

# Projeções de resiliência dos biomas brasileiros e riscos socioambientais às mudanças climáticas

*Projections of climate change resilience of Brazilian biomes  
and socio-environmental risks*

Patrícia F. Pinho<sup>a</sup>

Luciano J. S. Anjos<sup>b</sup>

Saulo Rodrigues-Filho<sup>c</sup>

Diogo V. Santos<sup>d</sup>

Peter M. Toledo<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Estudos Avançados (IEA), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil  
End. Eletrônico: pinhopati@gmail.com

<sup>b</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, PA, Brasil  
End. Eletrônico: ljsanjoss@gmail.com

<sup>c</sup> Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília (CDS/UnB), Brasília, DF, Brasil  
End. Eletrônico: saulofilhocds@gmail.com

<sup>d</sup> Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), Brasília, DF, Brasil  
End. Eletrônico: diogo.santos@mctic.gov.br

<sup>e</sup> Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), Inpe, São José dos Campos, SP, Brasil  
End. Eletrônico: peter.toledo@hotmail.com

doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33918

Received: 04/09/2020  
Accepted: 03/11/2020

ARTICLE – DOSSIER

Os dados e os resultados apresentados nesta publicação foram desenvolvidos no âmbito do projeto “Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção do Clima”, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, com apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, por meio dos recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente, aos quais oferecemos nossos agradecimentos.

## RESUMO

As mudanças climáticas são consideradas globalmente um dos principais vetores de transformações socioambientais, sobretudo em biomas, ecossistemas e populações mais vulneráveis. Nesse contexto, o conceito de resiliência tem sido frequentemente empregado, sendo utilizado na ecologia para entender os limiares de transição ecossistêmicos pelo qual florestas e outros habitats conseguem se

estruturar diante das diversas perturbações externas. No entanto, o conceito de resiliência ante os impactos e riscos das mudanças climáticas pelas lentes de riscos socioambientais no Brasil ainda é pouco desenvolvido, sobretudo na escala de biomas. Neste artigo, utilizamos a teoria das transições críticas à modelagem de distribuição de nicho ecológico em cenários futuros de aquecimento global até o final do século, a fim de evidenciar a alteração da resiliência ecológica dos biomas da Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, e de que forma as alterações na resiliência podem levar a um aumento da exposição, vulnerabilidades e riscos à segurança socioambiental. O artigo mostra como a abordagem interdisciplinar na modelagem de resiliência dos biomas pode ser um instrumento auxiliar para tomada de decisões no âmbito das políticas públicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas e redução de riscos à segurança socioambiental.

**Palavras-chave:** Biomas. Modelagem. Resiliência. Serviços Ecosistêmicos. Mudanças Climáticas. Segurança Socioambiental.

## ABSTRACT

*Climate Change is amongst the major drivers of socio-ecological transformation on vulnerable biomes and populations in the developing countries. The concept of resilience has been widely debated in the context of climate change and used in ecology to understand the ecosystem thresholds by which forests and other habitats restructure in the face of various external disturbances. However, the concept of resilience in the context of the impacts and risks of climate change through the lens of the socio-ecological security in Brazil is still less advanced, especially at the scales of biomes. In this article, we use a conceptual approach that combines the theory of critical transitions with the modeling of ecological distribution in future scenarios of gradual increase in global temperature by the end of the century for the Amazon, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica and Pampa's biomes. We show how changes in the ecological resilience of these biomes may cascade into possible higher exposure vulnerabilities and risks to socioecological security. The article offers the possibility of using biome resilience modeling as a supporting tool for decision making for climate change public policies, as mitigation and adaptive strategies, as reforestation and the establishment of priority areas for conservation in the country.*

**Keywords:** Biomes. Modeling. Resilience. Ecosystem Services. Climate Change. Social and Environmental Security.

## 1 INTRODUÇÃO

Para todo o Brasil, as análises de modelagem climática (utilizando o cenário-base 1970 até 2050) dos efeitos cumulativos de vetores climáticos e não climáticos na perda de espécies revelam que as forçantes de Mudanças do Uso da Terra (MUT) têm um papel histórico preponderante nas alterações dos biomas Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica e para os ambientes marinhos (JOLY et al., 2018). Contudo, a partir de 1970, as mudanças climáticas passam a ter participação crescente na perda de biodiversidade, oferecendo em 2050 riscos significativos ao provimento de serviços ecossistêmicos (OMETTO et al., 2018).

As projeções de mudanças climáticas para o Brasil apontam para impactos significativos na alteração do regime de precipitação extrema na forma de enchentes e inundações; forte aumento nos extremos de calor e maiores probabilidades de ondas de calor, sobretudo em meio urbano; maiores riscos de secas e aumento da aridez (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO; SCARANO, 2016). Ainda crítico se faz o fato de que tais impactos climáticos sobrepostos aos processos oriundos das mudanças do uso da terra nos ecossistemas acontecem de forma não linear, heterogênea no tempo e no espaço e são ainda pouco elucidados, tal como o debate sobre os pontos de inflexão ou “*tipping points*” nos biomas (LENTON, 2013; LENTON et al., 2008).

Nesse contexto, é importante reconhecer os limiares de temperatura, precipitação e umidade pelos quais os ecossistemas (oceanos e de florestas) incorrerão em pontos de inflexões para poder antever

e gerenciar riscos emergentes (OPPENHEIMER et al., 2014). As evidências científicas recentes sugerem que as condições climáticas atuais e projeções de alterações futuras impõem ônus ambientais, econômicos e sociais substanciais aos países tropicais do Sul Global, tal como o Brasil, que sofreram impactos econômicos e riscos de forma não linear e heterogênea (BURKE; HSIANG; MIGUEL, 2015). Contudo, as perdas econômicas e custos socioambientais poderiam ser minimizados, em teoria, por meio da implementação de estratégias de adaptação (CARLETON; HSIANG, 2016).

Por essa perspectiva, este artigo visa contribuir com análises de resiliência socioambiental de forma integrada na escala dos biomas da Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica e Pampa considerando as suas maiores vulnerabilidades às mudanças climáticas. O estudo busca contribuir para a redução de riscos em diferentes setores da economia, e bem-estar humano e saúde das populações, sobretudo as mais vulneráveis. Para esse fim, os resultados aqui apresentados possibilitam o apoio técnico a decisões sobre políticas de desenvolvimento socioeconômico, de planejamento urbano e áreas prioritárias para conservação na agenda de mitigação (e.g. reflorestamento) e de adaptação aos riscos oriundos da crise climática.

## 2 ABORDAGEM METODOLÓGICA INTEGRADA

Para compor as análises de alterações dos biomas terrestres diante das mudanças climáticas e seus desdobramentos para o que aqui definimos como segurança socioambiental<sup>1</sup>, três etapas distintas foram desenvolvidas. Primeiramente, avaliou-se a resiliência atual e futura dos biomas (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampas) por meio da modelagem de distribuição de nicho climático. Posteriormente, os resultados das análises de resiliência foram avaliados sob a ótica da força de MUT específicas para cada um dos biomas, com exceção do Pantanal<sup>2</sup>. A partir da triangulação dos dados, apresentamos uma discussão mais ampla sobre os possíveis riscos socioambientais às mudanças climáticas nos principais biomas do País.

As análises de resiliência dos ecossistemas por biomas foram realizadas por meio da distribuição do nicho climático, considerando variáveis de temperatura e precipitação para o período atual (1960-1990) e cenários de mudanças climáticas futuros representando diferentes níveis de aquecimento médio global (1,5°C, 2°C e 4°C, respectivamente), para RCP 8.5. Consideraram-se análises qualitativas e quantitativas de MUT no presente e projeções futuras (quando disponíveis) nos biomas por meio de taxas de desmatamento, dependência e fragilidade de povos indígenas, comunidades tradicionais e agricultura familiar, a expansão da agropecuária e “*commodities*”, urbanização e consumo, que têm um papel central na alteração dos ecossistemas e habitats, e sinergicamente interagem com as MC. Na próxima seção abordaremos a premissa conceitual do estado da arte de resiliência ecológica e modelagem de distribuição.

## 3 PREMISSA CONCEITUAL DO ESTADO DA ARTE EM RESILIÊNCIA ECOLÓGICA E MODELAGEM DE DISTRIBUIÇÃO

A clássica definição de resiliência de Holling (1973), até hoje amplamente utilizada, assevera que resiliência ecológica corresponde à magnitude de distúrbios que um sistema pode tolerar antes de mudar para um estado estável diferente. Tal conceito sugere que há limites ecofisiológicos de tolerância que garantem o adequado funcionamento dos ecossistemas naturais (aqui biomas) ao longo de um gradiente ambiental (e.g. temperatura e precipitação). Teoricamente, mudanças gradativas das condições ambientais podem fazer com que um ecossistema perca resiliência, reduzindo sua capacidade de auto-organização após um distúrbio e, conseqüentemente, comprometendo sua estrutura e

1 | Aqui, segurança socioambiental é definida como a forma que a vida humana e respectivos modos de vida dentro do meio ambiente sejam assegurados, seja na provisão de água, energia, alimento, bens materiais e atributos culturais (Adotado para a Quarta Comunicação Nacional do Brasil para a UNFCCC, 2019).

2 | Para o Pantanal, não foram realizadas análises de modelagem e, portanto, não foi contemplado no artigo.

funcionamento (SCHEFFER et al., 2009). A teoria da estabilidade ecológica e transições críticas prevê que se um determinado limiar ambiental (e.g. climático) for excedido, poderá desencadear um evento de transição crítica, o qual conduziria tal ecossistema com baixa resiliência a um estado alternativo de estabilidade (FOLKE et al., 2004; GUNDERSON, 2000; SCHEFFER et al., 2001). Em outras palavras, ocorreria a transformação de um ecossistema em outro, com uma reconfiguração dos ambientes sobre o espaço geográfico. No contexto atual, de mudanças climáticas em curso, podemos esperar que tais alterações atuem como um vetor proeminente de ameaça aos ecossistemas em função da promoção da perda de resiliência dos ecossistemas naturais (ANADÓN; SALA; MAESTRE, 2014).

Para tratar, a partir dessa lógica de narrativa, as análises de alterações dos ecossistemas e seus desdobramentos para a segurança socioambiental por biomas no Brasil, este trabalho buscou avaliar primeiramente a resiliência atual e futura dos ecossistemas nos biomas (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampas) usando o conceito e modelagem de distribuição do “nicho climático” e concomitantemente analisar a cadeia de impactos associada às forçantes de Mudanças no Uso da Terra (MUT).

As análises de resiliência dos ecossistemas por bioma serão apresentadas para os cenários de mudanças climáticas atual e futuros, representados por diferentes níveis de aquecimento global (1,5°C, 2°C e 4°C para RCP 8.5), e refletindo horizontes temporais centrados em 2025, 2045 e 2085, baseados em dados observados no presente e passado. Dado que as Mudanças do Uso da Terra (MUT) têm um papel central na alteração dos ecossistemas e *habitats*, e exposição destes aos impactos das Mudanças Climáticas (MC), proporcionando um processo sinérgico de retroalimentação positivo de degradação ambiental e riscos socioambientais, uma avaliação qualitativa e quantitativa de tais alterações atuais e futuras nos biomas é feita. Como resultado, a integração de análises de nicho climático presente e futura com as avaliações da atual e tendência de MUT irá inferir sobre a potencial resiliência socioambiental no contexto das mudanças climáticas para o País.

### 3.1 MODELANDO A RESILIÊNCIA DOS BIOMAS TERRESTRES DO BRASIL

Com o intuito de estimar a resiliência dos biomas terrestres do Brasil, foi tomado como premissa que cada tipo de vegetação está adaptado a uma determinada faixa de condições de temperatura e precipitação atuais, ou seja, a vegetação está em equilíbrio com o clima. Se, no futuro, um bioma for exposto a condições climáticas diferentes, às quais não está adaptado, sua resiliência poderia diminuir até alcançar um ponto em que ocorreria a transição para um outro patamar de estabilidade, resultando em um padrão de vegetação dominante distinto do atual. Assim, os modelos computacionais adotados foram projetados a fim de verificar qual seria a provável resposta da vegetação dos biomas se estes estivessem submetidos a condições de temperatura e precipitação diferentes das atuais.

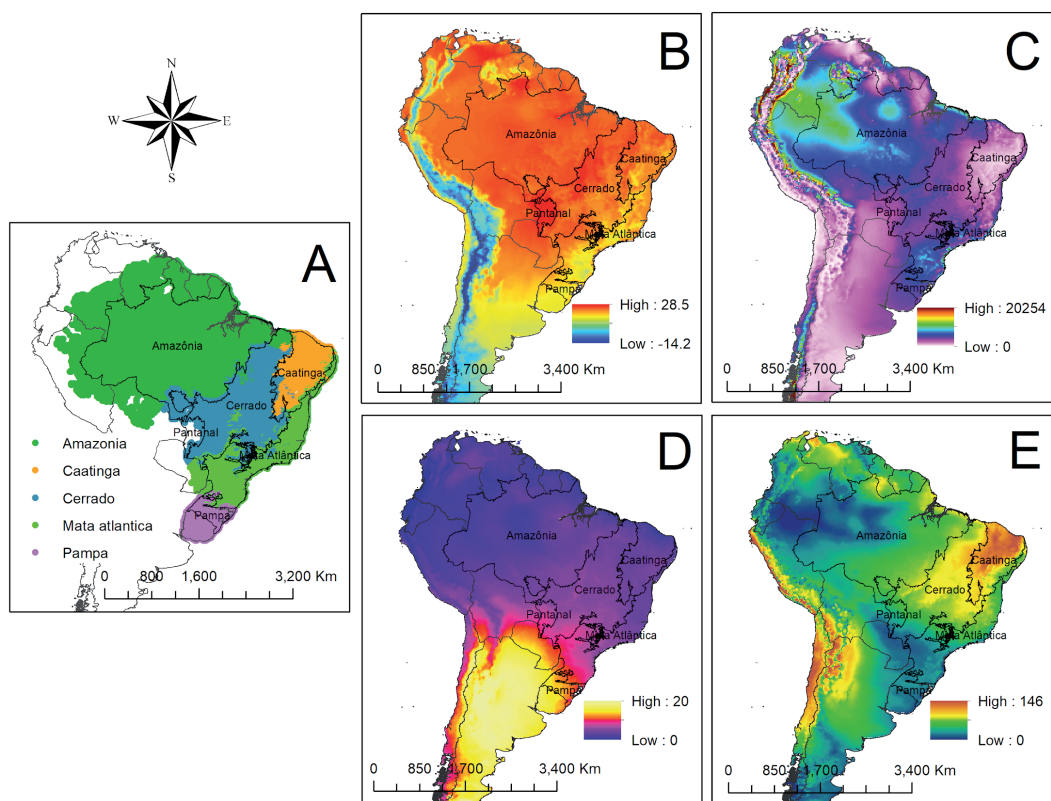
Mensurar de forma objetiva a resiliência ecológica não é uma tarefa trivial (NIKINMAA et al., 2020), sobretudo em largas escalas espaciais (REYER et al., 2015). Com o advento de recursos computacionais com alto poder de processamento e a grande disponibilidade de massivas quantidades de dados, várias abordagens têm sido propostas no sentido de ocupar essa lacuna. Por exemplo, Hirota et al. (2011) utilizaram uma regressão logística para mensurar o efeito da precipitação sobre os estados estáveis de floresta e savana para a América do Sul.

Com outra abordagem, Comer et al. (2019) criaram um índice para avaliar a vulnerabilidade de *habitats* à mudança climática modelando resiliência a partir da inclusão de fatores, como paisagens intactas, espécies invasoras, alteração do regime de fogo, insetos florestais e risco de doenças. Em uma revisão recente, Chambers, Allen e Cushman (2019) buscaram operacionalizar o conceito de resiliência a partir de uma estrutura conceitual espacialmente explícita. A abordagem adotada aqui difere das anteriores devido ao fato desta incorporar o conceito de resiliência ecológica, no âmbito da teoria das transições críticas, à modelagem de nicho ecológico (ANJOS; TOLEDO, 2018).

Neste estudo, para analisar a potencial resposta dos biomas terrestres brasileiros ante as mudanças climáticas, assumimos a premissa de que cada bioma representa um estado estável dentro de um sistema de multiestabilidade de ecossistemas em uma larga escala (SCHEFFER et al., 2012). Essa premissa possui um forte suporte empírico, visto que cada bioma apresenta uma resposta fenotípica e adaptativa peculiar das espécies às condições climáticas predominantes de uma região, modulada e consolidada ao longo de sua história ecológica evolutiva (DONOGHUE; EDWARDS, 2014). Com o objetivo de aumentar a acurácia espacial na determinação e classificação dos biomas, utilizamos os polígonos de ecorregiões, definidas por (OLSON et al., 2001). Além disso, a fim de contornar o viés causado pela subamostragem por conta de fronteiras geopolíticas, consideramos toda a amplitude de resposta climática dos biomas na América do Sul.

Após essa definição, os polígonos de cada bioma foram convertidos para um dado binário de presença-ausência, sob o formato vetorial de pontos com resolução espacial de 0.20° (~24 km). Para cada ocorrência de presença ou ausência foi atribuída uma assinatura georreferenciada com longitude e latitude, cobrindo toda a amplitude ocupada pelos biomas na América do Sul. Tais informações de presença-ausência foram usadas então como “inputs” no procedimento de construção dos modelos correlativos de distribuição baseados no nicho ecológico. Ao todo, foram incluídos nas análises 21.441 pontos como unidades amostrais, cobrindo parte da América do Sul (Figura 1A). Quando determinado bioma era modelado, levava-se em conta o dado de presença original, e todos os outros pontos da nuvem de amostras eram considerados como ausências daquele respectivo bioma.

Para modelar e prever a relação dos biomas terrestres com o clima dominante, utilizamos quatro preditores climáticos críticos para os ecossistemas terrestres (LEHMANN et al., 2014; OLIVERAS; MALHI, 2016). Essas variáveis foram selecionadas a partir de dois eixos ecoclimáticos de variabilidade, conforme (ANJOS; TOLEDO, 2018): (1) disponibilidade de umidade – precipitação acumulada anual (Figura 1C) e sazonalidade da precipitação (Figura 1E) e; (2) disponibilidade energética – temperatura média anual (Figura 1B) e amplitude anual de temperatura (Figura 1D). Tais variáveis foram obtidas a partir do Modelo Regional ETA, sob as condições de contorno do modelo global HadGEM2 ES (Eta-HadGEM2 ES), desenvolvido pelo Inpe (CHOU et al., 2014) com resolução espacial de 0.20° (24 km) abrangendo toda a América do Sul. As projeções climáticas para o futuro compreendem três períodos associados em níveis de aquecimento médio global para o RCP 8.5 do IPCC: 1.5°C (2011-2040); 2°C (2040-2070) e 4°C (2070-2099).



**Figura 1** | Em A são apresentadas as ocorrências para cada bioma levando em conta sua distribuição original. Os preditores climáticos utilizados na modelagem são apresentados em B – temperatura média anual; C – precipitação acumulada anual; D – amplitude anual de temperatura; E – sazonalidade da precipitação.

Fonte: *Elaboração própria.*

Para modelar a resiliência dos estados estáveis dos biomas terrestres, utilizamos o pacote *biomod2* (THUILLER et al., 2009) implementado na linguagem R (R CORE TEAM, 2020). Os modelos de distribuição foram calibrados utilizando os dados de presença-ausência de cada estado estável do bioma combinado aos preditores climáticos selecionados. Os modelos foram rodados utilizando nove métodos diferentes disponíveis na plataforma *biomod2*: *Bioclim* (SRE); *Classification Tree Analysis* (CTA); *Random Forest* (RF); *Generalized Linear Models* (GLM); *Generalized Additive Models* (GAM); *Generalized Boosted Models* (GBM); *Function Discriminant Analysis* (FDA); *Artificial Neural Networks* (ANN) e *Multiple Additive Regression Splines* (Mars). Para cada método, foram rodadas 10 réplicas com partição de 75% para treino e 25% para teste. A avaliação da acurácia dos modelos de cada método foi realizada com as métricas *True Skill Statistics* (TSS) e *Receiver Operating Characteristic* (ROC).

Cada método apresenta distintos pressupostos biológicos, matemáticos e/ou estatísticos, podendo produzir diferentes resultados a partir de um mesmo conjunto de dados de entrada. De acordo com Rangel e Loyola (2012), levando em conta tais características de cada método de modelagem, estes podem ser agrupados como “aquários” (*Bioclim*), “turbinas” (GLM, GAM, MARS e FDA) ou “cofres” (CTA, RF, GBM e ANN). Nesse sentido, optamos pela criação de um modelo consensual entre os diferentes métodos a fim de minimizar os efeitos de incertezas associados a cada método de modelagem. Para isso, os melhores modelos de cada método para compor o “ensemble” foram selecionados utilizando a métrica TSS que mede a qualidade combinando sensibilidade e especificidade dos modelos (ALLOUCHE; TSOAR; KADMON, 2006).

Para efeito de limiar, foram considerados acurados aqueles modelos com valores de TSS maior ou igual a 0.6. O modelo de distribuição consensual foi obtido por meio da média aritmética entre os melhores

modelos dos diferentes métodos (DINIZ FILHO et al., 2009). Construímos um modelo de distribuição consensual para cada bioma a partir da seleção dos modelos que alcançaram um valor de TSS  $\geq 0.6$ .

#### 4 RESULTADOS DA MODELAGEM DE RESILIÊNCIA DOS BIOMAS

A Figura 2 retrata o resultado da modelagem de distribuição dos biomas para o clima atual, que de forma explícita evidencia que há pouca sobreposição de ocupação do espaço climático (temperatura e precipitação) entre os biomas no Brasil. O padrão que se observa é que cada bioma ocupa uma determinada faixa do gradiente ambiental climático e, dentro desse contexto, todos apresentam relativa alta resiliência, e com resiliência baixa e ou intermediária em suas faixas de transição.

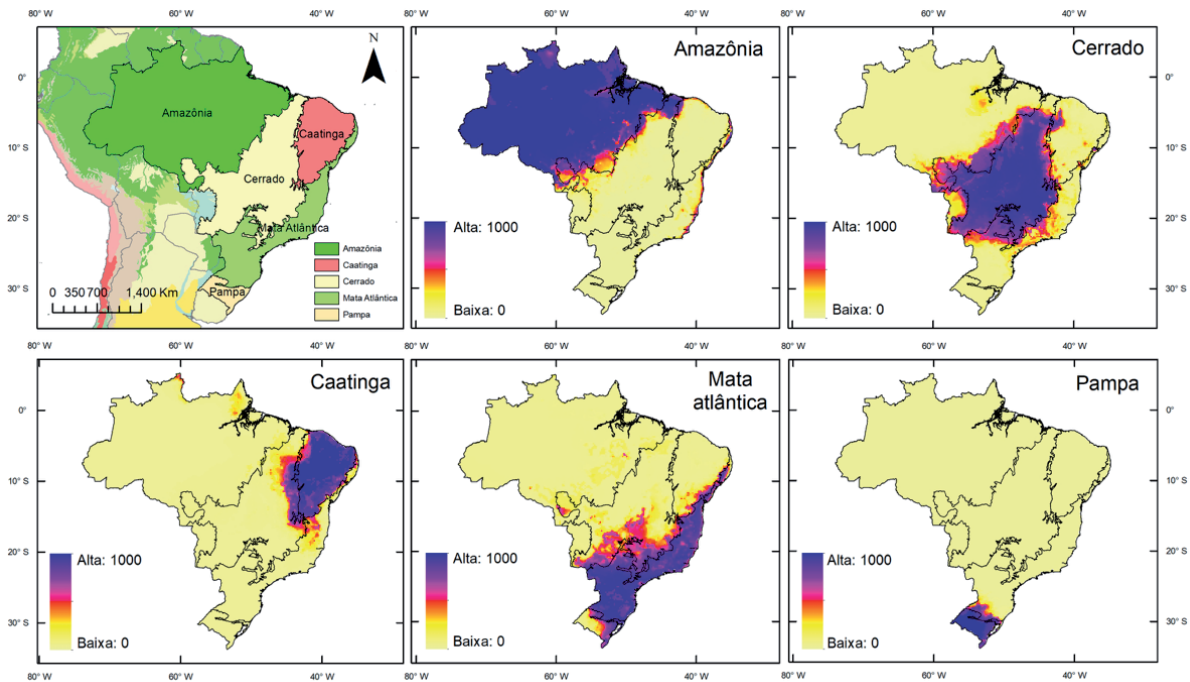
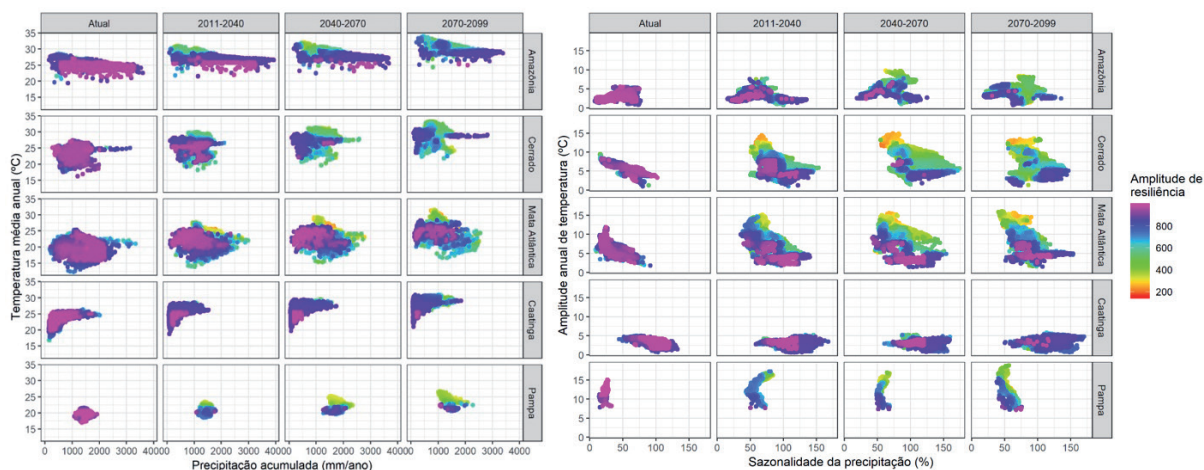


Figura 2 | Resiliência (baixa: 0 até alta: 1000) atual dos biomas para a dinâmica ecoclimática.

Fonte: Elaboração própria

A variável resiliência representa o grau de dominância de um certo bioma dentro de seus limites biogeográficos originais. Altos valores dessa variável indicam que um bioma possui uma forte predominância em comparação a outros biomas, ou seja, ele apresenta uma maior resiliência ecoclimática. Por outro lado, baixos valores apontam para uma menor resiliência e uma maior suscetibilidade a eventos de transição para outros estados estáveis dos ecossistemas.

Nesse sentido, quando a amplitude de resiliência é avaliada em um plano climático bidimensional, sob diferentes cenários climáticos (colunas), é possível detectar mudanças no nível de dominância do bioma a partir do deslocamento para condições climáticas não análogas ao presente (Figura 3). Por exemplo, nesta figura, observa-se o bioma amazônico mais vulnerável à transição crítica em cenários futuros por conta do aumento da temperatura média (eixo y) e redução da precipitação acumulada anual (eixo x) sob seus domínios biogeográficos. Da mesma forma, no mesmo bioma, observa-se que pequenas mudanças na sazonalidade da temperatura (eixo y) e precipitação (eixo x) provocaram fortes alterações na amplitude de resiliência, sugerindo uma maior vulnerabilidade a eventos de transição crítica em função das mudanças climáticas projetadas.



**Figura 3 |** Amplitude de resiliência atual e futura dos biomas relativa ao grau de aquecimento de 1,5°C, 2°C e 4°C no espaço bidimensional da modelagem de nicho climático. O conjunto das variáveis utilizadas foram de temperatura média anual (°C) e precipitação acumulada (mm/ano), e de amplitude anual de temperatura (°C) e sazonalidade da precipitação (%).

Fonte: Elaboração própria.

### AMAZÔNIA

A amplitude de resiliência no espaço ecoclimático “atual” ocupado pela Amazônia (níveis altos de precipitação e temperatura) denota alta capacidade adaptativa da floresta e está representada na Figura 3. Esta mostra que o limiar de alteração da amplitude de resiliência é sensível à diminuição da precipitação anual a partir de 1.500 mm/ano. As projeções mostram uma alteração significativa na amplitude de resiliência e evidenciam sua perda na maior parte do bioma da Amazônia, a partir do nível de aquecimento de 1,5°C, se concentrando em alta resiliência apenas na parte oeste do bioma, mas com retração significativa da amplitude em níveis de aquecimento mais elevados.

Dessa forma, as tendências de diminuição de precipitação e umidade afetam a resiliência da floresta. Tal cenário já tem sido documentado para o bioma (ZANIN; MACHADO; ALBERNAZ, 2016) resultando em aumento da mortalidade de árvores, redução da biomassa florestal e incremento na incidência de episódios de incêndio, culminando com a perda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos (ANJOS; TOLEDO, 2018; OMETTO et al., 2014).



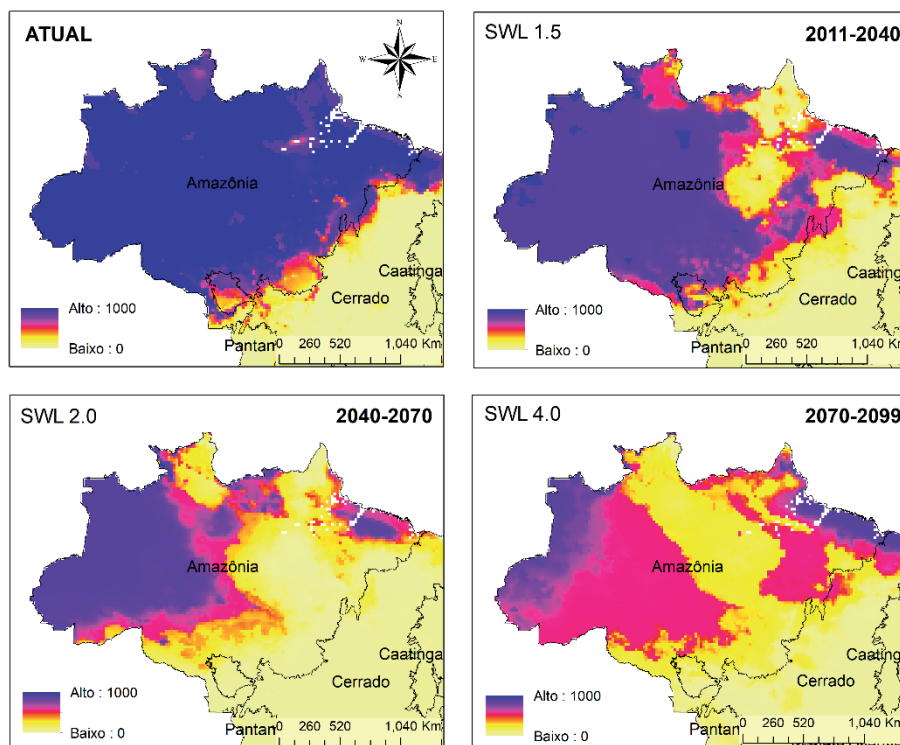


Figura 4 | Projeção das alterações da resiliência para a Amazônia (baixa: 0 até alta: 1000) em 1,5°C, 2°C e 4°C.

Fonte: Elaboração própria.

## CAATINGA

Para a Caatinga, a faixa de alta resiliência é bastante estreita no período atual, sendo dessa forma um bioma de baixa resiliência às variáveis ecoclimáticas (temperatura e precipitação), como é demonstrado na Figura 5. As projeções futuras mostram um outro estado estável, mais característico de deserto, com altas temperaturas e níveis críticos de precipitação, sem biomassa. Tais fatores indicam uma tendência maior ao processo de aridização, que, em conjunto com a degradação ambiental, leva a uma expansão das áreas de desertificação com a diluição da amplitude da resiliência da Caatinga.

As projeções indicam que, a partir do aumento do nível de aquecimento para 1.5°C, ocorre uma expansão do bioma para as zonas costeiras, Sul e Centro-Oeste do País, com resiliência alta. A partir do nível de aquecimento relativo a 2°C, mais expansão ocorre, sobrepondo o bioma da Mata Atlântica e avançando para o Cerrado. Para o nível de aquecimento de 4°C, o bioma fica com uma faixa de resiliência alta em áreas antes ocupadas pelo bioma da Mata Atlântica, e expansão para o Centro-Oeste ocupando o bioma do Cerrado. Os resultados dessa modelagem para o bioma da Caatinga também já foram descritos por Zanin, Machado e Albernaz (2016), mostrando compatibilidade dos resultados para o bioma.

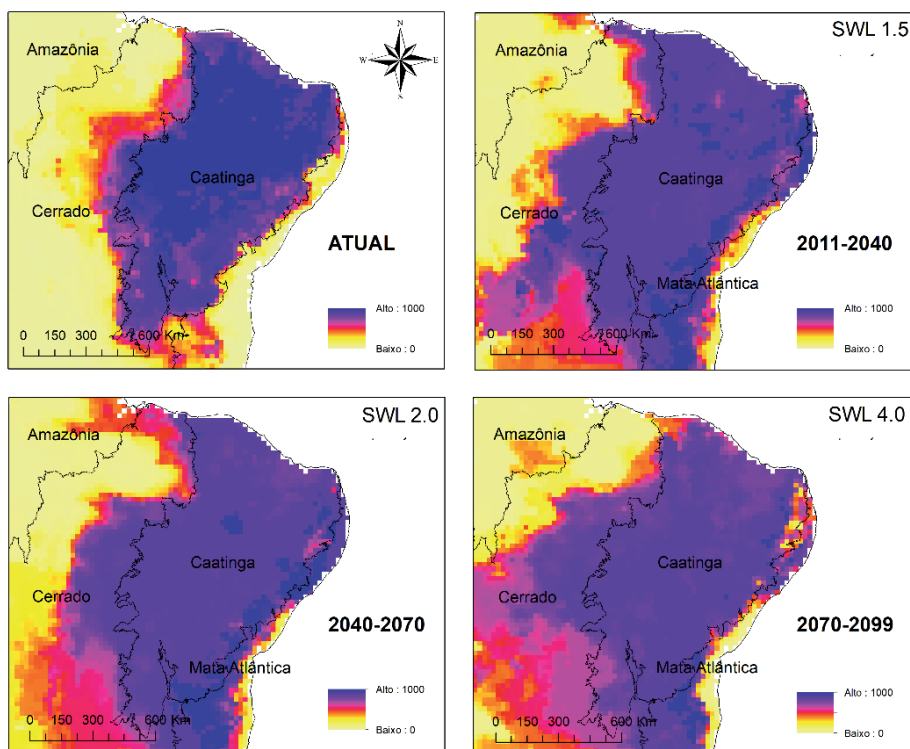


Figura 5 | Projeção das alterações da resiliência da Caatinga (baixa: 0 até alta: 1000) em 1,5°C, 2°C e 4°C.

Fonte: Elaboração própria.

### CERRADO

Para o Cerrado, a faixa de amplitude de resiliência é alta, maior do que para a Amazônia, apresentando relativa baixa resiliência em relação ao aumento das precipitações (~2,500 mm/ano) e uma maior tolerância ao gradiente de altas temperaturas no período atual, conforme é demonstrado na Figura 6. O bioma também apresenta nível intermediário de biomassa, dentro de transição do aumento e ou perda de resiliência. As projeções baseadas no período atual mostram que a partir de um nível de aquecimento relativo a 1.5°C, o Cerrado se expande em áreas antes ocupadas pelo bioma da Amazônia, e áreas ocupadas pela Mata Atlântica e região costeira. Para projeções de nível de aquecimento equivalente a 2°C, o bioma avança significativamente para ocupar grande parte da Amazônia e da Mata Atlântica. Para o nível de aquecimento de 4°C, os resultados dos modelos indicam uma diminuição da resiliência na região que é atualmente ocupada pelo bioma da Amazônia. Nesse mesmo cenário, a região costeira (Mata Atlântica) é ocupada pelo Cerrado, com resiliência intermediária.

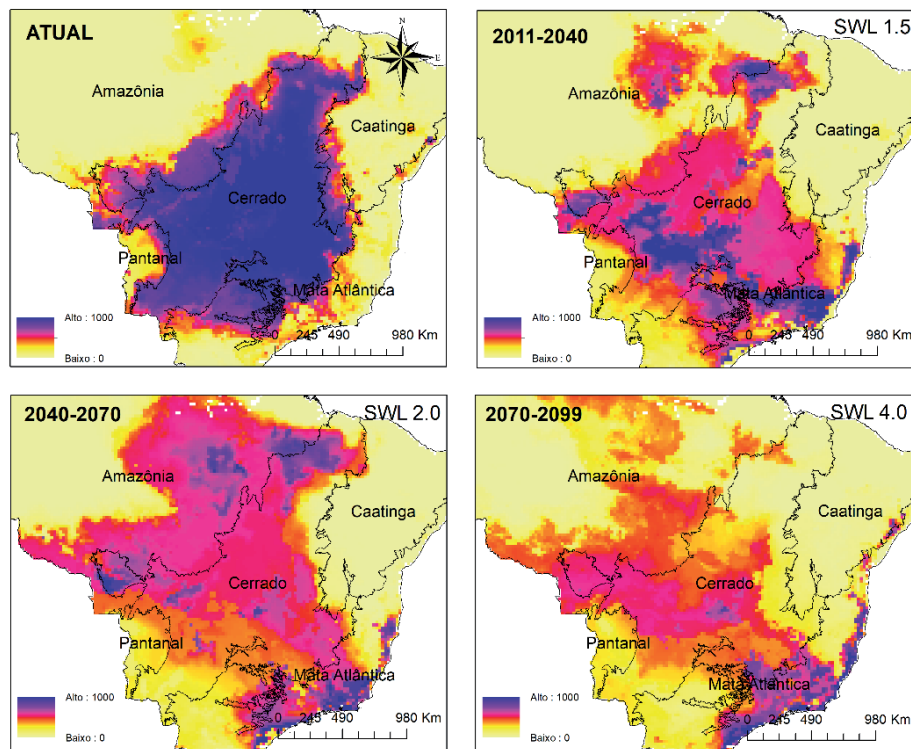


Figura 6 | Projeção das alterações da resiliência do Cerrado (baixa: 0 até alta: 1000) em 1,5°C, 2°C e 4°C.

Fonte: Elaboração própria.

Nessa perspectiva, a savana possui menor sensibilidade ao estresse climático e boa capacidade adaptativa se comparada com os biomas de floresta, como a Amazônia e a Mata Atlântica. O Cerrado também possui uma resistência relativa e adaptabilidade aos episódios de fogo, os quais são agentes naturais da ecologia do Cerrado, sendo vetores de grande risco para o bioma da Amazônia. Da mesma maneira, os resultados de avaliação da resiliência para o bioma do Cerrado também já foram descritos por Zanin, Machado e Albernaz (2016), e mostram compatibilidade dos resultados encontrados para o bioma.

### MATA ATLÂNTICA

Para a Mata Atlântica, o padrão de divisão é bastante forte, com faixa de alta resiliência relativamente estreita, sendo que a amplitude de temperatura é alta (12°C até 26°C), mas com uma faixa mais restrita aos extremos de precipitação (~1,200 e 2,000 mm/ano), o que sugere um limiar crítico (~1,200 e 2,000 mm/ano) para a Mata Atlântica de transição para um outro bioma, como o Cerrado, conforme é demonstrado na Figura 7. Para o nível de aquecimento de 1.5°C, uma retração da ocupação do bioma acontece, com perda significativa de resiliência, ou seja, resiliência baixa na maior parte ocupada pelo bioma e resiliência intermediária e alta concentrada no litoral. Com nível de aquecimento relativo a ~2°C, a alta resiliência ocorre apenas em pequenas manchas da região costeira, de forma semelhante ao cenário de 4°C de nível de aquecimento, no qual a maior parte do bioma apresenta baixa resiliência.

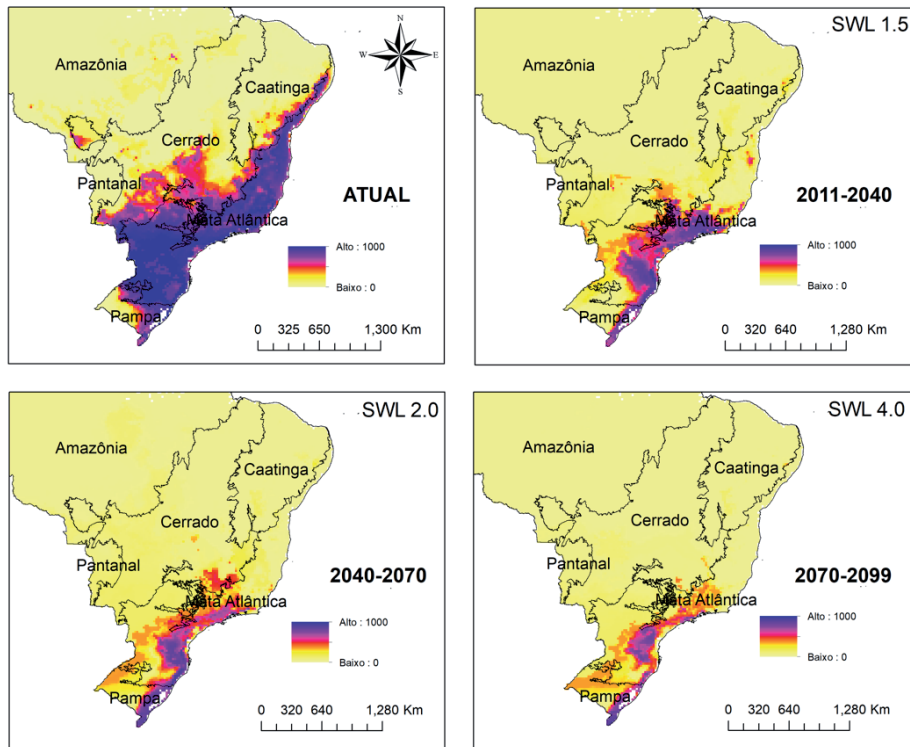


Figura 7 | Projeção das alterações da resiliência da Mata Atlântica (baixa: 0 até alta: 1000) em 1,5°C, 2°C e 4°C.

Fonte: Elaboração própria.

### PAMPA

Para o Pampa, os limiares de variação na temperatura são os mais baixos (18°C – 22°C) com faixa relativamente estreita de precipitações (1,100 mm a 2,000 mm) para alta resiliência, como é demonstrado na Figura 8. O bioma Pampa perde a alta resiliência em todos os níveis de aquecimento, se concentrando em apenas uma faixa bem pequena no extremo sul do País ao final do século. Também ocorre uma expansão desse bioma para outras áreas ocupadas pelo Cerrado em todos os níveis de aquecimento, mas com baixa resiliência. Conforme os resultados da modelagem indicam, existe uma tendência de aumento das vulnerabilidades de tal bioma às mudanças climáticas, tendo em vista as projeções de aumento de temperatura e de eventos extremos de precipitação, que afetarão a capacidade adaptativa e a resiliência do Pampa.

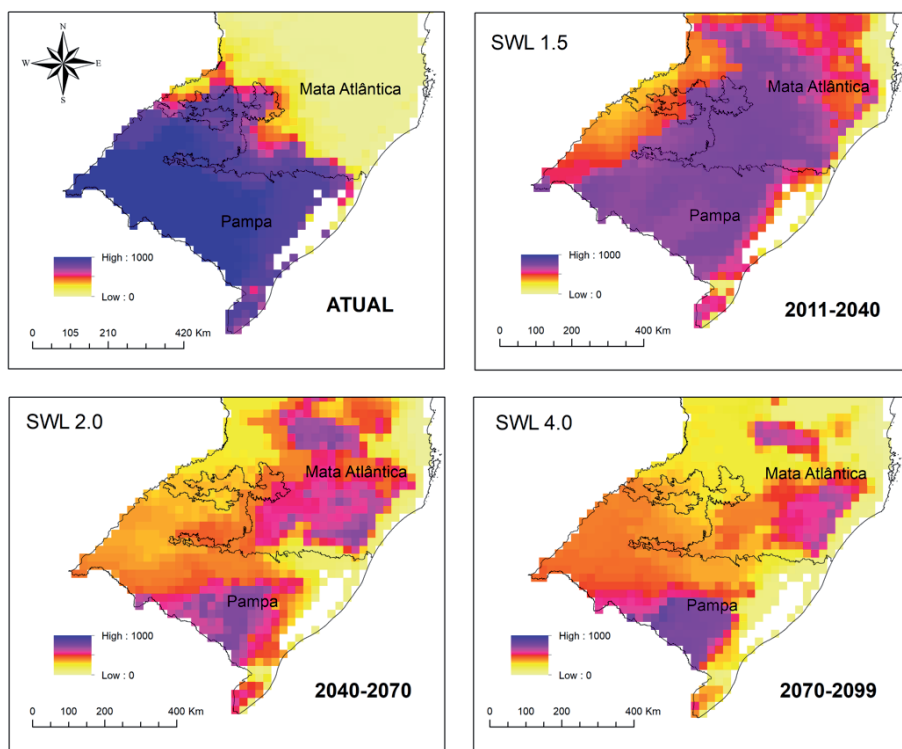


Figura 8 | Projeção das alterações da resiliência do Pampa (baixa: 0 até alta: 1000) em 1,5°C, 2°C e 4°C.

Fonte: Elaboração própria.

## 5 RISCOS SOCIOAMBIENTAIS POR BIOMA

Para todos os biomas, a modelagem de resiliência mostra que a perda de biodiversidade é esperada, comprometendo assim a funcionalidade dos ecossistemas, bem como a provisão de serviços destes para a sociedade.

Dado que a modelagem de resiliência dos ecossistemas aqui apresentada não inclui as forçantes não climáticas, especificamente ligadas às mudanças no uso da terra, nesta seção apontamos de forma quali-quantitativa tais forçantes, que, sobrepostas à modelagem de resiliência por biomas, apontam as principais vulnerabilidades e riscos socioambientais.

Como riscos socioambientais inferidos, apresentamos para cada bioma a exposição atual e associada aos principais vetores de mudanças no uso da terra, as vulnerabilidades e os potenciais e projetados impactos futuros para o bioma até 2100, associados às mudanças climáticas com a perda de resiliência conforme evidenciado na modelagem de nicho ecológico. Embora existam múltiplos vetores de mudança de uso da terra, bem como vulnerabilidades às mudanças climáticas que não estão contempladas nesta análise, aqui tratamos apenas de selecionar alguns exemplos para cada bioma mais evidentes e disponíveis na literatura na última década.

A Amazônia perderá sua capacidade de sumidouro de carbono, um serviço ecossistêmico de regulação climática de importância global (LAPOLA et al. 2018; O'NEILL et al. 2017). As forçantes de desmatamento atuais que têm se intensificado, em conjunto com o aumento de queimadas e urbanização acelerada e precária, atuam em expor a população e ecossistemas a extremos climáticos. Tais efeitos das mudanças climáticas e de uso da terra, levam a um aumento da mortalidade de árvores, redução da biomassa e na incidência de episódios de incêndio, perda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos (ANJOS; TOLEDO, 2018; OMETTO et al., 2018).

Dada a atual ligação da biodiversidade com o modo de vida, os povos indígenas e populações tradicionais já são altamente vulneráveis aos extremos climáticos na região (BRONDÍZIO et al., 2016; PINHO, 2016; PINHO, MARENGO; SMITH, 2015). A população, tanto rural como urbana, apresenta baixa capacidade de enfrentamento aos impactos de extremos climáticos associada a fatores de pobreza, marginalização e ausência da presença do Estado (MARU et al., 2014). Caso ações urgentes de adaptação não se concretizem, a perda dos serviços ecossistêmicos e de biodiversidade, essenciais para o modo de vida, economia e bem-estar da maioria da população na região, e globalmente, será ainda maior (BRONDÍZIO et al., 2016; LAPOLA et al., 2018).

Da mesma forma, é esperado que os custos sociais associados às mudanças climáticas projetadas em um cenário sem adaptação até 2030 são em sua maioria ainda pouco estimados. Por exemplo, não existem avaliações sobre os custos das migrações associadas aos impactos climáticos, mas existem evidências de que ocorrerão novos fluxos migratórios em decorrência dos extremos climáticos na Amazônia até 2030, com altos custos sociais, uma vez que migrantes terminam por ocupar espaços marginais e empregos precários nas grandes cidades, como Manaus e Boa Vista (LAPOLA et al., 2018). Espera-se que haja também um comprometimento na oferta hídrica dos principais rios da região a partir do aquecimento global de 2°C afetando as seguranças alimentar e hídrica (BETTS et al., 2018).

Como apontado para o bioma da Caatinga, apresentaria uma expansão das áreas com alta resiliência, principalmente sobre a Mata Atlântica nordestina e o Cerrado, mostrando, assim, que o bioma apresenta maior resiliência ao aumento da temperatura global. No entanto, o aumento da incidência de desertificação, levará a um impacto profundo na produção de alimentos, sobretudo de produtores rurais familiares, comprometendo o abastecimento do mercado local e regional de alimentos, tendo em vista que 35% de toda a área de produção de alimentos pela agricultura familiar está localizada no bioma da Caatinga (EMBRAPA, 2014), além de ser responsável por cerca de 80% da produção de alimentos nacionalmente (SARAIVA et al., 2018). Os impactos das mudanças climáticas mediante o processo de desertificação na região já estão afetando as seguranças alimentar e hídrica (LINDOSO et al., 2014; MESQUITA; BURSZTYN; WITTMAN, 2014), aumentando a incidência de pobreza, potenciais conflitos e migração, que tendem a se acirrar com o aumento do processo de desertificação associado à mudança climática.

Nos biomas do Cerrado e Mata Atlântica, que também apresentam alto grau de endemismo e configuram “hotspots” mundiais de biodiversidade (MYERS et al., 2000), salientam-se as vulnerabilidades relacionadas à alta redução da cobertura vegetal original, agravada pela forte pressão de degradação que permanece sobre os remanescentes, principalmente associada a práticas agrícolas de “commodities”, pecuária e urbanização, em conjunto com o relativo baixo número de áreas protegidas (JOLY et al., 2018). Em adição, no caso do Cerrado, estima-se que a redução da disponibilidade hídrica irá comprometer a produção de “commodities”, sobretudo soja (STRASSBURG et al., 2017) e potencialmente a agricultura familiar, e levar à incidência de doenças como a dengue e a ondas de calor (LAPOLA et al., 2019).

Espera-se que a Mata Atlântica sofra com a perda de serviços ecossistêmicos de polinização com o aumento da temperatura global, comprometendo a produção de alimentos (GIANNINI et al., 2017). As únicas áreas no bioma que potencialmente permanecerão resilientes à mudança do clima, hoje, são ambientes antrópicos, evidenciando a necessidade de se investir em reflorestamento da vegetação nativa em áreas apontadas como críticas de alta resiliência. Embora tenha havido uma redução dramática do desmatamento na Mata Atlântica (SOS MATA ATLÂNTICA, 2018), ainda são incipientes os investimentos e ações de recuperação da vegetação nativa e aumento de conectividade entre os fragmentos, a fim de assegurar processos ecológicos, biodiversidade e a provisão de serviços ecossistêmicos.

No Pampa, a vulnerabilidade a extremos climáticos no bioma é relativamente alta, como na Mata Atlântica, devido a processos históricos de desmatamento, restando apenas 26% da vegetação nativa (BUSTAMANTE et al., 2018). A baixa cobertura de vegetação nativa, alta fragmentação dos “habitats” e menos do que 3% de áreas protegidas no Pampa representam uma baixa capacidade adaptativa ante

as mudanças climáticas (BUSTAMANTE et al., 2018; JENKINS et al., 2015). Além disso, as atividades agropecuárias têm favorecido a invasão de espécies de herbáceas no Pampa e alteram o ciclo do fogo e a incidência na propagação do *Aedes aegypti* (Culicidae), contribuindo para o alastramento de casos de dengue, febre amarela, zika e chikungunya, que competem com espécies nativas, provocam estragos na agricultura e são vetores de doenças em humanos (BUSTAMANTE et al., 2018).

Algumas lacunas no campo da ciência foram identificadas, principalmente a forte discrepância na disponibilidade de estudos que explorem as evidências dos impactos relacionados ao clima e cenários futuros entre os biomas. É, portanto, necessário avançar em estudos sobre os impactos observados e projeções das mudanças climáticas nos serviços ecossistêmicos e bem-estar humano, segundo o nexo da segurança socioambiental, para que todos os biomas brasileiros, suas cidades e as zonas costeiras sejam representados na ciência e na prioridade de ações em mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Da mesma maneira, estudos que mapeiem as perdas e danos materiais e não materiais associados às mudanças climáticas, tal como alterações em bem-estar humano, perda de valores culturais devido a conflitos de uso da terra e fluxos migratórios que possam ser acirrados com as mudanças climáticas, são cruciais para avançar em estratégias adaptativas para a redução de riscos sistêmicos na segurança socioambiental no País. Da mesma forma, estudos que priorizem o entendimento dos limites (“*tipping points*”) ecológicos e sociais para os diferentes biomas no processo de aquecimento global contribuíram para o conhecimento da resiliência socioambiental nos trópicos, uma área ainda incipiente.

## 6 CONCLUSÃO

As mudanças climáticas são decorrentes do aumento da temperatura média global esperado para as próximas décadas até o final do século, que, por sua vez, está relacionado ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE), levando à redução da resiliência dos ecossistemas em todos os biomas, incorrendo em perda de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos e aumento da exposição e vulnerabilidades socioambientais. A princípio, o bioma da Caatinga é o mais resiliente ao aumento global de temperatura, e a Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado os mais susceptíveis e com perda de resiliência.

Os resultados da perda de resiliência aqui demonstrados, tal como para o bioma da Amazônia, colaboram com as estimativas “moderadas” e “extremas”, condicionadas à gravidade do processo de “*dieback da floresta*”, o que significa que pelo menos 30% e 50% da área da floresta amazônica seria perdida por fatores relacionados às mudanças climáticas, respectivamente (KRIEGLER et al., 2009), e que o desmatamento por atividades humanas diretas seria mantido abaixo de 20% da área florestal (LOVEJOY; NOBRE, 2018).

Para a Caatinga, o processo de aridização é potencializado (SALVATIERRA et al., 2017) e avança espacialmente para outras possíveis áreas ocupadas pela Mata Atlântica, sobretudo na região costeira (ZANIN; MACHADO; ALBERNAZ, 2016). Na Mata Atlântica e no Cerrado, a produção em larga escala de “*commodities*” agrícolas, sobretudo para o mercado externo, sofrerá perdas expressivas (LAPOLA et al., 2014). Tais perdas, por sua vez, representam ameaças concretas a uma série de setores da economia, com destaque para a agricultura e a geração de energia, assim como à sobrevivência de povos e comunidades tradicionais.

Dessa forma, esforços para limitar o aquecimento global, bem como ações e políticas de adaptação e redução das vulnerabilidades em escala local e regional, são imprescindíveis para se reduzir os riscos para a segurança socioambiental. Existe uma confiança alta de que limitando o aquecimento global a ~1.5oC, em vez de 2oC, até 2040 reduz os riscos dos ecossistemas únicos e ameaçados, protegendo os serviços ecossistêmicos para os modos de vida da população e proporcionando melhores oportunidades para a adaptação às mudanças climáticas e para a promoção do desenvolvimento sustentável (BATHIANY et al. 2018; O’NEILL et al. 2017; ROY et al., 2018), particularmente em ecossistemas biodiversos,

como Amazônia, Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. No mais, o investimento em reflorestamentos e o estabelecimento de unidades de conservação e de desenvolvimento sustentável, e demarcação de territórios indígenas, ancorados na legislação vigente e mecanismos de comando e controle, contribuem para a redução das exposições e vulnerabilidades dos biomas ao aquecimento global.

Além disso, propostas globais para a implementação de soluções baseadas na natureza, tal como adaptação baseada nos ecossistemas (EbA), têm colaborado diretamente para a agenda de mitigação e adaptação (SEDDON et al., 2020) e precisam urgentemente avançar no Brasil (KASECKER et al., 2018). Sobretudo em países tropicais como o Brasil, a resiliência dos ecossistemas pode e deve ser fortalecida no momento atual a fim de que estes possam desempenhar sua contribuição vital no enfrentamento da crise climática (MALHI et al., 2020).

## REFERÊNCIAS

ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). **Journal of Applied Ecology**, v. 43, n. 6, p. 1223-1232, set. 2006.

AMBRIZZI, T. et al. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI**: projeções de clima usando três modelos regionais. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Diretoria de Conservação da Biodiversidade – Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade. Subprojeto: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas, v. 3, p. 112, 2007.

ANADÓN, J. D.; SALA, O. E.; MAESTRE, F. T. Climate change will increase savannas at the expense of forests and treeless vegetation in tropical and subtropical Americas. **Journal of Ecology**, 2014.

ANJOS, L. J. S.; TOLEDO, P. M. DE. Measuring resilience and assessing vulnerability of terrestrial ecosystems to climate change in South America. **PLOS ONE**, v. 13, n. 3, p. e0194654, 19 mar. 2018.

BETTS, R. A. et al. Changes in climate extremes, fresh water availability and vulnerability to food insecurity projected at 1.5°C and 2°C global warming with a higher-resolution global climate model. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. A**, v. 376, 2018.

BRONDÍZIO, E. S. et al. **Social and health dimensions of climate change in the Amazon Annals of Human Biology**, 2016. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03014460.2016.1193222>>

BURKE, M.; HSIANG, S. M.; MIGUEL, E. Global non-linear effect of temperature on economic production. **Nature**, v. 527, n. 7577, 2015.

CARLETON, T. A.; HSIANG, S. M. Social and economic impacts of climate. **Science**, 2016.

CHAMBERS, J. C.; ALLEN, C. R.; CUSHMAN, S. A. Operationalizing Ecological Resilience Concepts for Managing Species and Ecosystems at Risk. **Frontiers in Ecology and Evolution**, 2019.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 2014.

COMER, P. J. et al. Habitat climate change vulnerability index applied to major vegetation types of the western interior United States. **Land**, 2019.

DINIZ FILHO, J. A. F. et al. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. **Ecography**, v. 32, n. 6, p. 897-906, dez. 2009.

DONOGHUE, M. J.; EDWARDS, E. J. Biome Shifts and Niche Evolution in Plants. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 45, n. 1, p. 547-572, 2014.

EMBRAPA. **Agricultura familiar no Brasil**.

FOLKE, C. et al. **Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management**. Annual Review of Ecology,



Evolution, and Systematics, 2004.

GIANNINI, T. C. et al. Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. **PLOS ONE**, v. 12, n. 8, p. e0182274, 9 ago. 2017.

GUNDERSON, L. H. Ecological Resilience: in theory and application. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 31, n. 1, p. 425-439, nov. 2000.

HIROTA, M. et al. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. **Science**, 2011.

JOLY, C. A. et al. **1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos**. Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos, 2018.

KASECKER, T. P. et al. Ecosystem-based adaptation to climate change: defining hotspot municipalities for policy design and implementation in Brazil. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 2018.

KRIEGLER, E. et al. Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2009.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 27-35, 1 jan. 2014.

\_\_\_\_\_. Limiting the high impacts of Amazon forest dieback with no-regrets science and policy action. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 46, p. 11671-11679, 13 nov. 2018.

\_\_\_\_\_. Heat stress vulnerability and risk at the (super) local scale in six Brazilian capitals. **Climatic Change**, 2019.

LEHMANN, C. E. R. et al. Savanna Vegetation-Fire-Climate Relationships Differ Among Continents. **Science**, v. 343, n. January, p. 548-553, 2014.

LENTON, T. M. Environmental Tipping Points. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 38, n. 1, p. 1-29, 2013.

LENTON, T. M. et al. Tipping elements in the Earth's climate system. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 6, p. 1786-1793, 2008.

LINDOSO, D. P. et al. Integrated assessment of smallholder farming's vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: a case study in Ceará. **Climatic Change**, v. 127, n. 1, p. 93-105, 8 nov. 2014.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon Tipping Point. **Science Advances**, 2018.

MALHI, Y. et al. Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 375, n. 1794, p. 20190104, 16 mar. 2020.

MARENCO, J. A.; SCARANO, F. R. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas. **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC)**, p. 184, 2016.

MARU, Y. T. et al. A linked vulnerability and resilience framework for adaptation pathways in remote disadvantaged communities. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 337-350, 2014.

MESQUITA, P.; BURSZTYN, M.; WITTMAN, H. **Climate variability in semi-arid Brazil**: food insecurity, agricultural production and adjustment to perceived changes. UNDP: International Policy Centre for Inclusive Growth. Disponível em: <<https://pcc.uw.edu/wp-content/uploads/sites/15/2014/10/Sample-One-Pager-3.pdf>>. Acesso em: jun. 2017.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 2000.

NIKINMAA, L. et al. Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. **Current Forestry Reports**, 2020.

OLIVERAS, I.; MALHI, Y. Many shades of green: the dynamic tropical forest-savanna transitions. **Philosophical Transactions B. Biological Sciences**, 2016.

OLSON, D. M. et al. Terrestrial Ecoregions of the World: a new map of life on earth. **BioScience**, v. 51, n. 11, p. 933, 2001.

OMETTO, J. P. et al. Interações entre Natureza e Sociedade: trajetórias do presente ao futuro. In: **1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos**. [s.l.: s.n.]. p. 46.

OPPENHEIMER, M. et al. Emergent Risks and Key Vulnerabilities. **Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 1039-1099, 2014.

PINHO, P. F. **Watching Brazil but missing the story: an amazonian inferno**. Latin American Studies Association. Special Issue on Environmental Justice and Climate Change in Latin America *Lasaforum*, Fall 2016, v. XLVIII, n. 4, p. 21-25, 2016.

PINHO, P. F.; MARENGO, J. A.; SMITH, M. S. Complex socio-ecological dynamics driven by extreme events in the Amazon. **Regional Environmental Change**, v. 15, n. 4, 2015.

RANGEL, T. F.; LOYOLA, R. D. Labeling ecological niche models. **Natureza y Conservación**, 2012.

REYER, C. P. O. et al. Forest resilience and tipping points at different spatio-temporal scales: approaches and challenges. **Journal of Ecology**, 2015.

SALVATIERRA, L. H. A. et al. Protected areas buffer the Brazilian semi-arid biome from climate change. **Biotropica**, 2017.

SARAIVA, A. et al. Contribuições da Natureza para Qualidade de Vida. In: SEIXAS, C. S. (Ed.). **Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos**. [s.l.: s.n.].

SCHEFFER, M. et al. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature**, v. 413, 2001.

\_\_\_\_\_. Early-warning signals for critical transitions. **Nature**, v. 461, p. 53, set. 2009.

\_\_\_\_\_. Anticipating Critical Transitions. **Science**, v. 338, n. 6.105, p. 344, p. 348, out. 2012.

SEDDON, N. et al. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. **Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences**, v. 375, n. 1794, p. 20190120, 16 mar. 2020.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Relatório Anual Sosma**. São Paulo: [s.n.].

STRASSBURG, B. B. N. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology and Evolution**, 2017.

THUILLER, W. et al. Biomod – A platform for ensemble forecasting of species distributions. **Ecography**, v. 32, n. 3, p. 369-373, jun. 2009.

ZANIN, M.; MACHADO, N.; ALBERNAZ, A. L. M. Mudanças climáticas e a cobertura vegetal nativa: impactos em um país megadiverso e seus biomas. In: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. (Ed.). **Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil**. [s.l.: s.n.]. p. 93-125.