

## Cenários Prospectivos de Mudanças Climáticas para o Estado do Tocantins

Erich Collicchio<sup>1</sup>; Humberto Ribeiro da Rocha<sup>2</sup>; Daniel de Castro Victória<sup>3</sup> e André de Moura Andrade<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Prof. Associado II da Universidade Federal do Tocantins - UFT; <sup>2</sup>Professor do Departamento de Ciências Atmosféricas/IAG/Universidade de São Paulo; <sup>3</sup>Pesquisador da Embrapa Agricultura Digital e <sup>4</sup>Engenheiro Ambiental, Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Tocantins - Semarh

### 1- Introdução

As condições climáticas influenciam diretamente nas atividades humanas, seja na produção agrícola, no sistema econômico, como também no bem-estar da população e nas suas relações sociais. Assim, o ser humano é dependente das condições que o clima lhe impõe e, está sujeito as suas variações, sejam elas positivas ou negativas.

O estado do Tocantins está sob domínio do clima tropical semiúmido, predominante na região central do Brasil, sendo caracterizado por ocorrer um período estacional seco e outro chuvoso. Apresenta normalmente uma estação com estiagem de cerca de 4 a 5 meses, e a ocorrência de chuvas concentradas no verão. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é considerado do tipo Aw – Tropical de verão úmido e período de estiagem no inverno (ROLDÃO; FERREIRA, 2019; SEAGRO, 2019).

A regionalização climática do Estado do Tocantins foi realizada adotando-se o Método de Thornthwaite (1948), que resultou na ocorrência de três grandes regiões climáticas: a) Clima úmido com moderada deficiência hídrica (B1wA'a'); b) Clima úmido subúmido com moderada deficiência hídrica (C2wA'a''); e c) Clima úmido subúmido com pequena deficiência hídrica (C2wA'a'). O tipo Clima C2wA'a'', apresenta a maior abrangência, estando distribuído em quase todo o Estado, com exceção das regiões localizadas no Bico do Papagaio (norte), oeste/sudoeste e parte do sudeste. Quanto ao tipo Clima B1wA'a', apresenta a segunda maior área de ocorrência, o qual corresponde a duas regiões descontínuas, sendo uma localizada na parte oeste/sudoeste do Estado, abrangendo de sul a norte da Ilha do Bananal e a outra envolvendo a região norte. Já a ocorrência do tipo Clima C2wA'a', com menor predominância, abrange a região sudeste do Estado (TOCANTINS, 2012).

Roldão; Ferreira (2019) realizaram outra classificação do clima, considerando 56 localidades do Estado, utilizando o mesmo método e associando-o aos valores das classes de índice de umidade (Iu) de cada tipo climático, Os tipos climáticos pelo

método são: a) Semiúmido seco (C1); b) Semiúmido (C2); c) Úmido (B1); d) Úmido (B2) e e) Úmido (B3). O tipo climático Úmido (B1) apresenta predominância no Tocantins, sendo constatado em 61% das localidades estudadas, distribuídas por todo o território. O clima Úmido (B2), é o segundo com maior ocorrência, estando presente na parte central e estendendo-se para o oeste e noroeste, sendo notado uma pequena área no sudeste do Estado. Não foi observado a ocorrência do clima tipo C1.

O aprimoramento do conhecimento acerca das características climáticas do estado do Tocantins, especialmente temperatura do ar, pluviosidade e outras variáveis do balanço hídrico é necessário e diretamente aplicável à busca de melhor entendimento sobre as tipologias de vegetação nativa, regimes fluviais e ocupação das terras, especialmente quanto aos processos produtivos relacionados às *commodities* agrícolas (ROLDÃO; FERREIRA, 2019).

Ao mesmo tempo, as mudanças climáticas que estão acontecendo no planeta, as quais são resultantes em grande parte das atividades humanas não sustentáveis, poderão refletir em amplos impactos nos sistemas naturais e antrópicos. Destaca-se que os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), têm constatado o crescente volume de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE), sendo observado os maiores registros da história no período mais recente (IPCC, 2007; IPCC, 2013; IPCC, 2021).

Nesse contexto, torna-se primordial entender seus processos, bem como realizar estudos considerando cenários futuros para o clima (SOUZA; MANZI, 2014; BRASIL, 2016; MARENGO; CHOU, 2017; ASSAD *et al.*, 2020).

“Tais alterações climáticas terão amplos efeitos no Brasil e no mundo, atingindo áreas diversas, como recursos hídricos, agricultura, energia, infraestrutura urbana e costeira, transportes e saúde, dentre outras” (ASSAD *et al.*, 2020).

Para a realização de estudos de projeções de mudanças do clima, são utilizados modelos climáticos distintos e um conjunto de cenários com especificidades relacionadas aos relatórios de avaliação do IPCC (NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2008; FBMC, 2010; CUBASCH *et al.*, 2013; MARENGO; CHOU, 2017).

As projeções de mudanças no sistema climático são produzidas usando uma hierarquia de modelos climáticos que vão desde modelos climáticos simples, passando por modelos de média complexidade, até modelos de categoria Sistema Terrestre (Earth System Models – ESM). Esses modelos simulam mudanças com base em um conjunto de cenários de forçantes antrópicas. Os cenários, chamados SRES (Special Report Emission Scenarios), que foram considerados para gerar as projeções de clima no Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) TAR e AR4 em 2007 e 2011, respectivamente, foram utilizados pelos modelos climáticos globais no âmbito do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 – CMIP3) do World Climate Research Programme (WCRP). Outro conjunto de cenários, os chamados Trajetórias de Concentração Representativa (Representative Concentration Pathways - RCP), foi utilizado pelos modelos climáticos globais, no âmbito do CMIP5. Essas projeções e simulações subsidiaram o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC AR5 (Fifth Assessment Reports) apresentados nos relatórios dos Grupos de Trabalho I (MARENGO; CHOU, 2017).

Os modelos matemáticos do sistema climático global são as melhores ferramentas para realizar projeções de cenários prováveis de mudanças climáticas para o futuro (NOBRE; SAMPAIO; SALAZAR, 2008; FBMC, 2010). Isso porque esses modelos consideram quantitativamente o comportamento dos compartimentos climáticos, vegetação, ciclagem biogeoquímica, dentre outros, bem como suas interações (FBMC, 2010). Contudo, existem fontes de incertezas inerentes às projeções do clima, associadas a estes modelos.

Entretanto, o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (2013), que refere-se às bases das ciências físicas, aponta que houve o aumento do grau de conhecimento do sistema climático em relação ao Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC, devido ao maior número de observações, com melhor qualidade, maior diversidade, maior cobertura geográfica, e melhor tratamento dos dados.

Outros modelos climáticos com resolução mais alta, foram incorporados aos estudos, bem como houve o aprimoramento dos modelos tornando-os mais realistas e com isso, favorecendo a melhor caracterização das incertezas.

Ressalta-se que ocorreu o aumento da resolução geográfica e vertical dos modelos climáticos globais, utilizados como referências nos relatórios de avaliação do IPCC desde 1990 (LENART, 2008; CUBASCH *et al.*, 2013).

Como exemplos de modelos climáticos com maior resolução, cita-se os modelos climáticos regionais (MCR), Eta MIROC5 e Eta HadGEM2 ES, aplicados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esses modelos são resultantes do *downscaling* de dois modelos climáticos globais de mudanças climáticas, o MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) e o HadGEM2 ES (Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System), respectivamente.

Nesse contexto, o IPCC (2021) destaca que, “os modelos climáticos continuam a melhorar, tornando-se mais aperfeiçoados na captura de processos complexos e de pequena escala e na simulação das condições climáticas médias atuais”.

Diante do exposto, o presente capítulo tem como objetivo de realizar um breve estudo das condições climáticas atuais e de projeções de cenários climáticos futuros do estado do Tocantins, considerando os resultados de dois modelos climáticos e de dois cenários distintos, utilizados em cada um dos relatórios de avaliação do IPCC, AR4 e AR5, para o período de 2021 a 2050.

## 2 - Procedimentos metodológicos

A área de estudo compreende o limite político-administrativo do estado do Tocantins, localizado na região Norte do Brasil, que apresenta uma área total de 277.620 km<sup>2</sup>.

Para a realização deste estudo, foi utilizado o banco de dados meteorológicos do Laboratório de Agroenergia, Uso da Terra e Mudanças Ambientais da Universidade Federal do Tocantins – LAMAM/UFT, organizado por Collicchio (2008), proveniente de 110 estações meteorológicas e pluviométricas localizadas no Tocantins e estados circunvizinhos, compreendidas entre os paralelos 4°30' e 13°30' S e meridianos 45°30' e 51°30' W (Figura 1).

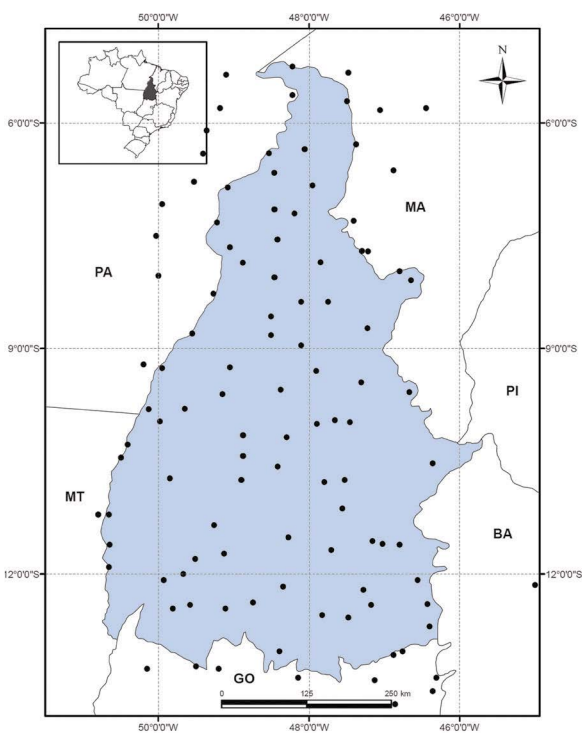


Figura 1 – Distribuição das estações meteorológicas e pluviométricas no estado do Tocantins e no seu entorno

Com base nesse banco de dados, foi apresentada uma análise da situação do clima atual, bem como serviu para projetar o clima do estado do Tocantins para o período de 2021 – 2050, tendo como referência os resultados da combinação de modelos climáticos e cenários futuros, para o referido período, relativos ao Quarto Relatório de Avaliação (AR4) e Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (Figura 2).

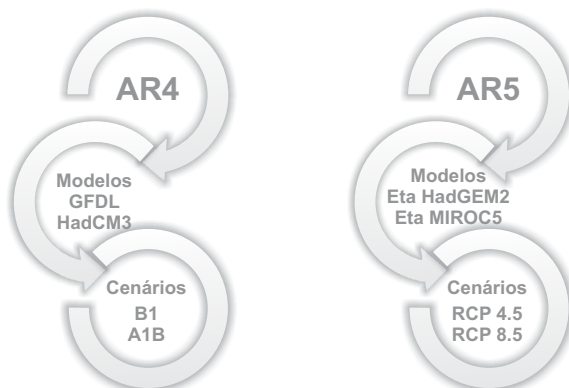


Figura 2 - Esquema mostrando os modelos climáticos e seus respectivos cenários de mudanças climáticas, considerando o Quarto e Quinto Relatórios de Avaliação do IPCC (AR4 e AR5)

Na primeira parte deste capítulo, estudou-se o clima atual e as projeções do clima do Tocantins, considerando o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4).

Apoiado nos dados observacionais, obteve-se a climatologia atual do Estado, a partir das estimativas das evapotranspirações potenciais pelo método de Thornthwaite (1948) e o cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC) de Thornthwaite; Mather (1955), de cada localidade, conforme simplificado por Pereira (2005). Para calcular o balanço hídrico, considerou-se a capacidade de água disponível do solo ( $CAD = 100 \text{ mm}$ ). Esse procedimento foi executado por meio da interface desenvolvida por Victoria *et al.* (2007), que utilizaram a calculadora de mapas do GRASS GIS, onde gerou-se mapas das temperaturas médias mensais e anuais, precipitações mensais e anuais e deficiências hídricas médias mensais e anuais, sendo esse último parâmetro resultante do BHC.

Com relação às projeções dos possíveis reflexos do clima futuro no estado do Tocantins, considerando o Relatório de Avaliação AR4, foram usados os dados de dois modelos climáticos (Atmosphere-Ocean General Circulation Models - AOGCM) que participaram dos estudos do IPCC (2007), considerando dois cenários de emissões.

Utilizou-se os dados de saída dos modelos Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL - CM 2.1), do National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, dos Estados Unidos e do Hadley Centre Coupled Model, version 3 (HadCM<sub>3</sub>), do Hadley Centre for Climate Prediction and Research, da Inglaterra, por serem discordantes quanto às estimativas de temperatura e especialmente de precipitação. Os dados provenientes dos modelos GFDL e HadCM<sub>3</sub> foram relacionados aos cenários de emissões B<sub>1</sub> (cenário de baixa emissão - otimista) e A<sub>1</sub>B (cenário intermediário), com projeções do clima para o período entre 2021 e 2050.

Visto que os dados referentes ao clima presente simulado pelos modelos, apresentam desvios em relação aos do clima observado, foi necessário fazer um procedimento de correção com o objetivo de adequar os dados simulados à realidade, utilizando-se o método conforme adotado por Minguéz *et al.* (2004) e Salati *et al.* (2007).

A partir dos dados corrigidos, procedeu-se as estimativas das evapotranspirações potenciais e o cálculo do balanço hídrico climatológico, conforme descrito anteriormente, obtendo-se assim, as temperaturas médias mensais e anuais, precipitações mensais e anuais e deficiências hídricas médias mensais e anuais para o período de 2021 e 2050, com base nos modelos GFDL e HadCM<sub>3</sub>, relacionados aos cenários B<sub>1</sub> e A<sub>1</sub>B,

As projeções de clima futuro de acordo com os dois modelos e dois cenários usados para o período do estudo, resultou em quatro simulações por parâmetro climático analisado.

Para a realização das projeções do clima para o estado do Tocantins, considerando o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), foram executadas as etapas descritas de forma resumida, conforme a seguir.

Os dados adquiridos dos dois modelos regionalizados, Eta MIROC5 e Eta HadGEM2 ES, disponibilizados pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram recortados para as dimensões geográficas e temporal de interesse, que referem-se ao estado do Tocantins e ao período de 2021 a 2050.

As médias mensais de temperatura e precipitação desses arquivos multidimensionais foram realizadas e suas correções com as médias dos dados observacionais amostrados de 110 estações espacializadas, foram feitas pelo método de Lenderink *et al.* (2007), para diminuir os erros tendenciais das variáveis estimadas, em relação às séries históricas consistidas.

Em seguida, procedeu-se o balanço hídrico de Thornthwaite; Mather (1995), utilizando a CAD = 150 mm, com uma rotina algorítmica em *Python*, desenvolvida por Victoria *et al.* (2007), e adaptada para a interface no sistema de informações geográficas, ArcGIS.

Assim sendo, foram obtidas as temperaturas médias mensais e anuais, precipitações mensais e anuais e deficiências hídricas médias mensais e anuais, entre os anos de 2021 e 2050, para os cenários tendencial (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5), considerando os modelos Eta HadGEM 2 ES e Eta MIROC5.

O uso de dois níveis de emissões, RCP 4.5 e RCP 8.5, e os dois modelos climáticos, resultaram em quatro simulações que correspondem a quatro possibilidades de projeções de clima futuro.

### 3 - Resultados da situação climática atual e dos possíveis efeitos das mudanças do clima, no estado do Tocantins para o período de 2021-2050

#### 3.1 - Situação climática atual do estado do Tocantins

Considerando a condição do clima atual do estado do Tocantins, apresenta-se a seguir uma análise qualitativa e espacial, referentes especialmente aos parâmetros climáticos/hídricos, temperatura do ar, precipitação pluviométrica e deficiência hídrica.

Com referência à estimativa da temperatura média anual do Estado, obteve-se no presente estudo, o valor de 25,7°C, variando de 23,9°C a 27,5°C, com uma amplitude térmica de 3,6°C. Pela Figura 3a, percebe-se um aumento da temperatura nos sentidos leste-oeste, sudeste-centro e de noroeste para o centro do Estado.

Nota-se compatibilidade entre os resultados observados neste trabalho, com os valores e padrões espaciais de temperatura média anual estimados por Roldão; Ferreira (2019), que consideraram os dados do projeto Reanalysis do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR).

Em relação à precipitação média anual no Tocantins, calculou-se que é de aproximadamente 1676 mm, com uma variação de 1255 a 2152 mm. Verifica-se também, uma similaridade do valor médio precipitação anual estimado por Roldão; Ferreira (2019), que foi de 1643 mm.

Percebe-se que as maiores concentrações de chuva são conferidas numa pequena porção à sudeste, e em uma área mais extensa, que abrange desde a região noroeste até a região oeste do Estado (Figura 3b).

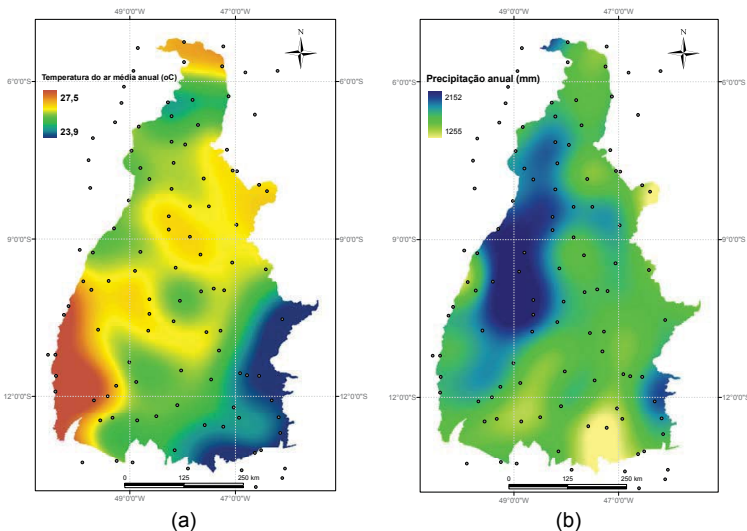


Figura 3 - (a) Temperatura do ar média anual (°C) e (b) precipitação média anual (mm) no estado do Tocantins

Moura; Vitorino; Adami (2018), ressaltam que essas regiões mais chuvosas, estão localizadas em ambientes fitofisionômicos de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, onde no contexto regional amplo, apresentam os principais sistemas geradores de chuvas no Tocantins.

Já as menores precipitações, são observadas nas regiões sudeste e nordeste do Tocantins, destacando-se o município de Paraná, localizado na região sudeste, onde verificou-se o volume pluviométrico médio anual de 422 mm, que está abaixo da média estadual (Figura 3b).

De acordo com a Figura 4, verifica-se que os meses que atingem temperaturas médias mais baixas, ocorrem em junho e julho (24,9 e 24,7 C), coincidindo com os meses mais secos, sendo observada a temperatura média mais elevada, em setembro, com 27,1 C.

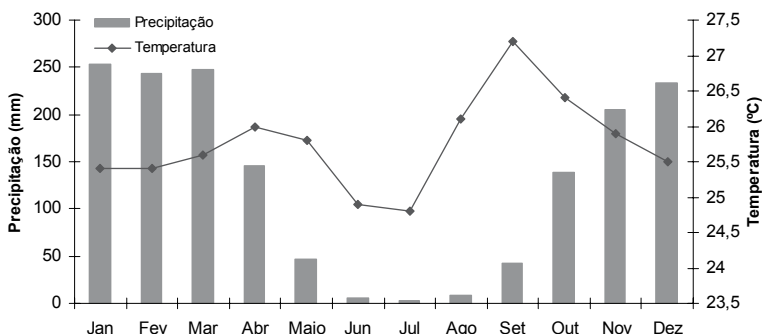


Figura 4 - Médias mensais da temperatura e totais médios mensais de precipita o, no estado do Tocantins

Nota-se que mais de 90% do total de chuvas acumuladas durante o ano, ocorrem normalmente no período de outubro a abril, sendo mais chuvoso no trimestre referente aos meses de janeiro a março, correspondendo a 47% do total anual.

A esta o da seca varia dependendo da região, de 3 a 6 meses, no entanto considerando precipita es mensais inferiores a 50 mm, o Estado apresenta em média 5 meses de seca, que inicia no mês de maio e finaliza em setembro, retratando o padrão sazonal das chuvas (Figura 4). Destaca-se que o mês de janeiro, caracteriza-se por ser o mais chuvoso (253 mm) e julho o mais seco (3 mm).

O conhecimento do balanço hídrico e da distribui o espaço-temporal da disponibilidade hídrica   importante porque auxilia na formula o de diretrizes para a implementa o de políticas, que favorecem o planejamento urbano e agroambiental, do uso racional da água, bem como fornece subsídios para a elabora o do zoneamento agrícola de risco climático e de aptidão agroclim tica para o plantio de culturas comerciais.



No que refere-se à estimativa da deficiência hídrica anual (Da) no Estado, constatou-se que variou de 245 a 587 mm, com uma amplitude de 342 mm.

Percebe-se que na região noroeste do Estado foi observada a menor deficiência hídrica. Por outro lado, as maiores deficiências hídricas foram verificadas especialmente nas regiões sudoeste, nordeste e extremo norte do Estado (Figura 5).

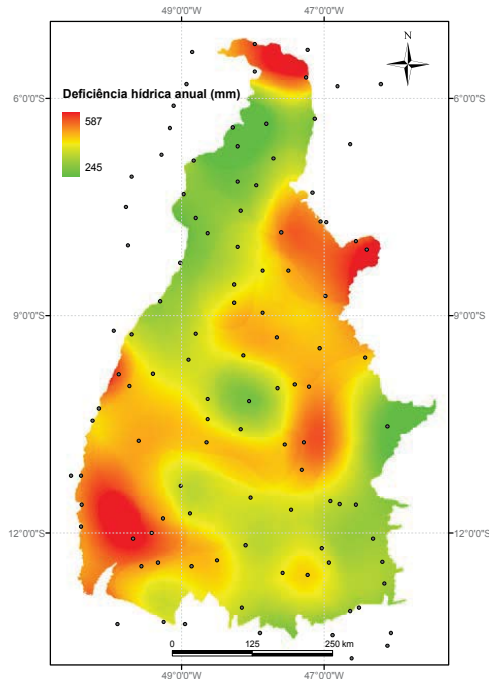


Figura 5 - Deficiência hídrica anual (em mm), no estado do Tocantins

A deficiência hídrica anual média calculada para o Tocantins, equivale a 411 mm, semelhante ao obtido por Roldão; Ferreira (2019), que foi de 414 mm.

Quando compara-se a Da do Tocantins, com outras regiões do centro-sul do país, verifica-se que é considerada elevada. Em Ituverava, no estado de São Paulo, por exemplo, onde a precipitação anual média atinge 1.460 mm, observa-se que a deficiência hídrica corresponde a 184 mm nos meses de abril a setembro, com um excedente hídrico de 464 mm nos meses de novembro a março (GARCIA, 2010). Em Jataí - Goiás, o total de chuvas é de 1.410 mm.ano<sup>-1</sup> e a evapotranspiração potencial de 613,7 mm.ano<sup>-1</sup>, mas apesar disso, o balanço hídrico aponta para um déficit hídrico anual de 107,8 mm, concentrado nos meses de junho a setembro (CRUZ; HERNANDEZ; VANZELA, 2006). Nos municípios de Sinop, Sorriso e Lucas do Rio Verde, em Mato Grosso, observam-se deficiências hídricas anuais referentes a 284 mm, distribuídas entre maio e setembro, e excedente hídrico anual de 931,34 mm concentrados entre novembro e abril (SOUZA *et al.*, 2013).

### 3.2 - Projeções do clima para o estado do Tocantins, considerando dois modelos e cenários do AR4/IPCC, para o período de 2021 a 2050

De acordo com os resultados observados na Tabela 1, a temperatura anual média da climatologia atual (25,7°C) aumentaria para ambos os modelos e cenários, sendo que o maior incremento constatado foi no Modelo/Cenário HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B, cuja temperatura atingiria 27,7°C, e a menor foi obtido no HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub>, com 27,2°C.

Quanto à amplitude de cada classe analisada de modelos/cenários, que mostra a dispersão entre os menores e maiores valores de temperatura espacializados, observa-se que houve pouca diferença entre elas, com um pequeno acréscimo (0,4°C), para todos os modelos/cenários, com exceção do HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B, que houve uma redução (0,6°C).

Tabela 1 - Valores médios anuais, diferenças entre os dados observados e estimados (Dif.) e amplitude, calculados para a temperatura e precipitação, considerando os modelos e cenários de mudanças climáticas em relação ao clima na condição atual (observado)

Modelos/ Cenários	Temperatura anual - Ta (°C)			Precipitação anual - Pre (mm)		
	Ta média	Dif. Ta	Amplitude	Pre média	Dif. Pre	Amplitude
Clima Atual	25,7	-	3,6	1676	-	897
GFDL_B <sub>1</sub>	27,4	+ 1,7	4,0	1615	- 61	1269
GFDL_A <sub>1</sub> B	27,5	+ 1,8	4,0	1543	- 133	1074
HadCM <sub>3</sub> _B <sub>1</sub>	27,2	+ 1,5	4,0	1480	- 196	797
HadCM <sub>3</sub> _A <sub>1</sub> B	27,7	+ 2,0	3,0	1542	- 134	967

I - Médias do aumento da Ta média em relação ao clima atual:

a) modelos: GFDL = +1,7°C e HadCM<sub>3</sub> = +1,8°C; b) cenários: B<sub>1</sub> = +1,6°C e A<sub>1</sub>B = +1,9°C

II - Médias da diferença da Pre média em relação ao clima atual:

a) modelos: GFDL = - 6 % e HadCM<sub>3</sub> = - 10 %; b) cenários: B<sub>1</sub> = - 8 % e A<sub>1</sub>B = - 8 %

Ao contrário do ocorrido com a temperatura, registrou-se uma redução da precipitação média anual do clima atual (1676 mm), para os dois cenários de ambos os modelos. O HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> com 1480 mm, foi o que mais diminuiu, correspondendo a uma redução média de 12%.

As variações espaciais da temperatura e precipitação da climatologia atual e de ambos modelos/cenários podem ser visualizadas nas Figuras 6 e 7.

Comparando as médias dos resultados dos modelos (Tabela 1), destaca-se que em relação à climatologia atual, houve um incremento semelhante quanto à temperatura do ar e um decréscimo da precipitação anual em ambos, mas com maior viés negativo quanto à precipitação gerada pelo modelo HadCM<sub>3</sub>, concordando com o apresentado por Marengo (2006).

As temperaturas médias anuais para ambos os modelos, foram semelhantes numericamente, mas as estimativas médias da precipitação geradas pelo modelo HadCM3 foram menores, tanto em relação à climatologia atual, quanto para o modelo GFDL.

Percebe-se que para o modelo GFDL, houve um incremento médio de 1,7°C em relação ao clima atual e praticamente não mostrou diferença entre cenários B<sub>1</sub> (+1,7°C) e A<sub>1</sub>B (+1,8°C), cujas temperaturas médias foram 27,4°C e 27,5°C, respectivamente. No entanto, nota-se a diferença no total anual de precipitação entre os cenários B<sub>1</sub> e A<sub>1</sub>B, com 1615 mm e 1543 mm, respectivamente e com média do modelo de 1579 mm.

Em relação ao clima atual, houve uma redução na média da precipitação do modelo, de aproximadamente 6 %, sendo que a diminuição média observada no cenário B<sub>1</sub>, foi de 4 % e no cenário A<sub>1</sub>B, foi o dobro.

Considerando o modelo HadCM<sub>3</sub>, nota-se que o aumento médio da temperatura anual em relação à do clima atual, foi de 1,8°C, semelhante à média do modelo GFDL (+1,7°C). Contudo, nesse caso existe diferença quanto à magnitude entre os cenários B<sub>1</sub> e A<sub>1</sub>B, de 0,5°C, os quais apresentaram Ta média de 27,2°C (acréscimo de 1,5°C) e 27,7°C (acréscimo de 2,0°C), respectivamente (Tabela 1).

Nota-se também, a ocorrência de diferença entre os totais anuais de precipitação para os dois cenários, sendo observado 1480 mm em B<sub>1</sub> e 1542 mm em A<sub>1</sub>B. A média do modelo HadCM<sub>3</sub> foi de 1511 mm, sendo inferior a do GFDL, em 68 mm, correspondendo a uma redução de 4 %, da precipitação no ano, do GFDL para o HadCM<sub>3</sub>.

Visualizando-se apenas as médias dos cenários dos dois modelos, depreende-se que haveria um acréscimo de 1,6°C e 1,9°C, para os respectivos cenários B<sub>1</sub> e A<sub>1</sub>B. Já para a precipitação anual média, verificou-se uma redução de 8 % das chuvas anuais para ambos os cenários.

As Figuras 8 e 9 mostram as diferenças da temperatura média e precipitação anual da climatologia atual, e as temperaturas e precipitações provenientes das projeções dos modelos/cenários estudados.

No GFDL\_B<sub>1</sub> observa-se um incremento da temperatura média anual em todo o Estado, com ênfase numa faixa diagonal estendendo-se no sentido sudoeste-nordeste. No GFDL\_A<sub>1</sub>B verifica-se a expansão desta faixa de aquecimento tendendo para o sul-sudeste do Tocantins.

Com relação ao HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> nota-se também um incremento da temperatura média em todo o território, bem como maior aquecimento numa faixa diagonal, à semelhança do GFDL\_B<sub>1</sub>, porém com menor área. No HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B esta faixa de aquecimento estende-se significativamente em largura, tanto para o nordeste quanto para o sul-sudeste do Estado, além de aumentar ainda mais a temperatura na região do Bico do Papagaio.

Ressalta-se que esses incrementos na temperatura simulados pelos modelos/cenários, são projeções que podem ocorrer nos próximos 30 anos (até meados deste século), o que são significativos, quando comparados com o aumento médio da temperatura global no século XX registrada em 0,6°C (MARENGO, 2006; IPCC, 2007) e de cerca de 1,1°C em relação ao período pré-industrial (IPCC, 2021).

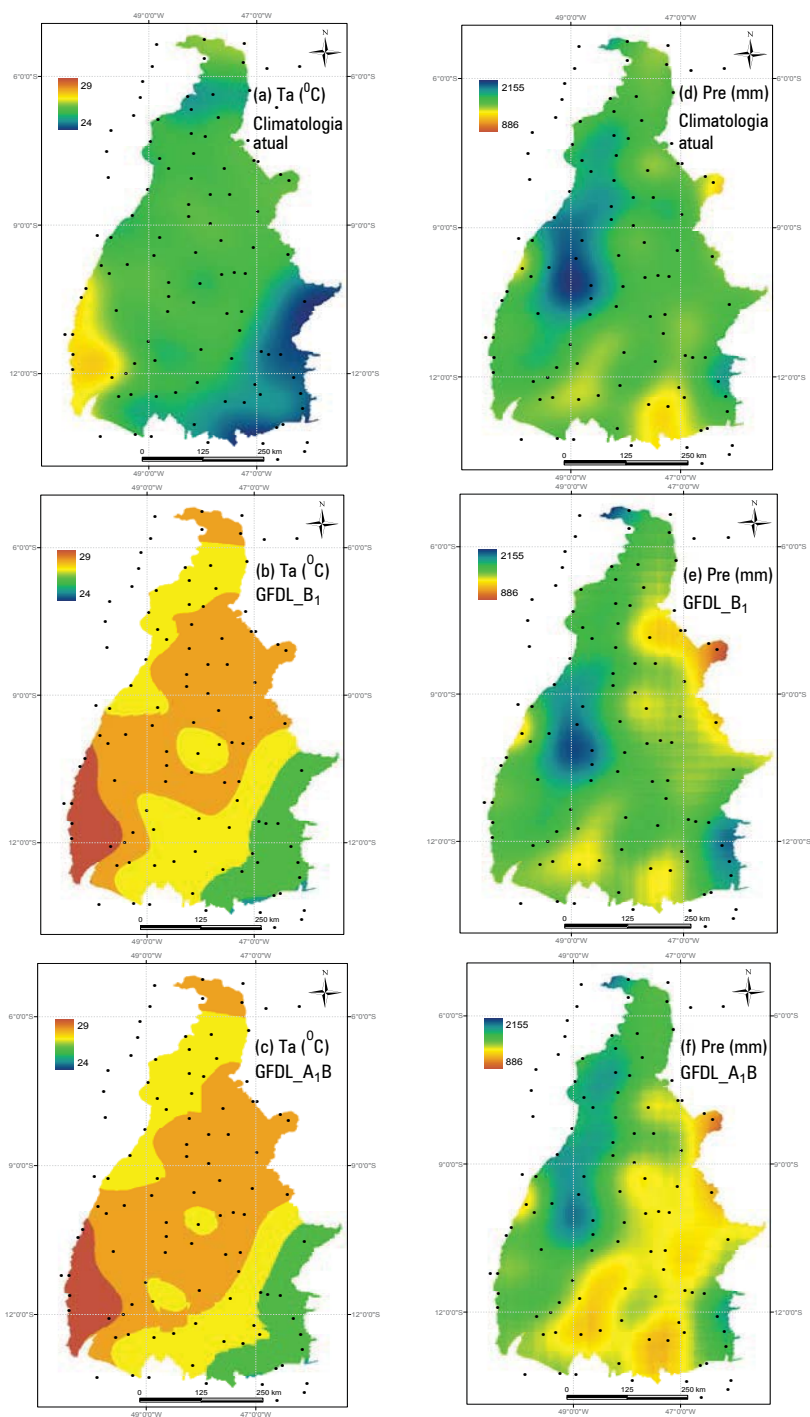


Figura 6 – Temperatura média anual - Ta (°C) referente à: (a) climatologia atual; (b) modelo/cenário GFDL\_B1 e (c) modelo/cenário GFDL\_A1B e precipitação anual - Pre (mm) referente à: (d) climatologia atual; (e) modelo/cenário GFDL\_B1 e (f) modelo/cenário GFDL\_A1B, para o período entre 2021 e 2050

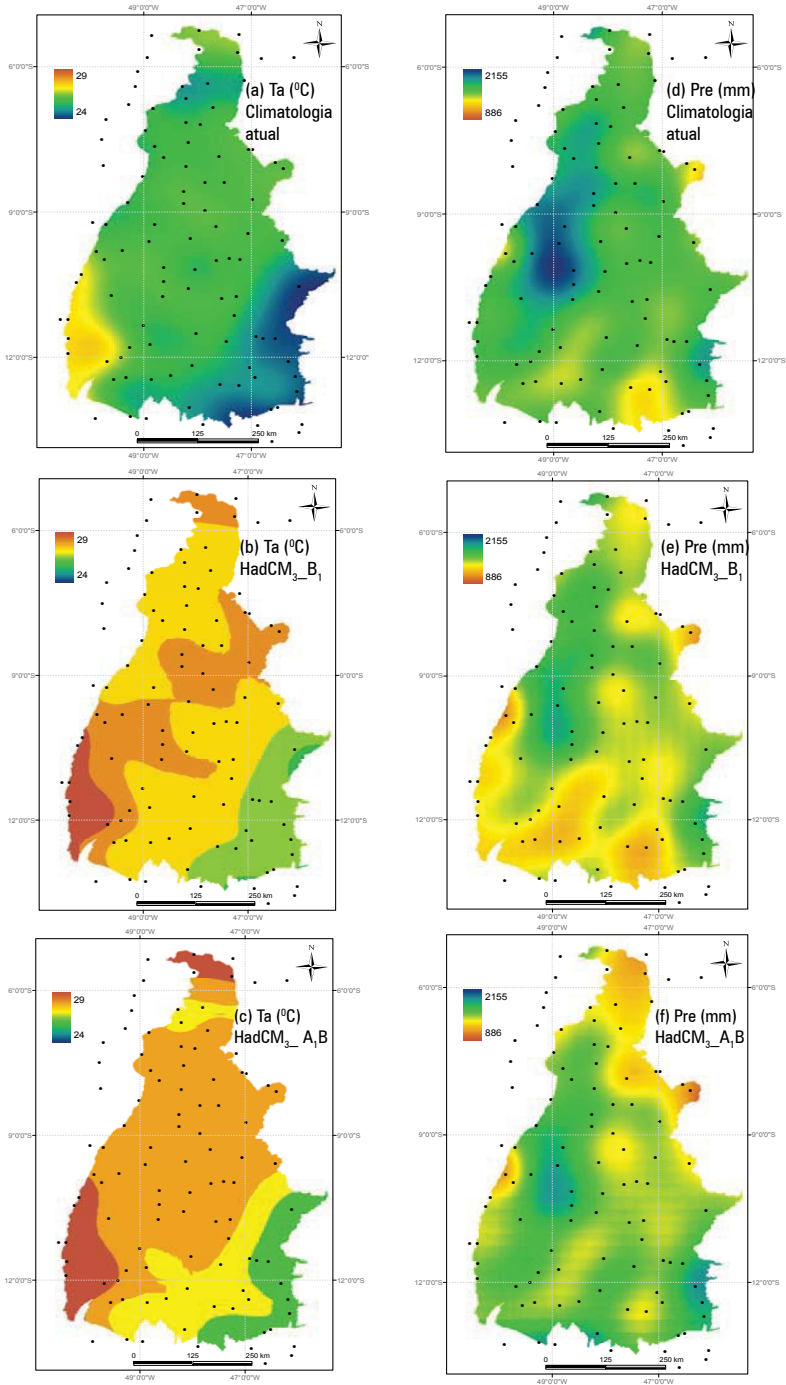


Figura 7 – Temperatura média anual - Ta (°C) referente à: (a) climatologia atual; (b) modelo/cenário HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> e (c) modelo/cenário HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B e precipitação anual - Pre (mm) referente à: (d) climatologia atual; (e) modelo/cenário HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> e (f) modelo/cenário HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B, para o período entre 2021 e 2050

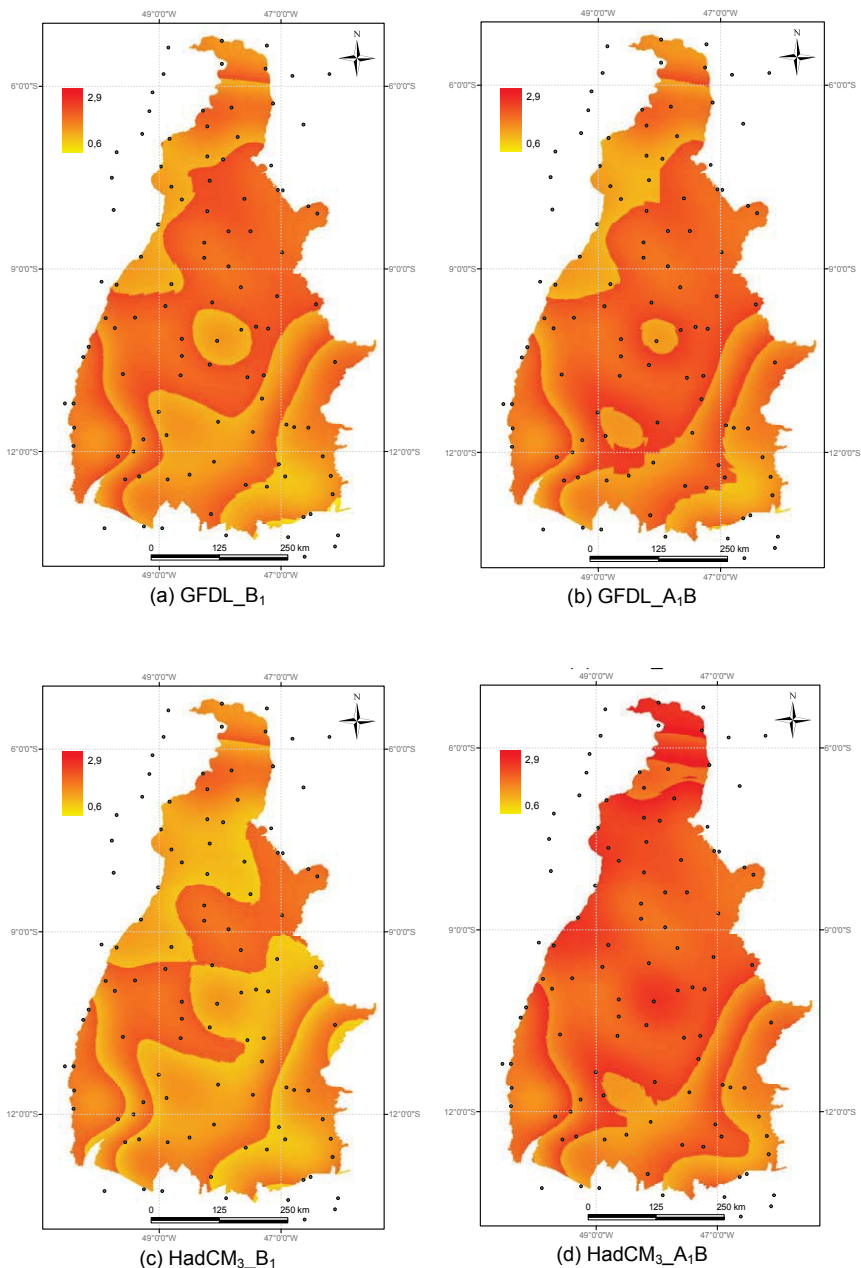


Figura 8 - Diferenças das temperaturas provenientes dos modelos/cenários: (a) GFDL\_B1, (b) GFDL\_A1B, (c) HadCM3\_B1 e (d) HadCM3\_A1B (°C), para o período de 2021 a 2050, e a temperatura média anual da climatologia atual (°C)

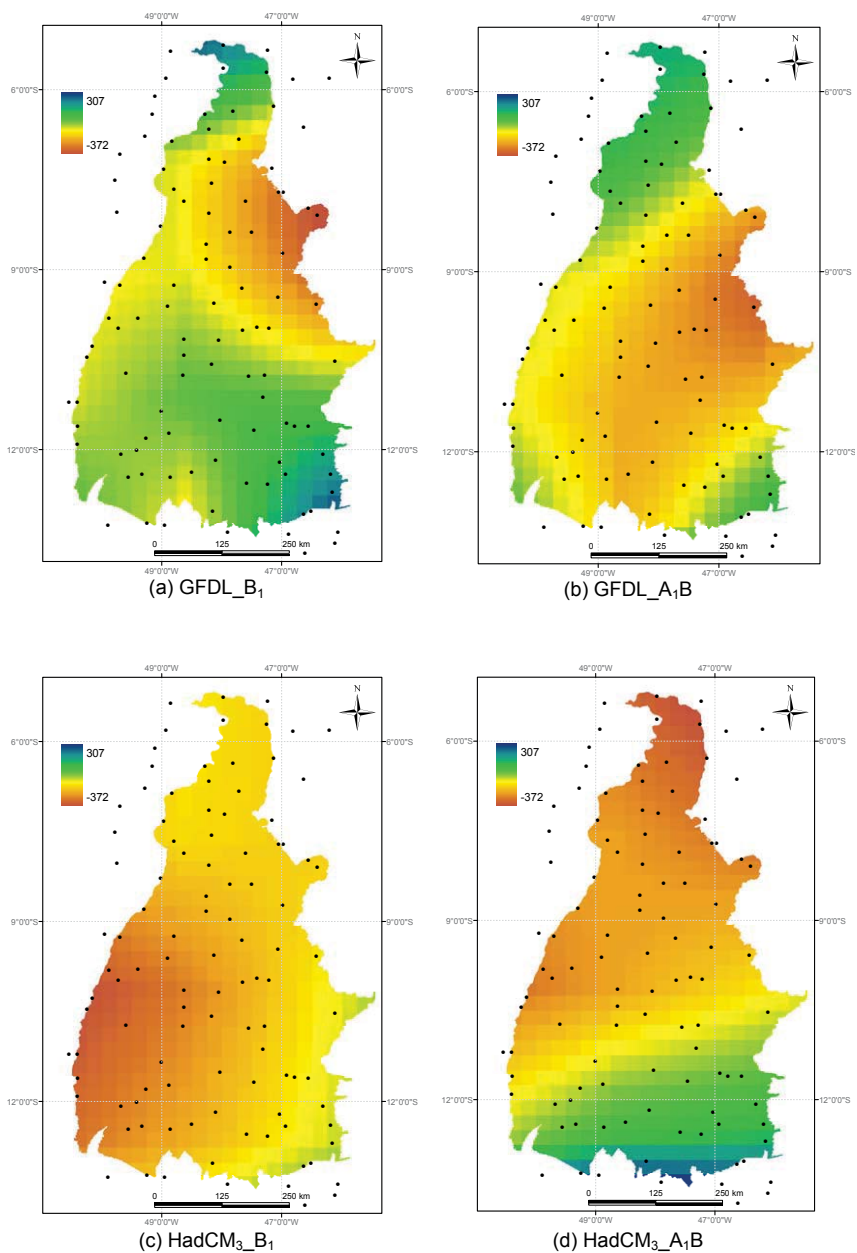


Figura 9 - Diferenças das precipitações provenientes dos modelos/cenários: (a) GFDL\_B1, (b) GFDL\_A1B, (c) HadCM3\_B1, e (d) HadCM3\_A1B (mm), para o período de 2021 a 2050, e a precipitação anual da climatologia atual (mm)

O relatório do PBMC (2014), cita o estudo realizado por Marengo *et al.* (2009) para o Cerrado brasileiro, que mostra que as projeções mais severas indicam que a maioria do bioma sofrerá um aumento de temperatura em torno de 4 °C até o final deste século, com exceção da região de transição com a Amazônia, cujo aumento poderá atingir 6 °C.

Constata-se a presença de anomalias de chuva nas projeções de todos os modelos/cenários, quando comparados com a climatologia atual, conforme pode ser visualizado na Figura 9.

No GFDL\_B<sub>1</sub> percebe-se redução de chuvas acentuada na região nordeste, com influências na porção central e contrastando com estas regiões, nota-se um aumento das chuvas tanto no extremo norte, quanto no sudeste do Estado.

As anomalias de precipitação observadas no GFDL\_A<sub>1</sub>B são maiores do que a do modelo/cenário anterior, uma vez que foi registrada uma forte declínio de chuvas, numa ampla faixa que se estende na diagonal no sentido sul-nordeste do Estado, sendo esta redução mais intensa na porção leste e nordeste. Ao mesmo tempo, constatou-se acréscimos de precipitação nas regiões noroeste, norte e sudeste, mas numericamente inferiores a do GFDL\_B<sub>1</sub>.

No HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> ocorreu redução da precipitação em todo o território, com maior intensidade na região sudoeste, onde se localiza a Ilha do Bananal. Já no HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B registrou-se também redução da precipitação tendendo da parte central até o extremo norte (região mais afetada), mas detectou-se aumento gradual das chuvas, do centro para o sul do Estado.

As projeções da precipitação no Cerrado brasileiro realizadas por Marengo *et al.* (2009) citado por PBMC (2014), indicam para os cenários mais pessimistas que haverá um decréscimo de 20 a 50% em relação aos valores atuais na parte central e sul do Bioma, e uma redução de aproximadamente 70% na porção norte. As projeções otimistas apontam para uma redução de 30% nas partes central e sul e uma redução de 40% na porção norte.

Além da redução da precipitação anual no Cerrado brasileiro, são esperadas mudanças na distribuição das chuvas ao longo do ano (MARENGO, *et al.*, 2010).

Na região norte-nordeste do Cerrado, é esperado um aumento de 20 a 30 dias na duração da estação seca (entre os meses de maio e setembro). Da mesma maneira, espera-se um decréscimo no número de eventos de chuva por ano no estado do Tocantins, nas regiões norte do Estado de Goiás, nordeste do Estado do Mato Grosso e no centro do Estado de Minas Gerais. Por outro lado, um aumento no volume de chuva na forma de tempestade é esperado para a região centro-sul do Cerrado (PBMC, 2014).

De acordo com Mistry (1998) citado por PBMC (2014), esse aumento na duração do período seco pode potencialmente resultar no incremento da vulnerabilidade aos incêndios que ocorrem tipicamente neste período no Cerrado, bem como resultar em uma diminuição dos estoques de biomassa e nutrientes.



Conforme o Souza; Manzi *et al.* (2014), as projeções consensuais para os biomas brasileiros, em específico para o Cerrado, baseadas nos resultados científicos de modelagem climática global e regional, são as seguintes:

Bioma Cerrado: Aumento de 1°C na temperatura superficial com diminuição percentual entre 10% a 20% na chuva durante as próximas três décadas (até 2040). Em meados do século (2041-2070) estima-se aumento entre 3°C a 3,5°C da temperatura do ar e redução entre 20% e 35% da chuva. No final do século (2071-2100) o aumento de temperatura atinge valores entre 5°C e 5,5°C e a diminuição da chuva é mais crítica, entre 35% e 45%. Acentuação das variações sazonais (SOUZA; MANZI *et al.*, 2014).

Com referência a deficiência hídrica anual (Da), pode ser observado na Tabela 2, que a Da mínima, que é o menor valor de Da obtido em um local do estado do Tocantins, passou de 245 mm (clima atual), para 404 mm, no modelo/cenário HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub>, gerando um incremento de cerca de 65%. De forma similar, para o GFDL\_B<sub>1</sub>, a Da máxima também aumentou de forma expressiva (61%), passando de 587 mm para 946 mm.

A Da média calculada para o cenário de clima atual foi de 411 mm, no entanto para o modelo/cenário HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub>, esse valor atingiu a média de 617 mm chegando a aumentar em 50%. Nota-se que os valores estimados para todos os modelos e cenários, apresentam um acréscimo em relação à situação atual, que varia de + 144 mm (GFDL\_B<sub>1</sub>) a + 206 mm (HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub>).

Tabela 2 - Valores médios calculados para a deficiência hídrica anual mínima, máxima, média, diferenças entre os dados observados e estimados (Dif.) e amplitude, considerando os modelos e cenários de mudanças climáticas, em relação ao clima na condição atual

Modelos/ Cenários	Deficiência hídrica anual - Da (mm)				
	Da mínima	Da máxima	Da média	Dif. Da média	Amplitude
Clima Atual	245	587	411	-	342
GFDL_B <sub>1</sub>	284	946	555	+ 144	662
GFDL_A <sub>1</sub> B	324	887	600	+ 189	563
HadCM <sub>3</sub> _B <sub>1</sub>	404	819	617	+ 206	415
HadCM <sub>3</sub> _A <sub>1</sub> B	285	927	609	+ 198	642

I - Médias da Da média:

a) modelos: GFDL = 577 mm e HadCM<sub>3</sub> = 613 mm e b) cenários: B<sub>1</sub> = 586 mm e A<sub>1</sub>B = 604 mm

II - Médias do aumento da Da média em relação ao clima atual:

a) modelos: GFDL = +40% e HadCM<sub>3</sub> = +49% e b) cenários: B<sub>1</sub> = +42% e A<sub>1</sub>B = +47%

Na região agrícola de Ituverava - SP, Garcia (2010) estudando o balanço hídrico nesta região e cenários futuros para o final do século, obteve resultados de aumentos da deficiência hídrica, variando de 313 mm a 368 mm. Para o cenário mais otimista (B<sub>2</sub>), o aumento da deficiência hídrica foi de 70% (Da = 313 mm) e para o cenário pessimista (A<sub>2</sub>) atingiu quase 200% (Da = 368 mm). Porém, comparando com os valores numéricos médios de Da obtidos no Tocantins, nota-se

que os valores observados por Garcia (2010), ainda assim, são inferiores tanto para o clima atual, quanto para os cenários futuros do presente estudo.

Diante desses cenários, torna-se necessário a adoção de medidas de prevenção, envolvendo o planejamento do uso e ocupação agrícola das terras de forma racional, bem como do manejo sustentável do solo e da água, conforme indicado por Collicchio (2008) e Garcia (2010).

Especialmente pode ser percebida na Figura 10, a distribuição dos valores correspondentes as diferenças de  $D_a$  da climatologia atual e as  $D_a$  de cada modelo/cenário.

De modo geral visualiza-se um incremento da  $D_a$  para todos os modelos/cenários, mas com variações de intensidade regionais.

No GFDL\_B<sub>1</sub> detectou-se um aumento expressivo da  $D_a$  na região nordeste, mas em contraponto obteve-se reduções da  $D_a$  no extremo norte e no sudeste do Estado (Figura 10a).

Considerando o mesmo modelo, para o cenário A<sub>1</sub>B, nota-se pela Figura 10b, que a  $D_a$  aumentou significativamente em área, ocupando uma faixa ampla que se estende da região sul até a nordeste e leste do Estado. Porém, constata-se neste cenário, reduções da  $D_a$  nas mesmas regiões observadas no cenário B<sub>1</sub>, acrescida da região nordeste.

Quanto ao HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> verificou-se que o aumento da  $D_a$  ocorreria fortemente na região sudoeste do Tocantins, contrastando com o modelo GFDL para o mesmo cenário em relação à localização, cujo aumento da  $D_a$  foi verificado de forma significativa na região nordeste (Figura 10c).

No HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B pode ser notado pela Figura 10d, um incremento da  $D_a$  nas regiões oeste, nordeste e extremo norte do Estado, com maior pronunciamento nesta última. Percebe-se também uma redução da  $D_a$  na porção sul do território.

Confrontando com o GFDL para este mesmo cenário, nota-se também que as elevações da  $D_a$  para cada modelo responderam de forma diferente. O modelo GFDL mostrou uma tendência de aumento numa faixa diagonal, correspondendo ao sentido sul-nordeste, enquanto que o HadCM<sub>3</sub> apresentou uma tendência de incremento gradativo da região centro-leste, até ficar mais intenso no norte do Estado, além de aumentar também a  $D_a$  na parte oeste do Tocantins.

O aumento da temperatura anual verificado em ambos os modelos e cenários, associado às alterações dos totais de precipitação anual em relação ao clima atual, provocou reflexos nos balanços hídricos, gerando um aumento na deficiência hídrica anual média de cada cenário e na média dos modelos, conforme esperado e também observado por Barbarisi *et al.* (2007), uma vez que implicou na elevação proporcional nas taxas de evapotranspiração.

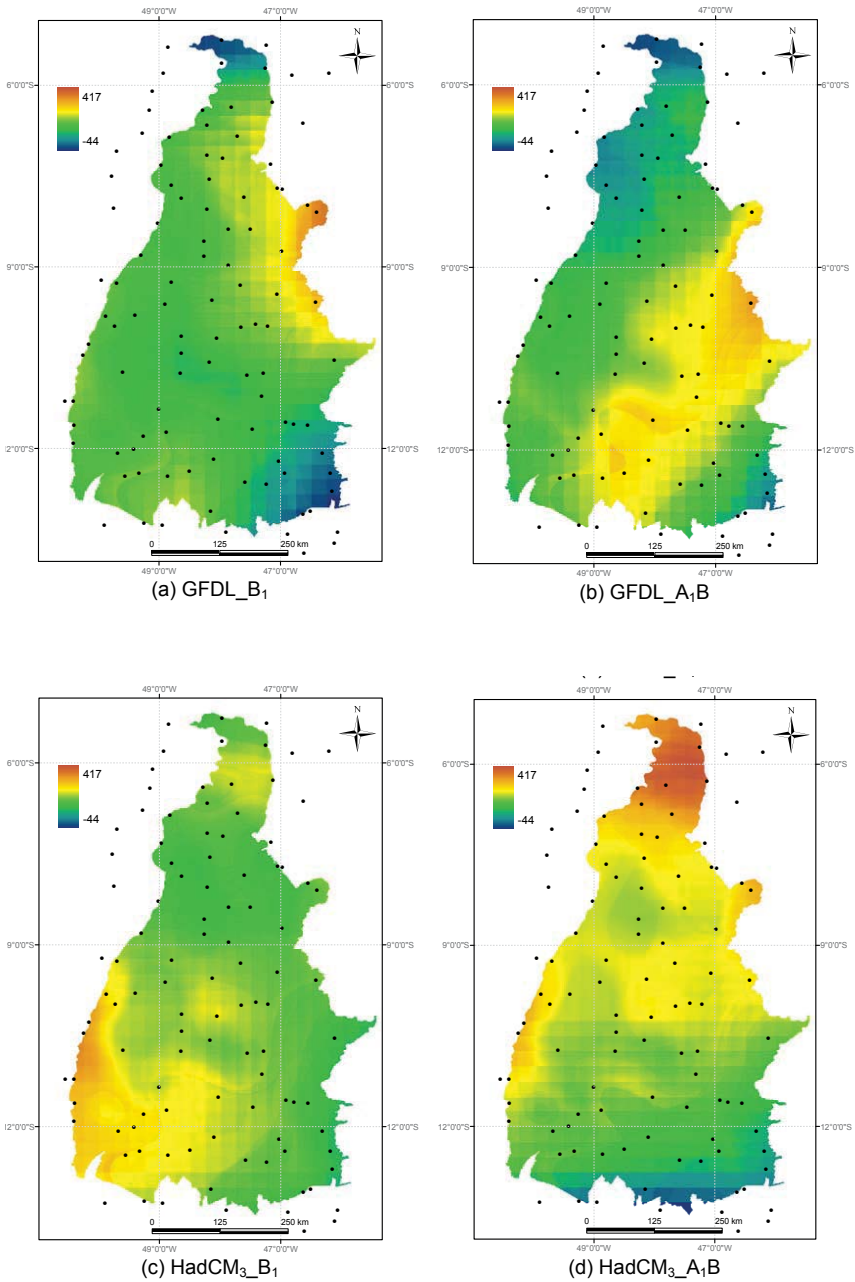


Figura 10 – Diferenças das deficiências hídricas provenientes dos modelos/cenários: (a) GFDL\_B<sub>1</sub>, (b) GFDL\_A<sub>1</sub>B, (c) HadCM<sub>3</sub>\_B<sub>1</sub> e (d) HadCM<sub>3</sub>\_A<sub>1</sub>B (mm), para o período de 2021 a 2050, e a deficiência hídrica anual da climatologia atual (mm)

Tal fato pode ser visualizado na Tabela 2, que mostra a Da média dos modelos GFDL (577 mm) e HadCM<sub>3</sub> (613 mm), correspondendo aos respectivos incrementos de 40% e 49% sobre a Da média do clima atual, assim como os aumentos da Da média de 42% para o cenário B<sub>1</sub> e de 47% para A<sub>1</sub>B.

Resultados concordantes foram obtidos por Salati *et al.* (2007), ao calcularem balanços hídricos para cenário de baixa emissão (B<sub>2</sub>), para o mesmo período e utilizando os dados dos mesmos modelos deste trabalho, para a Amazônia. Constataram também de forma semelhante a este estudo, que em média, o modelo HadCM<sub>3</sub> para este cenário apresentou maior deficiência hídrica anual do que o modelo GFDL.

### 3.3. Projeções do clima para o estado do Tocantins, considerando dois modelos e cenários do AR5/IPCC, para o período de 2021 a 2050

Os resultados relacionados aos dados médios de saída dos modelos climáticos regionais, Eta MIROC5 e Eta HadGEM2 – ES, e seus respectivos cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5), disponibilizados pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do INPE, para o período de estudo, bem como oriundos do balanço hídrico, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios anuais, diferenças entre os dados observados e estimados (Dif.) e amplitude (Amp.), calculados para a temperatura, precipitação e deficiência hídrica, considerando os modelos e cenários de mudanças climáticas, em relação ao clima na condição atual (observado)

Modelos/Cenários	Temperatura média anual Ta (°C)			Precipitação anual Pre (mm)			Deficiência hídrica anual Da (mm)		
	Ta média	Dif. Ta	Amp.	Pre média	Dif. Pre	Amp.	Da média	Dif. Da	Amp.
Clima Atual	25.7	-	3.6	1676	-	881	382	-	321
Eta HadGEM2 4.5	27.5	+1,8	4.0	1703	+27	1092	601	+219	368
Eta HadGEM2 8.5	28.7	+3,0	4.1	1611	-65	1176	700	+318	495
Eta MIROC5 4.5	27.0	+1,3	4.0	1419	-257	749	535	+153	335
Eta MIROC5 8.5	27.2	+1,5	4.0	1292	-384	650	589	+207	318

I - Médias do aumento da Ta média em relação ao clima atual:

a) modelos: Eta MIROC5 = + 1,4°C e Eta HadGEM2 = + 2,4°C;

b) cenários: RCP 4.5 = + 1,5°C e RCP 8.5 = + 2,7°C

II - Diferenças médias da Pre média em relação ao clima atual (%):

a) modelos: GFDL = - 19,1 % e Eta HadGEM2 = - 1,1 %;

b) cenários: RCP 4.5 = - 6,9 % e RCP 8.5 = - 13,4 %

III - Diferenças médias da Da média em relação ao clima atual (%):

a) modelos: Eta MIROC5 = + 47,1 % e Eta HadGEM2 = + 70,3 %;

b) cenários: RCP 4.5 = + 48,7 % e RCP 8.5 = - 68,7 %

De acordo com o modelo Eta MIROC5, o estado do Tocantins terá uma temperatura média anual estimada variando de 27°C a 27,2°C, no período analisado, observando-se um acréscimo esperado em relação à situação atual, em torno de + 1,3 e + 1,5 °C para o RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.

Nota-se, pelos valores apresentados e pelas Figuras 11a e 11b, que a diferença entre os dois cenários de emissões, equivale a 0,2°C, configurando um padrão térmico similar.

Com base nas Figuras 11a e 11b, constata-se ainda, a ocorrência de temperaturas menores na microrregião do Jalapão (porção leste) e na parte sul/sudeste do Estado, sendo observados maiores valores de  $T_a$ , na região sudoeste, especificamente na microrregião do Rio Formoso, localizada no entorno da Ilha do Bananal.

O modelo Eta HadGEM2 – ES, apresentou as maiores variações térmicas em ambos os cenários, quando comparados com a climatologia atual, conforme observa-se na Tabela 3 e Figura 11. Nessa perspectiva futura, entre os anos de 2021 e 2050, para o cenário RCP 4.5, estima-se que a temperatura média anual aumentará em aproximadamente 1,8°C, e para o cenário RCP 8.5, este acréscimo será de 3°C (Tabela 3).

Considerando a média dos dois cenários do modelo Eta HadGEM2 – ES, percebe-se que seria o que mais aqueceria em média o Estado, pois o incremento médio esperado da  $T_a$ , equivaleria a 2,4°C, em contraposição ao modelo Eta MIROC5, cujo aumento seria de 1,4°C.

Como esperado, a média do aumento da  $T_a$  para o cenário RCP 8.5 dos dois modelos, atingiria + 2,7°C, superando a média do RCP 4.5 (+ 1,5°C) (Tabela 3 e Figura 11).

A partir do estudo do efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado realizado por Assad *et al.* (2020), utilizando dados do cenário RCP 8.5 do quinto relatório do IPCC, observaram que todos os modelos analisados, indicavam o aumento na temperatura, “em que a mediana dos modelos aponta aumento superior a 1,2 vezes”.

Percebe-se que o incremento estimado da temperatura média anual do modelo Eta HadGEM2 – ES ( $T_a = + 2,4^\circ\text{C}$ ), bem como para ambos os cenários simulados por este modelo (RCP 4.5 = +1,8°C e RCP 8.5 = + 3°C), todos superariam o valor de 1,5°C, que refere-se ao limite de aquecimento global indicado pelo relatório do IPCC (2018), visando reduzir maiores riscos relacionados ao clima para os sistemas naturais e humanos. Contudo o referido relatório destaca que, “esses riscos dependem da magnitude e da taxa de aquecimento, localização geográfica, níveis de desenvolvimento e vulnerabilidade, e sobre as escolhas e implementação de opções de adaptação e mitigação” (IPCC, 2018).

De acordo ainda com o IPCC (2018), se o aquecimento global continuar a aumentar na taxa atual, a temperatura deverá atingir 1,5°C, entre 2030 e 2052, à semelhança do período utilizado neste estudo, por isso a necessidade premente da implementação de ações de adaptação e mitigação.

No que diz respeito à precipitação anual média (Pre), o modelo Eta MIROC5 representou mudanças mais significativas do que o Eta HadGEM2-ES, verificando-se nesse último modelo, menor redução média desta variável, porém com tendência de diminuir com o cenário pessimista (tabela 3), conforme observado também por Sousa *et al.* (2019).

A média da precipitação anual para o Tocantins considerando o modelo Eta HadGEM2-ES, foi de 1.703 mm (sendo o maior valor de 2.121 mm e o menor valor de 1.029 mm) e de 1.611 mm (maior valor de 2.054 mm e menor valor de 877 mm), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente (Tabela 3). Percebe-se que para esse modelo, a discrepância em relação ao clima atual foi pequena, se comparada ao Eta MIROC5, onde verificou-se no cenário RCP 4.5, um pequeno incremento de precipitação, em cerca de 27 mm (+ 1,6%), e no RCP 8.5, um decréscimo de 65 mm, equivalente a - 4%.

Com relação as médias da precipitação anual obtidas pelo modelo Eta MIROC5, observou-se 1.419 mm e 1.292 mm, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. Nesse sentido, a redução média da precipitação anual do Estado, foi equivalente a 257 mm (- 15,6%), para o RCP 4.5 e de 384 mm (-23%), para o RCP 8.5 (Tabela 3), podendo essas reduções serem percebidas espacialmente na Figura 12.

Sousa *et al.* (2019) usando esses mesmos modelos climáticos, também constataram reduções das precipitações médias entre 2011 e 2040. Os mesmos autores concluíram que há a possibilidade de decréscimo de 524,8 mm, na região sul do Estado, considerando o modelo Eta MIROC5 e o cenário RCP 8.5.

As Figuras 12a e 12b ilustram uma diferença relevante de ordem geográfica do total de chuvas entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o Eta MIROC5.

Nota-se que, para o Eta MIROC5 e cenário RCP 8.5, as restrições em quantidade de chuva ampliariam em quase toda área de influência analisada, se comparados ao cenário RCP 4.5 e ao clima atual. O cenário RCP 8.5, indica que 80% das precipitações no território será inferior a 1.400 mm, representado pelo gradiente em amarelo e vermelho da Figura 12b. No RCP 4.5 e clima atual, somente 43 % e 3 %, respectivamente, estão abaixo de 1.400 mm, ou seja, com uma faixa relativamente maior da cor verde, conforme Figura 12a.

Não foram notadas grandes diferenças na distribuição espacial de chuvas entre os cenários RCP 4.5 e 8.5, para o modelo Eta HadGEM2-ES (Figuras 12c e 12d).

Chou *et al.* (2016) utilizando dados do Climate Research Unit (CRU) para a simulação dos modelos climáticos regionais Eta MIROC5 e Eta HadGEM2-ES, utilizando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para a América do Sul, e considerando três períodos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100), apontam que na região Norte do Brasil e no estado do Tocantins, há uma tendência de elevação da temperatura em todas as estações do ano e redução da precipitação anual. Destaca-se que esses resultados obtidos por Chou *et al.* (2016), que utilizaram os mesmos modelos e cenários, reforçam a compatibilidade com os resultados verificados neste trabalho.

Estudos realizados por Assad *et al.* (2020), no âmbito do Cerrado brasileiro, demonstraram que a maioria dos resultados dos modelos aponta para o incremento da temperatura e para estabilidade ou redução das chuvas, assemelhando-se também, de forma geral com os resultados obtidos no presente estudo.

A deficiência hídrica anual, resultante do cálculo do balanço hídrico pela metodologia de Thornthwaite; Matter (1955), apontou para a situação do clima atual, o valor médio equivalente a 382 mm. Nesta metodologia considerou-se uma CAD de 150 mm e por isso, este valor ficou subdimensionado em relação ao encontrado por Roldão; Ferreira (2019), que foi de 414 mm, e neste capítulo no item 3.1, que foi de 411 mm, onde utilizou-se uma CAD de 100 mm.

Em todos os modelos e cenários, verifica-se o aumento significativo da deficiência hídrica, sendo que o incremento médio mais intenso refere-se ao modelo Eta HadGEM2-ES, cujo aumento atingiu 70,3 % (Tabela 3 e Figura 13). O aumento médio da Da média referente ao modelo Eta MIROC5 em relação ao clima atual, foi de 47,1 %, e que apesar de comparativamente ser inferior ao do modelo Eta HadGEM2-ES, é considerado elevado, devido aos valores médios absolutos observados (Tabela 3).

Considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo Eta HadGEM2-ES, espera-se o aumento na média atual deste parâmetro climático, de 219 mm (+57%) e 318 mm (+83%), respectivamente.

Assad *et al.* (2020) verificaram no Cerrado do Brasil, que nenhum modelo climático indicou redução da deficiência hídrica anual. Destacaram que “a mediana dos modelos apontou para aumento da deficiência hídrica superior a 1,5 vezes”. Os autores indicaram ainda que existe elevada concordância entre os modelos climáticos utilizados neste estudo, no que se refere ao aumento provável da deficiência hídrica no bioma Cerrado.

A ocorrência dessa situação, sendo confirmada, poderá tornar mais vulneráveis os ecossistemas, recursos hídricos e atividades econômicas no Estado.

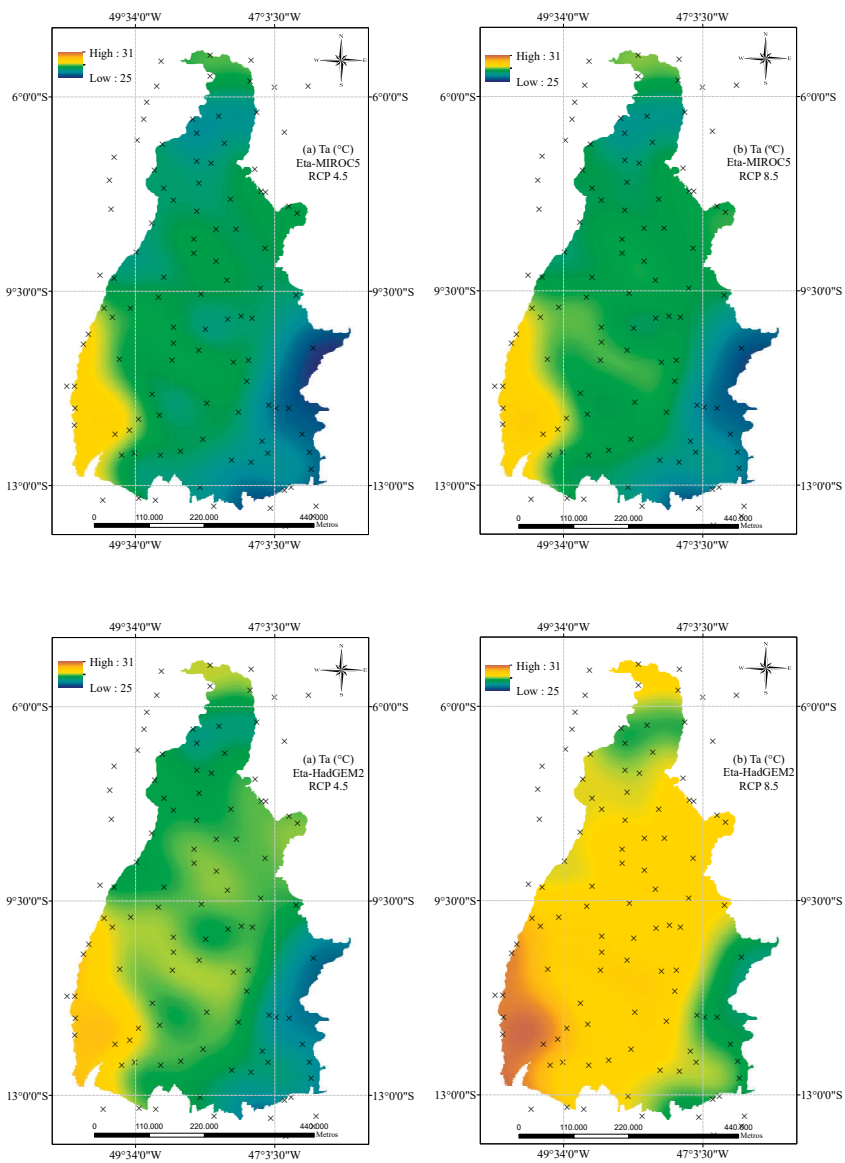


Figura 11 - Temperatura média anual - Ta (°C) referente ao: (a) modelo Eta MIROC5 e cenário RCP 4.5; (b) modelo Eta MIROC5 e cenário RCP 8.5; (c) modelo Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 4.5 e (d) modelo Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 8.5, para o período entre 2021 e 2050



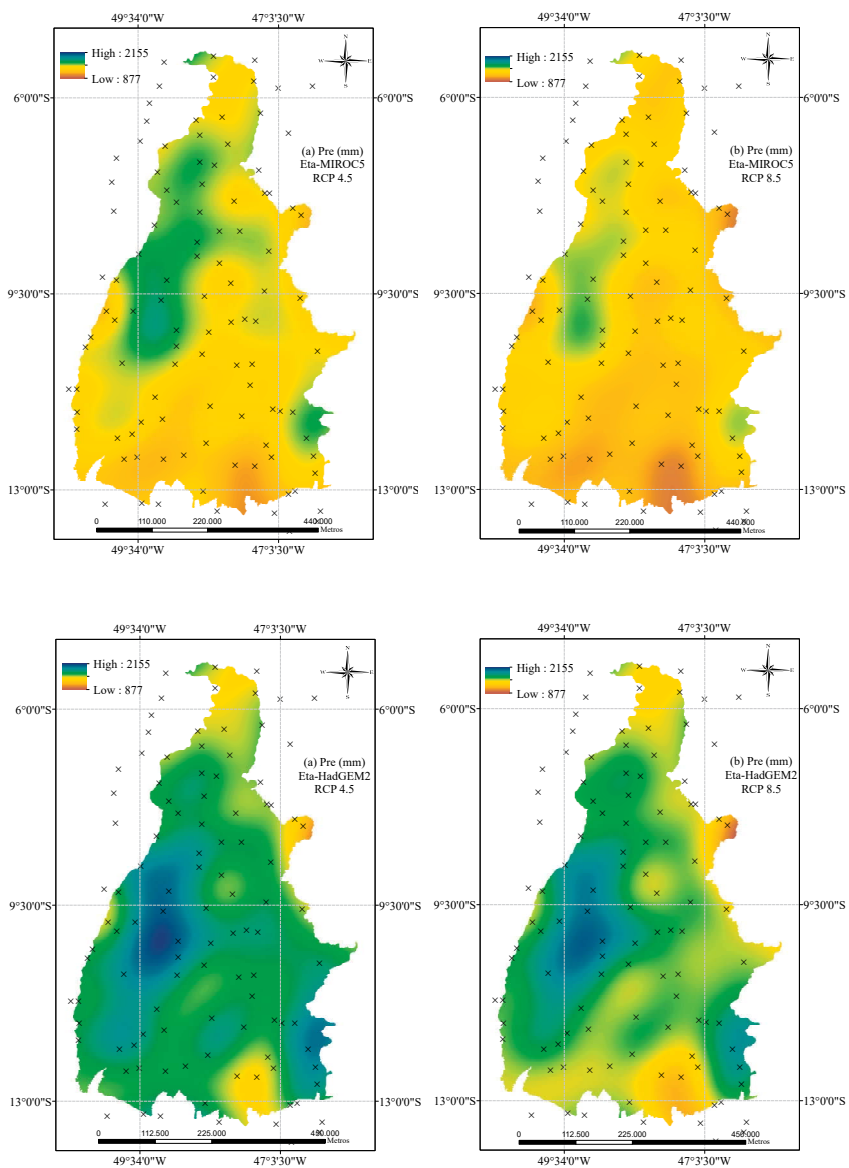


Figura 12 - Precipitação anual - Pre (mm) referente ao: (a) modelo Eta MIROC5 e cenário RCP 4.5; (b) modelo Eta MIROC 5 e cenário RCP 8.5; (c) modelo Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 4.5 e (d) modelo Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 8.5, para o período entre 2021 e 2050

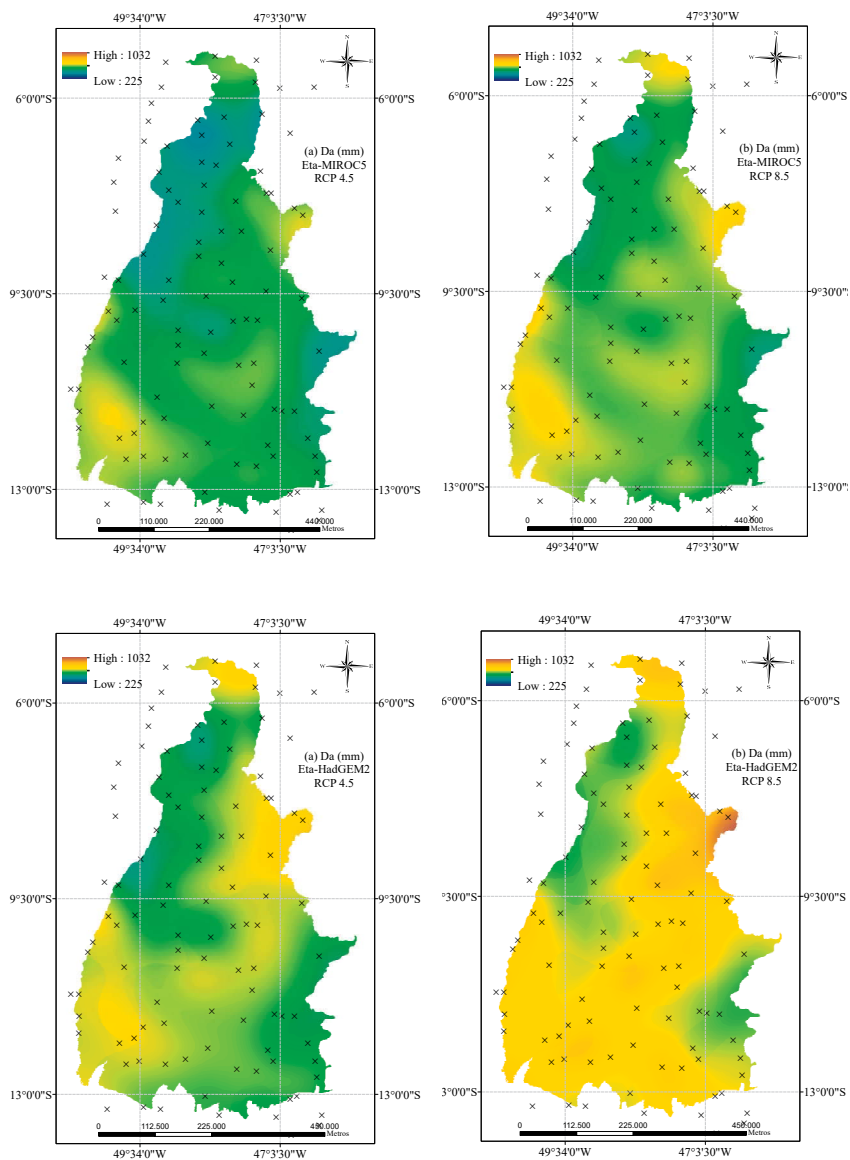


Figura 13 – Deficiência hídrica anual - Da (mm) referente ao: (a) modelo Eta MIROC5 e cenário RCP 4.5; (b) modelo Eta MIROC 5 e cenário RCP 8.5; (c) modelo Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 4.5 e (d) modelo Eta HadGEM2-ES e cenário RCP 8.5, para o período entre 2021 e 2050

## **Considerações finais**

As incertezas quanto às projeções do clima, ainda existem, contudo, as simulações com modelos do sistema climático são importantes para demonstrar perspectivas com relação ao futuro, além de servir de alerta aos governos e à sociedade em geral. Fornecem informações relevantes para subsidiar políticas e ações públicas e da iniciativa privada, bem como apoiar a realização de pesquisas científicas voltadas ao desenvolvimento sustentável e de combate às mudanças do clima.

Com o desenvolvimento de tecnologias e o aumento da quantidade de plataformas observacionais, espera-se que com o decorrer do tempo, ocorra a melhoria da acurácia das projeções dos modelos, proporcionando assim maior segurança dos resultados.

Considerando os resultados de todos os modelos climáticos e cenários analisados, tanto do relatório AR4 e AR5 do IPCC, percebe-se que deverá ocorrer aumento da temperatura média anual e redução da precipitação anual no Estado, no período de 2021 a 2050.

Essas alterações dos padrões de temperatura e precipitação, considerando os distintos cenários de mudanças climáticas, refletiram nas simulações dos balanços hídricos, gerando um incremento médio significativo da deficiência hídrica, mas com variações de intensidade regionais no Estado. Nesse contexto, essas projeções poderão afetar negativamente ecossistemas, recursos hídricos e atividades econômicas, bem como regiões produtoras atuais, podendo provocar consequências negativas na produção agrícola no Tocantins.

Confirmando-se essas projeções climáticas no que se refere aos possíveis efeitos na agricultura, algumas culturas poderão ser deslocadas para plantio em outras localidades ou até mesmo ficar impedidas de serem cultivadas no Estado. Poderá também dependendo da região, ocorrer a necessidade da utilização de irrigação suplementar ou plena, dentre outras técnicas de manejo, que poderá em algumas situações inviabilizar economicamente a atividade agrícola, ou mesmo ter restrições ambientais, devido as questões de disponibilidade de água numa bacia hidrográfica.

Diante dos resultados observados, destaca-se que o incremento de investimentos na pesquisa científica, visando o combate às mudanças do clima é emergencial. Assim como, a implementação de ações de mitigação e adaptação, como o uso de tecnologias de baixa emissão de GEE, utilização de energia alternativa, restauração de áreas degradadas e desflorestadas, dentre outras soluções sustentáveis.

## Referências

ASSAD, Eduardo Delgado; VICTORIA, Daniel de Castro; CUADRA, Santiago Vianna; PUGLIERO, Vanessa Silva; ZANETTI, Marília Ribeiro. Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. In: BOLFE, Édson Luis; SANO, Edson Eyji; CAMPOS, Silvia Kanadani (eds). **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções**. Brasília: Embrapa, cap. 7, p. 213 – 227. 2020.

BARBARISI, B. F.; MARIN, F. R.; ASSAD, E. A.; BARBARISI, B. F.; PILAU, F. G.; PACHECO, L. R. F. Efeito das mudanças climáticas sobre a aptidão climática para cana-de-açúcar no Estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007. Aracaju. **Anais...** Aracaju: SBA, 2007.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília: MCTI, 2016. 590p.

CHOU, Sin Chan; SILVA, Adan; LYRA, André; MOURÃO, Caroline; DEREZYNSKI, Claudine; RODRIGUES, Daniela; CAMPO, Diego; CHAGAS, Diego; SIQUEIRA, Gracielle; SUEIRO, Gustavo; PILOTTO, Isabel; GOMES, Jorge; BUSTAMANTE, Josiane; TAVARES, Priscila. **Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul**. In: TEIXEIRA, Breno Simonini; ORSINI, Jose Antonio Marengo; CRUZ, Márcio Rojas da (ed). Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, cap. 2, p. 49 – 90. 2016.

COLLICCHIO, E. **Zoneamento edafoclimático e ambiental para a cana-de-açúcar e as implicações das mudanças climáticas no estado do Tocantins**. 2008. 156 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CRUZ, S. P.; HERNANDEZ, F. B. T.; VANZELA, L. S. Balanço hídrico da região de Jataí – GO. CONIRD 2006. In: XVI CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. Goiânia, 25 a 30/07/2006. **Anais...** Goiânia, 2006. p. 1 – 7.

CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M. C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J. -G. Introduction. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX V.; MIDGLEY, P. M. (eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. chapter 1, p. 119- 158. 2013.

FBMC, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impactos, vulnerabilidade e repercussões socioeconômicas das mudanças globais do clima**. Rio de Janeiro: FBMC/Petrobras. 2010. 40 p. (Curso de capacitação – FBMC, módulo 3).

GARCIA, A. Balanço hídrico de Ituverava (SP) sob condições de cenários climáticos futuros. **Nucleus**, v.7, n.1, p. 217 – 222, abr. 2010.

IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Paris, 2007. 21p. (IPCC WG1 fourth assessment report – AR4).

IPCC, 2013. **Climate Change 2013: the Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX V.; MIDDLEY, P. M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York. 2013. 1535 p.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In: **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

IPCC, 2021. **Climate Change 2021: the Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

JESUS, J. B. de. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática pelo método de Thornthwaite e Mather para o município de Aracaju-SE. **Scientia Plena**, v. 11, n. 5, p. 1 – 6. 2015.

LENART, M. **Modeling at the global scale**. Southwest Climate Change Network, Arizona, University of Arizona. 12 set. 2008. Disponível: <<http://www.southwestclimatechange.org/climate/modeling/global-scale>>. Acesso em: 15 set. 2020.

LENDERINK, G. *et al.* Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

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: MMA, 2006. 212 p.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **Int. J. Climatol.**, v. 29, p. 2241–2255. 2009. doi: 10.1002/joc.1863

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Clim. Dyn.**, v. 35, n. 6, p. 1073 - 1097. 2010.

MARENGO, José A.; CHOU, Sin. C. Cenários futuros de clima para estudos de Impactos-Vulnerabilidade-Adaptação (IVA). In: NOBRE, Carlos A.; MARENGO, José A. (Orgs). **Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar**. São José dos Campos: INCT, cap. 13, p. 427 - 448, 2017.

MINGUEZ, M. I.; RUIZ-RAMOS, M.; DÍAZ-AMBRONA, C. H.; QUEMADA, M. Productivity in agricultural systems under climate change scenarios. evaluation and adaptation. **Journal de Physique**, Paris, v.4, n. 121, p.269-281, 2004.

MOURA, M. N.; VITORINO, M. I.; ADAMI, M. Análise de componentes principais da precipitação pluvial associada à produtividade de soja na Amazônia legal. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 574-588, 2018.

NOBRE, C.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Cenários de mudança climática para a América do Sul. In: CGEE Parcerias Estratégicas n. 27. **Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação**. Brasília: CGEE, cap. 2. 2008.

PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Base científica das mudanças climáticas: contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**. In: AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (eds.). Rio de Janeiro: COPPE - UFRJ, 2014. 464 p.

PEREIRA, A. R. Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005.

ROLDÃO, Aline de Freitas; FERREIRA, Vanderlei de Oliveira. Climatologia do Estado do Tocantins – Brasil. **Caderno de Geografia**, v.29, n.59, p. 1161 – 1181. 2019.

SALATI, E.; SALATI, E.; CAMPANHOL, T.; VILLA NOVA, N. **Tendências das variações climáticas para o Brasil no século XX e balanços hídricos para cenários climáticos para o século XXI: relatório 4**. Rio de Janeiro: MMA, 2007. 182 p.

SEAGRO. Secretaria da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento do Tocantins. **Climatologia**. Disponível em: <<http://www.to.gov.br/seagro/conteudo.php?id=8>>. Acesso em: 07 out. 2019.

SEPLAN. Secretaria Planejamento e Meio Ambiente do Tocantins. Diretoria de Pesquisas e Informação. Aspectos físicos. In: \_\_\_\_\_. **Anuário estatístico do Estado do Tocantins 1997/2003**. Palmas: SEPLAN, 2004. p. 21-28.

SEPLAN. Secretaria Planejamento e Meio Ambiente do Tocantins. Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. Palmas: SEPLAN, 2005. 54p.

SILVA, R. A.; RIES, E. S.; MACIEL, G. F. Tendências da temperatura anual no Estado do Tocantins. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 4, p. 544-551, jul./ago. 2020.

SOUSA, R. M., VIOLA, M. R., CHOU, S. C., ALVES, M. V. G., AVANZI, J. C. Projeções climáticas regionalizadas para o Estado do Tocantins, Brasil, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 24, n. 1, p. 330-347, jan./jun. 2019.

SOUZA, A. P. de; MOTA, L. L. da; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T. de; PAULINO, P. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 01, n. 01, p.34 - 43, out./dez., 2013.

SOUZA, E. B. de; MANZI, A. O. *et al.* Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. In: PBMC, AMBRIZZI, T., ARAUJO, M. (eds.). **Base científica das mudanças climáticas**: contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE – UFRJ, cap. 9, p. 320 – 340. 2014.

THORTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Thechnology, 1955. 104p.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública - SEPLAN. Superintendência de Pesquisa e Zoneamento Ecológico-Econômico. Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico - DZE. SOUSA, Paulo Augusto Barros de; BORGES, Rodrigo Sabino Teixeira; DIAS, Ricardo Ribeiro (Org.). **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. 6. ed. rev. atu. Palmas: SEPLAN, 2012. 80 p.

VICTORIA, D. de C.; SANTIAGO, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; PEREIRA, A. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. Water balance for the Ji-Paraná river basin, western Amazon, using a simple method through geographical information systems and remote sensing. **Earth Interactions**, Madison, v.11, n.5, p. 1-21, 2007.