio em todas as etapas deste trabalho.

A CAPES, pela bolsa de estudos. À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e Departamento de Zootecnia, pela oportunidade. À Embrapa, através de seus Centros de Pesquisa Pecuária Sudeste, Informática Agropecuária e Meio Ambiente, pelo suporte. À Giovana Maranhão Bettiol e Sílvia Roberto Medeiros Evangelista pela execução e auxílio no processamento e geração de resultados.

Aos professores e pesquisadores Pedro Gomes da Cruz, Cristiana de Gaspari Pezzopane, Moacyr Corsi, Sila Carneiro da Silva, Francisco Antonio Monteiro, Luis César Dias Drumond, Luís Gustavo Barioni, Paulo Cesar Sentelhas, Fabio Ricardo Marin, Fernando Campos Mendonça e Sonia Maria de Stefano Piedade pelos ensinamentos e/ou participação, como titulares ou suplentes, da banca avaliadora deste trabalho.

Ao Bruno Carneiro e Pedreira, Leandro Coelho de Araujo e Carlos Guilherme Silveira Pedreira pelas sugestões no artigo de revisão. Ao Elis Dener Lima Alves e Marcelo Sacardi Biudes pelas dicas na interpolação espacial de dados.

Aos colegas e amigos Luís Henrique Soares, Fabio Henrique Takahashi, Francisco Guilhien Gomes Junior, Daiane Aparecida Fausto, Tatiane Beloni, Jacqueline Geraldo de Lima, Karla Vilaça Martins, Walquíria Fernanda Teixeira, Míriam Regina Canesin e Arthur Galleti Lima, pelas dicas e auxílio no dia a dia.

A todos que de alguma forma contribuíram, meus sinceros agradecimentos!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Hipóteses científicas	15
1.2 Objetivos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Mudanças climáticas	17
2.1.1 Mudanças climáticas e o IPCC	17
2.1.2 Clima no sudeste do Brasil: mudanças observadas e projeções	19
2.2 Modelos climáticos regionais PRECIS e ETA-CPTEC	20
2.3 Aptidão de <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	23
2.4 Modelagem do crescimento de plantas forrageiras	24
2.4.1 Modelos empíricos	26
2.4.2 Modelos mecanicistas	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
4 RESULTADOS	41
4.1 Análise geral	41
4.2 Análise regional	54
5 DISCUSSÃO	57
5.1 Impacto na produção de forragem	57
5.2 Medidas de mitigação e adaptação	64
6 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICES	87

RESUMO

Mudanças climáticas e o acúmulo de forragem do capim-marandu: cenários futuros para o estado de São Paulo

Em 2007 o Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas relataram mudanças climáticas nas últimas décadas, principalmente aumento de temperatura. Tal fato tem preocupado cientistas sobre o futuro. Assim, estudos tem sido realizados para avaliar possíveis impactos na agropecuária. As pastagens no Brasil podem ser particularmente afetadas, devido a grande extensão de terras ocupadas, muitas delas em áreas marginais. No estado de São Paulo, estas mudanças poderão ser importantes para a *Braquiaria brizantha* cv. Marandu, gênero presente em cerca de 7,19 milhões de hectares. Assim, objetivou-se avaliar impactos das mudanças climáticas na produção desta forrageira em São Paulo. As projeções foram realizadas com base nos modelos climáticos regionalizados PRECIS e ETA-CPTEC, considerando os cenários de emissões do IPCC A2 (alta) e B2 (baixa). Os dados do período de 1963 a 2009 de 23 estações meteorológicas foram considerados como o clima atual (CA). Os períodos simulados foram de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070. Para associar clima com crescimento de capim-marandu, foi utilizado o modelo empírico de Cruz e colaboradores: $TAF = 15.34 * GD_{\text{corrigido}}$ ($p=0.056$, $r^2=0.95$), onde TAF é a taxa diária de acúmulo de forragem; $GD_{\text{corrigido}}$ é o grau-dia, calculado com $17,2^{\circ}\text{C}$ de temperatura-base e corrigido por um fator de penalização hídrico (obtido pela relação armazenamento de água atual/máximo do solo, considerando três capacidades: 40, 60 e 100 mm). Interpolação espacial foi realizada usando os métodos do vizinho natural e krigagem, com auxílio do software ArcGis 10.1. Análises regionais foram realizadas com base no censo LUPA. Em geral, as projeções mostraram aumento futuro na produção potencial. Considerando o CA, o acúmulo anual de forragem médio (AAF) foi 18,4; 19,6 e 21,0 Mg MS/ha/ano em solos com capacidade de 40, 60 e 100 mm, respectivamente. Nesta mesma ordem, foram simuladas AAF de 26,3; 27,9 e 29,8 para o PRECIS (aumento médio de 42%) e 25,0; 26,6 e 28,7 Mg MS/ha/ano para o ETA-CPTEC (aumento médio de 36%), em cenário A2 para 2043-2070. Outras projeções indicam aumentos intermediários. Apesar do aumento anual, a variação irá aumentar entre estações e entre anos. O aumento absoluto será maior na estação chuvosa, tornando a estacionalidade de produção mais marcante. Tal resultado é mais evidente nas simulações com o modelo ETA-CPTEC e para solos com menor capacidade (40 mm). Nestes solos, a TAF mínima e máxima (kg MS/ha/dia) foram, respectivamente, 15,4 (inverno) e 94,6 (verão) para o CA; 22,9 (inverno) e 125,1 (verão) para o PRECIS e 18,2 (inverno) e 125,9 (verão) para o ETA-CPTEC, em cenário A2 para 2043-2070. Os resultados variaram muito entre regiões, especialmente para cenários do ETA-CPTEC (extremos variaram de $<+10\%$ até $>+60\%$). Regiões mais quentes (oeste do estado, em geral) tem maior potencial de produção, porém terão menor incremento relativo no futuro. Os resultados são devidos ao aumento de temperatura em geral e redução da disponibilidade hídrica, principalmente na primavera, devido a maior evapotranspiração e não necessariamente à redução da precipitação. Estratégias para mitigação e adaptação foram sugeridas, principalmente relacionadas ao manejo da pastagem e dos animais para redução dos efeitos da menor disponibilidade hídrica, redução das emissões de gases de efeito estufa e uso da forragem excedente de verão.

Palavras-chave: *Brachiaria brizantha*; ETA; Gramínea tropical; Modelo empírico; PRECIS

ABSTRACT

Climate change and the forage accumulation of palisadegrass: future scenarios to São Paulo state

In 2007 the Intergovernmental Panel on Climate Change presented data showing climate changes in last decades, mainly temperature increase. This change has worried scientists about the future. Therefore, studies have been made to evaluate possible impacts of future climate changes on agricultural production. The pastures in Brazil can be especially affected, because they occupy large areas, many of them on marginal land. In São Paulo state these changes can be important for palisadegrass (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu), present in 7.19 million ha. Therefore, this research evaluated the impacts of climate change on palisadegrass yield in São Paulo state. Projections were created based on downscaled outputs of two general circulation models (PRECIS and ETA-CPTEC) considering the IPCC SRES scenarios A2 (high) and B2 (low). The data obtained from 23 weather stations from 1963 to 2009 was considered as current climate (base line) and future scenarios were determined from 2013 to 2040 and from 2043 to 2070. To associate the climate with palisadegrass growth, the following empirical model was used: $DMAR = 15.34 * DD_{adjusted}$ ($p=0.056$, $r^2=0.95$), extracted from research conducted in São Carlos-SP-Brazil, where DMAR is dry matter accumulation rate; $DD_{adjusted}$ is degree days, calculated with 17.2°C of base temperature and adjusted by one drought attenuation factor (obtained by the ratio actual/maximum soil water storage, considering three soils capacities: 40, 60 and 100 mm). Spatial interpolation was carried out using natural neighbor and kriging methods, with ArcGis 10.1 software tools. Regional analyses were realized based on the LUPA/SP census. In general, the projections showed increase on future yield potential. On soils with 40, 60 and 100 mm of storage capacity, the average annual accumulation (AAA) was, respectively, 18.4, 19.6 and 21.0 using base line data, 26.3, 27.9 and 29.8 using PRECIS output (increase about 42%) and 25.0, 26.6 and 28.7 Mg DM/ha/ano using ETA-CPTEC output (increase about 36%), considering A2 scenario in period of 2043 to 2070. The other projections show intermediate increases. Despite annual yield increase, the variation between seasons (seasonality) and years will increase. The increase in DMAR will be higher in rainy than dry season, especially in soils with low water storage capacity (40 mm) (mainly evidenced by ETA-CPTEC scenarios). For these soils, minimum and maximum DMAR (kg DM/ha/day) was respectively 15.4 (winter) and 94.6 (summer) considering base line, 22.9 (winter) and 125.1 (summer) considering PRECIS model and 18.2 (winter) and 125.9 (summer) considering ETA model, both in A2 for 2043 to 2070 scenario. The results varied a lot between regions, especially in ETA-CPTEC scenarios (extremes ranged from <+10% to >+60%). Warmer regions (west region, in general) showed higher production potential, but they will have lower relative increase in the future. These results are due to increase in temperature in all long year and decrease in water availability in winter and spring, due to higher evapotranspiration and not necessarily decrease in rain. Strategies for mitigation and adaptation were suggested, including mainly pasture and animal management to reduce effects of lower water availability, reduce greenhouse gases emissions and use of summer forage surplus.

Keywords: *Brachiaria brizantha*; Empirical model; ETA; PRECIS; Tropical grass

1 INTRODUÇÃO

Em 2007 o quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) apresentou dados que confirmam a ocorrência de mudanças climáticas nas últimas décadas, especialmente o aumento de temperatura. Essas alterações tem despertado o interesse em todo o mundo sobre possíveis mudanças futuras no clima. Neste contexto, modelos matemáticos capazes de projetar o clima no futuro em função de diferentes cenários em diversas regiões têm sido gerados (BERNSTEIN et al., 2007).

Dentre os problemas que poderão ocorrer devido às mudanças climáticas, destacam-se os efeitos nas atividades agropecuárias e a vulnerabilidade dos países em desenvolvimento. Estima-se que até 2050 cerca de 50% das áreas agrícolas da América Latina, sejam submetidas à desertificação e salinização em alguns locais, havendo expectativa de redução na produtividade de carne e leite em resposta a temperaturas crescentes, dentre outras consequências à produtividade agropecuária (MAGRIN et al., 2007).

De acordo com cenários gerados por vários modelos, estima-se que a temperatura média tenha aumento de 3,3 a 3,9°C até 2071 – 2100 na região sudeste do Brasil. Para a precipitação pluviométrica, estima-se redução no outono, inverno e primavera (de -0,06 a -0,09 mm/dia) e aumento no verão (+ 0,36 mm/dia) (HAMADA et al., 2011). Em geral, para a produção vegetal nesta região, observa-se tendência de maior disponibilidade térmica; porém maior restrição hídrica devido a maior evapotranspiração (ASSAD et al., 2004) e redução das chuvas em alguns períodos do ano. Assim, as mudanças tem grande potencial de afetar as atividades agropecuárias. A avaliação da vulnerabilidade dessas atividades, por meio da avaliação das condições atuais e do dimensionamento dos impactos das mudanças climáticas futuras sobre a agropecuária, é estratégica e permitirá a proposição de medidas de mitigação e adaptação.

Uma vez que as pastagens ocupam a maior área das atividades agrícolas do Brasil, as mudanças climáticas poderão afetar particularmente a pecuária, pois esta é fundamentalmente baseada nas pastagens, com cerca de 90% dos nutrientes requeridos pelos ruminantes obtidos diretamente por meio do pastejo (EUCLIDES et al., 2010). No período de 1996 a 2006 a área total de pastagens diminuiu de 177,7 milhões para 158,6 milhões de hectares, enquanto que no mesmo período o rebanho aumentou (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011). Esses números confirmam a importância das pastagens para o Brasil, indicam melhorias na sua utilização e apontam para uma tendência geral de redução de

área, principalmente devido à pressão pela regeneração das áreas de reserva legal e ao avanço da agricultura, para produção de alimentos, fibras e energia.

Desta forma, há indícios de que a manutenção de muitas áreas com pastagens está condicionada à incorporação de tecnologia e aumento da produtividade, visando competitividade com outras atividades de uso da terra; ou, caso contrário, o seu deslocamento para áreas marginais, onde há maiores limitações edafoclimáticas à produção. No estado de São Paulo, esta tendência é particularmente acentuada, devido à expansão da cultura da cana de açúcar. Assim, esta situação pode potencializar a vulnerabilidade das pastagens às variações climáticas, uma vez que os fatores de crescimento das plantas, em algumas regiões, poderão estar mais próximos de seus limites.

Segundo o Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do estado de São Paulo (LUPA) realizado pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento, o rebanho estadual em 2007/2008 era de 5,76 milhões de cabeças em propriedades que produzem carne, 924 mil cabeças em propriedades que produzem leite e 4,49 milhões em propriedades mistas (SÃO PAULO, 2008). Nesse levantamento, ainda é apontado que as áreas de pastagens no estado são da ordem de 8,1 milhões de hectares, o que representa 32,6% da área estadual total. As espécies do gênero *Brachiaria* (Syn. *Urochloa*), popularmente conhecidas por braquiárias, estão presentes em torno de 7,19 milhões de hectares, o equivalente a aproximadamente 89% das áreas de pastagens. Dentre elas, a cultivar Marandu (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu) é a mais utilizada (MILES et al., 2004).

Apesar da importância econômica e da expressiva área no território estadual, poucos trabalhos avaliam os riscos climáticos para as principais espécies forrageiras utilizadas no estado, e praticamente inexistem estudos dos possíveis impactos das mudanças climáticas na produção forrageira. Trabalhos de zoneamento existentes abordam apenas a fase de estabelecimento da pastagem (SANTOS; PEZZOPANE; BETTIOL, 2010) ou enfocam aspectos de aptidão edafoclimática das espécies (PEZZOPANE et al., 2012a). Adicionalmente, estudos realizados com culturas anuais não são adequados às pastagens, uma vez que nestas explora-se o desenvolvimento vegetativo, o que implica em diferenças fundamentais na determinação do risco climático à cultura quando comparada àquelas cuja produção depende da fase reprodutiva de desenvolvimento (grãos, frutos, etc.).

Para a geração de cenários futuros para pastagens, o ideal é o uso de modelos matemáticos que estimem a produtividade dos pastos, associando o crescimento das plantas à magnitude das variáveis climáticas. Neste sentido, é fundamental que estudos de zoneamento de risco climático de plantas forrageiras sejam realizados com esses modelos, associados às

projeções de mudanças climáticas futuras, visando nortear diretrizes estratégicas para o sistema produtivo e antecipar o desenvolvimento de alternativas de mitigação e adaptação de eventuais efeitos dessas mudanças.

1.1 Hipóteses científicas

- As mudanças climáticas afetarão a produção de forragem de *B. brizantha* cv. Marandu no estado de São Paulo.
- Alguns locais (região e/ou tipo de solo) do estado de São Paulo são mais vulneráveis a mudanças climáticas e tendem a sofrer maior impacto na produção de forragem de *B. brizantha* cv. Marandu.
- É possível identificar os locais mais vulneráveis e propor medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

1.2. Objetivos

- Gerar cenários futuros para a produção de forragem em pastagens de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em função de projeções de mudanças climática para o estado de São Paulo.
- Identificar as principais vulnerabilidades do sistema de produção de forragem frente às mudanças climáticas e propor alternativas para minimizar os possíveis impactos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mudanças climáticas

2.1.1 Mudanças climáticas e o IPCC

Apesar da atual preocupação da sociedade, estudos sobre mudanças climáticas não são recentes. A nota técnica nº 79 da organização mundial de meteorologia (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO, 1966) destina-se exclusivamente a esse tema (BLAIN, 2010). Segundo o quarto relatório de avaliação do IPCC (BERNSTEIN et al., 2007), o termo mudança climática refere-se a alterações nos padrões climáticos, que podem ser identificadas por alterações na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, e que persiste por longos períodos, da ordem de décadas ou mais, independentes de suas causas.

Mudanças climáticas ocorridas nas últimas décadas, somadas à probabilidade de mudanças futuras ainda mais acentuadas, tem preocupado a população mundial. A análise de dados climatológicos das últimas décadas confirma que desvios têm ocorrido no padrão normal de algumas variáveis relacionadas ao clima, especialmente a temperatura. Adicionalmente, projeções dessas mudanças têm sido geradas e os cenários futuros indicam que muitos sistemas naturais serão afetados (MAGRIN et al., 2007).

Diante dessa preocupação, em 1988 foi criado pelo Programa Ambiental da Organização das Nações Unidas (UNEP) e pela WMO, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que se constitui no principal órgão científico para avaliação deste tema, e visa fornecer ao mundo uma visão clara sobre o estado da arte das mudanças e seus potenciais impactos ambientais e socioeconômicos. O IPCC não realiza pesquisa primária, ele analisa as informações científicas geradas em todo o mundo. Desta forma, milhares de cientistas contribuem para o trabalho, sendo as revisões científicas, apresentadas na forma de relatórios, o principal mecanismo de divulgação das revisões e interpretações. O IPCC é intergovernamental por ser aberto a todos os países membros das Organizações das Nações Unidas (ONU) e da WMO (IPCC, 2013).

O IPCC tem publicado regularmente vários documentos. Os relatórios de avaliação (*Assessment Reports*) são os documentos mais completos, outros documentos incluem relatórios especiais, documentos técnicos e relatórios de metodologia. Até 2012, 5 séries de relatórios de avaliação foram emitidas, sendo o 1º em 1990, uma edição suplementar em 1992 e o 2º, 3º e 4º relatórios respectivamente nos anos de 1995, 2001 e 2007. Uma parte (Bases da

Ciência Física – Grupo de trabalho 1) do 5º relatório foi concluída em 2013 e a programação é que o restante seja concluída em 2014 (IPCC, 2013).

As avaliações, em geral, indicam que muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas. As principais ocorrências são: alterações nas geleiras por efeito de aquecimento (aumento no número de lagos, derretimento, etc.), aquecimento de lagos e rios em muitas regiões, adiantamento da primavera, alterando habitats e ciclos biológicos, aumento de algas, plâncton e peixes em oceanos situados em regiões de altas latitudes. Distúrbios na agricultura e nas florestas também têm sido verificados, como a antecipação da primavera no hemisfério norte, secas e aquecimento em áreas agrícolas da África e frequente ocorrência de graves incêndios (BERNSTEIN et al., 2007).

Na América Latina, as principais ocorrências registradas são: variabilidade do clima e ocorrência de eventos extremos, aumento médio da temperatura e elevação da taxa de elevação do nível do mar de um para 2 a 3 mm/ano. Efeitos futuros esperados incluem: desaparecimento de geleiras nos Andes, áreas semi-áridas sendo moderadamente a muito afetadas por processos de degradação, anomalias cada vez maiores das precipitações na porção tropical do continente, substituição das florestas tropicais pelo cerrado na Amazônia oriental e substituição da vegetação semi-árida por árida no nordeste do Brasil. Naturalmente, eventos predominantemente físicos (elevação do nível do mar, derretimento de geleiras, etc.) têm sido apresentados com maior confiança do que eventos predominantemente biológicos (efeitos em espécies, produção agropecuária, etc.) (MAGRIN et al., 2007).

Na média de vários modelos do IPCC para o Brasil, no cenário pessimista (A2) de emissões de gases de efeito estufa para o período de 2071 a 2100, é esperado aumento de 3,3 a 4,1°C para os meses de janeiro/fevereiro e outubro, respectivamente. A maior anomalia esperada na temperatura é na primavera e a menor no verão (HAMADA et al., 2011). Para a agropecuária brasileira, as principais mudanças esperadas são o aumento de temperatura e a redução da disponibilidade de água no solo.

Embora sejam fundamentais para fornecer informações básicas e uma tendência geral das mudanças climáticas para os diversos estudos da área, os modelos do IPCC são modelos globais e geralmente possuem resolução (centenas de quilômetros) que podem ser limitantes para estudos de impacto na agropecuária, que tem particularidades regionais que carecem de maior resolução. Assim, o uso de modelos regionais tem sido priorizado, recentemente, nesses tipos de estudos.

2.1.2 Clima no sudeste do Brasil: mudanças observadas e projeções

No estado de São Paulo, Blain (2010) avaliou séries anuais de temperatura máxima do ar e verificou que, nas localidades de Pindorama e Ubatuba, observa-se considerável elevação dos valores nos últimos anos. Por outro lado, em Cordeirópolis, Mococa, Monte Alegre do Sul e Ribeirão Preto, verificou-se estabilidade ou até mesmo queda nos períodos mais recentes. Nas localidades de Campinas e Piracicaba, nota-se marcante elevação das funções densidade de probabilidade associadas aos valores de temperatura máxima. Em Campinas, essa alteração ocorreu de forma mais intensa e temporalmente anterior à de Piracicaba. Os autores concluíram que apesar da maioria das séries apresentarem importantes variações em seus parâmetros estatísticos (variações climáticas), não foi possível estabelecer uma significância na variabilidade temporal (elevação ou queda) nas oito séries avaliadas.

Horikoshi e Fisch (2007) estudaram cenários futuros para o clima no município de Taubaté-SP e verificaram tendência, para o período de 2010 a 2099, de aumento da temperatura média do ar de 0,5 a 2,7° C, de aumento de 80 a 150 mm na precipitação média anual e de aumento do déficit de água no solo de 50 a 80 mm, devido ao aumento da evapotranspiração em maior magnitude do que o aumento na precipitação.

Em estudo com dados da região sul de Minas Gerais (Lavras-MG), foi comparada a série de dados de 1961 a 1990 com a série de 1991 a 2004, verificando aumento de 1° C na temperatura média anual (de 19,4 para 20,4° C), redução de 70 mm na precipitação (de 1530 para 1460 mm) e aumento de 57 mm na estimativa de evapotranspiração de referência (de 899 para 956 mm). Esses resultados indicam menor disponibilidade de água no solo para as plantas (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

Projeções futuras são realizadas por modelos matemáticos que tentam descrever os processos determinantes do clima. Obviamente, projeções possuem incertezas, principalmente aquelas relacionadas à representação imperfeita do clima pelos modelos, da trajetória futura das emissões de gases de efeito estufa, e dos reais efeitos do aumento de CO₂ nas plantas e as interações com a atmosfera (MARENGO, 2006; NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2008). Essas incertezas fazem com que as projeções de algumas variáveis (p.ex. temperatura), sejam mais confiáveis do que outras (p. ex. precipitação pluviométrica) (HAMADA et al., 2011). Apesar das mudanças climáticas poderem ter origem natural, antropogênica ou a soma das duas, é muito provável (acima de 90%) que a causa predominante seja a emissão antropogênica de gases de efeito estufa (BERNSTEIN et al., 2007).

No 4° relatório de avaliação do IPCC vários modelos climáticos globais são apresentados. Alguns dos modelos com projeções para a América do Sul que já foram

aplicados em pesquisas agropecuárias no Brasil são o BCCR-BCM2.0, CGCM3.1.T47, CNRM-CM3, CSIRO-Mk3.0, ECHO-G, GFDL-CM2.0, GISS-ER, UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1, INM-CM3.0, MIROC3.2.medres, ECHAM5, MRI-CGCM2.3.2, CCSM3 e PCM. Na média dos resultados desses modelos, em um cenário pessimista, há aumento de 3,2 a 4,0°C na temperatura média e variação na precipitação de -0,16 a +0,47 mm/dia entre os meses do ano na região Sudeste do Brasil até o final do século XXI (Tabela 1) (HAMADA et al., 2011).

Tabela 1 – Anomalia esperada nas médias de diferentes modelos do IPCC para a temperatura e precipitação média no cenário A2 de emissões de gases de efeito estufa na região sudeste do Brasil nos anos de 2071 a 2100

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura (°C)	+3,2	+3,2	+3,3	+3,5	+3,6	+3,6	+3,6	+3,8	+3,9	+4,0	+3,8	+3,4
Precip. (mm/dia)	+0,33	+0,47	+0,04	-0,12	-0,09	-0,10	-0,08	-0,07	-0,16	-0,14	+0,07	+0,29

Fonte: Centro de distribuição de dados IPCC (<http://www.ipcc-data.org/>), processados por Hamada et al. (2011).

Nota: Precip.=Precipitação.

Em geral, há variação nas projeções entre modelos, regiões e período do ano (HAMADA et al., 2008). Maiores diferenças têm sido observadas entre modelos do que entre cenários dentro de um mesmo modelo, sendo as maiores fontes de incerteza devido às diferenças de abordagem dos processos em cada modelo (NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2008). Assim, estudos relacionados à produção agropecuária com mudanças climáticas devem ser baseados em análises dos potenciais efeitos na produção vegetal, realizadas considerando-se mais de um modelo e mais de um cenário, visando estimar o viés existente e possibilitando o devido tratamento de incertezas.

2.2 Modelos climáticos regionais PRECIS e ETA-CPTEC

Em nível mundial, a avaliação das possíveis mudanças climáticas futuras tem sido realizada com uso de modelos climáticos globais, que são elaborados, testados e aplicados em diferentes projetos científicos. Esses modelos descrevem importantes elementos físicos e processos na atmosfera, oceano e superfície da terra que compõem o sistema climático (JONES et al., 2004).

Apesar do aumento do poder computacional, que tem permitido simulações em maior resolução espacial, os modelos globais de Circulação Geral Oceano-Atmosfera ainda rodam em grade de 100 a 300 km. Assim, a geração de cenários regionais em menor escala não é adequada nestes modelos, visto que tem limitações para representação da topografia, uso do

solo e distribuição de terra e mar. Desta forma, modelos climáticos regionais são ferramentas promissoras para representar os processos em maior detalhe e, portanto, fundamentais em estudos de impacto-vulnerabilidade-adaptação. Assim, esforços têm sido feitos para a geração e aplicação desses modelos (MARENGO et al., 2010), que é uma das principais técnicas de regionalização (“downscaling”) (AMBRIZZI et al., 2007).

Modelos climáticos regionais cobrem uma limitada área do globo, tipicamente 5000 x 5000 km com resolução de 50 x 50 km. São baseados em processos físicos representados por equações matemáticas que são resolvidas utilizando um grid tridimensional. Uma vez que possuem área limitada, os modelos regionais precisam ser “aninhados” em condições de contorno que são dependentes do tempo (por exemplo, vento, temperatura, pressão de superfície). Estas condições geralmente são fornecidas por integrações de modelos globais (JONES et al. 2004). Assim, é importante ressaltar que a técnica de regionalização (“downscaling”) contém erros derivados do modelo global utilizado, e ainda que isto não seja um erro na regionalização, precisa ser levado em conta. Técnicas diferentes de regionalização podem produzir diferentes previsões locais ainda que todas fossem forçadas pelo mesmo modelo global, e diferentes modelos regionais podem fornecer diferentes projeções climáticas (AMBRIZZI et al., 2007). Dentre os vários modelos regionais desenvolvidos, o PRECIS e ETA têm sido utilizados com frequência em trabalhos recentes na América do Sul (AMBRIZZI et al., 2007; ALVES; MARENGO, 2010; CARVALHO; ASSAD; PINTO, 2011; CANZIANI; BENITEZ, 2012; CHOU et al., 2012; MARENGO et al., 2009, 2010, 2012).

O PRECIS (*Providing Regional Climate for Impacts Studies*) é um sistema de modelagem climática regional portátil, que pode ser executado em um computador pessoal e aplicado em qualquer área do globo para gerar cenários de mudanças climáticas detalhadas. Este sistema foi desenvolvido pelo Centro britânico Hadley (*Met Office Hadley Centre*), um dos mais importantes centros de pesquisas de mudanças climáticas do mundo. O modelo regional que faz parte do PRECIS é o HadRM3P, que é baseado no modelo global HadAM3P, com resolução de 50 ou 25 km com 19 níveis na atmosfera (partindo da superfície até 30 km na estratosfera) e 4 níveis no solo (JONES et al., 2004). As principais variáveis das condições de contorno para executar o HadRM3P são campos de pressão na superfície e as componentes horizontais de temperatura, vento e umidade em toda a estrutura vertical da atmosfera. Para fins de mudança climática, o modelo usa também uma representação do ciclo de sulfato e de alguns outros aerossóis (AMBRIZZI et al., 2007).

Embora flexível e relativamente fácil de usar, alguns fatores devem ser considerados na aplicação do PRECIS: *i)* a nível local é importante verificar com dados observados se as projeções do modelo são realistas; *ii)* além do sistema computacional básico, deve-se ter fonte de energia segura e capacidade de manutenção do sistema em funcionamento e; *iii)* a execução do modelo e interpretação e divulgação dos resultados exigem tempo de pessoas com experiência relevante, embora atividades e materiais de treinamento do Centro Hadley sejam disponíveis e úteis (JONES et al., 2004).

O modelo ETA é um modelo atmosférico utilizado para fins operacionais e de pesquisa. O nome é derivado da letra grega “ η (eta)” que representa a coordenada vertical, calculada com base na pressão atmosférica (ETA MODEL, 2013), uma das características do modelo que é particularmente adequada para regiões de montanha, como a cordilheira dos Andes (CHOU et al., 2012). O modelo original foi desenvolvido pelo NCEP (*Nacional Centers for Environmental Prediction*) para estudos e previsão do tempo de curto prazo. Uma descrição completa do mesmo é apresentada por Black (1994); Janjic (1994) e Mesinger et al. (1988).

A versão climática do modelo ETA, que permite integrações para períodos de qualquer duração, têm sido desenvolvidos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC) (PISNICHENKO et al. 2006). O modelo denominado INPE ETA CCS (ETA for *Climate Change Simulations*) é uma versão do modelo ETA preparada por Pisnichenko e Tarasova (2010) para simulação de mudanças climáticas de longo prazo. Neste modelo, múltiplas modificações no modelo ETA original foram feitas, tais como novos programas para converter os dados de saída do modelo global HadAM3P para o formato do modelo ETA, novos programas de reinicialização, de atualização da temperatura na superfície do mar, ângulo de elevação do sol, etc. (MARENGO et al., 2010; PISNICHENKO; TARASOVA, 2010).

No trabalho de Pisnichenko e Tarasova (2010), assim como no modelo PRECIS, o INPE ETA CCS foi “aninhado” nas condições de contorno do modelo global HadAM3P. Dados como concentração de gases de efeito estufa e aerossóis foram obtidos para cada 6 horas e temperatura na superfície e gelo do mar para cada 15 dias. Interpolação linear foi realizada para os dados intermediários a esse período. As simulações foram realizadas para a América do Sul e oceano adjacente (latitude de 55° S a 16° N e longitude de 89° W a 29° W), com um grid de 37 km e 38 níveis verticais. Os autores demonstram que não houve desvios significativos entre o modelo regional INPE ETA CCS desenvolvido e o modelo global HadAM3P, indicando que o modelo regional pode ser utilizado para aumentar a resolução do modelo global.

Avançando na melhoria do então chamado INPE ETA CCS, que era executado com apenas uma condição de contorno, Chou et al. (2012) executou o modelo com 4 projeções do modelo HadCM3 para as condições de contorno, a fim de adicionar algum grau de incerteza nas simulações, obtendo uma resposta combinada destas projeções e passando então a chamar o modelo, nesta nova configuração, de ETA-CPTEC (como chamado neste trabalho).

O projeto brasileiro CREAS (Cenários Regionalizados de Clima Futuro da América do Sul) teve como objetivo melhorar a resolução dos cenários de mudanças climáticas na América do Sul. Ele seguiu a estratégia do projeto europeu PRUDENCE (*Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change: risks and Effects*) e comparou três modelos regionais aninhados na versão pública do modelo global HadAM3P do Centro Hadley: INPE ETA CCS, RegCM3 e o HadRM3P nos cenários de baixa (B2) e alta emissão (A2) do IPCC para o período de 2071 a 2100. Foi verificado no CREAS um consistente padrão entre mudanças futuras na temperatura e precipitação pluviométrica, que são mais acentuadas no cenário A2. Uma integrada imagem dos modelos apresenta: aumento geral de temperatura, especialmente na região tropical (5°N a 15°S) e no inverno; anomalia de 2 a 4°C no verão e de 3 a 5° no inverno no sudeste da América do Sul; redução de chuva no Nordeste e na parte mais ao leste da Amazônia no Brasil e aumento no Noroeste do Peru, Equador e Nordeste da Argentina. Os resultados são menos robustos para o centro-oeste e sudeste do Brasil do que para o leste da Amazônia e nordeste do Brasil e da Argentina (MARENGO et al., 2010).

2.3 Aptidão de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu

A espécie *Brachiaria brizantha* inclui cultivares de ampla distribuição nas regiões tropicais e subtropicais úmidas e sub-úmidas, presentes em regiões de latitudes de 12 a 25°, altitudes de 80 a 2000 m, sob precipitação anual de 590 a 3500 mm e de 0 a 7 meses sem chuva por ano (KELLER-GREIN; MAASS; HANSON, 1996; VALLE et al., 2010). A *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi lançada em 1984 pela Embrapa (unidades Gado de Corte e Cerrados). A introdução foi realizada inicialmente na região de Ibirarema-SP, sendo a origem genética o germoplasma proveniente da Estação de Investigação em Pastagens do Zimbábue, em Marandella (atualmente Marondera) (DETOMINI, 2008), região da África na faixa do paralelo 18° e altitudes superiores a 1000 m.

Essa gramínea é recomendada para a maioria das condições de pastagens brasileiras. Seu nível de precipitação ótimo é de 1500 a 3500 mm/ano (COOK et al., 2005), no entanto, tem bom desenvolvimento com precipitação próxima a 1.000 mm/ano (PIRES, 2006) e é

encontrada em muitas regiões brasileiras com precipitação da ordem de 700 mm/ano com 3 a 6 meses de estiagem (SANTOS et al., 2011). A temperatura ótima para o seu desenvolvimento está entre 30 e 35° C, tendo temperatura-base inferior, de acordo com estudos de campo realizados no estado de São Paulo, de 15 a 18,6°C (CRUZ et al., 2011; LARA, 2007; MENDONÇA; RACINI, 2006; RODRIGUES, 2004).

Por ser tipicamente uma gramínea tropical (metabolismo C4), essa espécie apresenta maior tolerância a altas e menor tolerância a baixas temperaturas do que gramíneas temperadas (metabolismo C3). Em geral, a faixa ótima para a fotossíntese é ligeiramente superior à faixa ótima para o crescimento (LUDLOW, 1980). Ludlow e Wilson (1971) em trabalho com seis gramíneas tropicais registraram temperatura ótima média para o processo fotossintético de 38°C. Outros autores também tem citado que a atividade fotossintética máxima de plantas C4 está por volta de maiores temperaturas, de 35 a 40° C (MACADAM; NELSON, 2003).

A real temperatura máxima suportada por espécies tropicais não é bem conhecida, pois poucos estudos foram conduzidos sob temperaturas muito altas (MOORE; BOOTE; SANDERSON, 2004). Alguns autores, no entanto, citam que as temperaturas máximas toleradas pelas gramíneas tropicais estão em torno de 55-60°C para o processo fotossintético e 40-50°C para o crescimento (LUDLOW, 1980). Outros autores, no entanto, citam que temperaturas superiores a 50°C já são prejudiciais a vários processos ou mesmo capazes de matar as plantas (CARROLL, 1941; DETOMINI, 2008; EDWARDS; KU; MONSON, 1985).

Apesar das variações, observa-se com segurança que o valor máximo tolerado por gramíneas tropicais é bastante elevado, sendo possível inferir que a elevação da temperatura pelas mudanças climáticas provavelmente não trará efeito negativo na produção no estado de São Paulo, uma vez que a maior temperatura média projetada para a região sudeste será de 27,7°C em fevereiro; e as temperaturas máximas, mesmo nos períodos mais quentes, serão inferiores a 38°C (HAMADA et al., 2011). Obviamente outros fatores, principalmente os relacionados à demanda hídrica, tem grande potencial de afetar a produção. Em relação à temperatura mínima, espera-se efeito positivo na produção.

2.4 Modelagem do crescimento de plantas forrageiras

Modelos agrícolas integram conhecimentos multidisciplinares, como física e química do solo, fisiologia e melhoramento vegetal, agrometeorologia e manejo, dentro de equações matemáticas utilizadas para prever crescimento, desenvolvimento e produção (HOOGENBOOM, 2000). Assim, auxiliam na organização, interpretação e aplicação do

conhecimento científico atual, sugerindo prioridades na pesquisa pela identificação de lacunas no conhecimento e estímulo de novas ideias.

A modelagem tem sido uma ferramenta eficaz na simulação do crescimento de plantas com significativos avanços nos últimos anos, principalmente devido ao aumento da demanda por previsões de safras, estudos sobre mudanças climáticas e avanços da informática (DOURADO-NETO et al., 1998a). Os usuários de modelos acompanharam essa evolução e estão crescendo em número e grau de sofisticação (GRABLE, 1987). No entanto, cuidados devem ser tomados, principalmente em relação às limitações intrínsecas de cada modelo, como validação para cada cultura e região, confiabilidade dos resultados e qualidade dos dados. Em geral, a maior limitação na geração e uso dos modelos é o histórico disponível do sistema a ser simulado e a disponibilidade de dados de entrada (HOOGENBOOM, 2000).

Modelos variam de muito simples, com apenas uma equação linear, à extremamente complexos, com milhares de equações (HOOGENBOOM, 2000). Podem ter várias classificações: estáticos ou dinâmicos, discretos ou contínuos, determinísticos ou estocásticos e mecanísticos ou empíricos. Modelos dinâmicos tem o tempo como variável, enquanto que os estáticos não. Tanto os discretos quanto os contínuos são dinâmicos, no contínuo, porém, o tempo é um valor real (exemplo 2,24 h), enquanto que no discreto o tempo é identificado por valores inteiros (exemplo 2 h). Estocásticos contêm algum elemento de aleatoriedade ou distribuição de probabilidade dentro do modelo, enquanto que determinísticos não (TEH, 2006). Modelos de interesse para predição da produção de MS de plantas geralmente são determinísticos dinâmicos: buscam representar como um sistema responde ao longo do tempo, sem nenhuma distribuição de probabilidade associada (THORNLEY; JOHNSON, 1990), podendo ser mecanicistas ou empíricos e serão os modelos alvos desta revisão.

Os modelos mecanicistas consideram os conhecimentos dos processos físicos, químicos e biológicos que governam os fenômenos em estudo (TEH, 2006), permitindo entendimento e provável extrapolação das condições em que foram gerados. No entanto, são necessárias mais informações para a sua geração e utilização, por isso, são mais utilizados na pesquisa. Por outro lado, os modelos empíricos são também chamados de correlativos ou estatísticos, são simples de serem gerados e de fácil aplicação, no entanto, estão sujeitos a maiores erros e são limitados à faixa de condições em que foram gerados (DOURADO-NETO et al., 1998b). São elaborados buscando a correlação entre produção ou crescimento de plantas com uma ou mais variáveis; como temperatura, radiação, disponibilidade hídrica e de nutrientes, especialmente o nitrogênio. Atualmente, são os mais estudados nas condições tropicais (CRUZ et al., 2011;

TONATO et al., 2010). Obviamente, a escolha do tipo de modelo a ser utilizado dependerá dos objetivos da previsão e disponibilidade de informações.

2.4.1 Modelos empíricos

A análise de regressão é a técnica mais comum de gerar modelos matemáticos empíricos. Regressão visando gerar equações capazes de estimar a produção de plantas (variável dependente) em função de fatores relacionados (variáveis independentes), principalmente variáveis meteorológicas (HOOGENBOOM, 2000) são as mais comuns. As principais variáveis utilizadas na geração de modelos para forrageiras são as temperaturas do ar (máxima – $T_{máx}$, média – $T_{méd}$ e mínima – $T_{mín}$), radiação solar global (R_g), fotoperíodo (N) e disponibilidade de água no solo. Frequentemente outras variáveis são calculadas visando melhorar a capacidade preditiva, principalmente os (i) Graus-Dia (GD) (OMETTO, 1981), que relaciona a temperatura ocorrida a uma temperatura-base (inferior ou superior) para crescimento de plantas; (ii) Unidades Fototérmicas (UF) (VILLA NOVA; CARRETERO; SCADUA, 1983), que considera os GD e fotoperíodo; e (iii) o Índice Climático de Crescimento (ICC) (FITZPATRICK; NIX, 1973), que leva em consideração a R_g , um índice térmico de crescimento da planta e um fator de penalização hídrico, geralmente a relação da evapotranspiração real (ETR) e a potencial (ETP).

A regressão linear da produção em função da temperatura do ar tem sido muito utilizada, pela facilidade de aplicação e relação da temperatura com a radiação fotossinteticamente ativa (ASSIS et al., 2006). Em trabalhos com plantas do gênero *Brachiaria* (Syn. *Urochloa*), *Panicum* e *Cynodon*, bons resultados têm sido obtidos, especialmente com a temperatura mínima (CRUZ et al., 2011; TONATO et al., 2010).

É possível determinar a temperatura-base inferior com rigor em câmaras de crescimento, isolado de outros fatores. Porém, trabalhos recentes tem estimado a temperatura base em campo, através da regressão entre o acúmulo de forragem e a temperatura média do ar, considerando como temperatura base inferior aquela em que o acúmulo é nulo como ($y = \alpha + \beta x$, em que $y = 0$) (ARAUJO, 2011; CRUZ et al., 2011; LARA, 2007; RODRIGUES, 2004). Apesar de haver controvérsias quanto à interpretação desse resultado, devido à extrapolação do conjunto de dados, os valores estimados têm apresentado consistentes resultados quando aplicados em campo. Além disso, essa é uma alternativa para estas condições, e já representa um avanço quando comparado ao uso de um valor generalizado (15°C) e frequentemente citado como T_{bi} para plantas forrageiras tropicais (COOPER; TAINTON, 1968; MOORE; BOOTE; SANDERSON, 2004).

O fato é que o valor exato não é conhecido, e o uso de valores com pequenos desvios na modelagem do crescimento pode proporcionar grandes erros nas estimativas de produção. Assim, é importante que na aplicação dos modelos sempre se considere a temperatura base utilizada ou estimada pelo autor do modelo, pois apesar de ser considerada fixa para cada espécie, variações têm sido observadas entre trabalhos (Tabela 2).

Tabela 2 – Temperatura-base inferior para diferentes gramíneas tropicais e subtropicais determinadas em condições de campo no Brasil

Gramínea	Tbi (°C)	Referência
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	17,2	Cruz et al. (2011)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	18,6	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	16,3	Lara (2007)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	15,0	Mendonça e Racini (2006)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Arapoty	17,8	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Capiporã	18,3	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés	19,0	Rodrigues (2004)
<i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk	16,7	Mendonça e Racini (2006)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Napier	13,9	Mendonça e Racini (2006)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Napier	15,0	Villa Nova et al. (2007)
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	15,6	Araujo et al. (2013)
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	15,0	Mendonça e Racini (2006)
<i>Paspalum atratum</i> cv. Pojuca	15,6	Mendonça e Racini (2006)
<i>Cynodon nlemfuensis</i> cv. Florico	11,5	Villa Nova et al. (2007)

O desenvolvimento de modelos empíricos para forrageiras tropicais tem sido realizado com frequência na comunidade científica e muitas equações com boa capacidade preditiva estão disponíveis. No entanto, uma vez que a aplicação destes modelos se limita as condições em que foram gerados, a modelagem para a diversidade de condições ainda é limitada, pois a maioria foi desenvolvida a partir de experimentos pontuais e concentrados em poucos locais, principalmente no sudeste dos Estados Unidos e do Brasil. Além disso, interações entre fatores (temperatura, luz, água, nitrogênio, etc.) utilizados como preditores do acúmulo de forragem podem limitar ainda mais, visto que a condição de simulação (adubação, clima, etc.) deve ser semelhante àquela que o modelo foi obtido.

Um dos trabalhos pioneiros foi o de Fitzpatrick e Nix (1973), que desenvolveram na Austrália, há quatro décadas, o ICC. Posteriormente esse índice foi utilizado no Sul do Brasil (MOTA; BERNY; MOTA, 1981) e, mais adiante, Pedro Jr. (1995) estimou o ICC para 47 localidades do estado de São Paulo e regiões limítrofes. O autor comparou o ICC com dados de taxa de acúmulo de forragem coletados em Nova Odessa para os capins colômbio (*P. maximum*), gordura (*Melinis minutiflora*), jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) e pangola (*Digitaria*

pentzii). As curvas que melhor se ajustaram aos dados foram exponenciais e os coeficientes de determinação variaram de 0,58 a 0,81 para os capins gordura e colônia, respectivamente.

Em 1984, um modelo de simulação do crescimento de forrageiras em função da umidade no solo, radiação, temperatura, fertilização com fósforo e biomassa aérea fotossintetizante, foi desenvolvido em Campo Grande/MS, na Embrapa Gado de Corte (GENEVILLE, 1984). Os autores verificaram que a disponibilidade de água e biomassa residual apresentou o maior efeito. Em trabalho recente, semelhantemente, a biomassa residual verde também apresentou efeito significativo no acúmulo de forragem, especialmente no início da rebrotação, quando a correlação com o acúmulo de forragem foi superior ao efeito da temperatura média do ar acumulada (ARAÚJO, 2011).

Overman; Angley e Wilkinson (1988) e Overman et al. (1990) sugeriram e avaliaram modelos considerando o componente disponibilidade de nitrogênio para o capim-bermuda *Cynodon dactylon* a partir de dados obtidos no sudeste dos EUA. Overman et al. (1990) ajustaram a equação: $y = A / (1 + e^{b-cN})$, em que y é o rendimento anual de matéria seca estimada (Mg ha^{-1}); N é o nitrogênio aplicado (Mg ha^{-1}); A é rendimento anual máximo (Mg ha^{-1}); b é o intercepto com o eixo y e c é o coeficiente de resposta (ha kg^{-1}). Os parâmetros A , b e c são estimados por experimentação.

A produção de forragem ao longo da rebrota do capim-elefante em função das UF foi estimada pela equação: $P = 1,261 / (1 + e^{2,85 - 0,008133 \times UF})$ por Villa Nova et al. (1999) em Piracicaba/SP, em que P é a quantidade de massa seca produzida e UF são as unidade fototérmicas acumuladas no período considerado.

Em outro estudo, modelos lineares foram gerados para simular a produção das forrageiras *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Cynodon* sp. cv. Tifton 85 e *Panicum maximum* cv. Tanzânia em função do ICC em Itapetinga/BA (SANTOS et al., 2008). Os autores concluíram que o ICC foi uma boa variável para ser usada em simulações de produção de matéria seca de forrageiras.

Em Uberaba/MG a produção de matéria seca anual das forrageiras *B. decumbens* cv. Basilisk, *B. brizantha* cv. Marandu, *B. brizantha* cv. Xaraés, *P. maximum* cv. Mombaça, *P. maximum* cv. Tanzânia e *Cynodon* sp. Tifton-85 foi correlacionada com a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel. As equações geradas para todas as forrageiras apresentaram coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,97 (SILVA JR. et al., 2010). Apesar dos altos coeficientes, a aplicação dos modelos tem como limitação a obtenção da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em condições de campo, pois é uma

variável que requer equipamentos específicos e, geralmente, é quantificada apenas em áreas experimentais.

Abordagem interessante foi realizada por Tonato et al. (2010) para a geração de modelos empíricos utilizando variáveis meteorológicas. Os autores compilaram dados de cinco experimentos independentes, sendo quatro realizados em Piracicaba/SP e um em Planaltina/DF e avaliaram a capacidade das variáveis $T_{mín}$, $T_{máx}$, $T_{méd}$ e R_g em prever a taxa de acúmulo de forragem ($kg\ ha^{-1}\ dia^{-1}$) de diferentes forrageiras dos gêneros *Brachiaria*, *Panicum* e *Cynodon*. Os autores constataram que a $T_{mín}$ foi a variável que apresentou a melhor capacidade preditiva.

Mais recentemente, Almeida et al. (2011) associou as UF a adubação nitrogenada e disponibilidade hídrica para simular o crescimento do capim-tanzânia (*P. maximum*). Esse tipo de abordagem proporciona resultados sensíveis as condições, com diferentes níveis de adubação e presença ou ausência de irrigação para cada região, ampliando assim, a aplicabilidade desse tipo de modelo nos sistemas produtivos. A grande limitação desse trabalho foi a utilização apenas de dados coletados em casa de vegetação em Piracicaba/SP. Assim, é necessária a calibração com experimentos de campo nos locais em que o modelo venha a ser utilizado.

Cruz et al. (2011) avaliaram diversas variáveis meteorológicas ($T_{mín}$, $T_{máx}$, $T_{méd}$, R_g , GD, ICC, UF e ETR) corrigidas ou não a um fator de penalização hídrico (ETR/ETP) na predição de produção de massa seca de *B. brizantha* cv. Marandu com dados obtidos em São Carlos/SP. Os autores verificaram que os melhores resultados foram observados com a regressão linear multivariada (com $T_{mín}$, R_g e ETR) e com a regressão univariada com GD corrigido, $T_{mín}$ corrigida ou ICC. A inclusão do fator hídrico no modelo melhorou a capacidade preditiva da variável. Esta abordagem é particularmente interessante na aplicação dos modelos em condições não irrigadas.

Em condições experimentais semelhantes às de Cruz et al. (2011), Pezzopane et al. (2012b) avaliaram as variáveis $T_{mín}$, $T_{méd}$, ETP, ETR, ICC e GD, esta última corrigida ou não por dois fatores de penalização hídrico, para a estimativa da produção do capim Tanzânia. Os fatores foram dados pela relação ETR/ETP ou relação armazenamento atual/máximo do solo, considerando o balanço hídrico sequencial (escala de cinco dias) e capacidade de armazenamento de 100 mm. As variáveis com melhores ajustes foram as que associaram temperatura e disponibilidade hídrica simultaneamente, como a ETR, GD corrigido pelos dois fatores e o ICC.

Modelos recentes com boa capacidade preditiva da produção de forrageiras geradas por Araujo et al. (2013); Cruz et al. (2011); Pezzopane et al. (2012b); Rodrigues (2004) e Tonato et al. (2010) estão sumarizados na Tabela 3. A temperatura média dos experimentos que geraram a base de dados destes modelos situou-se entre 16 e 26°C, aproximadamente. Os modelos variam entre espécies e cultivares, no entanto, alguns modelos foram agrupados para forrageiras com respostas semelhantes. Em geral os modelos gerados são lineares univariados, sendo, portanto, simples e de fácil aplicação. Os ajustes têm variado desde coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 0,40 até 0,87, a depender do genótipo e da variável utilizada.

Tabela 3 – Modelos empíricos lineares univariados correlacionando produção de matéria seca com temperatura ou variáveis relacionadas

Gramínea	Variável	Coefficiente angular	Intercepto	R^2	Referência
<i>B. brizanta</i> cv. Marandu	Tmín	11,93	-134,95	0,73	Cruz et al. (2011)
<i>B. brizanta</i> cv. Marandu	Tmín _{corr}	5,78	-17,24	0,75	Cruz et al. (2011)
<i>B. brizanta</i> cv. Marandu	GD _{corr} [*]	12,9	6,52	0,75	Cruz et al. (2011)
<i>Brachiaria</i> Grupo 1 [§]	Tmín	8,19	-94,92	0,55 a 0,5	Tonato et al. (2010)
<i>Brachiaria</i> Grupo 2 [¶]	Tmín	10,66	-128,07	0,55 a 0,6	Tonato et al. (2010)
<i>Cynodon</i> Grupo 1 [†]	Tmín	9,06	-84,69	0,6 a 0,7	Tonato et al. (2010)
<i>Cynodon</i> Grupo 2 ^{§§}	Tmín	7,97	-67,01	0,6 a 0,7	Tonato et al. (2010)
<i>Panicum</i> Grupo 1 ^{¶¶}	Tmín	6,36	-55,22	<0,4	Tonato et al. (2010)
<i>Panicum</i> Grupo 2 ^{††}	Tmín	5,93	-29,15	<0,4	Tonato et al. (2010)
<i>B. brizanta</i> cv. Marandu	Tmín	0,98	-11,92	0,59	Rodrigues (2004)
<i>B. brizanta</i> cv. Arapoty	Tmín	0,95	-10,30	0,64	Rodrigues (2004)
<i>B. brizanta</i> cv. Capiorã	Tmín	1,10	-13,23	0,83	Rodrigues (2004)
<i>B. brizanta</i> cv. Xaraés	Tmín	1,09	-13,55	0,74	Rodrigues (2004)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣUF	0,226	600,01	0,86	Araujo et al. (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣICC	368,14	-311,94	0,83	Araujo et al. (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Mombaça	ΣGD	11,52	-304,8	0,78	Araujo et al. (2013)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	ETR	34,73	-21,58	0,87	Pezzopane et al. (2012b)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	GD _{corr} [*]	18,80	-17,02	0,84	Pezzopane et al. (2012b)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	GD _{corr} ^{**}	18,90	-6,38	0,87	Pezzopane et al. (2012b)
<i>P. maximum</i> cv. Tanzânia	ICC	330,09	-12,88	0,84	Pezzopane et al. (2012b)

[§]Marandu, Basilisk e Arapoty; [¶]Capiorã e Xaraés; [†]Tifton 85 e Estrela; ^{§§}Coastcross, Florico e Florona; ^{¶¶}Atlas e Mombaça; ^{††}Tanzânia e Tobiata; Tmín_{corr}=Temperatura mínima corrigida por um fator de penalização hídrica; GD_{corr}=Graus-dia (calculado com base na Tbi) corrigido por um fator de penalização hídrico: ^{*}pela relação ETR/ETP e ^{**}pela relação Armazenamento atual/máxima do solo; ICC=índice climático de crescimento diário; ΣUF=soma de unidades fototérmicas diária; ΣICC=soma do ICC; ΣGD=soma dos graus-dia. Obs.: i) A variável resposta (y) é a taxa de acúmulo de forragem (kg MS/ha/dia), exceto para os modelos de Araujo (2011), que foram gerados com as somas diárias de todo o ciclo, assim a variável resposta (y) é a massa de forragem total em cada ciclo. ii) Os valores de temperatura são dados em graus celsius (°C). iii) Os dados de Rodrigues (2004) estão transformados pela raiz quadrada.

Observa-se que alguns modelos gerados apresentam boa capacidade preditiva (altos coeficientes de determinação) e são de fácil aplicação, pois as variáveis de entrada, especialmente temperatura, em geral são obtidas em quase todas as regiões tropicais. A maior limitação desses trabalhos é sua concentração geográfica, especialmente no sudeste do Brasil

e dos Estados Unidos. A restrição geográfica limita a faixa de condições climáticas e o uso desses modelos em outras regiões, que tem características que extrapolam a amplitude dos dados utilizados na geração dos modelos.

2.4.2 Modelos mecanicistas

Vários modelos mecanicistas já foram desenvolvidos ou adaptados para forrageiras em diversas regiões do mundo. Porém, a maioria possui base do conhecimento oriunda de culturas agrícolas e foram avaliados e, ou, estão disponíveis apenas para forrageiras temperadas. Por simularem o crescimento com base nos processos que ocorrem nas plantas, no entanto, modelos mecanicistas permitem extrapolação do uso, com as devidas adaptações, a condições diferentes daquelas em que foram gerados. Isso justifica as adaptações recentes de modelos originalmente desenvolvidos para culturas agrícolas ou forrageiras temperadas nos EUA e Austrália, por exemplo, estarem sendo parametrizados para forrageiras tropicais no Brasil (ARAUJO et al., 2013; LARA et al., 2012; PEDREIRA et al., 2011).

Geralmente, esses modelos agrupam centenas de equações, assim, são manipulados em *softwares* específicos. A geração de um modelo mecanicista envolve a aquisição de conhecimento acerca do sistema a ser simulado, a organização e interpretação do conhecimento, e a validação do modelo com dados experimentais. Um modelo será tão bom quanto o conhecimento disponível do sistema (DOURADO-NETO et al., 1998b).

Uma avaliação abrangente dos modelos já disponíveis à quase três décadas para forrageiras é encontrada no trabalho de Hanson; Parton e Innis (1985), que avaliaram os modelos AFRICA; BLUE GRAMA; ELM; LINEAR; RANGES; ROOTS; SHEEP; SAGE e SPUR. Recentemente, Kiniry et al. (2007) desenvolveram parâmetros em campo para viabilizar o uso do modelo ALMANAC (*Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria*) em simulações do crescimento e produção das forrageiras tropicais capim-bermuda (*C. dactylon*), capim-paspalum (*Pensacola bahiagrass*) e outras nativas tropicais de comum ocorrência do estado do Texas (EUA). Os autores ajustaram os parâmetros Índice de Área Foliar (IAF), Coeficiente de extinção luminosa (K_e) e Eficiência de Uso da Radiação (EUR). O máximo IAF dos capins-bermuda e paspalum obtido foi próximo de 2,2; valores médios para K_e variaram de 0,7 a 2,1 e a EUR obtida de quatro das cinco espécies avaliadas ficaram entre 1 e 2 g MJ⁻¹. Os autores concluíram que o modelo simulou razoavelmente a biomassa média das forrageiras e é uma ferramenta útil para simular os efeitos de solo e clima das espécies e locais avaliados.

Os modelos CROPGRO, GRAZPLAN e APSIM foram recentemente adaptados para simulações do crescimento de forrageiras tropicais no Brasil (ARAUJO et al., 2013; CRUZ, 2010; LARA et al., 2012; PEDREIRA et al., 2011). O CROPGRO prediz a dinâmica de crescimento e composição de culturas baseado nos dados de entrada dos processos fisiológicos da planta, características do solo, manejo e clima (BOOTE et al., 1998). Está presente na ferramenta computacional DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), que possui modelos para simulação do crescimento de 28 culturas na versão 4.5. (DSSAT, 2013).

A partir do modelo geral do CROPGRO, adaptações já foram realizadas para simular o crescimento de *Paspalum notatum* dentro de um sistema de rotação com amendoim na Flórida, USA (KELLY, 1995); para simular o crescimento de *Brachiaria decumbens* em regiões de baixa latitude da Colômbia (GIRALDO et al., 1998) e um código para forrageiras perenes (CROPGRO *Perennial Forage model*) foi desenvolvido por Rymph et al. (2004) na Flórida, USA, que representa melhor a partição de carbono e nitrogênio em sistemas de pastejo rotativo (PEDREIRA et al., 2011).

No Brasil, calibrações do modelo CROPGRO *Perennial Forage model* para *B. brizantha* cv. Xaraés foram realizadas por Pedreira et al. (2011), para *B. brizantha* cv. Marandu por Cruz (2010) e para *P. maximum* cv. Tanzânia por Lara et al. (2012). Lara et al. (2012) e Pedreira et al. (2011) utilizaram dados coletados em Piracicaba/SP para as adaptações e constataram que os modelos foram efetivos para integrar o conhecimento sobre as forrageiras, e podem ser usados para simular o crescimento com acurácia aceitável. Cruz (2010) utilizou dados coletados em São Carlos/SP e sugeriu novas adaptações no modelo. As adaptações sugeridas por Cruz (2010) demonstram a dificuldade de utilização do modelo sem o suporte da equipe de desenvolvedores, diferente do que ocorreu com Lara et al (2012) e Pedreira et al (2011), os quais realizaram os ajustes nos códigos, pois realizaram o trabalho com a equipe da Universidade da Flórida.

O GRAZPLAN foi desenvolvido para auxiliar o processo de tomada de decisão em pastagens temperadas da Austrália. Possui módulos que levam em consideração as interações dos processos de produção de forragem e produção animal (MOORE; DONNELLY; FREER, 1997) e está inserido na ferramenta computacional AUSFARM. O modelo foi parametrizado por Cruz (2010) para *B. brizantha*. Segundo o autor, o modelo apresentou resultados satisfatórios na previsão do crescimento da gramínea estudada.

O APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) é um sistema de modelagem modular desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Sistemas de Produção Agrícola da

Austrália visando simular processos biofísicos em sistemas de produção agrícola como um todo. A estrutura modular permite flexibilidade e atualmente o sistema é capaz de simular o crescimento de 25 culturas entre lavouras e pastagens (KEATING et al., 2003). O APSIM-Growth, módulo para simulação de crescimento de plantas, foi parametrizado para *P. maximum* cv. Mombaça por Araujo et al. (2013) com dados coletados em São Carlos/SP. Após a parametrização, o autor verificou que os modelos simularam satisfatoriamente a produção da gramínea, com erro na média geral de apenas 6 kg MS ha⁻¹ corte⁻¹.

As adaptações recentes dos modelos ALMANAC, CROPGRO, AUSFARM e APSIM proporcionam possibilidades promissoras de uso nas pastagens tropicais. Os resultados apontados pelos autores têm sido positivos. Assim como nos modelos empíricos, os dados utilizados para a parametrização dos modelos mecanicistas se concentram de forma incipientes em locais pontuais dos EUA, Austrália, Brasil e Colômbia, no entanto, a concepção desses modelos permite extrapolar, com critério, seu uso para outras regiões. Obviamente, novas parametrizações para outras espécies e locais e o avanço do conhecimento sobre os processos, permitirão o contínuo aperfeiçoamento, o que aumentará a capacidade preditiva e aplicabilidade dos modelos. A principal limitação desses modelos é a disponibilidade de dados de entrada (parâmetros de solo, clima e planta), pois muitos dados requeridos são ausentes para a maioria das áreas de pastagens tropicais, como por exemplo, radiação solar e características físicas dos solos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram gerados cenários futuros do acúmulo de forragem de *Brachiaria brizantha* (Syn. *Urochloa brizantha*) cv. Marandu em função de projeções dos modelos climáticos regionalizados PRECIS e ETA-CPTEC. Dados climáticos observados (*base line*) e projeções dos modelos foram associados a um modelo empírico de produção de massa seca do capim-marandu, sendo obtida a simulação do acúmulo de forragem atual (observada) e futura. Estes dados foram obtidos para estações meteorológicas dentro e no contorno do estado de São Paulo. A partir destes dados, mapas foram obtidos por interpolação.

Para cada modelo climático, foram realizadas simulações futuras considerando alta (AE) e baixa (BE) emissão de gases de efeito estufa (AE – cenário A2 e BE – cenário B2 do *Special Report on Emissions Scenarios* do IPCC), para dois períodos: 2013 a 2040 e 2043 a 2070. As simulações futuras foram comparadas com a produção atual de 1963 a 2009, simulada com os dados observados das estações.

Foi utilizado o sistema portátil PRECIS, o qual executa o modelo regional do Centro Hadley HadRM3P, que considera as condições de contorno do modelo climático global HadAM3P. Neste modelo, são utilizados dados do modelo climático global acoplado oceano-atmosfera HadCM3 (GORDON et al., 2000), do qual o componente atmosférico HadAM3 é a base para o HadAM3P. Foi utilizada resolução horizontal de 50 km com 19 níveis na atmosfera. Mais detalhes do modelo podem ser obtidos em Jones et al. (2004).

O modelo ETA-CPTEC utilizado foi a versão climática do modelo ETA desenvolvida no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), que permite integrações para períodos de qualquer duração. Foi utilizada a combinação de quatro projeções das condições de contorno do modelo climático global acoplado oceano-atmosfera do Centro Hadley HadCM3, que foi executado em resolução de 2,5° de latitude x 3,75° de longitude em frequência de 6 h. O ETA-CPTEC “aninhado” no HadCM3 foi configurado com resolução horizontal de 40 km e 38 camadas na vertical. Mais detalhes do modelo podem ser obtidos em Chou et al. (2012); Eta Model (2013); Pisnichenko et al. (2006) e Pisnichenko e Tarasova (2010).

Foram realizadas projeções para médias de temperatura e precipitação para três intervalos de 30 anos, considerados da seguinte forma: referência (PRECIS e ETA referência: período 1961-1990) e duas projeções futuras (PRECIS e ETA 2025: período 2011-2040 e PRECIS e ETA 2050: período 2041-2070). A partir das médias projetadas, foram calculadas as diferenças médias de temperatura entre os períodos futuros e a referência ($\Delta T_{2025} = \text{ETA}_{2025} - \text{ETA referência}$ e $\text{PRECIS}_{2025} - \text{PRECIS referência}$; $\Delta T_{2050} = \text{ETA}_{2050} -$

ETA referência e PRECIS2050 – PRECIS referência). Adicionalmente, foram calculadas as frações de variação da média das projeções de precipitação em relação à referência ($\Delta P_{2025} = \text{ETA}_{2025}/\text{ETA referência}$ e $\text{PRECIS}_{2025}/\text{PRECIS referência}$; $\Delta P_{2050} = \text{ETA}_{2050}/\text{ETA referência}$ e $\text{PRECIS}_{2050}/\text{PRECIS referência}$). A partir de então, os valores de ΔT foram somados às séries de temperaturas observadas (dados das estações meteorológicas) para calcular as temperaturas do futuro e os valores de ΔP foram multiplicados às séries de precipitações observadas para calcular as precipitações. Estes dados de temperatura e precipitação em seguida foram utilizados como dados de entrada no modelo vegetal para estimar a produção futura. Para eliminar erros operacionais, os anos iniciais das séries futuras (2011, 2012, 2041 e 2042) foram desconsiderados. Para a produção atual foram utilizados dados observados de 1963 a 2009.

O modelo vegetal utilizado foi a equação linear univariada adaptada de Cruz et al. (2011), com a variável graus-dia corrigida por um fator de penalização hídrica (GD_{corr}) como estimadora do acúmulo de forragem (equação 1). O fator de penalização hídrica utilizado foi a relação armazenamento atual do solo/armazenamento máximo ($\text{ARM}/\text{ARM máx}$), com base no balanço hídrico calculado conforme Thornthwaite e Mather (1955), considerando três possibilidades de armazenamento máximo (“3 tipos de solo”): 40, 60 e 100 mm. Para o cálculo dos GD foi considerada a temperatura basal de 17,2°C.

$$\text{TAMS} = 15,34 \times \text{GD}_{\text{corr}} \quad (p < 0,0001; r^2 = 0,95) \quad (1)$$

Em que: TAMS = Taxa média de acúmulo de matéria seca ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e GD_{corr} = Graus-dia corrigido para penalização hídrica (°C). O intercepto não foi significativo à 5% ($p = 0,056$) e considerado = 0, logo, a equação e o coeficiente de determinação foram redefinidos (a equação acima já está ajustada).

O modelo foi obtido nas condições da área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP (latitude 21° 57' S, longitude 47° 51' O), nos anos de 2009 e 2010, clima Cwa (Classificação de Köppen), solo Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, temperatura média entre 16,8 e 27,1°C, radiação solar média de 17,9 MJ m² (mínima de 12,7 em junho e máxima de 21,8 MJ m² em novembro de 2009) e adubação anual com 300 kg ha⁻¹ de N e K₂O. A frequência de corte adotada foi de 35 dias com resíduo de 25 cm. Foi realizada irrigação quando a umidade do solo atingia 75% do volume da capacidade de campo, onde a umidade foi monitorada por sonda de capacitância (Cruz, 2010).

Os dados de 285 estações meteorológicas de todo o Brasil fornecidos pelo INMET, INPE, ANA, EMBRAPA e institutos, empresas e universidades estaduais foram compilados

pela equipe de tecnologia da informação do projeto “Simulação de Cenários Agrícolas Futuros a partir de Projeções de Mudanças Climáticas Regionalizadas (SCAF)” da Embrapa em Campinas-SP. Foram selecionadas 23 estações, sendo 12 situadas no estado de São Paulo e 11 no contorno; nos estados do Paraná (5), Mato Grosso do Sul (2), Minas Gerais (3) e Rio de Janeiro (1) (Figura 1). O critério de seleção das estações foi o tamanho e continuidade da série de dados.

Figura 1 – Estações meteorológicas (▲) das quais foram obtidos os dados climáticos observados (*base line*): 12 no estado de São Paulo e 11 nas regiões de contorno. *Datum*: WGS84

Os dados foram compilados em matriz única no ambiente ExcelTM para análise estatística descritiva. Utilizou-se como medidas de posição a média e o terceiro quartil ($Q_{3/4}$), que é o valor que separa a série de dados ordenados em dois subconjuntos, nos quais 75% dos dados são inferiores e 25% superiores. Como medida de dispersão, calculou-se o erro padrão da média. Foram elaborados diagrama de bastões para a distribuição de frequência e ogivas para probabilidade acumulada (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Apesar da variável (acúmulo de forragem) ser contínua, o diagrama de bastões em substituição ao histograma foi realizado para se apresentar os dados da *base line* e projeções simultaneamente. Calculou-se também a variação média mensal (%) de cada projeção em relação à *base line*.

Séries temporais do acúmulo anual de forragem foram criadas e apresentadas em figuras gráficas, considerando o período de 1963 a 2070, exceto os anos de 2010, 2011, 2012, 2041 e 2042. Foram realizadas análises de regressão linear do acúmulo anual de forragem em função dos anos, sendo realizadas análises de variância e, quando significativas, calculados o coeficiente angular, intercepto e coeficiente de determinação para o acúmulo anual de forragem (variável dependente) em função dos anos (variável independente) das séries de 1963 a 2009 e 2013 a 2070 projetados conforme os modelos climáticos regionalizados PRECIS e ETA-CPTEC considerando cenário de alta emissão de gases de efeito estufa. As análises de variância e regressão foram realizadas com auxílio do Software R, versão 12.15.0.

Os mapas foram obtidos a partir da interpolação espacial dos dados médios pelo método de vizinho natural com auxílio do Software ArcGis versão 10.1, utilizando a ferramenta “Spatial Analyst Tools / Interpolation / Natural Neighbor” com tamanho da célula de saída de 0,0236. Para os dados da *base line* foram definidas faixas fixas a cada 5.000 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹ e para as projeções faixas a cada 10% de alteração no acúmulo.

Foi realizada também interpolação espacial pelo método da krigagem (*kriging*), por meio da qual foram estimadas as áreas do estado de São Paulo (em milhões de hectares) que são abrangidas para cada uma de cinco classes de acúmulo anual de forragem (até 17,5; 17,5 a 20; 20 a 22,5; 22,5 a 25 e 25 a 27,5 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) estimadas com base nos dados climáticos observados. Da mesma forma, foram estimadas as áreas para cinco classes de alteração (10 a 20; 20 a 30; 30 a 40; 40 a 50 e acima de 50%) do acúmulo de acordo com as projeções dos modelos climáticos para o período de 2043 a 2070.

O uso do método vizinho natural na elaboração dos mapas em substituição à krigagem foi devido às distorções (“efeito mira”) ocorridas nos mapas por este último, possivelmente devido à baixa cobertura e distribuição das estações meteorológicas utilizadas. O método vizinho natural é mais simples e utiliza polígonos Thiessen e triangulação de Delaunay na interpolação dos pontos, o que gerou uma superfície mais suave. O método da krigagem (ou método de Krige) é uma técnica dentro da geoestatística, o qual é bem mais complexo. Detalhes sobre o assunto podem ser obtidos em Alves; Biudes e Vecchia (2012) e Miranda (2010).

Foi realizada uma análise direcionada às mesorregiões (*shapefile Brasil 2007* do IBGE) do estado de São Paulo que possuem as maiores áreas com braquiária, segundo dados do Levantamento Censitário LUPA (SÃO PAULO, 2008): mesorregiões de Presidente Prudente, Araçatuba, Marília, Bauru, Itapetininga e Vale do Paraíba Paulista. Para cada mesorregião, a área estimada com braquiária (média de cada faixa apresentada no censo) foi associada ao

acúmulo médio de forragem atual ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e a variação estimada no futuro (%) considerando solo com capacidade de armazenamento de água de 60 mm, modelo climático PRECIS, cenário de A.E. e período de 2043-2070, permitindo comparar a magnitude da mudança climática com a área cultivada e estimar o impacto futuro na região em termos absolutos ($\text{Mg de MS ano}^{-1} \text{ mesorregião}^{-1}$).

4 RESULTADOS

4.1 Análise geral

Em geral, as projeções indicam aumento do acúmulo de forragem no futuro para o estado de São Paulo. Considerando o acúmulo médio anual, todas as colunas de distribuição de frequência e curvas de probabilidade acumulada se deslocaram para a direita. Em geral, o acúmulo estimado com base nos dados climáticos projetados pelo modelo PRECIS é superior aos do modelo ETA-CPTEC, especialmente no cenário de alta emissão (AE) de gases de efeito estufa. Em ambos os modelos, o aumento é também mais acentuado no período de 2043 a 2070 do que de 2013 a 2040 e mais no cenário de AE do que de BE (Figuras 2 e 3).

O acúmulo médio de forragem simulado para a *base line* foi de 18,4; 19,6 e 21,0 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ para condições de armazenamento de água no solo de 40, 60 e 100 mm, respectivamente. Nesta condição, o terceiro quartil foi posicionado a 22,3, 23,7 e 25,6 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹. Isto significa que 75% dos dados de produção simulada para o clima observado estão abaixo destes valores em solos com capacidade de armazenamento de 40, 60 e 100 mm, respectivamente (Tabela 4).

Para a simulação com base na projeção do modelo PRECIS, considerando AE e período de 2043 a 2070, o acúmulo médio de forragem foi de 26,3; 27,9 e 29,8 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ e o terceiro quartil posicionado em 31,9; 33,4 e 35,6 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ para condições de armazenamento de água no solo de respectivamente 40, 60 e 100 mm, o que representa um aumento de cerca de 42% na média anual e 41% no terceiro quartil. Considerando o modelo ETA-CPTEC, também com AE e período de 2043 a 2070, o acúmulo médio foi de 25,0; 26,6 e 28,7 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ e o terceiro quartil 29,4; 31,8 e 34,1 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, com aumentos respectivos em torno de 36 e 33%.

As demais projeções também indicam incrementos na produção, com resultados intermediários. A projeção do modelo PRECIS, considerando cenário de BE, indica um aumento no acúmulo médio anual de forragem em torno de 17,0 e 28,3% para os períodos de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070, respectivamente. Nesta mesma ordem, o resultado para o modelo ETA-CPTEC no cenário de BE é de aumentos de 14,4 e 29,3%. Em cenário de AE para 2013 a 2040 a média é de 25,6% para o modelo PRECIS e de 18,6% para o modelo ETA-CPTEC.

Figura 2 – Distribuição de frequência (%) e probabilidade acumulada (decimal) do acúmulo de forragem anual (Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) no estado de São Paulo, simulada por modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu com dados observados (1963 a 2009) e projetados pelo modelo climático PRECIS nos cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para os períodos de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070, considerando solos com capacidades de armazenamento hídrico de 40, 60 e 100 mm

Figura 3 – Distribuição de frequência (%) e probabilidade acumulada (decimal) do acúmulo de forragem anual (Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) no estado de São Paulo, simulada por modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu com dados observados (1963 a 2009) e projetados pelo modelo climático ETA-CPTEC nos cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para os períodos de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070, considerando solos com capacidades de armazenamento hídrico de 40, 60 e 100 mm

As médias da *base line* apresentaram erro padrão de 0,18 a 0,19 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹, que foram inferiores ao erro padrão das médias das projeções, que variaram de 0,26 a 0,33 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 4), indicando uma maior variação na produção de forragem entre anos e locais do estado de São Paulo no futuro, que é o reflexo de maiores oscilações climáticas.

Tabela 4 – Média, terceiro quartil e erro padrão da média (Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) do acúmulo de forragem anual da *B. brizantha* cv. Marandu simulado para a *base line* e projeções climáticas futuras nos modelos PRECIS e ETA-CPTEC em diferentes cenários para o estado de São Paulo

Simulação	BL	PRE/ BE/25	PRE/ BE/55	PRE/ AE/25	PRE/ AE/55	ETA/ BE/25	ETA/ BE/55	ETA/ AE/25	ETA/ AE/55
Média (Mg MS ha ⁻¹ ano ⁻¹)									
ARM 40	18,4 (0,18)	21,6 (0,27)	23,7 (0,29)	23,2 (0,28)	26,3 (0,30)	21,1 (0,26)	23,8 (0,28)	21,8 (0,26)	25,0 (0,29)
ARM 60	19,6 (0,18)	22,9 (0,28)	25,1 (0,30)	24,6 (0,29)	27,9 (0,32)	22,4 (0,27)	25,3 (0,29)	23,2 (0,27)	26,6 (0,30)
ARM 100	21,0 (0,19)	24,5 (0,29)	26,9 (0,31)	26,3 (0,31)	29,8 (0,33)	24,0 (0,28)	27,2 (0,31)	25,0 (0,29)	28,7 (0,32)
Terceiro quartil (Mg MS ha ⁻¹ ano ⁻¹)									
ARM 40	22,3	26,6	28,9	28,2	31,9	25,5	28,6	26,2	29,4
ARM 60	23,7	27,7	30,4	29,6	33,4	27,1	30,3	28,0	31,8
ARM 100	25,6	29,6	32,4	31,6	35,6	29,0	32,7	30,4	34,1

PRE = modelo PRECIS; ETA = modelo ETA-CPTEC; BE e AE = respectivamente cenários de baixa e alta emissão dos gases de efeito estufa; 25 = período de 2013 a 2040; 55 = período de 2043 a 2070; ARM 40, 60 e 100 = índice de penalização hídrica do modelo de crescimento vegetal considerando capacidade de armazenamento máxima do solo de 40, 60 e 100 mm, respectivamente (simula “tipos de solo”). Os valores entre parênteses representam o erro padrão da média.

Apesar do aumento no acúmulo de forragem no total anual, haverá incremento na variação da taxa de acúmulo de forragem (TAF) entre estações do mesmo ano em termos absolutos para os dois modelos climáticos. O incremento absoluto da TAF (em kg MS ha⁻¹ dia⁻¹) será maior no verão agrostológico (estações primavera e verão, período quente com chuvas) do que no inverno agrostológico (estações de inverno e outono, período frio e seco) (Figura 4), acentuando um padrão anual desigual de produção já conhecido pelo sistema produtivo (estacionalidade). Por outro lado, o incremento em termos relativos (%) é maior no inverno do que no verão agrostológico nas simulações com dados do modelo PRECIS, enquanto que no modelo ETA-CPTEC, mesmo em termos relativos, o incremento da TAF é maior no verão do que no inverno agrostológico (Figura 5).

A TAF média simulada para a *base line* variou de 15,4 (no inverno) a 94,6 (no verão) kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ durante o ano, considerando um solo com capacidade de armazenamento de 40 mm. Para capacidades de 60 e 100 mm, estes valores variaram respectivamente de 18,7 (inverno) a 98,2 (verão) e de 23,6 (inverno) a 102,2 (verão) kg MS ha⁻¹ dia⁻¹. Considerando as projeções do modelo PRECIS, em cenário de AE e período de 2043 a 2070, a TAF média variou de 22,9 (inverno) a 125,1 (verão); 29,6 (inverno) a 129,8 (verão) e 39,9 (inverno) a 135,1 (verão) kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ para solos com capacidades de 40, 60 e 100 mm, respectivamente. Nesta mesma ordem e cenário, a TAF para o modelo ETA-CPTEC variou de 18,2 (inverno) a 125,9 (verão), 21,8 (inverno) a 129,2 (verão) e de 30,6 (inverno) a 134,1 (verão) kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ (Figura 4).

Esses dados mostram que considerando o modelo PRECIS, haverá um aumento médio na TAF de 11,6 e 31,7 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹ em relação a *base line*, o que representa aumento médio de 58,7 e 32,2% para o mês menos e mais produtivo do ano, respectivamente. Por outro lado, considerando o ETA-CPTEC no mesmo cenário, o aumento médio na TAF será de 4,3 e 31,4 kg MS ha⁻¹ dia⁻¹, que representa aumento de 21,5 e 32,0% para o mês menos e mais produtivo do ano, respectivamente.

As simulações com base no modelo PRECIS, cenário AE e período 2043 a 2070, indicam incrementos médios de 39,8; 72,0 e 36,2% na produção de forragem em relação à *base line* para os períodos de *i*) janeiro a abril, *ii*) maio a agosto e *iii*) setembro a dezembro, respectivamente. Nesta mesma ordem, as simulações com base no modelo ETA-CPTEC indicam incrementos médios de 31,9; 64,1 e 24,4%. O aumento é mais acentuado no período de maio a agosto para solos com menores capacidades de armazenamento de água (solos arenosos) comparado a solos com maiores capacidades (solos argilosos). O inverso ocorre no período de setembro a dezembro, quando os solos com menores capacidades indicam ter pequeno incremento, especialmente para as projeções do modelo ETA, quando o incremento é próximo de zero (Figura 5).

Figura 4 – Taxa de acúmulo de forragem (kg MS ha⁻¹ dia⁻¹) média mensal no estado de São Paulo, simulada por modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu com dados observados (1963 a 2009) e projetados pelos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC nos cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para os períodos de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070, considerando solos com capacidades de armazenamento hídrico de 40, 60 e 100 mm

Figura 5 – Variação mensal média (%) da taxa de acúmulo de forragem (TAF) no estado de São Paulo da projeção futura em relação ao clima atual, de acordo com modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu e dados dos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC nos cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para os períodos de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070 e dados observados (1963 a 2009), considerando solos com capacidades de armazenamento hídrico de 40, 60 e 100 mm

O acúmulo anual de forragem, observado ano a ano, de acordo com os dados observados e projetados pelos modelos climáticos, permite a geração de uma série temporal de 1963 a 2070, excluídos apenas os anos de 2010, 2011, 2012, 2041 e 2042, devido a procedimentos no processamento (Figura 6). Observa-se aumento linear no acúmulo de forragem em todo este período. O aumento na produção ocorre inclusive dentro da série de dados climáticos observados, uma vez que é possível ajustar equações de regressão linear do acúmulo médio anual de forragem em função dos anos, estimando-se o incremento médio a cada ano com base no coeficiente angular (Tabela 5). Executando-se esta mesma análise para os dados projetados pelos modelos climáticos, observa-se que a inclinação da curva, dada pelos coeficientes, é maior, bem como os coeficientes de determinação.

Estima-se uma taxa de incremento médio no acúmulo anual de forragem de 49, 57 e 68 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹ no período de 1963 a 2009 para solos com capacidades de 40, 60 e 100 mm, respectivamente. No futuro, estima-se pelo modelo PRECIS em cenário de A.E., que haverá um incremento médio de 92, 99 e 109 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹ para solos com capacidades de 40, 60 e 100 mm, enquanto que pelo modelo ETA-CPTEC no mesmo cenário, o incremento estimado é de 96, 105 e 118 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹.

Figura 6 – Acúmulo médio anual de forragem (kg MS ha⁻¹ ano⁻¹) no estado de São Paulo, simulada por modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu com dados observados (1963 a 2009) e projetados pelos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC nos cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para os períodos de 2013 a 2040 e de 2043 a 2070, considerando solos com capacidades de armazenamento hídrico de 40, 60 e 100 mm

Tabela 5 – Equações de regressão linear do acúmulo anual médio de forragem (Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) em função dos anos ao longo da série temporal da *B. brizantha* cv. Marandu simulado para a *base line* e projeções climáticas futuras nos modelos PRECIS e ETA-CPTEC em cenários de alta emissão para o estado de São Paulo

Série	Dados/Projeção	Coefficiente angular	Intercepto	r ²	Probabilidade
1963-2009	Observado/Arm40	48,98	-78871,7	0,15	0,007
1963-2009	Observado/Arm60	57,37	-94373,2	0,20	0,001
1963-2009	Observado/Arm100	67,93	-113880,6	0,27	<0,001
2013-2070	PRECIS/Arm40	92,10	-163257,3	0,36	<0,001
2013-2070	ETA/Arm40	95,88	-172358,9	0,36	<0,001
2013-2070	PRECIS/Arm60	98,94	-175764,2	0,40	<0,001
2013-2070	ETA/Arm60	104,87	-189232,8	0,40	<0,001
2013-2070	PRECIS/Arm100	108,95	-194347,5	0,47	<0,001
2013-2070	ETA/Arm100	118,30	-214686,9	0,47	<0,001

A distribuição espacial do acúmulo anual de forragem no estado de São Paulo considerando os dados observados é típica. Considerando solos com capacidade de armazenamento de água de 40, 60 e 100 mm, o acúmulo situa-se respectivamente entre 5.448 a 24.858, 5.585 a 25.886 e 5739 a 28.418 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹. Interpolando e distribuindo em classes subdivididas a cada 5.000 kg MS ha⁻¹ ano⁻¹ é possível identificar de quatro a cinco faixas de produção para solos com 40, 60 e 100 mm (Figura 7).

Os resultados indicam clara distribuição de potencial climático de produção no estado. Em geral, a região oeste é potencialmente mais produtiva do que a região leste. A mesorregião do Vale do Paraíba Paulista e em geral a região anexa ao extremo sul de Minas Gerais apresenta menor potencial de acúmulo de forragem. Por outro lado, as mesorregiões de Presidente Prudente, Araçatuba e São José do Rio Preto (regiões anexas ao Mato Grosso do Sul) apresentam maior potencial. É evidente também uma faixa centro-leste que se estende da região anexa ao extremo sul de Minas Gerais até a região anexa ao nordeste do Paraná, que apresenta potencial relativamente menor. As demais regiões do estado, especialmente a região centro-oeste, apresentam potenciais intermediários que aumentam em sentido oeste. Destaca-se que o potencial mencionado é somente climático e se refere ao capim-marandu. O potencial de outras espécies pode ter distribuição diferente e o potencial real depende também de fatores como solo, adubação, irrigação, manejo e outros.

Com base no acúmulo de forragem estimado pelos dados climáticos observados (*base line*), mapas foram obtidos considerando a variação (%) do acúmulo no período futuro de 2043 a 2070 (Figuras 8, 9 e 10). Foi possível identificar claramente um padrão de resposta. A variação absoluta esteve entre -3,4 e +113,7% e ocorreu com o modelo ETA-CPTEC. O

extremo inferior (-3,4%) ocorreu na estação de Frutal-MG (região anexa ao triângulo mineiro) no cenário A.E./solo 40mm e o extremo superior (+113,7%) na estação de São José do Campos-SP (Vale do Paraíba Paulista) no cenário A.E./solo 100mm. Os resultados do modelo PRECIS foram mais estáveis e a variação esteve entre +9,5 e +75,4% para a estação de Frutal-MG (cenário B.E./solo 100mm) e Caldas-MG (cenário A.E./solo 100mm), respectivamente.

Figura 7 – Mapas do acúmulo médio anual de forragem ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) no estado de São Paulo, simulada por modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu com dados observados (1963 a 2009), considerando solos com capacidades de armazenamento hídrico de 40, 60 e 100 mm. Observações: Datum WGS84, ▲ = estações meteorológicas

Há predominantemente aumento no acúmulo de forragem considerando o total anual no estado de São Paulo. Em geral, o aumento foi superior nas áreas de menor acúmulo, o que era esperado, visto ser um parâmetro relativo. Embora a variação absoluta seja muita ampla, valores inferiores a 20% e/ou superiores a 50% foram pontuais e se concentraram na região anexa ao triângulo mineiro e sul de minas, respectivamente. Uma pequena faixa anexa ao

nordeste do Paraná também se destacou pelos aumentos superiores a 50% nos cenários de A.E.

Considerando a simulação com dados do modelo PRECIS, foram definidas cinco classes no cenário de BE para solos com 40 e 60 mm, com variação positiva no potencial de 10 a 60%. Para solos com 100 mm foram definidas seis classes, com variação positiva inferior a 10 até mais de 60%. Em cenário de AE, a simulação originou cinco classes, sendo a variação positiva de 20 a mais de 60% para as três capacidades de solo. Para as simulações considerando o modelo ETA-CPTEC, foram definidas seis classes em todos os cenários, variando de valores inferiores a 10% até mais de 60%.

Figura 8 – Mapas da variação (%) do acúmulo médio anual de forragem de *B. brizantha* cv. Marandu simulada com dados projetados pelos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC em relação a *base line* no estado de São Paulo, considerando cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para o período de 2043 a 2070 em solo com capacidade de armazenamento hídrico de 40 mm. Observações: *Datum* WGS84, ▲ = estações meteorológicas

Em média, as simulações realizadas com base no modelo PRECIS apresentaram maior aumento na produção do que aquelas realizadas pelo ETA-CPTEC. Este resultado é mais evidente observando os valores médios interpolados pelo método da krigagem (Tabela 6). Da

mesma forma, as simulações no cenário de AE estimam maior incremento do que no cenário de BE. A região do Vale do Paraíba Paulista (São José dos Campos) e região anexa ao extremo sul de Minas Gerais se destacam pelo superior incremento em relação às demais regiões. Nesta área, em nenhum cenário dos dois modelos climáticos o aumento será inferior a 30%. Por outro lado, as regiões consideradas como de maior potencial produtivo, mais a oeste do estado, apresentaram resultados com aumento inferior.

Figura 9 – Mapas da variação (%) do acúmulo médio anual de forragem de *B. brizantha* cv. Marandu simulada com dados projetados pelos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC em relação a *base line* no estado de São Paulo, considerando cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para o período de 2043 a 2070 em solo com capacidade de armazenamento hídrico de 60 mm. Observações: *Datum* WGS84, ▲ = estações meteorológicas

Embora a variação seja ampla, observa-se que da área total do estado (24,85 milhões de hectares), mais de 90% da área interpolada pelo método da krigagem estão distribuídas em apenas uma ou duas classes (Tabela 6). Isto nos remete a certa homogeneidade da variação do acúmulo de forragem no futuro para a maioria do estado, destacando que os extremos são ocorrências regionais. Em todas as simulações realizadas com base no modelo ETA-CPTEC há clara definição de duas áreas: oeste e leste, que dividem o estado em partes

aproximadamente iguais, com aumento no acúmulo de forragem no cenário de BE de 20 a 30% na área oeste e de 30 a 40% na área leste, e aumento no acúmulo no cenário de AE de 30 a 40% na área oeste e de 40 a 50% na área leste.

Por outro lado, nas simulações realizadas com base no modelo PRECIS no cenário de AE, mais de 87% da área do estado foi classificada com aumento de 40 a 50%, exceto na minoria correspondente ao Vale do Paraíba Paulista e áreas anexas ao extremo sul de Minas Gerais (aumento superior a 50%), e aquelas anexas ao triângulo mineiro (aumento inferior a 40%). No cenário de BE, os resultados foram intermediários.

Figura 10 – Mapas da variação (%) do acúmulo médio anual de forragem de *B. brizantha* cv. Marandu simulada com dados projetados pelos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC em relação a *base line* no estado de São Paulo, considerando cenários de baixa (B.E.) e alta (A.E.) emissão dos gases de efeito estufa para o período de 2043 a 2070 em solo com capacidade de armazenamento hídrico de 100 mm. Observações: *Datum*: WGS84, ▲ = estações meteorológicas

Tabela 6 – Área estimada no estado de São Paulo (milhões de ha) em função de classes de acúmulo anual de forragem (Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹) estimada por modelo de crescimento empírico de *B. brizantha* cv. Marandu com dados observados (1963 a 2009) e variação (%) em relação ao acúmulo atual com base nos modelos climáticos PRECIS e ETA-CPTEC para o período de 2041 a 2070 em cenários de alta (A.E.) e baixa (B.E.) emissão de gases de efeito estufa para solos com capacidades de armazenamento hídrico (ARM) de 40, 60 e 100 mm

Área em São Paulo (milhões de ha) - Simulação Atual						
Classes (Acúmulo de forragem, Mg MS/ha/ano)	ARM 40 mm		ARM 60 mm		ARM 100 mm	
< 17,5	8,17		1,79		0,30	
17,5 a 20	8,32		12,06		7,91	
20 a 22,5	8,36		7,16		7,70	
22,5 a 25	0,00		3,84		6,35	
25 a 27,5	0,00		0,00		2,59	
Área em São Paulo (milhões de ha) - Projeção PRECIS (2041 a 2070)						
Classes (variação, %)	ARM 40 mm		ARM 60 mm		ARM 100 mm	
	B.E.	A.E.	B.E.	A.E.	B.E.	A.E.
< 20	0,19	0,00	0,25	0,00	0,28	0,00
20 a 30	12,72	0,00	14,34	0,00	14,60	0,00
30 a 40	11,59	1,18	9,92	1,57	9,56	1,61
40 a 50	0,34	22,33	0,34	21,85	0,40	21,90
> 50%	0,00	1,34	0,00	1,43	0,00	1,35
Área em São Paulo (milhões de ha) - Projeção ETA-CPTEC (2041 a 2070)						
Classes (variação, %)	ARM 40 mm		ARM 60 mm		ARM 100 mm	
	B.E.	A.E.	B.E.	A.E.	B.E.	A.E.
< 20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20 a 30	12,31	0,50	12,19	0,38	12,06	0,48
30 a 40	12,54	13,84	12,66	13,59	12,79	13,32
40 a 50	0,00	10,51	0,00	10,88	0,00	11,05
> 50%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: método de interpolação - krigagem

4.2 Análise regional

Considerando os dados do Levantamento Censitário LUPA (SÃO PAULO, 2008), as mesorregiões com maior área ocupada com braquiária são: Presidente Prudente, Araçatuba, Marília, Bauru, Itapetininga e Vale do Paraíba Paulista, que incluem as microrregiões de Presidente Venceslau, Presidente Prudente, Dracena, Tupã, Andradina, Araçatuba, Lins, Jaú, Bauru, Botucatu, Marília, Avaré, Itapetininga, Itapeva, Pindamonhangaba e Guaratinguetá (Figura 11).

Estas seis mesorregiões, que incluem 16 microrregiões, possuem área total aproximada de 11,1 milhões de ha, que é cerca de 44,7% da área estadual. No total, estima-se que há, nestas mesorregiões, aproximadamente 4,8 milhões de ha com braquiárias, representando cerca de 43,2% da área total. Nas mesorregiões de Presidente Prudente, Araçatuba,

Marília/Bauru, Itapetininga e Vale do Paraíba Paulista, a área total aproximada e área total estimada com braquiárias são de 2,4 e 1,5; 1,7 e 0,7; 3,4 e 1,6; 2,0 e 0,5; 1,6 e 0,5 milhões de ha, representando ocupação (área de braquiária em relação ao total) em torno de 61, 42, 46, 27 e 30%, respectivamente (Figura 12). A mesorregião de Presidente Prudente possui a maior área estimada e ocupação com braquiária do estado. Ressalta-se que no censo, foram considerados, de forma generalizada, todas as espécies e cultivares de braquiária.

O acúmulo anual médio de forragem foi estimado em 23,3; 22,0; 19,7; 17,7 e 17,2 Mg MS ha⁻¹ ano⁻¹ e a variação futura com base no modelo PRECIS, cenário A.E. e período de 2043-2070 de +43,1, +43,3, +43,1, +41,0 e +43,8% para Presidente Prudente, Araçatuba, Marília/Bauru, Itapetininga e Vale do Paraíba Paulista, respectivamente. Tal variação proporciona impacto total de cerca de +42,6 milhões de toneladas de massa seca por ano (Figura 12).

Figura 11 – Área com braquiária (ha) segundo levantamento LUPA (SÃO PAULO, 2008), acúmulo anual de forragem (kg MS ha⁻¹ ano⁻¹) de *B. brizantha* cv. Marandu estimado com base nos dados observados (*base line* 1963-2009) e variação (%) do acúmulo médio anual de forragem simulada com dados do modelo climático PRECIS em relação a *base line*, considerando cenário de alta emissão dos gases de efeito estufa para o período de 2043 a 2070 em solo com capacidade de armazenamento hídrico de 60 mm

Figura 12 – Análise de cenários futuros para as mesorregiões de São Paulo: Presidente Prudente, Araçatuba, Marília/Bauru, Itapetininga e Vale do Paraíba Paulista. Os dados foram obtidos com o cruzamento das informações da Figura 11

5 DISCUSSÃO

5.1 Impacto na produção de forragem

O acúmulo anual de forragem simulada pelo modelo empírico no estado de São Paulo, com média em torno de 18 a 21 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ é próxima daquela obtida em trabalhos de campo com condições semelhantes às de desenvolvimento do modelo (MARI, 2003), indicando confiança nas simulações. O aumento do acúmulo de forragem projetado é reflexo direto do aumento de temperatura. Porém, esse aumento promove maior evapotranspiração potencial e, assim, mesmo sem queda na precipitação, há tendência futura de redução da disponibilidade de água no solo (ASSAD et al., 2004; TUBIELLO; SOUSSANA; HOWDEN, 2007). Exceto na primavera, o efeito simultâneo destes fatores afetou positivamente o potencial de produção, pois no período de chuva a umidade é excedente e no período seco a produção já é pequena. Na primavera, além de redução da precipitação, o aumento de temperatura (e evapotranspiração) foi superior, o que sinergicamente reduz muito a disponibilidade futura de água no solo.

O aumento anual médio de temperatura no estado projetado foi em torno de 2 a 3° C, considerando cenário de altas emissões (A.E.) e período de 2041 a 2070 (Figura 13). Cenários e períodos intermediários resultam em aumentos proporcionalmente menores. Os dois modelos climáticos utilizados tem resultados semelhantes em suas projeções de temperatura, embora o modelo ETA-CPTEC simule aumento ligeiramente superior na primavera-verão (Tabela 7). Projeções de precipitação apresentam menor confiança e os modelos apresentam resultados discordantes, semelhante ao relatado em estudos com modelos regionais (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO et al., 2010). Discordâncias nas simulações de precipitação também ocorrem entre modelos globais, principalmente na primavera/verão (HAMADA et al., 2011). O modelo ETA-CPTEC apresentou maior variação temporal e espacial.

Considerando cenário de altas emissões (A.E.) e período de 2041 a 2070, o modelo PRECIS projeta alteração positiva na precipitação da ordem de +15 a +25% no período de Janeiro a Abril e valores inalterados no restante do ano. Por outro lado, o modelo ETA-CPTEC projeta alteração negativa na precipitação da ordem de -5 a -25% de Janeiro a Abril, valor inalterado de Maio a Agosto e alteração negativa acentuada de Setembro a Dezembro (em torno de -20 a -35%) (Tabela 7). Esta projeção de redução das chuvas do modelo ETA-CPTEC explica a menor produção do capim-marandu em relação ao modelo PRECIS, mesmo considerando a maior temperatura simulada pelo ETA-CPTEC. Assim, embora o aumento

acentuado de temperatura do modelo ETA-CPTEC favoreça a produção do capim-marandu, o maior déficit hídrico contrapõe esse efeito. Esse resultado é particularmente evidente no período da primavera (Figura 5), quando temperatura e chuva têm seus extremos de alteração.

Figura 13 – Mapas temáticos de temperatura (°C) e precipitação média anual (mm) para o estado de São Paulo considerando dados atuais (*Base line* – BL 1963 a 2009) e projeções dos modelos ETA-CPTEC e PRECIS no cenário de altas emissões de gases de efeito estufa (A.E.) no período de 2041 a 2070. Sem referência geográfica.

Embora não tenha sido verificada redução em precipitação no modelo PRECIS, estudos que simularam o clima para períodos mais distantes (2071-2100) observaram aumento de precipitação no verão e ligeira redução no restante do ano, indicando ser esta uma tendência se for considerado um intervalo superior ao deste estudo (até 2070). O fato é que um padrão robusto de resultados em relação às chuvas no futuro no estado de São Paulo não tem sido verificado, diferentemente do observado para o nordeste, por exemplo, onde a redução de chuva é acentuada e há um consenso entre os modelos (MARENGO et al., 2010).

Tabela 7 – Faixa de temperatura (°C) e precipitação (mm/dia) atual média e variação (°C ou %) projetada pelos modelos climáticos regionais PRECIS e ETA-CPTEC no cenário de altas emissões (A.E.) de gases de efeito estufa para o período de 2043 a 2070 no estado de São Paulo

Variável	Cenário	Jan-Abr	Mai-Ago	Set-Dez
Temperatura	Atual (média - °C)*	23 a 26	16 a 21	21 a 25
	PRECIS A.E. 43-70 (variação - °C)	+1,5 a 2,5	+2,0 a 3,0	+2,5 a 3,0
	ETA A.E. 43-70 (variação - °C)	+2,0 a 3,0	+2,0 a 3,0	+3,0 a 3,5
Precipitação	Atual (média - mm/dia)*	4,5 a 5,5	1 a 1,5	3,5 a 4,5
	PRECIS A.E. 43-70 (variação - %)	+15 a +25	~0	~0
	ETA A.E. 43-70 (variação - %)	-5 a -25	~0	-20 a -35

* Desconsideradas microregiões de clima específico, tais como regiões litorâneas (ex. Ubatuba) e de altitudes muito elevadas (ex. Campos do Jordão).

O modelo empírico utilizado para estimar o acúmulo de forragem considera somente os fatores temperatura e chuva (CRUZ et al., 2011). Trabalhos semelhantes para plantas forrageiras tropicais são escassos, e a rigor outros fatores, especialmente o aumento de CO₂ atmosférico ([CO₂]), também deveriam ser considerados nesta análise. No entanto, a variação na produção vegetal estimada para o futuro tem padrão semelhante àquela estimada para forrageiras temperadas em outros locais (BAARS; RADCLIFFE; ROLLO, 1990) e para cana de açúcar no estado de São Paulo, com uso de modelos mecanicistas (MARIN et al., 2013). Destaca-se que trabalhos com cana de açúcar são úteis nesta comparação, visto que são plantas que também apresenta metabolismo fotossintético C4 e que se explora economicamente a parte aérea vegetativa. O refinamento das simulações, incluindo mais fatores, especialmente a [CO₂], requer experimentação adicional.

Acredita-se que com o aumento de temperatura e [CO₂], plantas de metabolismo C4, como o capim-marandu, tenham resposta semelhante à da cana de açúcar. Vários efeitos diretos e indiretos das mudanças climáticas são relacionados a aspectos meteorológicos e fisiológicos da cana de açúcar no trabalho de Marin et al. (2013), que usou o modelo vegetal mecanicista DSSAT/CANEGRO. O aumento de +3°C promoveu aumento da evapotranspiração potencial da ordem de 7,8 e 10,5% nas condições de Piracicaba e Ilha Solteira, respectivamente. Porém, esse aumento potencial não necessariamente se traduziu em aumento do consumo hídrico, haja vista que o aumento para 750 ppm de [CO₂], por exemplo, reduziu em 11 e 10,5% a transpiração e em 9,1 e 8,9% a evapotranspiração real da cultura, relacionado, segundo os autores, a acentuada redução da condutância estomática de plantas C4.

No trabalho de Marin et al. (2013), a produção de massa fresca de colmo (Mg ha⁻¹) simulada para o futuro (2010 a 2100), considerando os cenários A2 e B2 (SRES do IPCC) e

modelos climáticos CSIRO e PRECIS, sempre apresentou alteração positiva, variando de 1 a 54% e média de 22%. Considerando somente o modelo PRECIS no cenário A2 (A.E.) o aumento é de 54, 49 e 24% para ciclos de colheita precoce, médio e tardio, respectivamente. Embora para o capim-marandu tenha se utilizado modelo empírico, os resultados corroboram com o trabalho realizado com cana de açúcar, uma vez que aumentos na produção de massa variaram de 10 a mais de 50%, com média entre 30 a 40% dependendo da simulação. Embora em magnitude desconhecida, acredita-se que o incremento da produção do capim-marandu possa ainda ser maior, se considerado o efeito sinérgico do aumento da $[CO_2]$ e da temperatura, tal qual ocorreu com a cana de açúcar.

Por ser empírico, o modelo vegetal utilizado pode ser aplicado somente em condições similares daquelas em que desenvolvido. Identificando as condições experimentais, é possível delimitar a aplicação segura do modelo, em relação às suas variáveis independentes, não extrapolando os limites da equação de regressão. No experimento de Cruz (2010), desenvolvedor do modelo, houve ciclos de crescimento com ausência de chuvas até ciclos sem nenhuma restrição hídrica, e temperaturas médias dos ciclos de 16,8 a 27,1°C. Assim, é seguro aplicar o modelo no estado de São Paulo, uma vez que temperaturas médias acima de 27,1°C não são comuns (BANCO DE DADOS CLIMÁTICOS DO BRASIL, 2013) e abaixo de 16,8°C não há efeito nas simulações (a temperatura basal inferior foi estimada em 17,2°C).

Por outro lado, o efeito da adubação deve ser considerado com cautela na interpretação, visto ter considerável impacto no acúmulo de forragem, especialmente a nitrogenada (CECATO et al., 2000). Assim, parte-se do pressuposto que o acúmulo de forragem estimado pelos modelos nos diferentes cenários, será obtido com aplicações semelhantes de adubação. Embora dose inferior de adubação seja mais comum, avaliações nestas condições fazem com que respostas às mudanças climáticas sejam limitadas pelos nutrientes, o que caracteriza uma interação. Desta forma, a fixação da adubação facilita e permite foco na análise principal, que é o efeito do clima. Estudos utilizando modelos mecanicistas devem refinar as previsões considerando estes fatores simultaneamente.

O manejo do corte também merece considerações. Se a pastagem é mantida com maior Índice de Área Foliar (IAF), a interceptação luminosa (e assim a fotossíntese) é favorecida. Porém, a maior presença de folhas velhas (menos eficientes) e a maior respiração e senescência contrapõem este fator. Por outro lado, se a pastagem é mantida com menor IAF, a interceptação luminosa é potencialmente menor, porém a respiração e senescência também são menores e as folhas novas tem maior proporção (LEMAIRE; CHAPMAN, 1996). Enfim, fatores atuam simultaneamente e em sentidos opostos. O fato é que, mantida a estrutura da

pastagem dentro de certos limites, a frequência e intensidade de desfolha pouco afeta o acúmulo final de forragem (PARSONS; JOHNSON; HARVEY, 1988). Nestas condições, o manejo para evitar o crescimento de colmos e senescência é predominante (HODGSON; DA SILVA, 2002). Assim, não se espera que o acúmulo de forragem seja significativamente afetado entre manejos, desde que não sejam discrepantes a ponto de alterar significativamente a estrutura da pastagem.

Houve aumento da estacionalidade de produção em ambos os modelos, porém mais acentuado nas simulações com o modelo ETA-CPTEC. O aumento relativo (em %) do acúmulo de forragem maior no inverno do que no verão em simulações com o modelo PRECIS não reduz a estacionalidade, uma vez que o aumento de forragem absoluto (em kg MS) no verão é maior. Houve diferenças interessantes entre solos com capacidades diferentes de armazenamento de água. O incremento relativo no período de Maio-Agosto foi maior para solos com menor capacidade (40 mm), devido à produção que já é inferior nesta condição. Assim, pequeno incremento absoluto proporciona grande aumento relativo. De forma inversa, de Setembro-Dezembro, solos com maior capacidade (100 mm) apresentaram maior incremento, pois este período já é relativamente quente e a menor disponibilidade de água passa a ser o fator mais limitante.

Nas séries temporais de acúmulo de forragem, observaram-se equações de regressão significativas tanto para a *base line* quanto para as projeções. Os coeficientes angulares e de determinação foram maiores para as projeções. A significância da equação para a *base line* é devido ao aumento de temperatura que já ocorreu nos últimos 47 anos considerados. Assim, é fato que o maior potencial climático de produção do capim-marandu também ocorreu. Já os maiores coeficientes para as projeções, são reflexos da maior concentração dos gases de efeito estufa no futuro, que em magnitude dependente do cenário, aumentará as taxas de alteração de temperatura e precipitação (BERNSTEIN et al., 2007) e assim, os efeitos na produção vegetal.

A distribuição da produção atual de forragem no estado de São Paulo é explicada pelos fatores climáticos que favorecem a fotossíntese, especialmente temperatura e evapotranspiração potencial, que além da temperatura integra outros fatores, como radiação, umidade do ar e velocidade do vento. Por situar em uma faixa de latitude relativamente pequena, os tipos climáticos no estado são mais associados à altitude (Figura 14). Em geral, quanto mais a oeste do estado, menor a altitude e, portanto, maior a temperatura e evapotranspiração potencial. Contando que a disponibilidade de água não reduz proporcionalmente (na região oeste a precipitação anual normal é de 1000 a 1300 mm), tende-se a aumentar a produção. Nas projeções futuras, há maior aumento nas regiões de menor

potencial de produção atual. Assim como ocorreu para os períodos do ano de menor potencial climático, a menor produção atual, neste caso, proporciona maior variação relativa. Esta variação foi marcadamente superior na região próxima a São José dos Campos no Vale do Paraíba Paulista.

Figura 14 – Mapas temáticos de altitude (m), temperatura média anual do ar (°C), precipitação anual (mm) e evapotranspiração de referência (ETo, mm) para o estado de São Paulo considerando normais climatológicas. Sem referência geográfica. Fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS (2013)

Semelhante às projeções de outras culturas em diversas regiões da América Latina (MAGRIN et al., 2007), acredita-se que a maiores incertezas estejam na modelagem climática, haja vista a relativa discordância dos modelos nas projeções de chuvas, e ao fato de não se considerar o aumento de $[CO_2]$ no modelo vegetal. Contudo, há resultados com claro padrão de resposta, nos quais há confiança: *i)* haverá aumento do potencial climático de produção superior a 30% na maioria do estado; *ii)* a estacionalidade da produção irá aumentar em todas as regiões devido a menor disponibilidade hídrica; *iii)* as regiões mais frias e de menor potencial atual terão variação positiva mais acentuada e *iv)* a variação é maior nos cenários mais longínquos e de maior emissão de gases de efeito estufa.

Em uma comparação de três modelos climáticos regionalizados para simulações futuras na América do Sul, foi observado que todos mostram forte aquecimento no cenário de A.E. na

região tropical (especialmente entre os paralelos 5 a 15°) no verão e especialmente no inverno, alcançando aumento de até 6 a 8°C. No sudeste do continente, que inclui o estado de São Paulo, o aquecimento varia de 2 a 4° no verão e de 3 a 5° no inverno. Embora os modelos demonstrem resultados mais robustos para o Nordeste e Amazônia do que para o Pantanal e Sudeste brasileiro, há um consistente padrão de mudanças na circulação, temperatura e chuva (MARENGO et al., 2010).

Avaliações de possíveis impactos de mudanças climáticas em pastagens têm sido realizadas há mais de 20 anos, porém com plantas de clima temperado. Com base em projeções do modelo global HadCM3 no cenário A2 (SRES do IPCC), simulações do submodelo de crescimento de pastagem do modelo mecanicista CENTURY (modelo direcionado à simulações da dinâmica de C no solo), indicaram aumento da produtividade de pastagens nos pampas Argentinos e Uruguaios de 1 a 9% ainda em 2020 (GIMENEZ, 2006).

Em 1990, estudos na Nova Zelândia, baseados em modelos de crescimento empírico de azevém perene e trevo branco, considerando os fatores temperatura e disponibilidade hídrica, apontaram, para 2030, aumentos na produção anual de forragem de cerca de 20% na Ilha Sul e 5% na Ilha norte. Foram obtidas as seguintes projeções do padrão estacional para regiões da Ilha Sul: aumento de 50 e 80% no inverno, aumento de 20 a 40% na primavera e outono e nula alteração no verão. Da mesma forma, análises similares na Ilha Norte, projetaram crescimento aumentado de 20 a 40% no outono e inverno, nenhuma alteração na primavera e leve decréscimo no verão (BAARS; RADCLIFFE; ROLLO, 1990).

Utilizando um modelo empírico de regressão polinomial e cenários de +1 a +2°C de aumento de temperatura e chuvas variando de -20 a +20%, Zhang; Valentine e Kemp (2007) também avaliaram os impactos na produção de pastagens na Ilha Norte da Nova Zelândia. Em relação à produção de referência (1960 a 1990), os autores obtiveram variação de -46,2 a +51,9%, a depender do cenário e região climática. Considerando a média de todas as regiões, a variação foi de -20,4 a +9,6%. As simulações dos autores apontaram efeitos mais drásticos do que aqueles de Baars; Radcliffe e Rollo (1990), devido a projeções de cenários de maior restrição hídrica (redução mais acentuada na precipitação associada a maior aumento de temperatura). De forma geral, a variação em precipitação foi, em ambos os trabalhos, a explicação para o sentido da variação. A temperatura teve efeito predominantemente positivo, mas acentuou o efeito negativo em situação de balanço hídrico negativo no solo.

Embora as comparações possíveis tenham sido realizadas em condições e plantas diferentes, o panorama de projeções em geral tem semelhanças àquelas observadas para o capim-marandu no estado de São Paulo: *i)* o aumento em produção é predominante; *ii)* a

redução na produção ocorre quando o déficit hídrico se torna limitante; *iii*) a temperatura tem efeito predominantemente positivo, porém acentua efeitos negativos sob déficit hídrico; e *iv*) em termos relativos as variações são maiores para locais e períodos frios (potencialmente menos produtivos).

5.2 Medidas de mitigação e adaptação

O debate acerca da real ligação das ações antrópicas com as mudanças climáticas, bem como as diversas formas de redução das emissões de GEE, envolvem vários setores da economia, é um tema polêmico e foco de outros trabalhos. Portanto, extrapola os objetivos deste texto. No caso das pastagens, medidas de mitigação, que são ações para redução do balanço líquido positivo de GEE (especialmente CO₂, N₂O e CH₄), e adaptação, que são ações para minimizar os impactos das mudanças, são diversas, e há interação entre elas (SMITH et al., 2007). Um sumário adaptado para pastagens a partir medidas de mitigação e adaptação do IPCC (SMITH et al., 2007) foi apresentado na Tabela 8.

As medidas foram reunidas em três grupos: manejo da pastagem, recuperação de áreas degradadas/ proteção do solo e manejo animal. Dos exemplos citados, a maioria é considerada tanto medidas de mitigação da emissão dos GEE, quanto de adaptação aos impactos das mudanças climáticas (principalmente o aumento da estacionalidade causado pela restrição hídrica no solo).

A intensificação das áreas de pastagens, com o aumento de investimentos e insumos, tais como fertilizantes e, ou, irrigação, pode ser considerada medida de mitigação, uma vez que aumenta a produtividade de biomassa e o retorno de resíduos. Neste caso, a maior produção de biomassa (principalmente de raízes) favorece o estoque de carbono no solo (LAL, 2004). Porém, emissões de N₂O podem ser favorecidas, devido a maior umidade do solo causada pela irrigação e o maior uso de fertilizantes nitrogenados (MOSIER, 2001).

Assim como sugerido para pastagens no nordeste (SANTOS et al., 2011), a irrigação poderá ser uma importante alternativa de adaptação de pastagens frente ao aumento da estacionalidade de produção em São Paulo. Uma vez que a limitação térmica irá reduzir e a limitação hídrica aumentar, a relação benefício/custo da irrigação de pastagens será maior e esta estratégia fortemente favorecida. É importante, porém, ressaltar que a irrigação é uma prática vulnerável (SMITH et al., 2007), pois a disponibilidade hídrica poderá reduzir, e em outros setores da economia, haverá crescimento da demanda, o que poderá gerar competição entre uso agrícola, industrial e doméstico (MAGRIN et al., 2007). Neste cenário, medidas de

manejo de bacias hidrográficas e de conservação do solo e água serão ainda mais importantes, e sistemas de irrigação deverão ser cada vez mais eficientes.

Tabela 8 – Medidas para mitigação das emissões de gases de efeito estufa e adaptação frente às mudanças climáticas sugeridas para pastagens no estado de São Paulo

Medida	Exemplos	Mitigação de emissões			Adaptação
		CO ₂	N ₂ O	CH ₄	
Manejo da pastagem	Conservação de forragem (ex. ensilagem, diferimento, fenação)				+
	Aumento de produtividade/ <i>+input</i> insumos (ex. irrigação, +fertiliz.)	+	-		+
	Manejo/Eficiência Agronômica (ex. nutrientes, irrigação, acidez)	+	+		+
	Controle de fogo	+	+	+	
	Introdução de consórcios/integração	+	+/-	+/-	+
	Manejo do pastejo (frequência e intensidade)	+	+/-	+/-	+
Recuperação de áreas degradadas/proteção solo	Controle de erosão, aumento da infiltração de água no solo	+	+/-		+
Manejo animal	Melhoria/ balanceamento da dieta		+	+	+
	Agentes específicos e aditivos na dieta			+	
	Melhoramento animal e manejo geral (ex. sanidade, bem estar)		+	+	
	Manejo de dejetos (ordenha, confinamento, etc.)	+	+	+	+

Fonte: Adaptado do IPCC (SMITH et al., 2007).

Nota: + efeito líquido benéfico; – efeito líquido maléfico; +/- o efeito pode ser benéfico ou maléfico.

Técnicas agronômicas para aumento da eficiência dos processos talvez sejam as mais importantes medidas de mitigação e adaptação. A correção da acidez do solo e o equilíbrio nutricional, por exemplo, aumenta a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados, devido a maior produtividade e uso de N, reduzindo então o excedente de N e a formação de N₂O (SCHLESINGER, 1999) e favorecendo a atuação do solo como dreno de CO₂. O manejo racional de irrigação pode reduzir o excesso de umidade no solo, e assim, a formação de regiões anaeróbias que favorece a emissão de N₂O (CANTARELLA, 2007). Uma vez que o crescimento de raízes também pode ser favorecido pela correção do solo (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007), juntamente com práticas para redução da compactação, por exemplo, estas são também medidas de adaptação, pois plantas com sistema radicular mais profundo e robusto toleram mais o déficit hídrico.

O uso eficiente de N também pode reduzir perdas por lixiviação e volatilização, e assim, reduzir emissões “externas” de N₂O (SMITH et al., 2007). Além do equilíbrio nutricional, práticas como o ajuste das aplicações baseadas na estimativa precisa da necessidade das plantas, parcelamento ou formas de liberação lenta e aplicação no momento correto, também aumentam a eficiência de uso do N (CANTARELLA, 2007; SMITH et al., 2007).

A implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária, lavoura-pecuária-floresta ou pecuária-floresta, associada à recuperação de áreas degradadas, tem sido uma das medidas políticas mais defendidas no Brasil frente às mudanças climáticas. O plano ABC – Agricultura de Baixo Carbono (CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO

BRASIL, 2012) é um exemplo nacional. O Projeto Integra São Paulo: Lavoura, Pecuária, Floresta é um exemplo paulista recente (SÃO PAULO, 2013).

Existe uma variação de recomendações e sistemas de integração que influenciam a capacidade de mitigação, mas considera-se que o estoque de carbono nas camadas superficiais do solo é frequentemente maior em áreas com árvores (SMITH et al., 2007). Contudo, é importante deixar claro qual é a referência, pois o aumento de carbono no solo é particularmente claro no caso da implantação da integração em áreas agrícolas, ao passo que, solos de pastagens tendem a ter mais carbono do que os demais, inclusive quando comparado a florestas nativas (GUO; GIFFORD, 2002). Ainda, é possível que se a comparação do sistema de integração for com uma pastagem degradada, o saldo no estoque de carbono seja positivo, enquanto que se for uma pastagem “bem manejada” talvez não seja, pois fatores de manejo determinam fortemente se o solo é dreno ou fonte de carbono (FEARNSIDE; BARBOSA, 1998; RUGGIERI et al., 2011). Adicionalmente, efeitos nas emissões de N_2O e CH_4 não são bem conhecidos (ALBRECHT; KANDJI, 2003).

Neste contexto, fica claro que os sistemas de integração são principalmente métodos de recuperação das pastagens (VILELA et al., 2011). Quando comparados às condições mais frequentes das pastagens e de sistemas agrícolas de sucessão ou monocultivo, sistemas de integração proporcionam incremento da fertilidade e da atividade biológica do solo (especialmente no subsolo), aumento da reciclagem de nutrientes, melhoria das condições físicas do solo pelo efeito aglutinante da matéria orgânica, cobertura constante do solo e redução da ocorrência de erosão, melhoria do controle de plantas daninhas, pragas e doenças, dentre outros benefícios (VILELA; BARCELOS; SOUSA, 2001). Assim, além de mitigação, sistemas de integração são importantes medidas de adaptação, pelo ganho em produtividade, condicionamento de solo e maior crescimento de raízes.

O manejo do pastejo, através da frequência e intensidade da desfolha, pode influenciar o balanço de carbono na pastagem. Pastagens bem manejadas são mantidas em condições otimizadas de acúmulo de biomassa (DA SILVA; NASCIMENTO JR.; EUCLIDES, 2008). Assim, devido a maior produção, o acréscimo de carbono ao ambiente solo-planta geralmente é maior em pastagens bem manejadas do que naquelas sub ou super-pastejadas (RICE; OWENSBY, 2001). A influencia do manejo do pastejo no balanço de N_2O e CH_4 não é bem conhecida (SMITH et al., 2007). O manejo do pastejo pode também reduzir a ocorrência de fogo.

A queima de pastagens libera CH_4 e em menor extensão o N_2O . O CO_2 liberado é de origem recente e a rebrota da pastagem o reabsorve, assim ele frequentemente não é incluído

no balanço. A queima também tem os seguintes efeitos negativos: *i*) gera hidrocarbonetos e formas reativas de N, que reagem e formam ozônio troposférico (potente GEE); *ii*) produz aerossóis que podem ter efeitos de aquecimento ou resfriamento e *iii*) reduz albedo da superfície por várias semanas, causando aquecimento (SMITH et al., 2007). Desta forma, o controle do fogo, seja por supressão, queima ou retirada estratégica de contorno da vegetação (acero), ou manejo do pastejo, é importante medida de mitigação.

Várias práticas de manejo animal tem impacto nas emissões de GEE, especialmente quanto ao CH₄. Práticas para melhoria e balanceamento da dieta de animais em pastejo se relacionam principalmente ao valor nutritivo da forragem, ligada a maior quantidade de folhas, menor quantidade de colmos e material morto, com fibra de melhor degradação e teor de N e outros nutrientes adequados. Isto pode ser alcançado, pelo menos em parte, pela colheita da forragem no ponto de maturidade adequado (DA SILVA; CORSI, 2003) e pela correta adubação do solo (AGUIAR, 2011). A melhoria da qualidade da forragem (que associa valor nutritivo ao consumo), otimiza o desempenho animal. Assim, para uma mesma produção, reduz-se o número de animais ou eles são abatidos mais jovens (no caso da pecuária de corte), reduzindo a proporção de energia perdida como CH₄ (SMITH et al., 2007). Adicionalmente, com consumo e uso otimizado de proteína, reduz-se a excreção de N (DOVE, 1996) e então, as emissões de N₂O.

Existe uma gama de agentes específicos que podem ter efeito de supressão da metanogênese ruminal. Há inúmeras pesquisas em andamento, muitos com efeitos diversos e ainda inconclusivos, porém com resultados promissores. Alguns exemplos são os ionóforos, compostos halogenados, componentes de plantas (p. ex. taninos condensados, óleos essenciais e saponinas), probióticos, precursores do propionato e vacinas contra bactérias metanogênicas (SMITH et al., 2007). Sugere-se ao leitor consulta a textos específicos sobre o assunto para informação mais completa (LILA et al., 2003; MCGINN et al., 2004; NEWBOLD et al., 2002; VAN NEVEL; DEMEYER, 1995).

A emissão de CH₄, proveniente da fermentação entérica de ruminantes, varia com o sistema de produção, categoria e raça animal (PEDREIRA et al., 2009). Segundo este autor, o uso intensivo da pastagem, com altas adubações, gera mais CH₄ por dia, mas o aumento de produtividade pode compensar este efeito por unidade produzida. Da mesma forma, práticas de manejo e melhoramento animal, que influenciam na eficiência produtiva, aumentando a produção e/ou reduzindo a duração do ciclo (RUGGIERI et al., 2011), tem potencial para reduzir as emissões por kg de produto (carne, leite ou lã). Exemplos de manejo incluem sanidade, melhoria de dieta, suplementação, melhor distribuição de sombra e água, dentre

outros. A seleção animal para menor produção de metano tem sido proposta, porém ainda está limitada pela dificuldade de mensuração em escala adequada para programas de melhoramento (SMITH et al., 2007). Com o avanço das técnicas, esta limitação pode ser superada.

Dejetos animais liberam quantidades significativas de N_2O e CH_4 . Nos processos de ciclagem de nutrientes nas pastagens, a volatilização, especialmente de N, é importante via de saída (DUBEUX JR. et al., 2007). As emissões de N_2O devido aos animais em pastagem representaram 47,5% do total em solos agrícolas em 2005 (BRASIL, 2010). Várias práticas de manejo da pastagem (ajuste de adubação, manejo do pastejo, suplementação animal, etc.) influenciam na ciclagem de nutrientes (SOLLENBERGER et al., 2002). Assim, influenciam também nas emissões de GEE. Desta forma, buscar o aumento da eficiência de uso dos nutrientes, geralmente buscando melhor distribuição das excreções nas áreas de pastagens (DUBEUX JR. et al., 2011) conduz a menores emissões.

A emissão de CH_4 é particularmente acentuada em depósitos ou lagoas, devido à criação de ambiente anaeróbico. Assim, manusear dejetos em formas sólidas (p. ex. compostagem) pode reduzir a formação de CH_4 , porém isto pode aumentar a formação de N_2O (PAUSTIAN et al., 2004). A captura do CH_4 produzido, principalmente por meio de biodigestores, é técnica que tem chamado a atenção recentemente (AMARAL et al., 2004; ORRICO JR.; ORRICO; LUCAS JR., 2010). Estes podem ser utilizados principalmente em instalações de ordenha e confinamentos. Os benefícios desta prática podem ser estendidos, pois o biogás produzido pode ser utilizado como fonte de energia. Adicionalmente, a aplicação de dejetos animais em pastagens tem potencial de condicionamento do solo para plantas, sendo, portanto, medida de adaptação. Porém, é importante corretos critérios de aplicação, para reduzir perdas das diferentes formas de N.

As mudanças climáticas no estado de São Paulo proporcionarão efeitos benéficos (aumento global de produção) e maléficos (aumento da estacionalidade) nas pastagens de capim-marandu. A principal preocupação é a tendência de aumento do déficit hídrico, especialmente na primavera. De nada adianta também, se a maior produção não for convertida em produto animal. Assim, além das citadas acima, medidas de adaptação incluem o manejo ou melhoramento de plantas para maior tolerância ao déficit hídrico e o equacionamento ou convivência com o aumento de estacionalidade da produção.

Estudos avaliando respostas de plantas forrageiras sob déficit hídrico com o objetivo de estabelecer estratégias de manejo (SILVA et al., 2005) ou seleção para melhoramento genético (BELONI et al., 2013) tem sido desenvolvidos. A obtenção de resultados nesta linha

de pesquisa será importante estratégia de adaptação das plantas forrageiras em São Paulo. A convivência com a estacionalidade se refere à redução da demanda por forragem nos períodos críticos (venda ou redução da oferta para os animais). Enquanto que o equacionamento se refere às medidas diversas de conservação de forragem, que podem ser integradas, de forma eficiente, ao manejo do pastejo (BAKER, 1988; DA SILVA; NASCIMENTO JR.; EUCLIDES, 2008). O aperfeiçoamento e implantação de técnicas eficientes de ensilagem (MORAIS, 1999), fenação (PEREIRA; REIS, 1999) e diferimento (EUCLIDES et al., 2007) são os principais exemplos.

Em síntese, é possível generalizar que os impactos, pelo menos para o capim-marandu no estado de São Paulo, não são tão preocupantes quanto de outros cenários, como o acentuado déficit hídrico projetado para nordeste brasileiro (MARENGO et al., 2010). Estratégias direcionadas para aumento da produtividade por área e/ou por animal, associado ao uso eficiente dos insumos e investimentos, englobam a maioria das medidas de mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. É possível que uma integração das estratégias supracitadas seja o caminho técnico e economicamente mais adequado para as pastagens de capim-marandu no estado de São Paulo.

Sugestões de novas pesquisas incluem: *i*) ampliação da base de dados utilizada para a geração de modelos empíricos de produção de forrageiras tropicais; *ii*) experimentação para avaliar os efeitos da [CO₂] atmosférica no crescimento destas plantas; *iii*) realização de simulações de cenários futuros utilizando modelos mecanicistas, incluindo a modelagem dos impactos de estratégias de manejo (adubação, irrigação, pastejo, etc.) e *iv*) avaliação dos cenários futuros de outras forrageiras, principalmente em relação ao efeito da disponibilidade hídrica.

6 CONCLUSÃO

As mudanças climáticas afetarão, em caráter predominantemente positivo, a produção de massa seca de forragem de *B. brizantha* cv. Marandu no estado de São Paulo. O aumento absoluto do acúmulo de forragem será maior no verão do que no inverno, caracterizando um aumento da estacionalidade de produção. Efeitos negativos ocorrerão na primavera, devido ao aumento da restrição hídrica, sendo mais acentuados em solos com menor capacidade de armazenamento hídrico. Locais de temperatura mais amena, particularmente regiões de maior altitude (anexas ao extremo sul de Minas Gerais), tendem a ter incremento mais acentuado.

Existem várias medidas que devem ser eficientes na mitigação e adaptação frente às mudanças climáticas. Acredita-se que uma integração daquelas direcionadas para aumento da produtividade por área e/ou por animal, associado ao uso eficiente dos insumos e investimentos, seja importante meta a ser atingida pelo setor produtivo, frente aos cenários até então obtidos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A.P.A. **Correção e adubação do solo da pastagem**. Uberaba: AGUIAR, A.P.A., 2011. 244p.

ALBRECHT, A.; KANDJI, S.T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 99, p. 15-27, 2003.

ALMEIDA, A.C.S.; MINGOTI, R.; COELHO, R.D.; LOURENÇO, L.F. Simulação do crescimento do capim Tanzânia irrigado com base na unidade fototérmica, na adubação nitrogenada e na disponibilidade hídrica do período. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, p. 215-222, 2011.

ALVES, E.D.L.; BIUDES, M.S. VECCHIA, F.A.S. Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 1, n. 5, p.606-618, 2012.

ALVES, L.M.; MARENGO, J.A. Assessment of regional seasonal predict ability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 100, p. 337-350, 2010.

AMARAL, C.M.C.; AMARAL, L.A.; LUCAS JR., J.; NASCIMENTO, A.A.; FERREIRA, D.S.; MACHADO, M.R.F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, 2004.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 112p.(Relatório nº 3 do subprojeto Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI).

ARAÚJO, L.C. **Modelos matemáticos para estimar a sazonalidade de produção em pastagens de *Panicum maximum* cv. Mombaça, em regiões do Estado de São Paulo**. 2011. 89p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ARAÚJO, L.C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, R.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; CRUZ, P.G. Simulating Guinea grass production: empirical and mechanistic approaches. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 61-69, 2013.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.

ASSIS, J.P.; DOURADO-NETO, D.D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; BONNECARRÈRE, R.A.G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 731-737, 2006.

BAARS, J.A.; RADCLIFFE, J.E.; ROLLO, M.D. Climatic change effects on seasonal patterns of pasture production in New Zealand. **Proceedings of the New Zealand Grassland Association**, Canterbury, v. 51, p. 43-46, 1990.

BAKER, R.D. Grazing management and the integration of grazing and conservation. In: FRAME, J. (Ed.). **Efficient beef production from grass**. Okehampton: British Grassland Society, 1988. p. 65-77. (Occasional Symposium, 22).

BANCO DE DADOS CLIMÁTICOS DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em: 04 nov. 2013.

BELONI, T.; VIGNA, B.B.Z.; PEZZOPANE, C.G.; CRUZ, P.G.; LIMA, A.G.; SANTOS, P.M. Root/shoot ratio *Paspalum* accessions submitted to water deficit. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 50., 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: SBZ, 2013. 1 CD-ROM.

BERNSTEIN, L.; BOSCH, P.; CANZIANI, O.; CHEN, Z.; CHRIST, R.; DAVIDSON, O.; HARE, W.; HUQ, S.; KAROLY, D.; KATTSOV, V.; KUNDZEWICZ, Z.W.; LIU, J.; LOHMANN, U.; MANNING, M.; MATSUNO, T.; MENNE, B.; METZ, B.; MIRZA, M.; NICHOLLS, N.; NURSE, L.; PACHAURI, R.; PALUTIKOF, J.; PARRRY, M.; QIN, D.; RAVINDRANATH, N.H.; REISINGER, A.; REN, J.; RIAHI, K.; ROSENZWEIG, C.; RUSTICUCCI, M.; SCHNEIDER, S.; SOKONA, Y.; SOLOMON, S.; STOTT, P.; STOUFFER, R.; SUGIYAMA, T.; SWART, R.J.; TIRPAK, D.; VOGEL, C.; YOHE, G. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2007. p 26-73. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

BLACK, T.L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast example. **Weather and Forecasting**, Boston, v. 9, p. 265-278, 1994.

BLAIN, G.C. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 114-124, 2010.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G.Y. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 99-128.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-geral de mudanças globais de clima. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. 280p.

CALLEGARI-JACQUES, S.M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255p.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANZIANI, P.O.; BENITEZ, G.C. Climate Impacts of Deforestation/Land-Use Changes in Central South America in the PRECIS Regional Climate Model: Mean Precipitation and Temperature Response to Present and Future Deforestation Scenarios. **The Scientific World Journal**, New York, v. 2012, n. 972672, p. 1-20, 2012.

CARROLL, J.C. Effects of drought, temperature and nitrogen on turfgrasses. **Plant physiology**, Waterbury, p. 19-36, 1941.

CARVALHO, J.R.P.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Kalman filter and correction of the temperatures estimated by PRECIS model. **Atmospheric Research**, Aubière, v. 102, p. 218-226, 2011.

CECATO, U.; YANAKA, F.Y.; FILHO, M.R.T.B.; SANTOS, G.T.; CANTO, M.W.; ONORATO, W.M.; PETERNELLI, M. Influência da adubação nitrogenada e fosfatada na produção, na rebrota e no perfilhamento do capim-marandu (*Brachiaria brizantha* [Hochst] Stapf. cv. Marandu). **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v. 22, n. 3, p. 817-822, 2000.

CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, n. 635-653, 2012.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **ABC: Agricultura de Baixo Carbono por que investir?**. Brasília: Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2012. 44 p. Guia de financiamento para agricultura de baixo carbono. Disponível em: <<http://agriculturabaixocarbono.files.wordpress.com/2012/01/cartilhaabcweb.pdf>> Acesso em 04 nov. 2013.

COOK, B.G.; PENGELLY, B.C.; BROWN, S.D.; DONNELLY, J.L.; EAGLES, D.A.; FRANCO, M.A.; HANSON, J.; MULLEN, B.F.; PARTRIDGE, I.J.; PETERS, M.; SCHULTZE-KRAFT, R. **Tropical Forages: an interactive selection tool**. Brisbane: CSIRO, DPI&F, CIAT, ILRI, 2005. 1 CD-ROM.

COOPER, J.P.; TAITON, N.M. Light and temperature requirements for growth of tropical and temperate grasses. **Herbage Abstracts**, Farnham Royal, v. 38, p. 167-176, 1968.

CRUZ, P.G. **Produção de forragem em *Brachiaria brizantha*: adaptação, geração e avaliação de modelos empíricos e mecanicistas para estimativa do acúmulo de forragem**. 2010. 102p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CRUZ, P.G.; SANTOS, P.M.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; ARAUJO, L.C. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.7, p.675-681, 2011.

DA SILVA, S.C.; CORSI, M. Manejo do pastejo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 20., 2003, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2003. p. 155-185.

DA SILVA, S.C.; NASCIMENTO JR., D.; EUCLIDES, V.B.P. **Pastagens**: conceitos básicos, produção e manejo. Viçosa: Suprema, 2008. 115p.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G.C.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007.

DETOMINI, E.R. Pastagens. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. (Ed.). **Manual de Fisiologia Vegetal**: fisiologia de cultivos. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2008. p. 787-812.

DECISION SUPORT SYSTEM FOR AGROTECHNOLOGY – DSSAT. Disponível em: <<http://dssat.net/>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: III. Modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 58-61, 1998a.

DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 46-50, 1998b.

DOVE, H. The ruminant, the rumen and the pasture resource: Nutrient Interactions in the grazing animal. In: HODGSON, J.; ILLIUS, A.W. (Ed.). **The ecology and management of grazing**. Wallingford: CAB International, 1996. p. 219-246.

DUBEUX JR., J.C.B.; SOLLENBERGER, L.E.; MATHEWS, B.W.; SCHOLBERG, J.M.; SANTOS, H.Q. Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 3, p. 915-928, 2007.

DUBEUX JR., J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M.A.; MELLO, A.C.L.; SILVA, H.M.S.; LIRA, C.C. A ciclagem de nutrientes no contexto do manejo das pastagens. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 8., 2011, Lavras. **Anais...** Lavras: Suprema, 2011. p. 9-30.

EDWARDS, G.E.; KU, M.S.B.; MONSON, R.K. **C₄ photosynthesis and its regulation**. In: BARBER, J.; BAKER, N.R. (Ed.). **Photosynthetic mechanisms and the environment**. Amsterdam: Elsevier Science, 1985. p. 287-327.

ETA MODEL. Disponível em: <<http://etamodel.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 17 set. 2013.

EUCLIDES, V.P.B.; FLORES, R.; MEDEIROS, R.N.; OLIVEIRA, M.P. Diferimento de pastos de braquiária cultivares Basilisk e Marandu, na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.2, p.273-280, 2007.

EUCLIDES, V. P. B.; VALLE, C. B.; MACEDO, M. C. M.; ALMEIDA, R. G.; MONTAGNER, D. B.; BARBOSA, R. A. Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.39, p.151-168, 2010.

FEARNSIDE, P.M.; BARBOSA, R.I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 108, p. 147-166, 1998

FITZPATRICK, E.A.; NIX, H.A. The climatic factor in Australian grassland ecology. In: MOORE, R.M. (Ed.). **Australian grasslands**. Canberra: Australian National University Press, 1973. chap. 1, p. 3-36.

GENEVILLE, MS. Modelo de simulação do balanço hídrico e do crescimento de uma pastagem de gramínea para a região de Mato Grosso do Sul. In: SEMINÁRIO SOBRE A APLICAÇÃO DE UM ENFOQUE DE SISTEMAS NA PESQUISA DE PRODUÇÃO ANIMAL, 2., Campo Grande, 1978. **Anais...** Campo Grande: EMBRAPA Gado de Corte, 1984. p. 63-71.

GIMENEZ, A. **Climate Change and Variability in the Mixed Crop/Livestock Production Systems of the Argentinean, Brazilian and Uruguayan Pampas**. Washington: The International STARTS secretariat, 2006. 54p. A Final Report Submitted to Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), Project n. LA 27. Disponível em: <www.start.org> Acesso em: 29 out. 2013.

GIRALDO, L.M.; LIZCANO, L.J.; GIJSMAN, A.J.; RIVERA, B.; FRANCOL, H. 1998. Adaptation of DSSAT model to simulate the production of *Brachiaria decumbens*. **Pasturas Tropicales**, Cali, v. 20, p. 2-12, 1998.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C.A.; BANKS, H.; GREGORY, J.M.; JOHNS, T.C.; MITCHELL, J.F.B.; WOOD, R.A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 16, p. 147-168, 2000.

GRABLE, A.R. The future of applied plant growth modeling. In: WISIOL, K.; HESKETH, J.D. (Ed.). **Plant growth modeling for resource management: current models and methods**. Boca Raton: CRC Press, 1987. p. 141-156.

GUO, L.B.; GIFFORD, R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analyses. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, p. 345-360, 2002.

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J.A.; THOMAZ, M.C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do século XXI. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2011. cap. 2, p. 41-74.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; MARENGO, J.; GHINI, R. Cenários climáticos futuros para o Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. p. 27-73.

HANSON, J.D.; PARTON, W.J.; INNIS, G.S. Plant growth and production of grassland ecosystems: a comparison of modelling approaches. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 29, p. 131-144, 1985.

HODGSON, J.; DA SILVA, S.C. Options in tropical pasture management. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39., 2002, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2002. p.180-202.

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

HORIKOSHI, A.S; FISH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté-SP, v. 2, n. 2, p. 33-46, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Disponível em: <<http://www.ipef.br/geodatabase/mapas.asp>>. Acesso em: 18 out. 2013.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 20 out. 2013.

INTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Séries estatísticas**. Disponível em: <http://serieestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=0&no=1>. Acesso em: 23 nov. 2011.

JANJIC, Z.I. The step-mountain eta coordinate model: further development of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure scheme. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 122, p. 927-945, 1994.

JONES, R.G.; NOGUER, M.; HASSELL, D.; HUDSON, D.; WILSON, S.; JENKINS, G.; MITCHELL, J. **Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS**. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2004. 40p.

KEATING, B.A.; CARBERRY P.S.; HAMMER, G.L.; PROBERT M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH D., HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 18, p. 267-288, 2003.

KELLER-GREIN, G.; MAASS, B.L.; HANSON, J. Natural variation in *Brachiaria* and existing germplasm collections. In: MILES, J.W.; MAASS, B.L.; do VALLE, C.B. (Ed.). **Brachiaria: Biology, Agronomy and Improvement**. Cali: CIAT, EMBRAPA, 1996. p.16-42.

KELLY, T.C. **A bioeconomic system approach to sustainability analysis at the farm level**. 1995. 114p. Thesis (Ph.D. in Agronomy) – University of Florida, Gainesville, 1995.

KINIRY, J.R.; BURSON, B.L.; EVERS, G.W.; WILLIAMS, J.R.; SANCHEZ, H.; WADE, C.; FEATHERSTON, J.W.; GREENWADE, J. Coastal Bermudagrass, Bahiagrass, and Native Range Simulation at Diverse Sites in Texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 450-461, 2007.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LARA, M.A.S. **Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de *Brachiaria* spp. às variações estacionais da temperatura do ar e do fotoperíodo**. 2007. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

LARA, M.A.S.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; PEDREIRA, B.C.; MORENO, L.S.B.; ALDERMAN, P.D. Predicting growth of *Panicum maximum*: an adaptation of the CROPGRO - Perennial Forage Model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, p. 600-611, 2012.

LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J.; ILLIUS, A.W. (Ed.). **The ecology and management of grazing**. Wallingford: CAB International, 1996. p. 3-35.

LILA, Z.A.; MOHAMMED, N.; KANDA, S.; KAMADA, T.; ITABASHI, H. Effect of sarsaponin on ruminal fermentation with particular reference to methane production in vitro. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 86, p. 330-336, 2003.

LUDLOW, M. Stress physiology of tropical pasture plants. **Tropical grasslands**, Brisbane, v. 14, n. 3, p. 136-145, 1980.

LUDLOW, M.M.; WILSON, G.L. Photosynthesis of tropical pasture plants. I. Illuminance, carbon dioxide concentration, leaf temperature, and leaf-air vapor pressure difference. **Australian Journal of Biological Sciences**, Melbourne, v. 24, p. 449-470, 1971.

MACADAM, J.W.; NELSON, C.J. Physiology of Forage Plants. In: BARNES, R.F.; NELSON, C.J.; COLLINS, M.; MOORE, K.J. **Forages: an introduction to grassland agriculture**. 6th ed. Ames: Iowa State Press, 2003. v.1 556p.

MAGRIN, G.; GARCIA, G.; CHOQUE, D.C.; GIMENEZ, J.C.; MORENO, A.R.; NAGY, G.J.; NOBRE, C.A.; VILLAMIZAR, A. Latin America. In: **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**, Cambridge, UK, 2007. p. 581-615. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

MARENGO, J.A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 212p. (Série Biodiversidade, 26).

MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L.M.; VALVERDE, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, West Sussex, v. 29, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; ALVES, L.M.; CUADRA, S.V.; VALVERDE, M.C.; TORRES, R.R.; SANTOS, D.C. FERRAZ, S.E.T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W.R. SANTOS, D.C.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J. GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana´ River basins. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, p. 1829-1848, 2012.

MARI, L.J. **Intervalo entre cortes em capim-marandu (*Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu):** produção, valor nutritivo e perdas associadas à fermentação da silagem. 2003. 138p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.Q.; JUSTIN, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 117, p. 227-239, 2013.

MCGINN, S.M.; BEAUCHEMIN, K.A.; COATES, T.; COLOMBATTO, D. Methane emissions from beef cattle: effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. **Journal of Animal Science**, Albany, v. 82, p. 3346-3356, 2004.

MENDONÇA, F.; RASSINI, J. **Temperatura-base inferior e estacionalidade de produção de gramíneas forrageiras tropicais.** São Carlos: EMBRAPA Pecuária Sudeste, 2006. 9p. (Circular técnica, 45)

MESINGER, F.; JANJIC, Z.I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D.G. The step-mountain coordinate model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 116, p. 1493-1518, 1988.

MILES, J.W.; VALLE, C.B.; RAO, I.M.; EUCLIDES, V.P.B. *Brachiaria* grasses. In: MOSER, L.E.; BURSON, B.L.; SOLLENBERGER, L.E. (Ed.). **Warm-season (C4) grasses.** Madison: ASA: SSSA, 2004. p. 745-783.

MIRANDA, J.I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas.** 2. ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2010. 425p.

MOORE, A.D.; DONNELLY, J.R.; FREER, M. GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture sub models, and the GrassGro DSS. **Agricultural Systems**, Barking, v. 55, p. 535-582, 1997.

MOORE, K.J.; BOOTE, K.J.; SANDERSON, M.A. Physiology and developmental morphology. In: MOSER, L.E.; BURSON, B.L.; SOLLENBERGER, L.E. (Ed.). **Warm-season (C4) grasses.** Madison: ASA: SSSA, 2004. p. 745-783.

MORAIS, J.P.G. Silagem de gramíneas tropicais. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 7., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1999. p. 89-95.

MOSIER, A.R. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 228, p. 17-27, 2001.

MOTA, F.S.; BERNY, Z.B.; MOTA, J.F.A.S. Índice climático de crescimento de pastagens naturais no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, p. 453-472, 1981.

NEWBOLD, C.J.; OUDA, J.O.; LÓPEZ, S.; NELSON, N.; OMED, H.; WALLACE, R.J.; MOSS, A.R. Propionate precursors as possible alternative electron acceptors to methane in ruminal fermentation. In: TAKAHASHI, J.; YOUNG, B.A. (Eds.). **Greenhouse Gases and Animal Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2002. p. 151-154.

NOBRE, C.A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. **Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21**. Brasília: Parcerias Estratégicas, n. 27, p. 19-42, 2008. (Edição especial Mudanças do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação).

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

ORRICO JR., M.A.P.; ORRICO, A.C.A.; LUCAS JR., J. Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.386-394, 2010.

OVERMAN, A.R.; ANGLE, A.E.; WILKINSON, R. Evaluation of an Empirical Model of Coastal Bermudagrass Production. **Agricultural Systems**, Barking, v. 28, p. 57-66, 1988.

OVERMAN, A.R.; NEFF, C.R.; WILKINSON, S.R.; MARTIN, F.G. Water, harvest interval, and applied nitrogen effects on forage yield of Bermudagrass and Bahiagrass. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 1011-1016, 1990.

PARSONS, A.J.; JOHNSON, I.R.; HARVEY, A. Use of a model to optimize the interaction between frequency and severity of intermittent defoliation and to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 43, n. 1, p. 49-59, 1988.

PAUSTIAN, K.; BABCOCK, B.A.; HATFIELD, J.; LAL, R.; MCCARL, B.A.; MCLAUGHLIN, S.; MOSIER, A.; RICE, C.; ROBERTSON, G.P.; ROSENBERG, N.J.; ROSENZWEIG, C.; SCHLESINGER, W.H.; ZILBERMAN, D. **Agricultural Mitigation of Greenhouse Gases: Science and Policy Options**. Ames: Council on Agricultural Science and Technology, 2004. 120p. Report R141 2004.

PEDREIRA, B.C.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; LARA, M.A.S.; ALDERMAN, P.D. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, p. 370-379, 2011.

PEDREIRA, M.S.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M.A.; FRIGHETTO, R.; OLIVEIRA, S.G.; BERTCHIELLI, T.T. Ruminal methane emission by dairy cattle in Southeast Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.66, n. 6, p.742-750, 2009.

PEDRO JR., M.J. Índice climático de crescimento para gramíneas forrageiras no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v 54, p. 427-435, 1995.

PEREIRA, J.R.A.; REIS, R.A. Feno. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 7., 1999, Piracicaba. **Anais...**Piracicaba: FEALQ, 1999. p. 123-146.

PEZZOPANE, J.R.M.; SANTOS, P.M.; BETTIOL, G.M.; BOSI, C.; PETINARI, I.B. **Zoneamento de aptidão climática para os capins marandu e tanzânia na região sudeste do Brasil**. São Carlos: EMBRAPA Pecuária Sudeste, 2012a. 27 p. (Documentos, 108).

PEZZOPANE, J.R.M.; SANTOS, P.M.; MENDONÇA, F.C.; ARAUJO, L.C.; CRUZ, P.G. Dry matter production of Tanzania grass as a function of agrometeorological variables. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v 47, p. 471-477, 2012b.

PIRES, W. **Manual de pastagem**. . Viçosa: Aprenda Fácil, 2006. 302p.

PISNICHENKO, I.A.; TARASOVA, T.A. Climate version of the ETA regional forecast model. Evaluating the consistency between the ETA model and HadAM3P global model. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 99, p. 255-272, 2010.

PISNICHENKO, I.A.; TARASOVA, T.A.; FERNANDEZ, J.P.R.; MARENGO, J.A. Validation of the Eta WS regional climate model driven by boundary conditions from the HadAM3H over South America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8., 2006, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: INPE, 2006. p. 595-597.

RICE, C.W.; OWENSBY, C.E. Effects of fire and grazing on soil carbon in rangelands. In: FOLLET, R.; KIMBLE, J.M.; LAL, R. (Ed.). **The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect**. Boca Raton: Lewis Publishers, 2001. p. 323-342.

RODRIGUES, D.C. **Produção de forragem de cultivares de *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich) Staf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas**. 2004. 94p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

RUGGIERI, A.C.; BRITO, L.F.; MAGALHÃES, M.A.; AZENHA, M.V.; MEISTER, N.C. O pasto como mitigador de gases de efeito estufa na atividade pecuária. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 8., 2011, Lavras. **Anais...** Lavras: Suprema, 2011. p. 53-78.

RYMPH, S.J.; BOOTE, K.J.; IRMAK, A.; MISLEVY, P.; EVERS, G.W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: developing physiological parameters. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, Gainesville, v. 63, p. 37 -51, 2004.

SANTOS, F.G.; CHAVES, M.A.; SILVA, M.W.R.; SOARES, R.D.S.; FRANCO, I.L.; PINHO, B.D. Índice climático de crescimento para os capins *Brachiaria brizantha* cv.

Marandu, *Cynodon dactylon* cv. Tifton 85 e *Panicum maximum* cv. Tanzânia e relação com a produção de massa seca. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 9, p. 627-637, 2008.

SANTOS, P.M.; PEZZOPANE, J.R.M.; BETTIOL, G.M. **Zoneamento de riscos climáticos para a semeadura do capim-marandu em municípios do estado de São Paulo**. São Carlos: EMBRAPA Pecuária Sudeste, 2010, 36 p. (Documentos, 101).

SANTOS, P.M.; VOLTOLINI, T.V.; CAVALCANTE, A.C.R.; PEZZOPANE, J.R.M.; MOURA, M.S.B.; SILVA, T.G.F.; BETTIOL, G.M.; CRUZ, P.G. Mudanças Climáticas Globais e a Pecuária: Cenários Futuros para o Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, p. 1176-1196, 2011.

SÃO PAULO (Estado). Alckmin lança projeto para recuperar pastagens degradadas do Estado de SP. **SP Notícias**, São Paulo, 01 mar. de 2013. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/lenoticia.php?id=226549>>. Acesso em: 22 out. 2013.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. **Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

SCHLESINGER, W.H. Carbon sequestration in soils. **Science**, Washington, v. 284, n. 5423, p. 2095-2099, 1999.

SILVA JR., L.C.; LUCAS, F.T.; BORGES, B.M.M.N.; SILVA, W.J. Effect of photosynthetic active radiation in growth and development of tropical forages. **FAZU em Revista**, Uberaba, v. 7, p. 63-67, 2010.

SILVA, M.M.P.; VASQUEZ, H.M.; BRESSAN-SMITH, R.E.; SILVA, J.F.C., ERBESDOBLER, E.D., ANDRADE JR, P.S.C. Respostas morfogênicas de gramíneas forrageiras tropicais sob diferentes condições hídricas do solo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.34, n.5, p.1493-1504, 2005.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; MCCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIROTENKO, O. Agriculture. In: **Climate Change 2007: Mitigation**. Cambridge, UK, and New York, USA, 2007. p. 497-540. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

SOLLENBERGER, L.E.; DUBEUX JR., J.C.B.; SANTOS, H.Q.; MATHEWS, B.W. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. 39., Recife, 2002. **Anais ...** Recife: SBZ, 2002. p. 151-179.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.205-274.

TEH, C. **Introduction to mathematical modeling of crop growth**: how the equations derived and assembled into a computer model. Boca Raton: Brown Walker Press, 2006. 256p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modeling**: a mathematical approach to plant and crop physiology. Caldwell: The Blackburn Press, 1990. 669p.

THORNTWHAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

TONATO, F.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Desenvolvimento de modelos preditores de acúmulo de forragem em pastagens tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 522-529, 2010.

TUBIELLO, F.N.; SOUSSANA, J.; HOWDEN, S.M. Crop and pasture response to climate change. **PNAS**, Washington, v. 104, n. 50, p. 19686-19690, 2007. Disponível em: <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0701728104> Acesso em: 31 out. 2013

VALLE, C.B.; MACEDO, M.C.M.; EUCLIDES, V.P.B.; JANK, L.; RESENDE, R.M.S. Gênero *Brachiaria*. In: FONSECA, D.M.; MATUSCELLO, J.A. (Ed.). **Plantas Forrageiras**. Viçosa: Editora UFV, 2010. p. 30-77.

VAN NEVEL, C.J.; DEMEYER, D.I. Lipolysis and biohydrogenation of soybean oil in the rumen in vitro: Inhibition by antimicrobials. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 78, p. 2797-2806, 1995.

VILELA, L.; BARCELOS, A.O.; SOUSA, D.M.G. **Benefícios da integração entre lavoura e pecuária**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2001. 21p. (Documentos, 42).

VILELA, L.; JÚNIOR, R.G.; MARCHÃO, R.L.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G.A. O papel da integração lavoura-pecuária na recuperação de pastagens degradadas. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 8., 2011, Lavras. **Anais...** Lavras: Suprema, 2011. p. 37-52.

VILLA NOVA, N.A.; CARRETERO, M.V.; SCADUA, R.A. Um modelo de avaliação do crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1983. p. 31-48.

VILLA NOVA, N.A.; BARIONI, L.G.; PEDREIRA, C.G.S.; PEREIRA, A.R. Modelo para previsão de produtividade do capim elefante cv. Napier em função da temperatura do ar, fotoperíodo e frequência de desfolha. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, p. 75-79, 1999.

VILLA NOVA, N.A.; TONATO, F.; PEDREIRA, C.G.S.; MEDEIROS, H.R. Método alternativo para cálculo da temperatura base de gramíneas forrageiras. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 545-549, 2007.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Climatic change:** report of a working group of the Commission for Climatology. Geneva: WMO, 1966. 80 p. (Technical note, 79). Disponível em:
<http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=3849> Acesso em: 06 nov. 2013.

ZHANG, B.; VALENTINE, I.; KEMP, P.D. Spatially explicit modelling of the impact of climate changes on pasture production in the North Island, New Zealand. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 84, p. 203-216, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Mapa de acúmulo anual de forragem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu com interpolação contínua

APÊNDICE B – Mapa da variação futura do acúmulo anual de forragem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu com interpolação contínua