ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Projeções da temperatura da superfície na bacia hidrográfica do rio Tietê – SP para o final do Século XXI

Murilo da Costa Ruv Lemes¹, Michelle Simões Reboita², Roger Rodrigues Torres³, Gilberto Fisch⁴

¹Msc. em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Doutorando, Centro de Ciências do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, CEP 12227-010, São José dos Campos, São Paulo. (12) 991939099. murilo.ruv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2991-7755> (autor correspondente). ²Dr. em Meteorologia, Professora, Pesquisadora, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. reboita@unifei.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1734-2395>. ³Mestrando em meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. brunocapucin23@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0166-6739>. ⁴Dr. Em Meteorologia, Professor, Pesquisador, Departamento de Agronomia, Universidade de Taubaté, Estrada Municipal Professor Dr. José Luís Cembraneli, 5000, Jardim Sandra Maria, Taubaté-SP. fisch.gilberto@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6668-9988>.

Artigo recebido em 01/06/2020 e aceite em 20/11/2020

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Tietê tem sido afetada por mudanças em seu uso e cobertura da terra, principalmente às suas margens, que influenciam diretamente a temperatura da superfície (Ts). Nesse contexto, o objetivo do trabalho é caracterizar sazonalmente a Ts na referida bacia e apresentar projeções dessa variável obtidas com o modelo ETA em alta resolução (5 km) nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 e considerando 3 intervalos temporais: 2006-2040, 2040-2070, 2070-2100. Alguns cálculos (como médias climatológicas e vies) foram necessários para compreender as mudanças ocorridas e as que poderão ocorrer na área de estudo. Até o final do século XXI algumas áreas da bacia do rio Tietê, bem como sua região de foz, poderão apresentar aumento de até 5° C (8° C) no período entre 2070 - 2100 do cenário RCP4.5 (8.5), o que pode impactar tanto as atividades econômicas quanto o cotidiano da população.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Bacia Hidrográfica; São Paulo

Projections of surface temperature in the hydrographic basin of the Tietê river - SP for the end of the 21st century

ABSTRACT

The hydrographic basin of the Tietê river has been affected by changes in its use and land cover, mainly on its banks, which directly influence the surface temperature (Ts). In this context, the objective of the work is to seasonally characterize the Ts in the referred basin and present projections of this variable obtained with the ETA model in high resolution (5 km), under the scenarios RCP4.5 and RCP8.5, and considering 3-time slices: 2006-2040, 2040-2070, 2070-2100. Some calculations (such as climatological averages and bias) were necessary to understand the magnitude of the changes that have occurred and those that may occur. By the end of the 21st century, some areas of the Tietê river basin, as well as its mouth region, may show an increase of up to 5° C (8° C) in the period between 2070 - 2100 of the RCP4.5 (8.5) scenario, which may impact both economic activities and the daily lives of the population.

Keywords: Climate Change; Hydrographic Basin; Sao Paulo

Introdução

No Estado de São Paulo está localizada uma das mais importantes bacias hidrográficas do país, a do rio Tietê. Com extensão de 1.136 km, o rio Tietê banha 62 municípios e possui jusante no interior do continente. Sua nascente encontra-se no município de Salesópolis, na serra do Mar paulista, enquanto a foz, em Itapura, desaguando no rio

Paraná, na divisa com o Estado do Mato Grosso do Sul. A bacia é organizada em 6 diferentes sub bacias (Alto Tietê, Sorocaba Médio Tietê, Piracicaba Jundiaí, Tietê Jacaré, Tietê Batalha e Baixo Tietê) de acordo com suas características fisiográficas (PLANO DE BACIA DO RIO TIETÊ, 2018). Desde a última década, a alta densidade populacional (tipicamente de 43 milhões

de habitantes) tem colaborado para modificar o uso e cobertura da terra na região da bacia hidrográfica através do intenso desmatamento, com a finalidade de abastecer a construção civil, áreas para atividades agrícolas, pastoreio, instalação de fábricas, entre outras.

A troca da cobertura natural (floresta e campos abertos) por novas superfícies rurais (campos cultivados) ou urbanas (asfalto e concreto) é um dos fatores que causa mudanças no clima local. A redução de área vegetada exerce influência direta na temperatura da superfície (Ts) e do ar adjacente. Áreas com pouca vegetação possuem temperatura, em média, de 2° C a mais do que quando comparadas àquelas mais vegetadas, podendo a diferença ultrapassar, em alguns casos, 6,0° C (Amorim, 2005; Barros; Lombardo, 2016). Barboza et al. (2013) mostram que o balanço de energia dos centros urbanos de médio porte já possui diferença em função de mudanças nas variáveis dos fluxos de calor sensível e latente. (Mendonça, 2000; Tang et al., 2018).

Recentemente, Lemes et al. (2019) mostraram que a mudança no uso e cobertura da terra da região da bacia hidrográfica do rio Tietê impactaram na Ts de forma intensa nos últimos 10 anos. O aumento da Ts implica em aumento da temperatura do ar e, considerando que, a junção das mudanças climáticas locais é responsável pelas mudanças climáticas globais há inúmeros problemas que poderão se suceder. Barcellos et al. (2009) mencionam que um aumento de 2° C na temperatura média global, juntamente com eventos de precipitação extrema, pode contribuir para o aumento de doenças transmitidas por vetores (dengue, malária, febre amarela), água (contaminações decorrentes de poluentes) e ar (bronquite, tuberculose). O 5° relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) destaca as causas e inúmeros efeitos das mudanças climáticas, com destaque para os efeitos danosos à saúde da população. A obtenção de indicativos de como a Ts será no futuro é de suma importância para o planejamento urbano. Para isso, tem-se utilizado as projeções de modelos climáticos regionais (Villamayor et al., 2018). No início da modelagem climática regional, os modelos eram executados com 50 km de resolução horizontal (Ambrizzi et al., 2019), porém hoje as projeções já estão sendo realizadas com 5 km de espaçamento de ponto de grade. Um exemplo disso são as projeções para o Estado de São Paulo realizadas com o modelo ETA (Calado et al., 2018). Esses autores, assim como Marengo et al. (2013), obtiveram um indicativo de mudança na intensidade da precipitação, tanto nas projeções

usando o cenário RCP4.5, quanto o RCP8.5. Ainda, segundo Marengo et al. (2013), as chuvas fracas, ou garoas, diminuirão consideravelmente, em contrapartida, as chuvas intensas, além dos eventos extremos, ocorrerão com maior frequência nos grandes centros urbanos (tais como São Paulo e Rio de Janeiro). Grande parte desses eventos estão associados ao fenômeno ilha de calor (IC), como é o caso da cidade do Rio de Janeiro (Peres et al., 2018). O fenômeno diminui a evapotranspiração diurna, aumenta a devolução de energia da superfície para a atmosfera na forma de calor sensível (partição de energia) e favorece as fortes pancadas de chuva no final do dia (Barros; Lombardo, 2016).

Diante do exposto, o objetivo do presente estudo é caracterizar sazonalmente a Ts na bacia do rio Tietê e apresentar projeções dessa variável obtidas com o modelo ETA em alta resolução (5 km) nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 e considerando 3 intervalos de tempo: 2006-2040, 2040-2070, 2070-2100. A justificativa do estudo está no fato de que a maioria dos trabalhos focam a temperatura do ar ao nível do abrigo meteorológico (2 m) e não a Ts, sendo que essa última é importante para o aquecimento do ar adjacente.

Metodologia

Dados

Para uma contextualização geográfica do Estado de São Paulo e da bacia hidrográfica do rio Tietê utilizaram-se informações do Modelo Digital de Elevação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE; mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/arquivos-raster) e do sensor MODIS tanto para dados de uso e cobertura da terra (com resolução espacial de 500 metros e período de 2000 a 2017) quanto para a Ts (resolução espacial de 1000 metros e para o período de 2000 a 2018). Por fim, as projeções do modelo ETA com 5 km de resolução horizontal foram obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Mais detalhes desses produtos são apresentados na sequência.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

O sensor MODIS encontra-se acoplado em dois satélites da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA): Terra e Aqua. O satélite Terra cruza a linha do Equador às 10:30 h da manhã, ao passo que o satélite Aqua, às 13:30 h da tarde. No Brasil, o sensor MODIS possui 2 horários de passagem matutinos e 2 noturnos (9h, 11h, 22h,

23h pelo horário de Brasília). O sensor acoplado (MODIS) tem por objetivo a obtenção de informações, tais como: temperatura da superfície (MOD11A1), cor do oceano, vegetação global e mudanças nas mesmas, características das nuvens, concentração de aerossóis, uso e cobertura da terra (MCD12Q1) etc.

O produto de uso e cobertura da terra (MCD12Q1) possui resolução horizontal de 500 m com grânulos classificados por: ano, mês ou dia. O produto possui 13 tipos diferentes de classificações de uso e cobertura da terra e está disponível a partir do dia 21 de fevereiro de 2000. Ambos os produtos estão disponíveis (MCD12Q1 e MOD11A1) na sua 6ª versão e podem ser adquiridos no website da NASA, (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>). O sensor MODIS fornece a Ts que é medida na primeira camada rente ao solo, a mais superficial de todas. Portanto, esta variável difere da temperatura do ar a 2 m, que é mais referenciada majoritariamente na literatura.

O produto MOD11A1, Ts com resolução de 1000 m, está acoplado ao satélite Terra. O satélite Terra cruza o fuso UTC-3 às 9h, 11h, 22h e 23h (horário de Brasília), possui as mesmas características e informações espaciais do MCD12Q1 (*User Land Cover*), porém os dados estão disponíveis desde 2000 até o presente. Os dados estão disponíveis para *download* no site lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/task/area.

Projeções Climáticas

O modelo climático regional ETA foi executado no período histórico de 1960 a 2005 e futuro 2006 a 2100, sendo alinhado às projeções do modelo global HadGEM2-ES considerando os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5. O modelo foi integrado com resolução horizontal de 5 km cobrindo a área do Estado de São Paulo.

O modelo possui 38 camadas verticais com o topo em 25 hPa, considera 13 tipos de uso e cobertura do solo, além da vegetação da área urbana, 4 camadas de solo e 9 tipos de solo. A parametrização física seguiu o modelo de Betts-Miller- Janjic e a de *Cumulus*, o modelo de Ferrier.

Área de Estudo

A Figura 1 mostra o relevo do Estado de São Paulo e suas características que podem influenciar no clima da bacia hidrográfica do rio Tietê. De maneira geral, o relevo é composto por quatro diferentes unidades: planícies litorâneas a leste (número 5 na Figura 1), planaltos no leste e centro do Estado (número 4), serras (cuestas basálticas) e depressões que se encontram distribuídas espacialmente (números 1, 2 e 3) (Ross e Moroz, 2011). Uma descrição detalhada do relevo é apresentada por Lemes et al. (2019). A bacia do rio Tietê ocupa áreas com topografia de, no máximo, 1027 m (como é o caso da nascente do Tietê em Salesópolis – SP). A região de número 3 na Figura 1 mostra a região mais baixa da bacia do Tietê, nela está exemplificada a Depressão Central, localidades que não passam dos 400 m acima do nível do mar.

A vegetação no Estado de São Paulo é heterogênea: há cobertura vegetal densa no setor sudeste do Estado (incluindo a sub bacia Alto Tietê), possui resquícios de Mata Atlântica, principalmente nas regiões do litoral paulista e da serra do Mar. A mata Atlântica ou floresta Atlântica (verde escuro na Figura 2) possui alta densidade, contribuindo com o balanço de umidade local, tanto pela evapotranspiração da floresta, quanto por manter a umidade transportada do oceano (Borelli, 2006). Similar à Mata Atlântica, em densidade, o território possui a mata dos Pinheiros (Meireles et al., 2008).

Figura 1 - Relevo do Estado de São Paulo (metros) e bacia do rio Tietê seguindo a classificação das sub bacias: 1- Planalto Ocidental, 2 – Cuestas Basálticas, 3 – Depressão Central, 4 – Planalto Atlântico, 5 – Planície Litorânea.

Na porção central e norte do Estado, englobando as sub bacias Tietê Jacaré e Tietê Batalha, a atividade agrícola (em rosa na Figura 2) ocupou o espaço que antes pertencia ao cerrado paulista (Klein, 2000) (verde claro na Figura 2). O cerrado paulista, caracterizado pela presença de árvores de pequeno porte e vegetação rasteira (Siqueira et al., 2007), acompanha as regiões dos vales das serras dos Agudos e Mirantes ao Sul, além das serras do Tabuleiro, Jaboticabal e Batatas ao norte (cor bege e violeta na Figura 2). Ainda é possível observar a presença da Mata Caducifólia, ou Floresta Decídua (sul, próxima a divisa com o Paraná), que é uma mata densa, encontrada em transição de biomas.

Na jusante do rio Tietê (orientação nascente/foz), a organização das características de cobertura da terra é determinada em sua maioria pela formação do relevo (Figura 2). A sub bacia Alto Tietê possui a maior altitude de toda bacia. Serras de menor porte, ao longo do Médio Tietê (Sorocaba Médio Tietê e Piracicaba Jundiaí), possuem vegetação arbórea (Mata dos Pinheiro), porém menos densa. Terras mais baixas, como vales, depressões (Baixo Tietê e Tietê Batalha), possuem menor declividade, isso as tornam de fácil manejo para agricultura (em rosa na Figura 2).

Figura 2 - Mapa de cobertura da terra para o Estado de São Paulo e bacia do rio Tietê no ano de 2017.

Análises

Climatologia

A primeira parte dos resultados apresentará a climatologia da Ts de todo o Estado de São Paulo e da região da bacia hidrográfica do rio Tietê. A climatologia é obtida com dados do sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua (lpdaac.usgs.gov/tools/appears/).

Uso e cobertura da terra

Uma breve contextualização sobre a mudança da cobertura da terra, para o período de 2001 a 2017, será mostrada para identificar os pontos de maior modificação, seja a área

convertida, degradada ou fragmentada (Leal et al., 2020).

Avaliação e Projeções do modelo ETA

Na sequência é realizada a validação dos dados de Ts do modelo ETA 5km no período de 2000 a 2005 através de comparação com dados do sensor MODIS (1 km) interpolados para a grade do modelo ETA (5 km).

Para quantificar diferença do modelo em relação ao observado foi calculado o VIES (Eq. 1):

$$VIES = ETA - MODIS \quad (1)$$

O viés indica a diferença, para mais ou para menos, que os dados obtidos pelo modelo possuem

em relação aos dados observados, representado pelo sensor MODIS.

Por fim, o sinal das projeções climáticas é obtido através da diferença dos períodos: 2006 – 2040, 2040 – 2070 e 2070 – 2100 em relação ao período presente analisado 2000 – 2005, ou seja, com as forçantes representadas por este período (4.5 W/m^2 e 8.5 W/m^2).

Resultados

Climatologia da Ts e Mudança no Uso e Ocupação da Terra: Dados Observados

Essa seção apresenta a climatologia anual e sazonal da Ts no Estado de São Paulo com base em dados recentes (2000 a 2018) obtidos com o sensor MODIS. Além disso, apresenta mudanças registradas no uso e ocupação da terra.

A média anual da Ts no Estado de São Paulo, com destaque para a bacia do rio Tietê, mostra um gradiente com orientação leste/oeste, devido ao efeito de continentalidade (Figura 3). No litoral do Estado, a média anual é de cerca de 23°C , mas na serra do Mar decresce devido à altitude (entre 800 a 1.000 m) e vegetação densa da região. Juntamente com a serra da Mantiqueira (entre 1.000 a 2.000 m de altitude), essas regiões possuem as menores médias de todo o Estado, com valores entre 16°C a 20°C na média anual (Figura 3). A maior parte do leste do Estado apresenta temperatura média entre 16°C a 23°C , porém, na sub bacia do Alto Tietê, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) há temperaturas mais

elevada (circunferência mais amarelada na Figura 3) devido ao efeito da ilha de calor. Ainda no setor leste do Estado, o Vale do Paraíba possui temperatura média anual de 23°C , porém, é nítida a mudança da temperatura para áreas vizinhas (urbanização da região).

A parte do Médio Tietê (incluindo as regiões Sorocaba Médio Tietê e Piracicaba Jundiá) possui dois padrões distintos de Ts. No setor a leste são registradas menores médias, em torno de 19°C a 20°C , devido à presença da serra da Cantareira, com grande elevação (800 m acima do nível do mar, mas atingindo, alguns pontos, 1.000 m). Já a porção oeste da região é mais quente, sendo a média anual em torno de 23°C a 26°C . Nessas áreas há centros urbanos, como as cidades de Sorocaba, Campinas, Jundiá, Piracicaba e outras, além de terras destinadas à agricultura. Na divisa a oeste das regiões médias do Tietê com a sub bacia Tietê Jacaré, tem-se dois trechos com menores médias anuais (em torno de 23°C e 22°C), em virtude da topografia elevada das serras de Botucatu (ao sul) e do Tabuleiro (ao norte).

Por fim, as regiões a oeste do Estado de São Paulo, bem como as sub bacias Tietê Batalha e Baixo Tietê, apresentam as maiores médias anuais de temperatura (entre 25°C a 27°C), porém, alguns pontos isolados registram 28°C . Essa região, diferente de todas as demais do Estado, é caracterizada por um relevo totalmente plano, pouco acidentado e com pouca cobertura vegetal (Figura 2).

Figura 3 - Média anual da Ts (°C) baseada nas informações do sensor MODIS para o período de 2000 a 2018.

A Figura 4 apresenta a média sazonal da Ts. As principais características dessa figura são: (1) a presença de temperaturas mais elevadas no verão e menores no inverno e (2) a fácil identificação de ilhas de calor, como na RMSP, vale do Paraíba, Sorocaba e Campinas (o que, é facilmente mostrado na Figura 3 devido aos núcleos de cores mais marrons). As maiores temperaturas da região leste estão no vale do Paraíba, por ser uma região de baixa altitude e cercada por montanhas e na RMSP. Além disso, é possível identificar o curso do rio Tietê ao longo de todo Estado, principalmente, no verão e primavera (Figura 4), indicando que o rio e suas matas ciliares podem ser consideradas como ilhas de fresco.

No verão (Figura 4a), a média da Ts é superior a 23° C em praticamente todo o Estado. As exceções são a serra da Mantiqueira e serra do Mar (região do município de Cunha) com médias em torno de 19° C e, a região sul do Estado, uma das áreas com maior cobertura de Mata Atlântica, com Ts de cerca de 20° C. As sub bacias do rio Tietê que registram maior temperatura são Baixo Tietê, Tietê Batalha e Tietê Jacaré. A partir da região média do Tietê (Sorocaba Médio Tietê e Piracicaba Jundiá), as maiores diferenças estão nos grandes centros

urbanos (Sorocaba, região de Campinas, mas principalmente, RMSP).

No inverno (Figura 4b), as menores temperaturas são registradas na serra da Mantiqueira (englobando os municípios de Campos do Jordão, São Bento do Sapucaí e Santo Antônio do Pinhal e serra do Mar, e novamente o trecho de Cunha) com cerca de 14° C. Nos primeiros trechos da sub bacia do rio Tietê, a sua jusante (Alto Tietê, Sorocaba Médio Tietê e Piracicaba Jundiá) aparecem alguns pontos com maior temperatura em razão da concentração dos centros urbanos (ilha de calor). Na sub bacia Alto Tietê a influência da RMSP na média da Ts é evidente em todas as estações do ano, bem como, a leste, na região do Vale do Paraíba, diferindo-se em até 4° C de regiões mais próximas, com menor concentração urbana e maior densidade de vegetação. Isso também pode ser identificado na região de Campinas (localizada na sub bacia Piracicaba Jundiá), nesta porção, a cor branca na Figura 4b predomina, indicando uma maior temperatura dessa região, em até 5° C, em comparação as outras vizinhas.

Nas estações de transição (**Figura 4c e 4d**), o outono é mais quente quando comparado a

primavera (exceto no norte do Estado de São Paulo). Fato que é decorrente do armazenamento de calor no solo após o término do verão. Isso também tem contribuição com o final da colheita e o solo estando sem vegetação. No norte do Estado predomina a agricultura, com cultivos mais rasteiros e com raízes menos profundas, então isso não auxilia tanto o armazenamento de energia no solo. As maiores temperaturas na primavera no setor norte são por aquecimento radiativo. As regiões mais vegetadas e elevadas continuam indicando menores valores de Ts, como a serra da Mantiqueira, serra do Mar e sul do Estado. Em todas as estações do ano, a RMSP, Campinas,

Sorocaba e alguns outros pontos, indicam um maior aquecimento. Na primavera (**Figura 4d**), o continente volta a esquentar gradativamente, iniciando pela porção noroeste do território, onde todo a cobertura da terra, favorece esse aquecimento (maior quantidade de solo exposto, terras destinadas à agricultura contrastando com a falta de florestas e áreas vegetadas). Na porção leste do Estado a Ts ainda é baixa, devido à orografia, porém, o fato mais importante para esse registro é a maior presença de vegetação (Mata Atlântica).

Figura 4 - Média sazonal Ts (°C) no período de 2000 a 2018 obtidas com dados do sensor MODIS.

Com a crescente urbanização ao longo do tempo e a intensa expansão agropecuária, muitas áreas vegetadas deram lugar à construção civil, plantações e pastagens. Essas mudanças impactam no clima regional, o que, consequentemente, influencia o clima global.

A Figura 5 indica a mudança no uso e ocupação da terra nos anos 2000 e 2017 na bacia do rio Tietê. O primeiro aspecto observado na análise é o aumento da atividade agrícola (cor rosa

na Figura 5), principalmente na região do Baixo Tietê, Tietê Batalha e Tietê Jacaré. A presença

dessa atividade às margens do rio Tietê aumentou desde o início da série histórica. Segundo dados do IBGE (2017), a maior parte da produção agrícola ao longo da bacia é de cana-de-açúcar e laranja (Bertão et al., 2019). A produção do ano de 2017 desses produtos foi de 447,5 milhões de toneladas, demonstrando o investimento nessas áreas. Em ambas houve o contraste com a diminuição da

vegetação rasteira e solo exposto, bem como, a diminuição, na porção leste do Tietê Batalha (mudança da cor azul para rosa na Figura 5 nas regiões da serra de Botucatu e serra do Tabuleiro). Lemes et al. (2019) mostraram que nessas áreas de mudanças na cobertura da terra a Ts aumentou em cerca de 1.5° C do ano 2000 para 2017.

As sub bacias Sorocaba Médio Tietê e Piracicaba Jundiáí mostraram um maior crescimento urbano, assim como o Alto Tietê, marcado pela RMSP. Essas áreas e o oeste da bacia do Tietê representam o avanço na produção de laranja no Estado de São Paulo. Segundo a Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SAAESP), a colheita aumentou 22,1%, alcançando 320 milhões de

caixas de 40,8 kg, sendo que mais da metade disso, foi destinada para a indústria de suco. Isso demonstra o aumento, em praticamente toda a bacia, das áreas destinadas à agricultura.

Por fim, o ponto mais notório está no Alto Tietê (Figura 5), uma vez que a área urbana duplicou. Para essa área expandir, a região de Mata Atlântica sofreu redução. Além da área urbana, as plantações de eucalipto (Arguello et al., 2010) contribuíram para a extração de uma pequena porção da mata originária da região. Esses aspectos podem ser vistos na Figura 5 pela diminuição da área em laranja, tanto na região sul do Alto Tietê quanto ao norte dela.

Figura 5 – Cobertura da terra ao longo da bacia do rio Tietê nos anos de 2000 e 2017. Dados do satélite MODIS Terra.

Validação do Modelo ETA

Antes da descrição das projeções futuras obtidas por um modelo climático numérico, é necessário conhecer sua performance no clima presente. Assim, nessa seção é apresentada a validação do modelo ETA-5km no período de 2000 a 2005. Esse período foi escolhido, uma vez que o ano de 2000 é o ano de início da série do MODIS e

o ano de 2005 é o último ano das simulações antes da inclusão das forçantes dos cenários RCPs nas projeções. A Figura 6 mostra, para o referido período, a Ts observada pelo MODIS, simulada pelo ETA e o VIES.

O modelo ETA é hábil em representar o padrão espacial sazonal e anual da Ts, em que as maiores temperaturas ocorrem no noroeste do Estado e as menores no leste-sudeste. O modelo tem uma tendência a superestimar a Ts nas porções

centro e oeste, exceto no setor leste do Estado. Além disso, o outono é a única estação do ano em que predomina viés negativo da ordem de -2°C . A análise realizada aqui foca em três regiões (em que cada uma inclui mais de uma sub bacia): Alto (Alto Tietê), Médio (Sorocaba Médio Tietê, Piracicaba Jundiá e Tietê Jacaré) e Baixo (Tietê Batalha e Baixo Tietê).

Para a primeira região, Alto Tietê, o modelo na RMSP subestima a Ts em cerca de 3°C na média anual e, excedendo, a 5°C no outono (Figura 6f). Na região do Médio Tietê, o viés é menor no verão e inverno, cerca de 1°C , e maior nas estações de transição, sendo de -2°C até 4°C

em algumas regiões. Por fim, na região do Baixo Tietê, a Ts tem menor viés no outono (1°C) e maior na primavera (5°C).

Embora a validação da Ts mostre diferenças em valores entre observação e modelo, isso não invalida a análise das projeções no clima futuro, visto que em tal análise é realizada a diferença futuro menos presente dos dados simulados. A mensagem mais importante dessa seção é mostrar que o ETA-5 km consegue reproduzir o padrão espacial da Ts e sua variabilidade sazonal.

Figura 6 - Média anual e sazonal da Ts ($^{\circ}\text{C}$) observada pelo MODIS (coluna da esquerda), simulada pelo modelo ETA - 5 km (coluna central) e viés (modelo menos observação) no período de 2000 a 2005.

Clima Futuro

A Figura 7 mostra a diferença futuro menos o presente para o cenário RCP 4.5, enquanto a Figura 8 apresenta a mesma informação, porém, para o cenário RCP 8.5. As principais informações

são que as tendências positivas na Ts aumentam no sentido oeste-leste, ou seja, do continente para o oceano, afetando, principalmente, as grandes regiões produtoras do Estado de São Paulo. Considerando o cenário RCP4.5, o Baixo Tietê é o setor que apresenta maior aumento na Ts e sendo

mais acentuado na primavera (até 7° C nos períodos 2006-2040 e no 2070-2100). O segundo maior aumento da Ts é projetado para a sub bacia Alto Tietê, principalmente para as estações de verão e primavera (6° C e 5° C respectivamente).

Figura 7 - Diferença das projeções da Ts (°C) do modelo ETA com o histórico, segundo o cenário RCP 4.5 do IPCC para os três períodos de análise: 2006 - 2040 (futuro próximo), 2040 - 2070 (futuro) e 2070 - 2100 (futuro distante). As linhas indicam as estações do ano, da mesma forma como na Figura 6. A última linha é o período anual.

O cenário RCP8.5, para o Estado e toda região da bacia do rio Tietê (Figura 8), evidencia as

preocupantes mudanças na Ts, uma vez que no final do século têm-se projeções de até 8° C de

aumento no oeste e norte do Estado. Durante o verão na Figura 7 (RCP 4.5) tinha-se um aquecimento maior restrito à sub bacia Baixo Tietê, porém, na Figura 8 (RCP 8.5) esse aquecimento

estende-se até a porção média do rio (Tietê Jacaré); além disso, engloba o início, a montante, da sub bacia Sorocaba Médio Tietê e Piracicaba Jundiá.

Figura 8 - Diferença das projeções da Ts (°C) do modelo ETA com o histórico (1960 – 2005) segundo o cenário RCP 8.5 do IPCC para os três períodos de análise: 2006 - 2040 (futuro próximo), 2040 - 2070 (futuro) e 2070 - 2100 (futuro distante). As linhas indicam as estações do ano, da mesma forma como na Figura 6. A última linha é o período anual.

Conclusões

Esse estudo mostrou a climatologia da Ts no período de 2000 a 2018 com base em dados do sensor MODIS e as projeções dessa variável fornecidas pelo modelo ETA-5 km considerando dois cenários do IPCC: RCP4.5 e RCP8.5.

O padrão espacial da Ts é caracterizado por menores temperaturas na porção do litoral e maiores a oeste (interior do continente) do Estado. Em função da alta resolução do MODIS, a localização das ilhas de calor urbano e a trajetória do rio Tietê são bem representadas nos dados. O modelo ETA-5km representa muito bem a

localização das ilhas de calor e as diferenças térmicas ao longo do rio Tietê

As maiores projeções nas temperaturas ocorrem no oeste da bacia do rio Tietê. Porém, as alterações vão intensificando no sentido oeste-leste à medida que as projeções vão avançando no tempo. O aumento da média da T_s está praticamente em todo o Estado de São Paulo no período 2070 – 2100, o que cria um cenário extremamente preocupante.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES - código financeiro 001 e ao CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro e aos centros (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC e ao *United State Geological Survey*) que disponibilizaram os dados usados nesse estudo. Ainda agradecemos ao grupo da Dra. Chou Sin Chan e a Pedro Regoto pesquisadora do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela cessão dos dados de simulação climática.

Referências

- Ambrizzi, T., Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., Llopart, M. 2019. The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1 – 23.
- Amorim, M. C. 2005. Ilhas de calor em Birigui/SP. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, p. 121 – 131.
- Barboza, E. C., Machado, A. J., Franchini, A. A. 2013. Estimativa do balanço de energia na superfície em cidades do oeste paulista, Brasil. *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, (pp. 1 - 7). Brasília.
- Barros, H. R., Lombardo, M. A. 2016. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. *GEOUSP: espaço e tempo*, vol 2 160 – 177.
- Bertão, E. F., Ricardi, A. M., Lima, C. G. R. 2019. Análise multitemporal do uso e cobertura da terra e potencial de degradação do solo na microbacia do Córrego Laranja Azeda – município de Pereira Barreto (SP). *Anap Brasil*, 12, 27, 54 – 71.
- Calado, R. N., Derecynski, C. P., Chou, S. C., Sueiro, G., Oliveira, J. D., Silva, V. R. 2018. Avaliação do Desempenho das Simulações por Conjunto do Modelo Eta-5km para o Caso de Chuva Intensa na Bacia do Rio Paraíba do Sul em Janeiro de 2000. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 83 – 96.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Acesso em 05 de Junho de 2018, disponível em <https://www.ibge.gov.br/>, 2018.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. United Nations. Access in December 06 in 2019, Available in <https://www.ipcc.ch/>, 2018.
- Leal, F. A., Santos Filho, F. F., Leal, G. S. A., Almeida, M. V. S., Miguel, E. P. 2020. Análise temporal da fragmentação da paisagem no entorno de florestas nacionais em Rondônia. *Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 7, 1, 94 – 100.
- Lemes, M. C. R., Reboita, M. S., Torres, R. R. Elementos Fisiográficos e a Precipitação no Estado de São Paulo. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física, 2019, Fortaleza. Elementos Fisiográficos e a Precipitação no Estado de São Paulo.
- Marengo, J., Obregon, G., Ramirez, V. 2013. Observed and projected changes in rainfall. *Climate Research*, 57, 61 – 72.
- Mendonça, F. O. 2000. O clima urbano de cidades de porte médio e pequeno: aspectos teórico-metodológico e estudos de caso. *Vulnerabilidade e Mudanças Climáticas*, 167 - 192.
- MODERATE -RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER (MODIS). Acesso em 12 de julho de 2020, disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/tools/appeears/>.
- PLANO DE BACIA DO RIO TIETÊ. Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (USP) Comitê de Bacia Hidrográfica, 1 – 55. Disponível em: http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7111/pat_sumario_executivo.pdf, 2018.
- Peres, L. F., Lucena, A. J., Rotunno Filho, O. T., França, J. A. 2018. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 104-116.
- Tang, R., Zhao, X., Zhou, T., Jiang, B., Wu, D., Tang, B. 2018. Assessing the impacts os urbanization on albedo in Jing-Jin-Ji region of China. *Remote Sensing*, 10(1096), pp. 1 – 21.
- Villamayor, J., Ambrizzi, T; Mohino, E; 2018. Influence of decadal sea surface temperature variability on northern Brazil rainfall in CMIP5 simulations. *Climate Dynamics*, v. 51, n. 1-2, p. 563-579, v. 2.