

Impacto da projeção de mudanças climáticas globais no zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar na América do Sul

Fábio da Silveira Castro ¹
Alexandre Cândido Xavier ²
Abrahão Alexandre Alden Elesbon ¹
José Maria de Souza ¹
Waylson Zancanella Quartezi ³
Luciano Roncetti Pimenta ⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES
Av. Arino Gomes Leal – N^o1700, Santa Margarida, CEP 29700-660 - Colatina - ES, Brasil
{fabiosilveira, Abrahao, jmsouza}@ifes.edu.br

² Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo - CCA-UFES
Caixa Postal 16, S/N, Alto Universitário, CEP 29500-000, Alegre - ES, Brasil
xavier@cca.ufes.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES
Rod. Montanha x Vinhático, km 01, Palhinha, CEP 29890-000 - Montanha - ES, Brasil
waylson.quartezi@ifes.edu.br

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES
Rod. Rodovia Miguel Curry Carneiro, Santa Luzia, CEP 29830-000 – Nova Venécia - ES,
Brasil
luciano.pimenta@ifes.edu.br

Abstract. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) through its Fourth Assessment Report of Global Climate Change (IPCC-AR4), published in 2007, assign emissions of greenhouse gases as the main cause of the increase in average temperatures and alert an increase between 1.8 °C and 6.4 °C until 2100, thus being able to modify the climatic aptitude for crops in different regions of the planet. Therefore, a necessity exists to replace fossil fuels with renewable and clean energy sources such as ethanol. The cane sugar, therefore, presents itself as a strategic crop for ethanol production. The study objective: elaborate the agroclimatic zoning of cane sugar to South America considering the climate for future reference and 2050, in function to the emission scenario A1B considered pessimistic and using a balance between all energy sources. For the development of agroclimatic zoning proceeded to calculate the water balance (reference and future) of culture by the method of Thornthwaite & Mather (1955). For the reference scenario used data from monthly averages of precipitation and temperature from the CRU, while for future projections, data from the Multimodel anomalies (*ensemble*) - MM for the 2050. Based on thematic maps reclassified on annual water deficit, annual mean temperature, annual water surplus and the Index Satisfaction of Water Requirements (ISNA) held an overlay of this information thus obtaining the final maps of agroclimatic zoning of cane sugar. The unfit areas correspond to most of South America and a substantial transition between the classes of weather ability of culture.

Palavras-chave: global warming, water balance of culture, zoning agroclimatic, sugarcane, aquecimento global, balance hídrico da cultura, zoneamento agroclimático, cana-de-açúcar.

1. Introdução

Os riscos decorridos das mudanças climáticas globais, sejam naturais ou pela ação antrópica, têm levado grande preocupação à comunidade científica. Para estudar tais mudanças o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) fornece informações científicas através de relatórios sobre as mudanças do clima que já aconteceram e que podem vir a acontecer no mundo (IPCC, 2007).

Segundo o IPCC (2007), as mudanças climáticas referem-se a uma variação estatisticamente significativa nas condições médias do clima por um longo período como décadas ou mais. Ele ainda alerta através de relatórios para um aumento médio na temperatura global entre 1,8 °C e 4,0 °C até 2100 e, caso a população e a economia continuarem a crescer rapidamente e se for mantido o consumo intenso de combustíveis fósseis, esse aumento será ainda maior chegando a 6,4 °C.

Buckeridge et al. (2008), afirmam que a queima de combustíveis fósseis, a modificação do uso ou cobertura do solo e o crescimento populacional vêm colaborando para o aumento do aquecimento global e as alterações que estão ocorrendo no clima do planeta.

De acordo com Furtado et al. (2011), o etanol é uma fonte de energia renovável e limpa para o meio ambiente e pode ser produzido a partir da cana-de-açúcar, atenuando o efeito das emissões de gases de efeito estufa, mitigando possíveis impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas, principalmente pelo setor de transportes que contribui com cerca de 50% das emissões de CO₂ proveniente da queima de combustíveis fósseis (Goldemberg, 2011).

A expansão das áreas com a implantação da cultura da cana-de-açúcar para a produção de etanol, uma vez que poderia amenizar o efeito do aquecimento global, já que estaria relacionada à diminuição das emissões de combustíveis fósseis. Porém, para identificar as áreas potencialmente favoráveis à cultura da cana-de-açúcar, é importante observar as condições climáticas da região, afim de atender as exigências da cultura, tornando-se, portanto, relevante à elaboração de zoneamentos agroclimáticos. Estes são consideradas ferramentas de fundamental importância na delimitação de áreas climaticamente favoráveis para diversas culturas agrícolas, auxiliando na organização, planejamento das atividades agrícolas e o uso dos recursos naturais de maneira racional, de modo a refletir na otimização dos investimentos Sedyama et al. (2001); Assad et al., (2013).

Mediante ao exposto, o objetivo do presente trabalho foi elaborar o zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na América do Sul, considerando o clima de referência 1961-1990 (década de 1980) e o cenário A1B de mudanças climáticas projetadas para o período de 2040-2069 (década de 2050), utilizando dados do Multimodel (*ensemble*) – MM, que é a média da combinação dos 22 modelos climáticos globais do IPCC-AR4 (quarto relatório do IPCC) na simulação dos dados climáticos das variáveis climatológicas, temperatura do ar e precipitação pluviométrica.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

A região de estudo corresponde ao território da América do Sul, com área total de 17.632.900 km². Situa-se geograficamente entre os meridianos 83° e 33° de longitude oeste e entre os paralelos 58° de latitude Sul e 15° de latitude Norte, compreendendo os países da Argentina, Bolívia, Brasil, Colômbia, Chile, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Paraguai, Peru, Suriname, Uruguai e Venezuela, conforme apresentado na Figura 1.

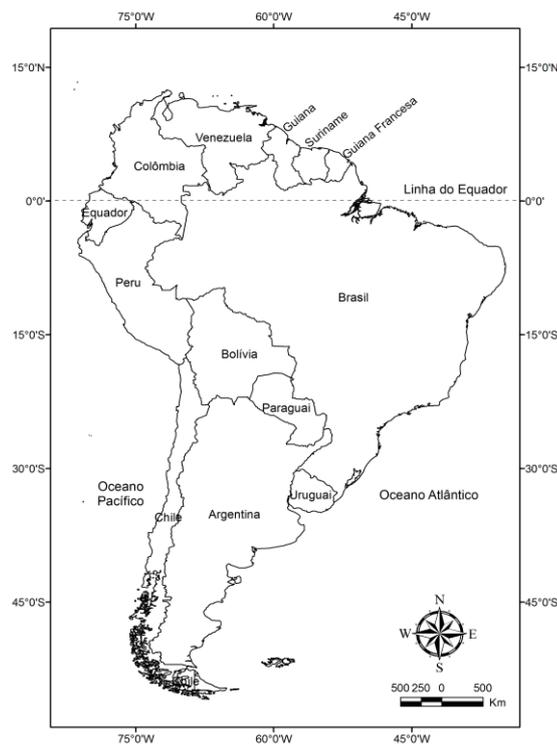


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2 Aquisição e tratamento dos dados climatológicos para o zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar

Para elaborar o zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar representando o clima referência do globo terrestre, utilizaram-se as normais climatológicas da base de dados observacionais proveniente da “University of East Anglia”/“Climate Research Unit” (CRU), disponibilizada gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.cru.uea.ac.uk/data>. Foram considerados os dados médios das variáveis climáticas temperatura do ar e precipitação pluviométrica em escala mensal compreendidos no período de 1961-1990 (década de 1980), oriundos de diversas estações meteorológicas distribuídas ao longo da superfície terrestre disponível no formato matricial (grid) com resolução espacial 10' x 10' (New et al., 2002).

Para realizar as simulações da projeção futura para a década de 2050, utilizaram-se as médias das anomalias de temperatura do ar e precipitação pluviométrica de todos os diferentes modelos climáticos globais provenientes do IPCC-AR4, ao qual denominamos de Multimodel (ensemble) – MM. O cenário de emissão utilizado foi o A1B (SRA1B-30b compatível com o quarto relatório de avaliação de mudanças climáticas) que descreve um uso equilibrado e eficiente de fontes de energia. Todos os dados de simulações climáticas utilizados no presente estudo foram adquiridos gratuitamente no site do IPCC no endereço eletrônico http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_AR4/index.html.

Como os dados dos MCGs do IPCC-AR4 encontravam-se disponíveis em grades com diferentes resoluções espaciais quando comparado aos dados do CRU, procedeu-se a regionalização dos dados, ou seja, a redução da escala dos dados do Multimodel (ensemble) – MM, para a mesma resolução do CRU (10' x 10') de latitude e longitude. Para realizar tal procedimento, utilizou-se o método de interpolação do tipo linear devido a sua simplicidade Burden e Faires, (2008), construída por meio de funções em linguagem de programação que foram implementadas no software Matlab 6.5®.

2.3 Elaboração do balanço hídrico da cultura

De posse dos dados de temperatura média do ar e da precipitação pluvial mensal proveniente do CRU e do IPCA-R4 ajustados para o futuro, realizaram-se as simulações dos balanços hídricos da cultura pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) para o clima referência (1961-1990) e para a projeção futura centrado na década de 2050 (2040 a 2069), para o cenário A1B. Iniciou-se o balanço hídrico no fim do período chuvoso conforme indicado por Pereira, et al. (2002), adotando a Capacidade de Armazenamento Disponível (CAD), que é o máximo de água que o solo pode reter de 100 mm, assim como é indicada para a maioria das culturas agrícolas anuais Pereira et al. (2002).

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é um parâmetro necessário para o cálculo do balanço hídrico da cultura e expressa a demanda de água utilizada por uma cultura em qualquer fase de seu desenvolvimento, desde o plantio/semeadura até a colheita, quando não houver restrição hídrica. Para realizar o cálculo da estimativa da ET_c, foi necessário obter primeiro a evapotranspiração potencial corrigida (ETP_c). Os métodos desenvolvidos são empíricos e foram calculados através da (Equações 1 e 2).

$$ETP_c = ETP * \frac{ND}{30} * \frac{N}{12} \quad (1)$$

em que:

ETP_c = evapotranspiração potencial corrigida;

ND = número de dias do mês em questão; e

N = fotoperíodo médio daquele mês.

$$ET_c = Kc * ETP_c \quad (2)$$

em que:

ET_c = evapotranspiração da cultura (mm);

ETP_c = evapotranspiração potencial corrigida ou de referência (mm); e

Kc = coeficiente de cultura, este varia em função dos diferentes períodos de crescimento e desenvolvimento da cultura (adimensional).

As fases fenológicas e a duração dos períodos para a cultura da cana-de-açúcar com ciclo de 1 ano foram adaptados de Barbieri et al. (1982) e Allen et al. (1998). O kc expressa a demanda de água pela planta em cada fase de seu desenvolvimento, sendo utilizado para calcular a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em cada uma dessas fases, para isso, utilizou-se o kc recomendado no boletim da Food and Agriculture Organization FAO-56 Allen et al. (1998), conforme mostrado na Tabela 1

Tabela 1. Duração média das fases fenológicas e o coeficiente de cultura (kc) da cultura da cana-de-açúcar com ciclo de 1 ano.

*Fases Fenológicas	*Duração em meses	**Coeficiente Kc
Brotação e Emergência	1	0,4
Perfilhamento	2	1,25
Desenvolvimento Vegetativo	7	1,25
Maturação	2	0,75

Fonte: *Adaptado de Barbieri, 1982.

**Baseado em Doorenbos e Pruitt (1977) - FAO n.24 e Allen et al. (1998) - FAO n.56.

Calculou-se também o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) que corresponde a um a valor adimensional variando de zero (0) a um (1), sendo que valores próximos a 1 indicam suprimento hídrico ideal. Esse parâmetro foi de fundamental importância para delimitar áreas com baixos riscos de ocorrência de estresses hídricos no território da América do Sul. Assim, o ISNA da cana-de-açúcar foi definido pela (Equação 3).

$$ISNA = ETr / ETc \quad (3)$$

em que:

ISNA = índice de satisfação das necessidades de água;

ETr = evapotranspiração real da cultura (mm); e

ETc = evapotranspiração da cultura (mm).

Com os dados calculados, foi possível gerar os mapas de evapotranspiração potencial (ETp), evapotranspiração real (ETr), armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica anual (Da) e excedente hídrico anual (Ea), espacializados para a resolução do CRU (10' x 10'), através do acoplamento dos dados da projeção futura do IPCC aos dados do CRU.

É importante ressaltar que o balanço hídrico foi realizado célula a célula, considerando as diferenças regionais projetadas pelos modelos do IPCC para o clima futuro, onde cada célula possui seu valor correspondente à variável em estudo de acordo com seu posicionamento geográfico.

2.4 Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)

O zoneamento agroclimático consistiu essencialmente na delimitação das zonas de aptidão para o cultivo da cultura estudada, na qual foram estabelecidas as condições hídrico-termais ideais para o seu desenvolvimento e produtividade.

A partir dos mapas de temperatura média, deficiência hídrica anual, excedente hídrico anual e do índice de satisfação da necessidade de água anual, delimitou-se as zonas de aptidão climática para definir as áreas de exploração da cana-de-açúcar, considerando o cenário referência e a projeção futura década de 2050 para a América do Sul, classificando-as em: aptas, restritas por (Da), restritas por (Ta) e inaptas ao cultivo.

Os parâmetros térmicos e hídricos estabelecidos para avaliar as áreas com aptidão para a implantação e desenvolvimento da cultura foram baseados nos trabalhos realizados por Brunini et al. (2008) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação de riscos e faixas de aptidões térmicas e hídricas para a cultura da cana-de-açúcar.

Regiões	Risco	Classificação	*Ta (°C)	Da (mm)	Ea (mm)	ISNA
Aptas	Baixo	Indicada	> 20	< 200	< 800	> 0,6
Restritas por Da	Baixo	Indicada	> 20	200 ≤ Da < 400	< 800	> 0,6
Restritas por Ta	Alto	Não indicada	18 < Ta < 20	< 200	< 800	> 0,6
Inaptas	Alto	Não indicada	< 18	Da ≥ 400	> 800	< 0,6

Ta = temperatura média anual; Da = deficiência hídrica anual; Ea = excedente hídrico anual; e ISNA = índices de satisfação das necessidades de água.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2009).

*Brunini et al. (2008).

Os mapas finais do zoneamento agroclimático para o cenário referência e a projeção futura para a cultura da cana-de-açúcar foram gerados através da sobreposição de mapas que caracterizavam a aptidão térmica e hídrica satisfatórias ao desenvolvimento da cultura para a área estudada. Todas as etapas para a realização dos mapas foram realizadas em um software de SIG (ArcGis 10.0®).

3. Resultados e Discussão

Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados do impacto das projeções de mudanças climáticas globais do IPCC-AR4 para a cana-de-açúcar.

A Figura 2 apresenta os mapas temáticos do zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar para a América do Sul considerando o cenário referência (década de 1980) e a projeção climática futura do cenário A1B para a década de 2050.

De acordo com a Figura 2, observa-se que para o clima referência as zonas climatologicamente aptas para o cultivo da cana-de-açúcar correspondem a 24,8% da área de estudo, reduzindo significativamente para 15,7% na década de 2050.

Esses resultados podem ser atribuídos ao aumento na média da temperatura global e o aumento da deficiência hídrica em muitos locais da área estudada. Já as áreas restritas por (Da) aumentarão, passando de 4,2% na década de 1980 para 15,6% em 2050. Nas áreas restritas por (Da), a cultura poderá ser cultivada, porém o uso da irrigação tornará necessário.

O Uruguai terá um aumento de 15,36% de áreas aptas para a cultura. Já no Peru, observa-se uma expansão nas áreas aptas para o cultivo da cultura para a década de 2050, essas regiões provavelmente serão beneficiadas pelo aumento da temperatura. O Chile, tanto para o cenário referência, quanto para a projeção climática futura apresentam 100% da área de seu território inapta para o cultivo da cultura. Isso ocorre, pelo fato da região apresentar temperaturas muito baixas, o que não é tolerado pela cultura.

Outro aspecto importante a ser avaliado é a distribuição espacial das classes de aptidão da cana-de-açúcar, regiões que no cenário referência apresentam áreas aptas para o cultivo da cultura passarão a ser inaptas ou restritas por (Da), e outras que não possuíam aptidão se tornarão aptas, mediante ao efeito das projeções futuras de mudanças climáticas. Isso pode ser observado em diversos países, ficando bem evidenciado no estado do Amazonas pertencente à região Norte do Brasil, que para o cenário referência não apresenta áreas favoráveis para a cultura, porém com a projeção climática centrada na década de 2050, o Estado passará a possuir zonas aptas e restritas por (Da), portanto, sendo beneficiado com o incremento da temperatura, já que apresenta baixa deficiência hídrica.

Resultados concordantes foram encontrados nos estudos realizados por Oliveira et al. (2012) que apontou alto risco climático para a cultura mediante as mudanças climáticas, porém em alguns locais do Brasil observa-se o surgimento de novas áreas aptas para o cultivo

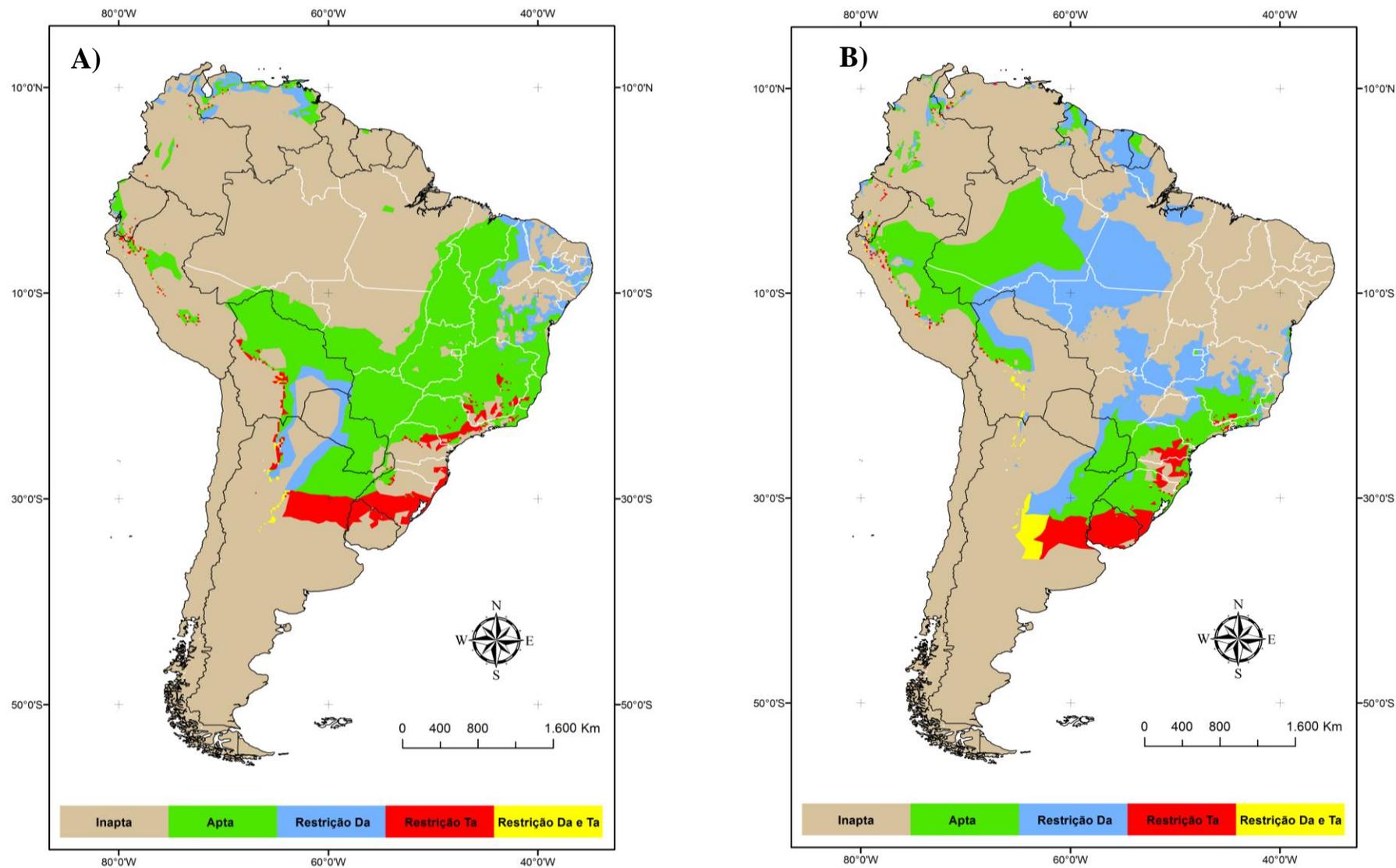


Figura 2. Zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul para o cenário referência (década de 1980) utilizando dados do CRU (A) e para a década de 2050, cenário A1B (B).

4. Conclusões

Se ocorrerem as mudanças climáticas globais projetadas pelos modelos do IPCC-AR4 ao longo da década de 2050, considerando o cenário A1B e mantidas as características genéticas da cultura, ocorrerá uma expansão das regiões inaptas para a implantação da cana-de-açúcar na América do Sul. As áreas restritas por deficiência hídrica também aumentarão, sendo estas passíveis de cultivo, porém o uso da irrigação torna-se imprescindível nessas regiões.

Referências Bibliográficas

Allen, R.A.; Pereira, S.L.; Raes, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 328p. (Irrigation and Drainage, n.56).

Assad, E. D.; Martins, S. C.; Beltrão, N. E. M.; Pinto, H. S. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.1, p. 8,2013.

Barbieri, V.; Villa Nova, N.A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR, Coordenadoria Regional Sul, p.36, 1982.

Buckeridge, M.S.; Aidar, M.P.M.; Silva, E.A.; Martinez, C.A. **Respostas de Plantas às Mudanças Climáticas Globais**. In: Buckeridge, M.S. (Org.). *Biologia e Mudanças Climáticas no Brasil*. 1.ed. São Carlos: Rima Editora, v. 1, p.77-91, 2008.

Burden, R. L.; Faires, J. D. **Análise numérica**. Cengage Learning, 8ª Ed., 2008,721p.

Brunini, O; Prado, H. do; Landell, M.G.A.; Carvalho, J.P. de; Brunini, A.; MORAIS, J.F.L. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo: aptidão edafoclimática da cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 31p, 2008.

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. 1977. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage, n.24).

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. In: Manzatto, C.V. Embrapa Solos, Rio de Janeiro-RJ, 55p, 2009.

Furtado, A.T.; Scandiffio, M.I.G.; Cortez, L.A.B. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, v.39, p.156-166, 2011.

Goldemberg, J. The role of biomass in the world's energy system. In: *Routes to cellulosic ethanol*. Buckeridge, M. S.; Goldman, G. H. (eds.). **Springer**, New York, p.3-14, 2011.

IPCC, 2007. **Climate Change 2007: Synthesis Report: Working Group contributions to the Fourth Assessment Report**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf>. Acesso em: 05 out.2013.

New, M.; Lister, D.; Hulme, M.; Makin, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v.21, p.1-25, 2002.

Oliveira, S. D.; Silva, V.P.R.; Santos, C.A.C.; Silva, M.T.; Sousa, E.P. Os Impactos das Alterações Climáticas na Cana-de-Açúcar Cultivada em Sistema de Sequeiro na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Brasília, n.11, p.170-184, 2012.

Pereira, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

Sediyama, G.C.; Melo Junior, J.C.F. de; Santos, A.R. dos; Ribeiro, A.; Costa, M.H.; Hamakawa, P.J.; Costa, J.M.N. da; Costa, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, p.501-509, 2001.

Thornthwaite, C. W.; Mather, J. R. **The water balance**. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, New Jersey, v.8, n.1, 104p., 1955.