

**Relatório do Produto nº 4 do Contrato nº 2014/0003-43 –
BRA/11/001: Cenários Futuros da Mudança do Clima e seus
Impactos sobre a Biodiversidade Brasileira**

Ronaldo Weigand Jr.

BRASÍLIA, 2016

SUMÁRIO

Sumário.....	2
Glossário.....	4
1 Introdução.....	5
1.1 Mudança do clima.....	5
1.2 Biodiversidade, clima e serviços ecossistêmicos.....	8
1.3 Marco conceitual simplificado de vulnerabilidade à mudança do clima.....	11
1.4 Objetivo do trabalho.....	13
1.5 Metodologia.....	14
2 Operacionalizando o conceito de ecossistema.....	14
3 Sensibilidade da biodiversidade à mudança do clima.....	17
3.1 Sensibilidade dos ecossistemas.....	17
3.1.1 Sensibilidade dos ecossistemas à mudança do clima.....	17
3.1.2 Fragmentação e outras pressões.....	20
3.2 Sensibilidade das Espécies.....	22
3.2.1 Sensibilidade à mudança do clima.....	23
3.2.2 Sensibilidade à fragmentação e outras pressões.....	29
4 Exposição da biodiversidade à mudança do clima.....	34
4.1 Exposição dos ecossistemas à mudança do clima.....	34
4.1.1 Amazônia.....	34
4.1.2 Caatinga.....	35
4.1.3 Cerrado.....	35
4.1.4 Mata Atlântica.....	36
4.1.5 Pampa.....	36
4.1.6 Pantanal.....	37

4.1.7	Áreas de contato entre os nichos climáticos dos biomas brasileiros	38
4.1.8	Ecosistemas aquáticos continentais	39
4.1.9	Ecosistemas costeiros e marinhos	39
4.2	Exposição das Espécies	40
5	Conclusão: Prováveis impactos sobre a biodiversidade	47
5.1	Ecosistemas sob estresse	47
5.1.1	Ecosistemas terrestres	47
5.1.2	Ecosistemas fluviais	53
5.1.3	Ecosistemas costeiros e marinhos	53
5.2	Espécies sob estresse	54
5.3	Lacunas de conhecimento	55
5.4	Diretrizes para Adaptação	57
6	Referências	59

GLOSSÁRIO

Bioma: “vegetação clímax” e suas subdivisões, e a fauna, ocupando extensas regiões sob um mesmo domínio climático. Vegetação clímax é a maior unidade de vegetação, que está permanentemente próximo ao estágio final de uma sucessão específica determinada pelo clima.

Capacidade de adaptação ou capacidade adaptativa (em relação aos impactos da mudança do clima): capacidade de ecossistemas e espécies de ajustar-se à mudança do clima (inclusive à variabilidade e aos extremos climáticos) atenuando possíveis danos, aproveitando oportunidades ou enfrentando as consequências.

Exposição: extensão em que ecossistemas e espécies estão expostos e vivenciam a mudança do clima.

ICMBio: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

Impacto: efeitos nos ecossistemas e nas espécies causados pelas mudanças no clima.

IPCC: Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC, sigla em inglês).

MMA: Ministério do Meio Ambiente.

Nicho climático: área caracterizada pela ocorrência de parâmetros climáticos (por exemplo, temperatura e precipitação) dentro das faixas favoráveis para ecossistemas e espécies.

PNA: Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima.

RCP: Representative Concentration Pathways, ou Trajetórias Representativas de Concentração, abreviadas como RCP 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, de acordo com o armazenamento térmico da atmosfera, em watts por metro quadrado (W/m^2).

Sensibilidade: grau em que ecossistemas e espécies podem ser afetados, direta ou indiretamente, negativamente ou positivamente pela mudança do clima.

Serviços ecossistêmicos: benefícios obtidos pelos humanos a partir dos ecossistemas.

Vulnerabilidade à mudança do clima: um atributo resultante de fatores de *exposição*, *sensibilidade*, *impacto* e *capacidade de adaptação* dos sistemas naturais e humanos.

1 INTRODUÇÃO

1.1 MUDANÇA DO CLIMA

No Brasil, até recentemente, os debates acerca da mudança do clima enfatizaram mais a mitigação que a adaptação à mudança do clima. O País, ao longo dos últimos anos, desempenhou um papel de liderança alcançando resultados relevantes na redução das emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE). No entanto, com a constatação dos impactos de eventos extremos e o avanço da ciência do clima, começam a emergir as vulnerabilidades do País à mudança do clima, reforçando a necessidade de preparar o país para empreender ações de adaptação à mudança do clima.

O Plano Nacional de Adaptação (PNA) é o principal instrumento existente no País, e orienta a elaboração de instrumentos e a implementação de políticas com foco em adaptação, sendo previsto com este fim pela Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/09).

Modelos climáticos desenvolvidos no Brasil e no mundo vêm indicando alterações importantes nos padrões climáticos futuros e têm sido utilizados para estimar o impacto em diversos setores. Modelos regionais seguem os modelos globais desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC, sigla em inglês), que produzem cenários para os horizontes temporais de 2040, 2070 e 2100. A partir desses modelos, o PNA trabalha com duas perspectivas de tempo: 1) uma perspectiva de curto prazo, com quatro anos, que coincide com o prazo de planejamento do Plano Plurianual (PPA) do governo federal; e outra 2) de longo prazo, até 2040 ou 2050, que coincide com o primeiro horizonte temporal de projeções climáticas dos modelos.

As projeções utilizadas no PNA estão baseadas no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (2014), onde foram propostos quatro novos cenários de níveis de emissão denominados Trajetórias Representativas de Concentração, abreviados como RCP, do inglês, *Representative Concentration Pathways*, com valores de 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, de acordo com o armazenamento térmico da atmosfera, em Watts por metro quadrado (W/m^2). Por ser considerado muito otimista, o cenário RCP 2.6, que supõe um armazenamento de 2,6 Watts por metro quadrado (W/m^2), tem sido preterido nas análises de projeção climáticas. O cenário RCP 4.5 supõe um armazenamento de 4,5 W/m^2 e representa uma estabilização das emissões de gases de efeito estufa antes de

2100, o que resultaria em um aumento médio da temperatura do planeta entre 1,1°C e 2,6°C e elevação do nível do mar entre 32 e 63 cm. É um cenário bastante utilizado nas análises. O cenário RCP 6.0 (com armazenamento de 6,0 W/m²), baseado estabilização das emissões de gases de efeito estufa logo após 2100, prevê aumento da temperatura entre 1,4°C e 3,1°C e elevação do nível do mar entre 33 e 63 cm. No cenário RCP 8.5 (com armazenamento de 8,5 W/m²), as emissões de gases causadores do efeito estufa continuam a crescer, assim como a sua concentração. Neste cenário, a superfície da Terra poderia aquecer entre 2,6°C e 4,8°C ao longo deste século, fazendo com que o nível dos oceanos aumente entre 45 e 82 centímetros.

Segundo o PNA, o Brasil tem se destacado no desenvolvimento de modelos climáticos regionais e globais, incluindo o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM, da sigla em inglês), e a versão do modelo regional ETA, utilizado para detalhar as simulações de dois modelos climáticos globais, o modelo inglês HadGEM2-ES e o japonês MIROC5, sob dois cenários de emissão, RCP 4.5 e 8.5 em uma resolução horizontal de 20 km sobre uma área que cobre a América do Sul, América Central e Caribe. A partir desses modelos, projeta-se aquecimento para todo o continente, em todos os cenários de emissão, variando entre 2°C a 8°C em algumas áreas, especialmente no Centro-Oeste e expandindo-se para as demais regiões ao longo deste Século. A redução das chuvas atinge as regiões Centro-Oeste e Sudeste, nas áreas sob influência do fenômeno *Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)*, expandindo-se para regiões da Amazônia. Na região Sul, as chuvas devem aumentar, destacadamente no verão e na primavera, expandindo-se até o Sudeste, que se torna uma região de transição, ou incerteza, cujo regime de chuva depende fortemente da banda chuvosa, ZCAS, durante o verão.

O estudo desenvolvido por consultoria ao Ministério do Meio Ambiente (FRANÇOSO, 2016a) para apoiar a Estratégia de Biodiversidade e Ecossistemas do PNA prevê que as mudanças nos parâmetros do clima mais expressivas serão o aumento da temperatura média anual no Cerrado, na Caatinga e na Mata Atlântica, tanto na distribuição das áreas de altas temperaturas quanto nos limites máximos projetados para esse parâmetro. Também será mais intensa a sazonalidade da temperatura, especialmente na Amazônia. A precipitação anual aumentará no Sul do país e diminuirá no Norte (Figura 1). A classe climática predominante no país será de temperaturas altas e precipitação moderada com alta sazonalidade da precipitação e/ou temperatura,

observada atualmente no Pantanal e no norte do Cerrado, nos estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e norte de Goiás (Figura 2).

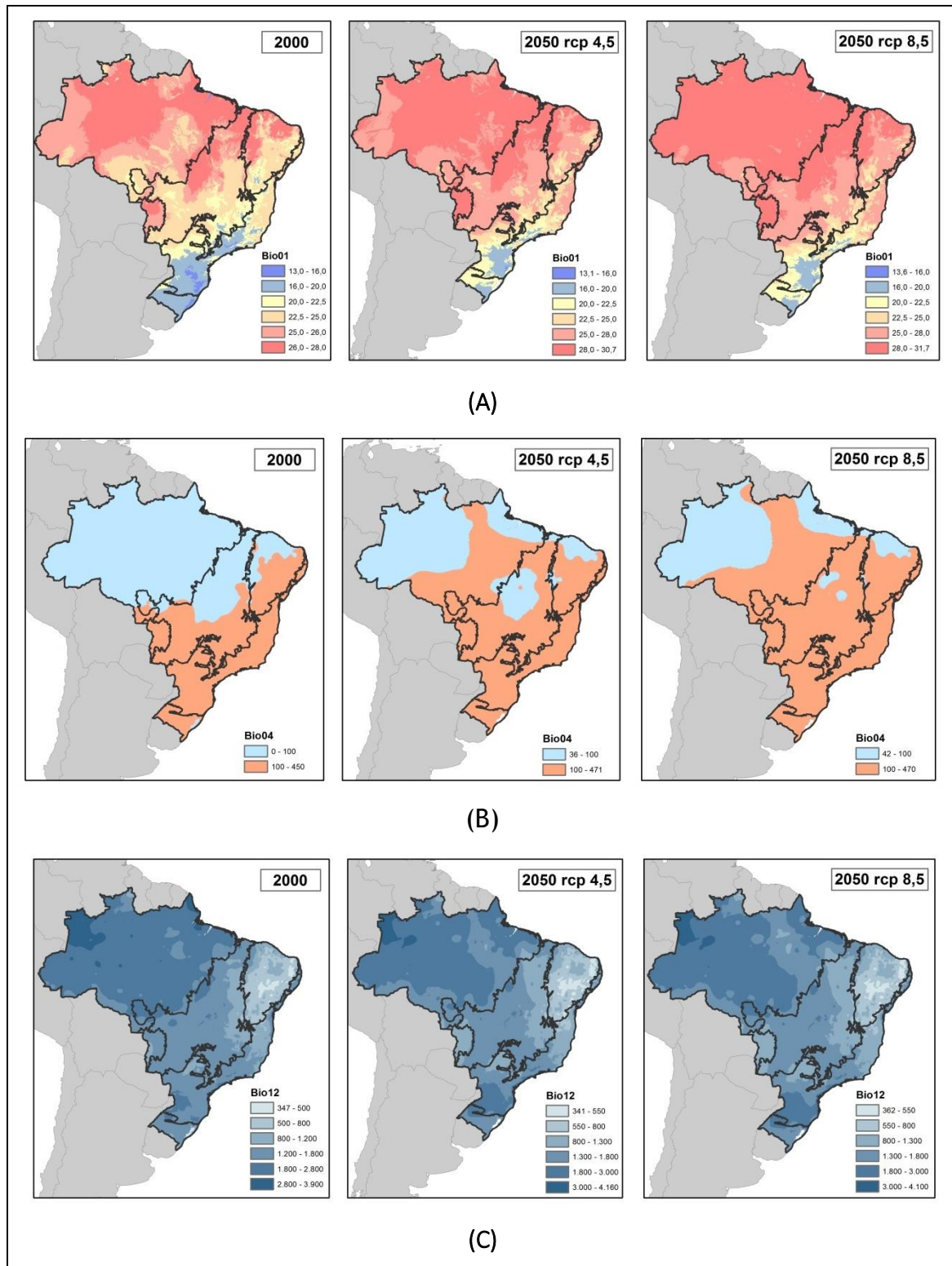


Figura 1: Projeções de classes de (A) temperatura média anual, em °C, (B) sazonalidade da temperatura, em coeficiente de variação, e (C) precipitação anual (mm) para o ano 2000 e em duas trajetórias representativas de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4,5 e RCP 4,8) baseadas em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016a).

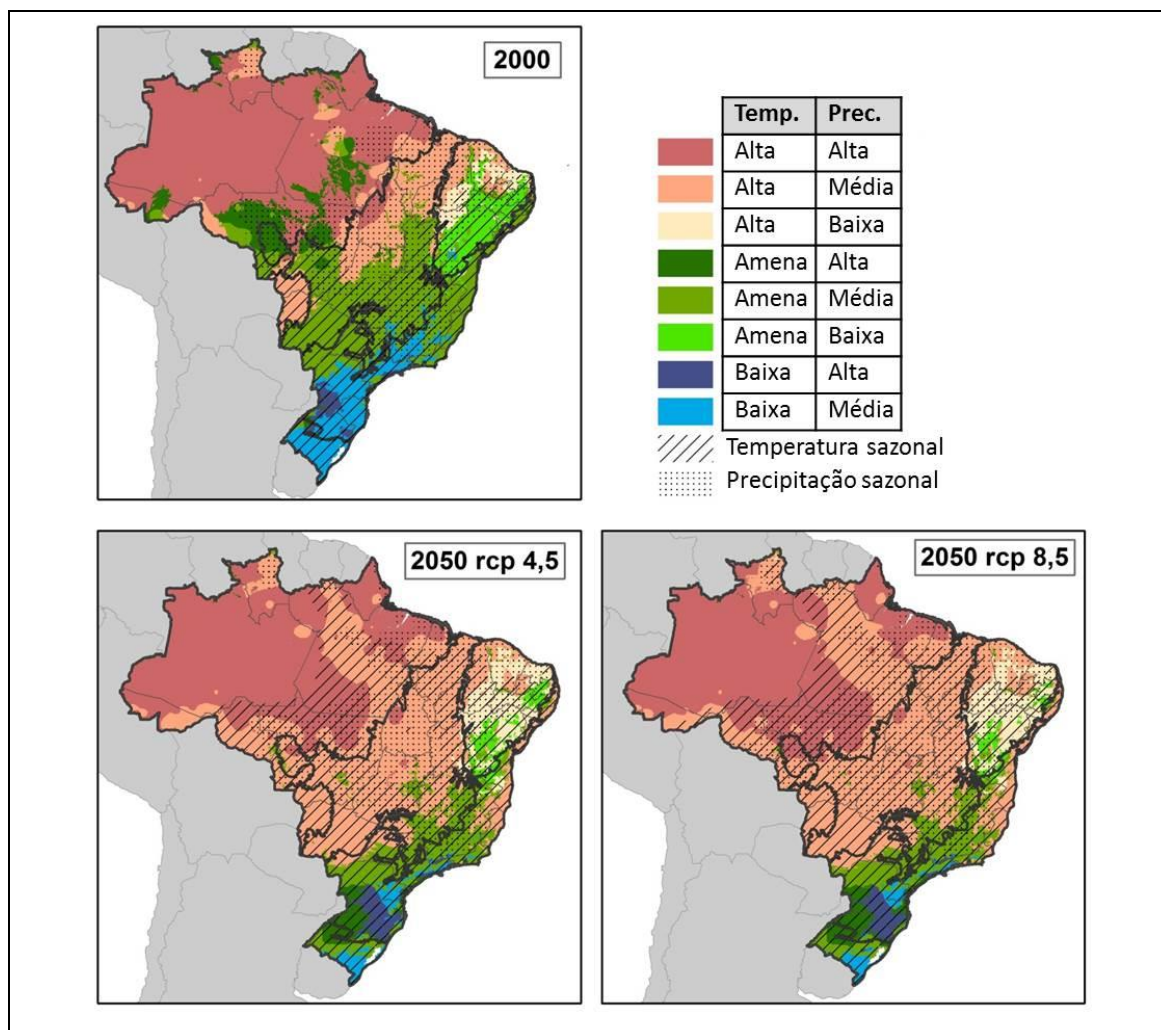


Figura 2: Grupos climáticos baseados em temperatura média anual, sazonalidade da temperatura, precipitação anual e sazonalidade da precipitação para o ano 2000 e 2050 em duas trajetórias representativas de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4,5 e RCP 4,8) baseadas em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOZO, 2016a).

1.2 BIODIVERSIDADE, CLIMA E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

A mudança do clima deverá impactar a biodiversidade brasileira nos seus três níveis, de acordo com a definição de biodiversidade da CDB (CDB, Art. 2o., BRASIL/MMA, 1992, p. 9)¹: i) ecossistemas; ii) espécies/populações; iii) diversidade genética dentro das espécies/populações.

¹ A Convenção da Diversidade Biológica (CDB) definiu a biodiversidade como “a variabilidade de organismos vivos de todas as origens, compreendendo, dentre outros, os ecossistemas terrestres, marinhos e outros ecossistemas aquáticos e os complexos ecológicos de que fazem parte; compreendendo ainda a diversidade dentro de espécies, entre espécies e de ecossistemas”.

O clima é fator determinante para a distribuição dos seres vivos no planeta. Desde o início do século XX, estudos avaliam a influência das variações do clima e da variabilidade climática sobre as espécies (PARMESAN, 2006). Mais recentemente, os registros dos impactos da mudança do clima associada ao aquecimento global passaram a ser mais frequentes e abrangentes (*Ibid.*; HUGHES 2000, MCCARTY 2001, WALTHER *et al.* 2002 e WALTHER *et al.* 2005 *apud* VALE; ALVES; LORINI, 2009), inclusive no Brasil (LEMES, 2016a). A maior parte dos registros, no entanto, tem se concentrado na América do Norte, Europa e Japão. Há grandes lacunas nos estudos feitos na América do Sul (PARMESAN, 2006; VALE; ALVES; LORINI, 2009)². A maior parte (70%) dos estudos sobre os efeitos da mudança do clima sobre a diversidade brasileira foi publicada nos últimos três anos (LEMES, 2016a).

Assim, atualmente, é ainda difícil estabelecer, com base científica, ligações causais entre o declínio de uma espécie e a mudança do clima (PBMC, 2013). Isso se dá, entre outros motivos, porque, embora haja um consenso quase unânime de que a mudança do clima já está acontecendo e que pode alcançar níveis críticos nas próximas décadas (IPCC, 2014), ainda há incerteza sobre quais variações climáticas que já podem estar impactando as espécies podem ser atribuídas à mudança do clima. Os impactos da mudança do clima se somam a uma série de ameaças que já afetam a conservação da biodiversidade e ecossistemas, produzindo efeitos sinérgicos e de difícil previsão e monitoramento. Atualmente não é possível precisar a *exposição* atual à mudança do clima, nem seus *impactos*, ainda que se possa observá-los.

Apesar disso, há um consenso de que os ecossistemas e espécies estão sendo *expostos* à mudança do clima em todo o mundo (IPCC, 2014), e uma forma de se conectar um determinado evento climático com a mudança do clima é verificar se o evento é previsto pelos modelos climáticos. No Brasil, os primeiros trabalhos sobre os impactos de cenários futuros de mudanças climáticas sobre a biodiversidade começaram a ser realizados a partir de 2007, enfocando modelagens do clima e seus efeitos sobre a biodiversidade (por exemplo, MARENGO, 2007; MARINI *et al.*, 2009a, 2009b, 2010a, 2010b; VIEIRA; MENDES; OPREA, 2012). Entretanto, estes estudos não substituem abordagens observacionais, cujas pesquisas são ainda incipientes e esparsas.

² Parmesan (2006) revisou 866 trabalhos *peer reviewed*, e 40% deles foram produzidos nos últimos três anos antes da elaboração do seu artigo.

A biodiversidade é base para o provimento e manutenção de “serviços ecossistêmicos”. O conceito de serviços ecossistêmicos (SEs) evoluiu do conceito de função ecossistêmica, aplicado por De Groot (1986) no sentido atual de serviço ecossistêmico. Atualmente, as *funções ecossistêmicas* são vistas como um subconjunto de processos ecológicos e estruturas dos ecossistemas (DE GROOT; WILSON; BOUMANS, 2002), que criam integridade sistêmica dentro dos ecossistemas e tornam o todo maior que a soma das partes individuais. Já os *serviços ecossistêmicos*, de acordo com Romeiro (2009, citando DE GROOT, 1986; COSTANZA *et al.*, 1997; DE GROOT; WILSON; BOUMANS, 2002), são os benefícios obtidos pelos humanos a partir dos ecossistemas. Isto é, uma função ecossistêmica é considerada um serviço ecossistêmico quando é (ou tem a possibilidade ou potencial de ser) utilizada para benefício humano (HUETING *et al.*, 1998 *apud* ROMEIRO, 2009). Os SEs podem ser classificados nas seguintes categorias (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005; DE GROOT; FISHER; CHRISTIE, 2010) (Tabela 1):

- Serviços de habitat
- Serviços de provisão (produtos obtidos dos ecossistemas)
- Serviços de regulação (benefícios obtidos através da regulação dos processos dos ecossistemas)
- Serviços culturais (benefícios não materiais obtidos dos ecossistemas).

Tabela 1: Classes e tipos de serviços ecossistêmicos.

Classes de serviços ecossistêmicos	Tipos de serviços ecossistêmicos	Exemplos
Serviços de provisão	Alimentação	Caça, frutas, castanhas, etc.
	Água	Abastecimento humano, industrial e agropecuário
	Matérias primas	Fibras, madeira, lenha, fertilizantes
	Recursos genéticos	Para melhoramento genético e remédios
	Recursos medicinais	Produtos, modelos e organismos-teste
	Recursos ornamentais	Artesanato, plantas ornamentais, animais de estimação, moda
Serviços de regulação	Regulação da qualidade do ar	Captura de poeira e agentes químicos
	Regulação climática	Influência da vegetação sobre as chuvas

Classes de ecossistêmicos	serviços	Tipos de serviços ecossistêmicos	Exemplos
		Moderação de eventos extremos	Proteção contra tempestades e prevenção de inundações
		Regulação de fluxos de água	Drenagem natural, irrigação e prevenção de secas
		Tratamento de resíduos	Purificação da água
		Prevenção de erosão	Controle de voçorocas
		Manutenção da fertilidade do solo	Formação do solo
		Polinização e dispersão	Polinização de culturas comerciais, dispersão de sementes florestais
		Controle biológico	Controle de pragas e doenças
Serviços de habitat		Manutenção de ciclos de vida de espécies migratórias	Ninhais e áreas de reprodução
		Manutenção da diversidade genética	Conservação e proteção do pool genético
Serviços culturais e de amenidades		Informação estética	Paisagens e espécies
		Oportunidades para recreação e turismo	Locais para camping e trilhas
		Inspiração para cultura, arte e design	Paisagens
		Experiência espiritual	Locais para rituais
		Informação para o desenvolvimento cognitivo	Locais para visitação e educação

Fonte: Adaptado de De Groot *et al.* (2010)

Enquanto vários serviços ecossistêmicos podem ajudar a sociedade a se adaptar à mudança do clima, também podem ser impactados pela mudança. Por exemplo, a população de insetos polinizadores pode ser impactada, reduzindo o serviço de polinização de plantações.

1.3 MARCO CONCEITUAL SIMPLIFICADO DE VULNERABILIDADE À MUDANÇA DO CLIMA

A *vulnerabilidade* à mudança do clima é um atributo resultante de fatores de *exposição, sensibilidade, impacto e capacidade de adaptação* dos sistemas naturais e humanos. O Marco Conceitual simplificado é ilustrado pela Figura 3, com as seguintes definições, já adaptadas para a biodiversidade e ecossistemas:

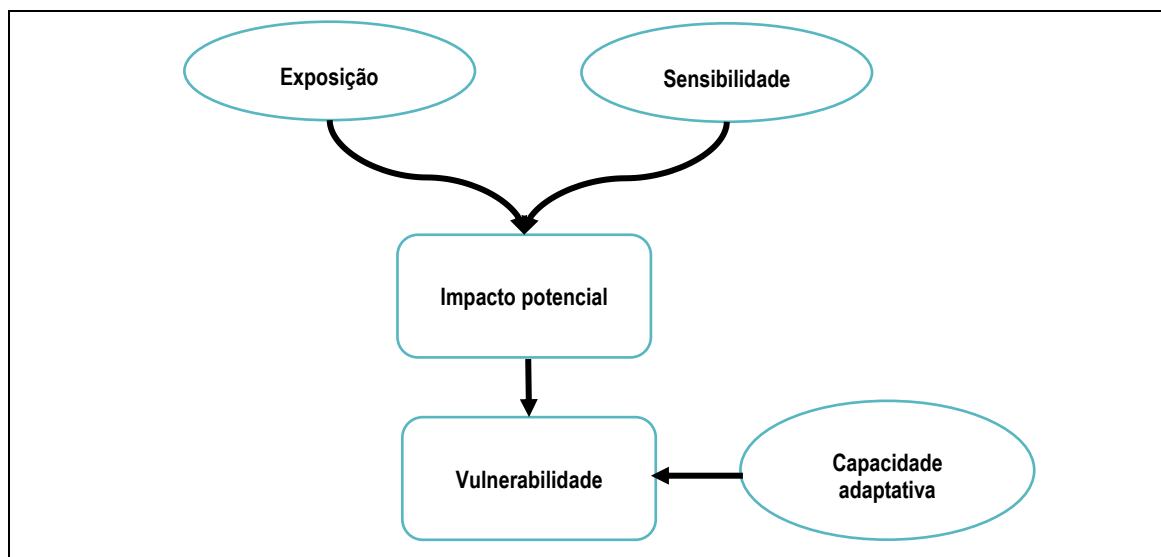


Figura 3: Esquema simplificado para análise de vulnerabilidade.

- **Exposição** pode ser entendida como a extensão em que ecossistemas e espécies estão expostos e vivenciam a mudança do clima. É caracterizada pela magnitude, frequência, duração e ou extensão espacial de um *evento climático* (IPCC, 2007; ANDRADE PEREZ, 2010). Exposição também pode ser considerada a mudança na localização e abrangência do “nicho climático”, isto é, na área caracterizada pela ocorrência de parâmetros climáticos dentro das faixas favoráveis para ecossistemas e espécies.
- **Sensibilidade** é o grau em que ecossistemas e espécies podem ser afetados, direta ou indiretamente, negativamente ou positivamente pela mudança do clima (IPCC, 2007). É o grau em que a sobrevivência, persistência, aptidão, desempenho ou regeneração de uma espécie, população ou ecossistema é dependente do clima atual, particularmente aquelas variáveis que provavelmente vão se alterar no futuro próximo. A sensibilidade depende de uma série de fatores, incluindo ecofisiologia, história de vida e preferências de micro-habitat das espécies (DAWSON *et al.*, 2011) e a integridade dos ecossistemas.
- **Impacto** são os efeitos nos ecossistemas e nas espécies causados pelas mudanças no clima. Por exemplo, longos períodos secos podem aumentar a incidência de incêndios florestais, com impactos diretos e momentâneos sobre a biodiversidade e causando mudanças na estrutura e função dos ecossistemas que

podem durar muitos anos, ou mesmo serem permanentes. O impacto é resultado da combinação de **exposição** e **sensibilidade** de ecossistemas e espécies.

- **Capacidade de adaptação ou capacidade adaptativa (em relação aos impactos da mudança do clima)** é capacidade de ecossistemas e espécies de ajustar-se à mudança do clima (inclusive à variabilidade e aos extremos climáticos) atenuando possíveis danos, aproveitando oportunidades ou enfrentando as consequências (IPCC AR4, 2007). Adaptação se refere à capacidade dos ecossistemas e espécies de se adaptar às novas condições climáticas, persistindo no local, mudando-se para micro-habitats locais mais adequados, migrando para regiões mais favoráveis (DAWSON *et al.*, 2011), ou mudando o fenótipo, fenologia ou comportamento (mudança da fonte de alimento, mudança da época de floração ou da perda de folhas, exploração de microambientes mais amenos, mudança do horário de atividade durante o dia, mudança da época de migração, etc.). A capacidade adaptativa depende de uma série de fatores intrínsecos, incluindo a plasticidade fenotípica, diversidade genética, taxas de evolução, características das histórias de vida, e habilidade de dispersão e colonização (*Ibid.*). Quando incluímos o ser humano no sistema, a capacidade adaptativa também inclui as políticas públicas de promover a proteção da biodiversidade nas áreas de ocorrência das novas condições, conservação de grandes blocos de áreas naturais, e outras medidas conservacionistas.
- **Vulnerabilidade** é a medida em que um elemento da biodiversidade está ameaçado com declínio, redução de aptidão, perda genética ou extinção devido à mudança climática (DAWSON *et al.*, 2011). Considera, além do **impacto** (resultado da exposição e da sensibilidade), a **capacidade de adaptação**.

1.4 OBJETIVO DO TRABALHO

Contribuir para a análise da *exposição*, a *sensibilidade* e o *impacto potencial* da mudança do clima sobre a biodiversidade, por meio da revisão de literatura e da consolidação dos estudos desenvolvidos no MMA para apoiar o Plano Nacional de Adaptação (PNA).

Este trabalho será a base para análise da capacidade adaptativa e da vulnerabilidade do Brasil diante da mudança do clima que será apresentada no Produto

6 e envolve avaliar as políticas públicas relacionadas com biodiversidade e ecossistemas em relação à sua capacidade de promover adaptação à mudança do clima, reduzindo a vulnerabilidade. A partir dos dados apresentados neste trabalho, serão avaliadas as principais políticas relacionadas com áreas protegidas, conservação e recuperação da vegetação nativa em áreas públicas e privadas, espécies ameaçadas e priorização de áreas para a conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira.

1.5 METODOLOGIA

Neste trabalho, a revisão do conhecimento e a discussão sobre exposição e a sensibilidade em relação ao tema de biodiversidade foram desenvolvidas com base em trabalhos realizados no Brasil e em outros países, por meio de revisão bibliográfica, e pelos seguintes estudos contratados pelo Ministério do Meio Ambiente³:

- Mapas do Clima em 2050 (FRANÇOSO, 2016a).
- Respostas da biodiversidade aos impactos das mudanças climáticas (LEMES, 2016a).
- Respostas da biodiversidade aos impactos da fragmentação da vegetação nativa (LEMES, 2016b).
- Parâmetros de clima mais relevantes para análise do impacto da mudança do clima sobre a biodiversidade (FRANÇOSO, 2016b).
- Mapas da distribuição espacial futura de nichos climáticos dos biomas brasileiros (FRANÇOSO, 2016c).
- Mapa das áreas sob estresse climático (exposição) (FRANÇOSO, 2016d).
- Respostas da biodiversidade aos impactos das mudanças climáticas para, anfíbios, aves, mamíferos e borboletas frugívoras (LEMES, 2016c).

2 OPERACIONALIZANDO O CONCEITO DE ECOSISTEMA

Para que fossem possíveis análises sobre os impactos da mudança do clima sobre os ecossistemas, foi necessário definir, de forma operacional, o que se entende por ecossistemas neste trabalho. Isso resultou em dilemas envolvendo diferentes

³ Para mais detalhes, consultar os trabalhos originais.

abordagens. A primeira opção, que foi utilizada no PNA após a confirmação dos pesquisadores da Rede Bioclima⁴, propôs que se considerassem “ecossistemas terrestres” as formações vegetais nativas e fitofisionomias, conforme a classificação de Veloso *et al.* (1991, *apud* IBGE, 2012), organizadas em biomas. Posteriormente, para mapeamento dos ecossistemas e modelagem climática, por meio de algoritmos que buscavam a associação entre variáveis climáticas e os ecossistemas, foram comparadas a abordagem baseada em biomas e a baseada em “distritos vegetais”, com as seguintes definições:

- Um bioma compreende a “vegetação clímax”⁵ e suas subdivisões, e a fauna, ocupando extensas regiões sob um mesmo domínio climático (CLEMENTS & SHELFORD, 1939; OXFORD 2010 *apud* FRANÇOSO, 2016b) (Figura 4).
- Distritos vegetais são o resultado analítico de uma sistematização da classificação de vegetação do IBGE, combinada com inspeções visuais, índices de vegetação (EVI e NDVI) derivados de imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), solos e unidades geoambientais (FRANÇOSO, 2016b) (Figura 5).

A comparação concluiu que os limites dos biomas brasileiros, embora não perfeitamente, refletem melhor que os distritos vegetais as variáveis climáticas disponíveis (96% de acertos para os biomas contra 52% para os distritos vegetais) (FRANÇOSO, 2016b). Dessa forma, operacionalmente, para análise e modelagens, “ecossistemas terrestres” neste trabalho são os biomas. Em discussões mais qualitativas, outros conceitos podem ser utilizados, como foi feito para o caso dos ecossistemas aquáticos continentais e ecossistemas marinhos.

⁴ Grupo de pesquisadores que acompanha a elaboração do capítulo sobre biodiversidade do Plano Nacional de Adaptação.

⁵ Vegetação clímax é a maior unidade de vegetação, que está permanentemente próximo ao estágio final de uma sucessão específica determinada pelo clima (CLEMENTS, 1916 *apud* FRANÇOSO, 2016b).

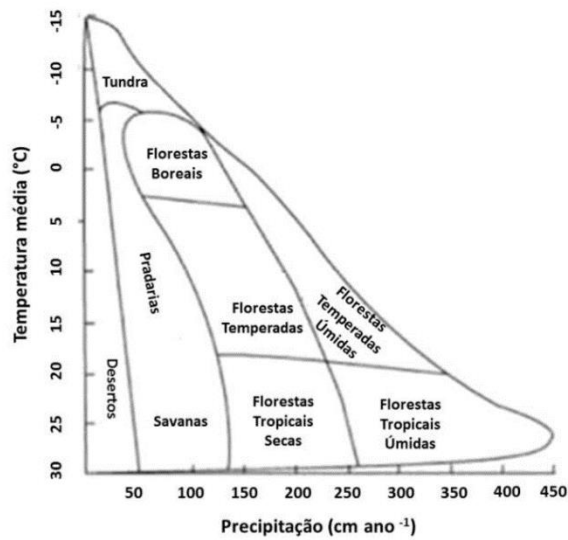


Figura 4: Biomas e como eles são determinados pelo clima (Fonte: adaptado de WHITTAKER por CHAPIN *et al.* 2011, *apud* FRANÇOSO, 2016b)



Figura 5: Mapa dos Distritos Vegetais elaborados a partir da combinação e interpretação visual de mapas de classes de vegetação, altitude, solos, geologia e índices de vegetação (Fonte: FRANÇOSO, 2016b).

3 SENSIBILIDADE DA BIODIVERSIDADE À MUDANÇA DO CLIMA

Conforme a definição apresentada na descrição do marco conceitual simplificado, a sensibilidade da biodiversidade à mudança do clima é o grau em que a sobrevivência, persistência, aptidão, desempenho ou regeneração de uma espécie, população ou ecossistema é dependente do clima atual. A sensibilidade depende principalmente dos seguintes fatores:

- **Características dos ecossistemas e das espécies que determinam sua sensibilidade à mudança do clima** (ecofisiologia, história de vida e preferências de micro-habitat das espécies).
- **Integridade dos ecossistemas**, que influencia o tamanho do habitat disponível, e a estabilidade e resiliência dos ecossistemas.

Dessa forma, a sensibilidade é um atributo dos ecossistemas e das espécies.

3.1 SENSIBILIDADE DOS ECOSSISTEMAS

3.1.1 Sensibilidade dos ecossistemas à mudança do clima

Ecossistemas terrestres

A sensibilidade dos ecossistemas terrestres à mudança do clima está relacionada com processos fisiológicos nas plantas. Conforme explica-se no estudo de França (2016b), a fotossíntese envolve a absorção de água, transportada das raízes às folhas, por meio da diferença de “potencial hídrico” no interior da planta. À medida em que a planta transpira e perde água, a concentração de sais no seu interior aumenta nas folhas, criando um potencial hídrico negativo em que a água se movimenta das células com menor concentração de sais para as com maior concentração. Ou seja, é criada uma força de sucção. Assim, quanto mais alta for a planta, maior deverá ser a força de sucção e, assim, maior será a pressão exercida sobre os dutos do xilema, que é o sistema de vasos que leva água e nutrientes das raízes das plantas até as folhas. Quando há bastante água no solo, o potencial hídrico nas raízes é menos negativo, e a sucção exercida pelas folhas faz com que a água flua. Entretanto, se falta água no solo, plantas mais altas terão mais dificuldade para levar a água à copa. Se a diferença de potencial hídrico for demasiada,

pode haver embolia dos vasos do xilema⁶, provocando a morte da planta. Há várias formas de adaptação das plantas à situação de menor disponibilidade de água. Uma das principais é a redução do seu porte.

Assim, mudança no clima que resulte na redução de precipitação e prolongamento do período seco pode causar a perda da cobertura arbórea, como previsto para partes da Amazônia (CHOAT *et al.* 2012, *apud* FRANÇOSO, 2016b), e substituição por plantas de menor porte ou com outras adaptações para enfrentar a falta de umidade.

Françoso (2016b) analisou a associação entre os biomas e as variáveis climáticas, identificando quatro variáveis capazes de prever a localização atual dos biomas com 94% de acertos:

- Temperatura média anual
- Sazonalidade da temperatura
- Precipitação anual
- Sazonalidade da precipitação

Assim, Françoso (2016b) explica como essas variáveis estão associadas aos biomas:

Dessa forma, fica evidente uma clara compartimentalização climática dos biomas brasileiros, que podem ser divididos em três grupos. O Pampa e a Mata Atlântica apresentam alta sazonalidade da temperatura, baixa sazonalidade da precipitação e baixa temperatura média anual, sendo que essas características são mais acentuadas no Pampa. O segundo grupo, composto pelo Pantanal, Cerrado e Caatinga, é caracterizado por baixa precipitação anual e alta sazonalidade da precipitação, e a sazonalidade da temperatura é pouco relevante para esse grupo. A Caatinga sofre maior influência desses fatores do que os outros dois biomas, especialmente sazonalidade da precipitação. A Mata Atlântica e o Pantanal ainda são moderadamente influenciados pela sazonalidade da temperatura. A Amazônia (terceiro grupo) possui características únicas, sendo definida por altas temperaturas médias anuais e alta precipitação anual, tendo precipitação uniforme ao longo do ano (FRANÇOSO, 2016b).

Assim, a sensibilidade é expressa pelas mudanças nessas variáveis que podem resultar em mudanças da estrutura dos ecossistemas que compõem os biomas, com fortes impactos sobre a biodiversidade, afetada diretamente ou indiretamente pela

⁶ Sistema de vasos condutores de água e nutrientes das raízes para as folhas das plantas.

mudança nessas variáveis climáticas. Françoso (2016b) analisou como esses parâmetros estão associados com os biomas por meio de regressão logística (Tabela 2).

Tabela 2: Resultado das regressões logísticas dos parâmetros do clima para os biomas brasileiros.

Bioma	Relação positiva	Relação negativa
Amazônia	Precipitação da semana mais úmida (mm)	Sazonalidade da temperatura (C of V)
	Varição da temperatura média diurna (média – período max-min) (°C)	Temperatura média do trimestre mais úmido (°C)
		Precipitação da semana mais seca (mm)
		Sazonalidade da precipitação (C of V)
		Precipitação do trimestre mais quente (mm)
Caatinga	Sazonalidade da temperatura (C of V)	Precipitação do trimestre mais quente (mm)
	Isotermalidade (Bio02 ÷ Bio07)	Precipitação da semana mais úmida (mm)
		Precipitação do trimestre mais frio (mm)
		Varição da temperatura média diurna (média – período max-min) (°C)
Cerrado	Precipitação da semana mais úmida (mm)	Precipitação da semana mais seca (mm)
	Temperatura média do trimestre mais úmido (°C)	Precipitação do trimestre mais frio (mm)
Mata Atlântica	Precipitação do trimestre mais frio (mm)	Varição da temperatura média diurna (média – período max-min) (°C)
	Precipitação da semana mais seca (mm)	
	Precipitação do trimestre mais quente (mm)	Temperatura média do trimestre mais seco (°C)
	Isotermalidade (Bio02 ÷ Bio07)	
Pampa	Temperatura máxima da semana mais quente (°C)	Sazonalidade da precipitação (C of V)
	Temperatura mínima da semana mais fria (°C)	Temperatura média do trimestre mais úmido (°C)
Pantanal	Precipitação do trimestre mais quente (mm)	Precipitação da semana mais seca (mm)
	Temperatura mínima da semana mais fria (°C)	

Fonte: Françoso (2016b).

Ecosistemas fluviais

Cortando os biomas, estão uma série de ecossistemas aquáticos, como rios e lagoas, que poderão ser impactados, seja pela alteração das paisagens vegetais em que estão inseridos, seja diretamente por fatores como mudanças na precipitação e na temperatura, seja pelas atividades humanas, como barragens, poluição e retirada de água para a irrigação. O caso dos ecossistemas fluviais é complexo pois é comum que os grandes rios atravessem diferentes tipos de ecossistemas terrestres e zonas climáticas.

Esses ecossistemas são sensíveis a variações de oxigênio dissolvido, temperatura, quantidade de nutrientes dissolvidos, poluentes e sedimentos na água, que podem alterar suas características físicas e químicas, e afetar sua produtividade. Alguns corpos d'água são intermitentes, secando completamente ou criando trechos isolados no período seco, mudando essas características enquanto se dá a variação de volume de água.

Os ecossistemas fluviais sofrem bastante influência do relevo, que cria obstáculos para algumas espécies (como cachoeiras) e determina a velocidade e direção da corrente, alterando a possibilidade de migração das espécies em adaptação à mudança do clima. Assim, a sensibilidade dos ecossistemas fluviais à mudança do clima está relacionada com fatores como a vazão média ou volume de água, velocidade da corrente, relevo, geologia, etc.

Ecossistemas costeiros e marinhos

Enquanto na maioria dos ecossistemas terrestres a influência da mudança do clima se dá por meio de variações de temperatura do ar e de precipitação, ou indiretamente por fatores bióticos, na zona costeira e marinha, a mudança do clima influencia a biodiversidade pela elevação do nível dos oceanos, elevação da temperatura das águas, acidificação das águas e mudanças na salinidade, além de mudanças na pluviosidade e temperatura.

A sensibilidade de manguezais é determinada pelo relevo da área, vazão e carga de sedimentos do estuário, que determinam como poderão responder à elevação do nível do mar. A sensibilidade de dunas e restingas depende de sua fixação e do relevo circundante, que determinam como responderão à elevação do nível do mar e a tempestades mais frequentes.

3.1.2 Fragmentação e outras pressões

Ecossistemas terrestres

A perda de área e a fragmentação da vegetação nativa provocam mudanças na vegetação remanescente. Nas florestas úmidas, a fragmentação pode desencadear processos de retroalimentação (feedback) em que a fragmentação amplia a degradação do habitat. Cochrane (2009) aponta que as florestas de copa fechada permanecem

úmidas e frescas no seu interior. Eventos extremos de seca e extração seletiva de madeira podem secar seu interior das florestas o suficiente para torná-las susceptíveis a incêndios. O uso do fogo nas bordas dessas florestas, com a finalidade de conversão de áreas para a agropecuária ou de limpeza de terrenos, ou mesmo devido a acidentes, faz com que o fogo penetre nesses ecossistemas. Já danificadas pela extração seletiva de madeira, um número crescente de árvores mortas cria mais material combustível para os próximos incêndios, aumentando os danos às árvores e outros organismos remanescentes. Assim, um processo de “*feedback positivo*”⁷ avança até que a floresta entre em colapso e seja substituída por arbustos e gramíneas. Apesar de as florestas úmidas terem passado por muitos períodos de mudança climática, o grau de fragmentação atual cria um estresse sem precedentes (COCHRANE; LAURANCE, 2008; COCHRANE, 2009). Isto é, a resiliência da floresta como tal vai sendo enfraquecida, até que o ecossistema muda para um outro estado de equilíbrio, geralmente de menor complexidade.

Na borda de florestas, pode haver um aumento da temperatura do ambiente, maior radiação solar e menor umidade relativa do ar (DIDHAM; LAWTON 1999, *apud* LEMES, 2016b). As árvores nas bordas de florestas estão mais expostas ao vento, tornando-se mais vulneráveis à queda (BIRD JACKSON; FAHRIG, 2013 *apud* Lemes, 2016b). A maior incidência de radiação solar pode aumentar a densidade populacional de plantas (CAMARGO *et al.* 2011, *apud* Lemes, 2016b). Esse resultado da interação entre dois ambientes/e adjacentes é conhecido como “efeito de borda”, criando diferenças na composição de espécies, na estrutura de habitat e nos processos ecológicos em relação ao interior desses ecossistemas (MURCIA 1995 *apud* Lemes, 2016b).

A fragmentação é caracterizada pelo tamanho e formato dos fragmentos. Quanto mais comprido e irregular for o formato do fragmento, maior o perímetro em relação à área e, assim, o efeito de borda. Quanto menor o fragmento, maior a área proporcional afetada pelo efeito de borda⁸. Quanto maior a borda, menor a resiliência e mais sujeito

⁷ *Feedback positivo* é um processo de retroalimentação que aumenta a intensidade do processo. *Feedback negativo* é um processo de retroalimentação que reduz a intensidade do processo.

⁸ Por exemplo, um fragmento retangular de 20 hectares de 400 m por 500 m tem 1800 m de perímetro onde impactos do ambiente vizinho causará mudanças na borda, mas um fragmento retangular de 100 m por 2000 m teria a mesma área com 4200 m de perímetro. Assim, o primeiro fragmento teria 90 metros de perímetro por hectare de remanescente, enquanto o segundo 210 metros (mais que o dobro). Se o efeito de borda penetrar 50 metros, o primeiro seria afetado em menos da metade da área, enquanto o segundo, com a mesma área, seria totalmente afetado. Se os fragmentos fossem duas vezes maiores,

estará o ecossistema aos efeitos descritos por Cochrane (2009), ou seja, mais sensível será o ecossistema à mudança do clima se ela implicar aumento do estresse hídrico e dos eventos extremos, como vendavais.

Ecosistemas fluviais

Rios são ecossistemas que podem ser interrompidos por barragens e por trechos poluídos. Numa barragem, além de ser um obstáculo em si, o reservatório pode ser um desafio para as espécies de corredeiras, por se tratar de um outro tipo de ambiente. Trechos poluídos podem isolar partes de melhor qualidade do rio onde as espécies mais sensíveis podem viver.

Ecosistemas costeiros e marinhos

Ecosistemas costeiros são fragmentados pela expansão urbana, empreendimentos imobiliários, plantações e pela carcinicultura. Da mesma forma que em outros ecossistemas terrestres e fluviais, há impactos sobre o funcionamento dos ecossistemas e suas espécies, tornando-os mais sensíveis à mudança do clima. No caso de manguezais e recifes de coral, além da fragmentação, a poluição pode colocar estresse sobre os organismos, deixando o sistema mais sensível.

Ecosistemas marinhos podem ser fragmentados por obras costeiras, poluição, sobrepesca e pesca de arrasto.

3.2 SENSIBILIDADE DAS ESPÉCIES

Espécies é o segundo nível de biodiversidade de acordo com a definição da CDB. O surgimento e a extinção de espécies são parte da dinâmica natural da evolução. Entretanto, a mudança do clima deve acelerar a taxa de extinção, reduzindo a diversidade de espécies.

Estima-se que a riqueza de espécies do Brasil varie entre 10 a 20% da biodiversidade do mundo em diversos reinos e filos que abrangem microrganismos, plantas, vertebrados e invertebrados (BRASIL, 2006, 2010)⁹. Assim, o impacto da

preservando as proporções, no primeiro caso, o perímetro seria de 2.548 m (63,7 m por ha), e no segundo, 6038 m (151 m por ha) – nos dois casos, uma relação menor de perímetro por área.

⁹ Este valor é estimado a partir do valor médio da faixa de variação para o Brasil e para o mundo.

mudança do clima na riqueza de espécies brasileira tem uma grande importância, não só para o País, mas para o mundo.

3.2.1 Sensibilidade à mudança do clima

A mudança do clima pode influenciar as espécies diretamente ou de forma indireta. De forma direta, as condições de clima, como mudanças na temperatura e na precipitação podem prejudicar o desenvolvimento, reduzir a mobilidade, prejudicar taxas reprodutivas, aumentar a mortalidade, afetar a imunidade a doenças entre outros efeitos. Algumas espécies são sensíveis a baixas temperaturas, outras ao calor ou seca excessivos. De forma indireta, as espécies podem ser influenciadas pelos efeitos da mudança do clima sobre o ecossistema ou outras espécies.

Nichos climáticos e efeitos diretos da mudança do clima

Os valores dos parâmetros climáticos em que as espécies ou ecossistemas têm melhor desempenho constituem seu nicho climático. Quanto menor o nicho climático em termos da amplitude dos parâmetros climáticos que o definem, mais sensível é a espécie. Além dos parâmetros climáticos médios que influenciam as espécies, os eventos extremos podem ter impacto importante, especialmente as enchentes, e as secas prolongadas que podem aumentar a ocorrência de incêndios em ambientes onde os organismos não estão adaptados.

A mudança do clima também pode afetar os biótopos, ou seja, onde o organismo vive no ecossistema, por exemplo, em habitats subterrâneos, no alto da copa das árvores ou dentro d'água (CLOSEL; KOHLSDORF, 2012).

Alguns grupos de espécies são particularmente sensíveis. Anfíbios possuem fisiologia e comportamento que podem ser alterados pela temperatura (NAVAS *et al.* 2013, *apud* LEMES, 2016a), e precisam de água para reprodução – ou, pelo menos, de microambientes mais úmidos (HADDAD *et al.* 2013, *apud* LEMES, 2016a). Assim, são sensíveis à redução na disponibilidade de água.

As aves sedentárias, endêmicas de topo de montanhas, ou restritas de planície (ŞEKERCIOĞLU *et al.* 2012, *apud* LEMES, 2016a) provavelmente são mais sensíveis à mudança do clima. As borboletas frugívoras possuem uma estreita relação com o habitat, o que faz com que o grupo responda de maneira rápida às alterações ambientais (SOGA *et al.* 2015, SWEANEY *et al.* 2014 *apud* LEMES, 2016a).

Os corais são sensíveis a pequenos aumentos na temperatura da água do mar e à acidez causada pela absorção de CO₂ pelos oceanos. O principal impacto é o “branqueamento” (*bleaching*) dos recifes de coral com a perda da alga simbiote, devido ao aumento da temperatura e da acidez das águas marinhas. Esse processo, que ficou bastante conhecido no Caribe (PARMESAN, 2006), também ocorre no Brasil. Estudos detectaram que anomalias térmicas de apenas 0,25° C por duas semanas no litoral norte da Bahia e 0,5° C em Abrolhos causaram branqueamento em 10% dos corais (LEÃO; KIKUCHI; OLIVEIRA, 2008a, 2008b).

Modelagem de da ocorrência/distribuição de espécies

Estudos de modelagem da ocorrência/distribuição de espécies vem sendo documentados e são úteis para a definição de nichos climáticos (ver, por exemplo, ALEXANDRE; LORINI; GRELE, 2014; PIE *et al.*, 2013; ANACLETO; OLIVEIRA, 2014; GIANNINI *et al.*, 2012; IHLOW *et al.*, 2012; MARINI *et al.*, 2010b, 2013; MEYER, 2013; SIMON *et al.*, 2013; SIQUEIRA; PETERSON, 2003; SOARES-FILHO *et al.*, 2003, 2006; SOUZA *et al.*, 2011; VIEIRA; MENDES; OPREA, 2012; ZIMBRES *et al.*, 2012; MEYER; PIE; PASSOS, 2014; LOYOLA *et al.*, 2012; DE MARCO JÚNIOR; SIQUEIRA, 2009; OLIVEIRA; CASSEMIRO, 2013). No Brasil, são cada vez mais comuns os estudos que modelam os impactos da mudança do clima sobre as espécies, especialmente para grupos cuja distribuição é mais conhecida, como as aves (Ver, por exemplo, MARINI *et al.*, 2009a, 2009b, 2010a) e morcegos (VIEIRA; MENDES; OPREA, 2012).

Lemes (2016a, citando PETERSON *et al.*, 2011) aponta que as avaliações dos impactos das mudanças climáticas na biodiversidade são principalmente baseadas em estudos das respostas dos organismos às mudanças nas variáveis climáticas, com base em experimentos e manipulações em campo e, usualmente, a modelagem preditiva da distribuição das espécies. A modelagem preditiva pode ser de três tipos:

- **Modelos mecanísticos**, que preveem a distribuição das espécies com base no conhecimento disponível das restrições fisiológicas de cada uma.
- **Modelos correlativos**, que preveem a distribuição das espécies com base na *associação* das espécies com intervalos de certos parâmetros climáticos no presente, em termos de probabilidade de ocorrência.
- **Modelos híbridos**, que combinam as duas abordagens.

Um número razoável de trabalhos argumenta que a modelagem de nichos climáticos precisa ser complementada com uma modelagem de fatores bióticos (ZARNETSKE; SKELLY; URBAN, 2012; BLOIS *et al.*, 2013; HILLERISLAMBERS *et al.*, 2013). Segundo DAWSON *et al.* (2011), os estudos que procuram prever os impactos da mudança do clima sobre a biodiversidade estão sendo desenvolvidos sobre uma base metodológica estreita, que precisa ser complementada por outras abordagens.

Dentre os 59 estudos analisados por Lemes (2016a), três foram experimentos e os demais utilizaram modelos preditivos. Dentre os modelos preditivos, seis estudos utilizaram os modelos mecanísticos, 50 correlativos, dos quais 23 utilizaram modelos únicos (principalmente, MaxEnt), outros 25 modelos consensuais e, ainda, dois estudos, os modelos híbridos.

Modelos correlativos de distribuição de espécies

Os modelos correlativos de distribuição de espécies são os mais comuns (PACIFICI *et al.*, 2015, *apud* LEMES, 2016a), e utilizam os registros de ocorrência das espécies para derivar funções que relacionam a probabilidade de sua ocorrência considerando o clima e outros fatores, como topografia e uso da terra (BOTKIN *et al.*, 2007; PETERSON *et al.*, 2011; *apud* LEMES, 2016a). Esses modelos são aplicados dentro de uma abordagem de envelope climático em que se avalia se o nicho fundamental de uma espécie continuará ou não a existir na distribuição atual.

As principais limitações dos modelos correlativos são o pressuposto de equilíbrio espécie-clima atual e que nem todas as condições climáticas que a espécie pode existir são incluídas nos modelos (PETERSON *et al.*, 2011 *apud* LEMES, 2016a). Além disso, esses modelos ignoram as relações interespecíficas, discutidas a seguir. Outra limitação é que já foram desenvolvidos mais de 14 algoritmos que associam a ocorrência das espécies às projeções no clima futuro, sem que haja um consenso na literatura sobre qual é o melhor algoritmo ou a melhor forma de avaliá-los (PETERSON *et al.*, 2011 *apud* LEMES, 2016a).

Os modelos correlativos podem ser simples como, por exemplo, o BIOCLIM que estabelece a variação de condições ambientais adequadas diretamente dos registros conhecidos da espécie, ou algoritmos complexos baseados em inteligência artificial (por exemplo, algoritmos genéticos – GARP, máxima entropia – MaxEnt ou redes neurais), que buscam elucidar relações intrincadas entre a distribuição das espécies e o ambiente

(PETERSON *et al.* 2011, *apud* LEMES, 2016a). “Modelos consensuais” (*ensemble forecasting*) têm sido utilizados para lidar com as discrepâncias dos resultados de diferentes modelos.

Interações biológicas

No nível de espécies, as interações biológicas emergem como um fator de análise importante, já que as espécies ocorrem em comunidades bióticas, com muitas relações de interdependência. Segundo PARMESAN (2006), que revisou 866 trabalhos realizados em diversas partes do mundo, a maioria dos impactos observados da mudança do clima sobre a biodiversidade tem se registrado sobre a fenologia das espécies, que é o componente sazonal presente no seu ciclo de vidas, como por exemplo a época de floração, frutificação ou de perda de folhas, ou ainda a data de migração ou nascimento dos filhotes. Esse impacto é particularmente importante pois afeta a sincronia entre as espécies e suas fontes de alimentos, que com a mudança do clima, pode ser prejudicada (HARRINGTON *et al.* 1999, VISSER & BOTH, 2005, *apud* PARMESAN, 2006).

A mudança do clima vai influenciar as distribuições de espécies, embaralhar as comunidades, e alterar as interações bióticas, como predação, competição, dispersão, polinização, mutualismo, que vão influenciar as comunidades de forma inesperada e importante (HARLEY, 2011; HILLERISLAMBERS *et al.*, 2013). Isso será mais intenso em comunidades tropicais e, considerando o maior grau de especialização das espécies tropicais, o rearranjo das comunidades pode ter consequências mais graves para elas (SHELDON; YANG; TEWKSBURY, 2011).

Além disso, espécies, quando mudam sua área de ocorrência, podem ter seu deslocamento para a nova área retardado ou acelerado por outras espécies (HARLEY, 2011; HILLERISLAMBERS *et al.*, 2013). Também pode acontecer de uma espécie que não seja sensível à mudança do clima ocorrida possa ser impactada por meio de uma espécie que é. O aumento das taxas de extinção de anfíbios tropicais na América do Sul e Central, chegando a 67% nos últimos 20-30 anos, é um dos mais notáveis impactos da mudança do clima registrados sobre as espécies, provavelmente devido a um fungo que é favorecido por noites mais quentes e menor nebulosidade (POUNDS *et al.* 2006, *apud* PARMESAN, 2006). Essas mudanças nas relações entre os seres vivos de um ecossistema são difíceis de avaliar ou prever, exigindo monitoramento por vários anos.

A mudança do clima também tem causado o declínio da população de insetos polinizadores, devido à mudança na distribuição geográfica das espécies, afetando também a interação polinizador-planta, mesmo nas espécies menos sensíveis, de regiões áridas ou semiáridas, adaptadas às altas temperaturas e baixa pluviosidade (GIANNINI *et al.*, 2012; GIANNINI *et al.*, 2013, *apud* LEMES, 2016a). Esse declínio pode causar impactos nos ecossistemas e nas lavouras que dependem dos polinizadores, como é o caso do café (DE MARCO; COELHO 2004 *apud* LEMES, 2016a).

Mudança na distribuição geográfica

Com a mudança do clima, a distribuição geográfica de uma espécie pode expandir, contrair, ou ainda permanecer inalterada (GARCIA *et al.*, 2014a). A mudança na distribuição geográfica projetada por modelos para as espécies revela o quanto a espécie será *exposta* à mudança do clima além dos seus limites de *sensibilidade*. A perda de área de ocorrência atual impõe desafios às espécies. A expansão potencial para novas área pode ou não compensar perdas ou representar oportunidades de adaptação, uma vez que a mudança na área de ocorrência potencial pode se concretizar ou não dependendo da capacidade de dispersão e das interações bióticas nas novas áreas.

Ainda, do ponto de vista das espécies já estabelecidas nas novas áreas de outras espécies, as espécies recém-chegadas podem representar oportunidades (como presa, por exemplo) ou ameaças (como competidora ou predadora). Assim, a mudança na localização da área de ocorrência das condições favoráveis para uma espécie representa a combinação de sensibilidade e exposição, mas a mudança de fato de uma espécie para uma nova área representa a sua capacidade de adaptação.

No Cerrado, modelos para espécies conhecidas como a “mangaba” (*Hancornia speciosa*) e a “arnica” (*Lychnophora ericoides*) apontam redução de mais de 90% da distribuição atual no ano 2080 (Simon *et al.*, 2013). O “pequi” (*Caryocar brasiliensis*) também poderá ter redução na sua distribuição geográfica, afetando a economia local de vários municípios, sendo que muitas populações de “pequi” podem tornar-se extintas ou ter uma forte redução da sua diversidade genética (NABOUT *et al.*, 2011, e COLEVATTI *et al.*, 2011, *apud* LEMES, 2016a). No caso do “baru” (*Dipteryx alata*), as mudanças na distribuição geográfica não deverão afetar a diversidade genética (DINIZ-FILHO *et al.*, 2012, *apud* LEMES, 2016a).

Estudos apontam a mudança na distribuição geográfica de muitas espécies da Região Amazônica, geralmente, com redução da distribuição geográfica das espécies (MILES *et al.*, 2004; FEELEY *et al.*, 2009 *apud* LEMES, 2016a). Na Mata Atlântica, mariposas mostram-se extremamente sensíveis e poderão desaparecer até 2080 (FERRO *et al.*, 2014 *apud* LEMES, 2016a), com a redução de 100% do clima adequado no futuro. Muitos vertebrados endêmicos da Caatinga também poderão ter sua distribuição geográfica restringida nos cenários futuros (OLIVEIRA *et al.*, 2012 *apud* LEMES, 2016a).

Algumas espécies são pouco sensíveis às mudanças no clima. Por exemplo, a *Rhinella granulosa*, uma espécie de anfíbio da Caatinga, com fisiologia extremamente tolerante às altas temperaturas e adaptada para suportar clima quente e seco, tende a manter sua distribuição (CASSEMIRO *et al.*, 2012, *apud* LEMES, 2016a). As espécies de árvores de floresta seca podem expandir a distribuição geográfica em áreas que atualmente são ocupadas por savanas e florestas úmidas (RODRIGUES *et al.*, 2015, *apud* LEMES, 2016a).

Porém, os estudos utilizando modelagem preditiva da ocorrência/distribuição de espécies revelam que muitas são sensíveis à mudança do clima, com deslocamento e redução da área favorável. Para lidar com essa perspectiva, recomenda-se priorização dinâmica das espécies estudadas (ZIMBRES *et al.*, 2012; LOYOLA *et al.*, 2013; FALEIRO *et al.*, 2013; LEMES; Loyola 2013, *apud* LEMES, 2016a), com a identificação de áreas que sejam importantes considerando a distribuição atual e futura das espécies.

Deve-se reconhecer, entretanto, o nível de incerteza de tais previsões (DINIZ-FILHO *et al.*, 2009; DINIZ-FILHO *et al.*, 2010, *apud* LEMES, 2016a) e a possibilidade de que estes modelos estejam subestimando ou superestimando o risco de extinção.

Invasões biológicas

Sem considerar a mudança do clima, as invasões biológicas podem causar profundas mudanças na biodiversidade, diminuindo a diversidade, ou até mesmo extinguindo espécies nativas (CLAVERO; GARCIA-BARTHOU 2005, *apud* LEMES, 2016a). Medidas preventivas para lidar com espécies invasoras deveriam ser uma prioridade para a conservação da natureza sendo menos onerosas do que as medidas de erradicação (PIMENTEL *et al.*, 2000, *apud* LEMES, 2016a).

Entretanto, o deslocamento de uma espécie para uma nova área de ocorrência devido à mudança do clima pode ser visto tanto como “invasão” causadora de extinções locais quanto como “adaptação”. Com a mudança do clima, uma das formas de adaptação dos ecossistemas é a substituição de espécies nas funções ecossistêmicas, com novos equilíbrios. Assim, um dos desafios da conservação será o manejo dessas espécies e a decisão sobre se as espécies recém-chegadas nos ecossistemas são bem-vindas ou não. Não bastaria ser uma espécie exótica para ser considerada invasora; teria que ser nociva ao ecossistema, como nos casos em que sua proliferação ocorre sem controle causando degradação da produtividade do ecossistema.

No Cerrado, as principais espécies invasoras são as gramíneas africanas (*Urochloa* spp. e *Megathyrsus maximus*). Para as espécies do gênero *Urochloa*, o aumento da temperatura e do gás carbônico atmosférico melhora a resposta ao déficit hídrico da espécie, o estabelecimento das plântulas e a capacidade de germinação das sementes (FARIA *et al.* 2015a; 2015b; *apud* LEMES, 2016a). Ou seja, essas gramíneas serão favorecidas pela mudança do clima.

Outro exemplo de espécie conhecida pelo potencial invasor é a rã-touro americana (*Lithobates catesbeianus*) que era endêmica do leste da América do Norte, mas já foi introduzida em mais de 40 países (GISD 2015, *apud* LEMES, 2016a), inclusive no Brasil, onde os estudos de projeções dos nichos climáticos futuros apontam que as condições serão favoráveis para a espécie nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, inclusive nas unidades de conservação (LEMES, 2016a, citando FICETOLA *et al.*, 2007; GIOVANELLI *et al.*, 2008; NORI *et al.*, 2011; e LOYOLA *et al.*, 2012).

3.2.2 Sensibilidade à fragmentação e outras pressões

A mudança do clima envolve a alteração da localização de nichos climáticos (ou seja, das áreas onde os parâmetros de clima são favoráveis às espécies). Da mesma forma a fragmentação envolve uma mudança da localização das áreas de habitat disponíveis para o desenvolvimento das espécies, o que ocorreria mesmo na ausência de mudança do clima. Combinados, os impactos da mudança do clima e da fragmentação são mais intensos.

A fragmentação pode levar a modificações na diversidade e na composição de espécies, com mudança nas interações entre as espécies, e modificações tanto nos

processos biológicos quanto nas características do microclima e solo (LEMES, 2016b). Outros efeitos incluem redução da conectividade entre subpopulações remanescentes e menor probabilidade de colonização de habitats, agora, vazios (FAHRIG, 2003, *apud* LEMES, 2016b), maior suscetibilidade a variações ambientais e demográficas (LEIMU *et al.*, 2006, *apud* LEMES, 2016b), redução do efeito resgate¹⁰ (MACARTHUR; WILSON, 1963; 1967, *apud* LEMES, 2016b), e mudança na composição das espécies (SANTOS *et al.*, 2008; LEAL *et al.* 2012, *apud* LEMES, 2016b).

Uma abordagem frequente trata os habitats fragmentados como “ilhas” rodeadas por um “mar” hostil (matriz), com base na Teoria de Biogeografia de Ilhas de MacArthur e Wilson (1967, *apud* LEMES, 2016b), o que originou novas abordagens em biologia da conservação (HAILA 2002, *apud* LEMES, 2016b).

Tamanho do habitat

O Lemes (2016b) sistematizou os principais efeitos da perda e da fragmentação de habitats sobre a biodiversidade brasileira com base em revisão de literatura (Tabela 3, onde os dados estão sistematizados por grupo e por bioma).

Efeito de borda

Conforme abordado na seção sobre fragmentação de ecossistemas, onde dois ambientes adjacentes interagem, as condições bióticas e abióticas resultantes são diferentes daquelas no interior dos dois ambientes. Isso é denominado efeito de borda e tem uma grande importância para as espécies quando os habitats estão fragmentados. Essa zona de contato apresenta diferenças na composição de espécies, na estrutura de habitat e nos processos ecológicos (MURCIA, 1995, *apud* LEMES, 2016b). Quanto maior a área de contato, maior a probabilidade de indivíduos saírem do habitat e entrarem, ou serem expostos, na matriz, o que aumenta a mortalidade (FAHRIG, 2003 e MURCIA, 1995, *apud* LEMES, 2016b).

¹⁰ O “efeito resgate” ocorre quando indivíduos de uma espécie imigram para uma ilha já ocupada por aquela espécie, reduzindo a chance de extinção local da espécie. Esse efeito também pode ocorrer com fragmentos de ecossistemas nativos, de forma análoga às ilhas. Quanto mais distante uma ilha/fragmento fica das demais ilhas/fragmentos ou do continente/grandes áreas do ecossistema, menor a ocorrência do efeito resgate.

Tabela 3: Principais efeitos da perda e aumento fragmentação de habitat e diminuição da conectividade entre fragmentos nos principais grupos estudados ao longo dos biomas brasileiros.

Grupo	Bioma	Principais resultados
Aves	Amazônia	Aumento das interações competitivas.
	Mata Atlântica	Diminuição de riqueza, diversidade e abundância de populações com a redução dos fragmentos. Diminuição de espécies frutíferas, insetívoras, e da abundância de espécies de nidificação secundária ¹¹ . Aumento de riqueza e abundância de espécies generalistas. Aumento de parasitismo em aves.
	Pampa	Redução das populações de espécies ameaçadas.
Mamíferos	Amazônia	Não foi observado efeito da fragmentação para pequenos mamíferos.
	Mata Atlântica	Diminuição de riqueza, abundância e especialização em pequenos mamíferos, aumento de pequenos mamíferos generalistas. Mamíferos médios e grandes pouco afetados pela fragmentação, mas afetados pelo tipo de uso do solo no entorno dos fragmentos. Diminuição nas populações de espécies de primatas <i>Callithrix aurita</i> , <i>Callicebus nigrifrons</i> , <i>Sapajus nigritus</i> e <i>Leontopithecus chrysomelas</i> .
Anfíbios	Mata Atlântica	Diminuição da diversidade genética e da riqueza de espécies.
Peixes	Pantanal	Redução de espécies de peixes de áreas alagadas, especialmente de maior porte.
Invertebrados	Amazônia	Redução das populações de besouros com a fragmentação, mas rápida recuperação das espécies da subfamília <i>Scarabeinae</i> . Redução das populações de aranhas <i>Ctenidae</i> e da abundância e riqueza de abelhas <i>Euglossini</i> .
	Mata Atlântica	Diminuição de riqueza e abundância de formigas, particularmente as especialistas. Redução na abundância de <i>Apinae</i> e na riqueza de abelhas que alimentam sua cria apenas com pólen de plantas do mesmo gênero ou família, e a diminuição das abelhas <i>Augochlorini</i> .
	Ambientes marinhos	Aumento da diversidade devido ao relaxamento das relações de dominância.
Plantas	Amazônia	Diminuição na riqueza e abundância de plantas briófitas.
	Cerrado	A fragmentação pode afetar a diversidade genética e a estrutura espacial genética das populações de plantas da família <i>Annonaceae</i> . Fragmentos maiores apresentaram maior número de indivíduos (de arbustos e arvoretas), de espécies (de árvores, arbustos e arvoretas), e maior diversidade (de árvores) do que os fragmentos menores.
	Mata Atlântica	Redução na riqueza e diferenças na composição de espécies de samambaias. Redução da chuva de sementes, aumento de espécies pioneiras e diminuição de espécies de sementes grandes.
Interações Biológicas	Amazônia	Redução das populações de espécies de aves dispersoras de sementes. Pouco efeito em redes mutualísticas entre formigas e plantas.
	Mata Atlântica	Redução na riqueza e abundância de predadores de sementes e de dispersores de sementes de médio e grande porte. Aumento da dispersão pelo vento de frutos, sementes ou esporos.

¹¹ Espécies que utilizam/aproveitam ninhos construídos por outras espécies.

Outros efeitos relatados na literatura incluem maior teor de tanino e menor teor de água nas plantas nas bordas (ISHINO *et al.*, 2012, *apud* LEMES, 2016b), maior abundância de plantas pioneiras nas bordas (GONÇALVES *et al.*, 2010, *apud* LEMES, 2016b), redução da abundância e da riqueza de *Euglossini*¹² em uma floresta no Acre (Storck-Tonon *et al.* 2013, *apud* LEMES, 2016b), maior presença de espécies generalistas (formigas, SOBRINHO; SCHOEREDER 2007; morcegos, PENARIOL; MADI-RAVAZZI 2013, *apud* LEMES, 2016b), e redução da diversidade de pequenos mamíferos da Mata Atlântica (STEVENS; HUSBAND 1998, *apud* LEMES, 2016b).

Limiar de extinção

O limiar de extinção em relação à fragmentação de habitats é atingido quando o grau de fragmentação é tal que causa a extinção local de espécies, causando um declínio desproporcional da diversidade de espécies (FAHRIG, 2003; FICETOLA; DENOËL 2009, *apud* LEMES, 2016b). Estudos apontam que a diversidade das áreas de remanescentes é bastante inferior na medida em que a fragmentação aumenta:

- Na Amazônia, áreas com cobertura florestal menor que 40% têm forte perda de diversidade de aves e mamíferos (OCHOA-QUINTERO *et al.* 2015 *apud* LEMES, 2016b);
- Na Mata Atlântica, estudos mostraram que a fragmentação causa perdas na diversidade de aves, pequenos mamíferos e plantas: a) áreas com menos de 10% de cobertura florestal têm perda da diversidade de aves e pequenos mamíferos em comparação com áreas com cobertura florestal nativa entre 30% e 50% (Lira *et al.* 2012, *apud* LEMES, 2016b); b) áreas com menos de 30% de cobertura nativa, têm forte perda da diversidade de plantas da família Sapotaceae (LIMA; MARIANO-NETO, 2014 *apud* LEMES, 2016b), perdas de cerca de três espécies de Rubiaceae para cada 10% de diminuição na cobertura florestal (ANDRADE *et al.* 2015, *apud* LEMES, 2016b); e c) áreas com cobertura vegetal nativa inferior a 50% têm forte perda da diversidade de espécies especialistas (MORANTE-FILHO *et al.* 2015, *apud* LEMES, 2016b). Também há impactos da fragmentação sobre o fluxo gênico: Balkenhol *et al.* (2013, *apud* LEMES, 2016b), mostraram que se a cobertura florestal de Mata Atlântica for inferior a 31%, há comprometimento do

¹² Conhecidas como abelhas das orquídeas.

fluxo gênico entre as populações do marsupial *Marmosops incanus*, e quando a cobertura nativa fica menor que 11%, essa espécie é extinta da paisagem.

No caso de grandes predadores, os requerimentos de área podem ser importantes. OLIVEIRA (1994 *apud* BEISIEGEL 2009) estimou a área necessária para suportar populações de onças-pintadas (*Panthera onca*) e onças pardas, (*Puma concolor*) viáveis a longo prazo em 21.186 km² e 31.250 km², respectivamente para uma população efetivamente reprodutiva de 500 adultos. Áreas de vegetação nativa tão extensas são comuns somente na Amazônia e se tornarão desafios cada vez maiores para a conservação em outros biomas.

No caso de anfíbios, a sensibilidade à fragmentação varia com o modo reprodutivo. Espécies que possuem ciclo de vida bifásico, com larva aquática, sofrem bastante com a descontinuidade entre ambientes aquáticos e terrestres (BECKER *et al.*, 2007; FONSECA *et al.* 2013, LION *et al.* 2014, *apud* LEMES, 2016b). A estratégia demográfica também influencia a sensibilidade: as espécies r-estrategistas¹³, ou com maiores taxas de difusão de filhotes pós-metamórficos, terão limiares de extinção maiores (FONSECA *et al.* 2013, *apud* LEMES, 2016b).

Conectividade e dispersão

A fragmentação da paisagem geralmente representa um desafio para a movimentação das espécies induzida pela mudança do clima. Num contexto de mudanças climáticas, em paisagens naturais fragmentadas, somente a capacidade de dispersão não é suficiente: é preciso haver habitats adequados dentro do raio de dispersão das espécies (VALE; ALVES; LORINI, 2009).

A revisão realizada por Lemes (2016b) evidenciou que os estudos mostram que a redução na área e a perda de conectividade dos fragmentos tem, em geral, um efeito negativo na riqueza, abundância e diversidade dos grupos avaliados, levando a uma simplificação dos sistemas ecológicos e a extinção local de algumas espécies, mudança na composição de espécies de alguns grupos, o que, por si só, já podem desencadear cascatas de extinção (FISCHER; LINDEMEYER 2007, *apud* LEMES, 2016b). Os estudos levantados também mostram que a fragmentação gera uma diminuição nas interações

¹³ Espécies cuja estratégia reprodutiva é produzir a cada ciclo um elevado número de descendentes, considerando que poucos sobreviverão até a idade adulta, pois não há cuidado com a prole.

biológicas positivas (mutualismos, dispersão de sementes, polinização) e um aumento nas interações negativas (competição, parasitismo, herbivoria), favorecendo espécies generalistas.

4 EXPOSIÇÃO DA BIODIVERSIDADE À MUDANÇA DO CLIMA

4.1 EXPOSIÇÃO DOS ECOSISTEMAS À MUDANÇA DO CLIMA

Neste trabalho, consideramos a “exposição” como a mudança na localização dos nichos climáticos, ou seja, da área de ocorrência dos parâmetros climáticos importantes para previsão da ocorrência dos ecossistemas. Projeções futuras dos mapas dos nichos climáticos dos biomas brasileiros foram desenvolvidas por Françaço (2016c) com base nos modelos HadGEM2 (Martin *et al.* 2011), nos cenários RCP 4.5 e 8.5 (IPCC 2014), utilizando os parâmetros identificados por Françaço (2016b) usando o algoritmo Maxent.

4.1.1 Amazônia

Os resultados do estudo desenvolvido por Françaço (2016c) indicam que o bioma Amazônia estará fortemente exposto à mudança do clima, com redução da área favorável nos dois cenários analisados (Figura 6).

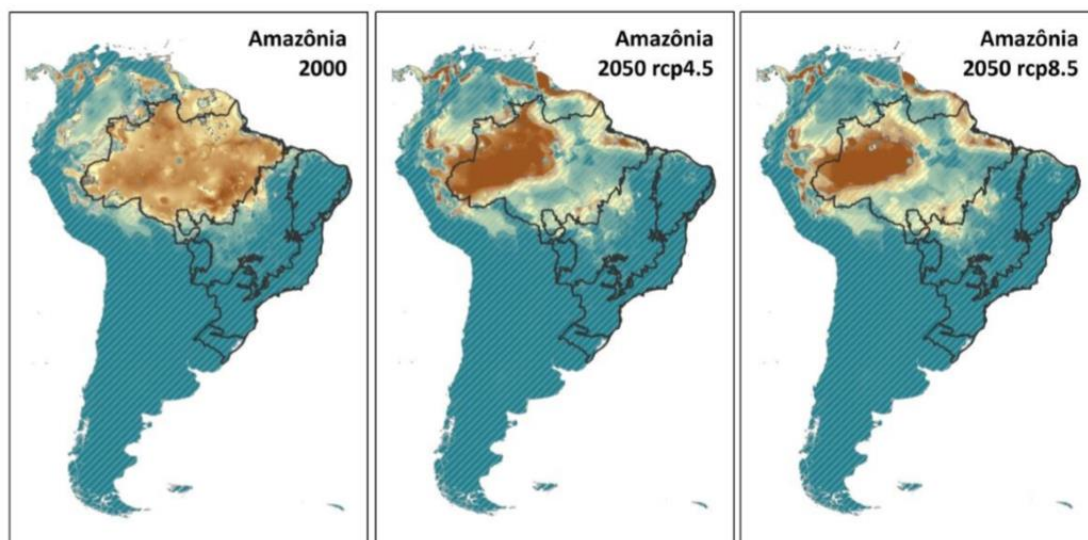


Figura 6: Mapa atual e projeções de nicho climático da Amazônia para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

A previsão é que esse nicho climático ocupe apenas 25% dos limites atuais do bioma Amazônia no cenário RCP 8.5.

4.1.2 Caatinga

O nicho climático da Caatinga também apresentará redução da sua distribuição, passando de cerca de um milhão de km² para 712 mil km² (Figura 7).

Observa-se a fragmentação desse nicho climático nos limites do bioma Caatinga, que é bastante acentuado no cenário RCP 8.5. No cenário 4.5 w_m2 é observada a intrusão desse nicho climático nos limites atuais dos biomas Amazônia e Cerrado, o que não é observado no cenário RCP 8.5 (FRANÇOSO, 2016c).

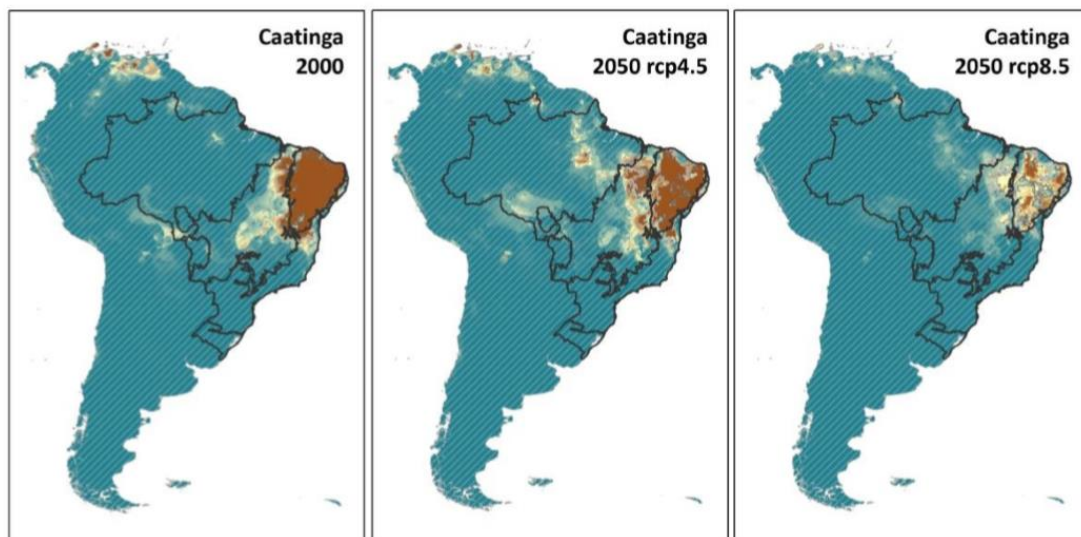


Figura 7: Mapa atual e projeções de nicho climático da Caatinga para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

4.1.3 Cerrado

A distribuição atual do nicho climático do Cerrado corresponde a cerca de 2,8 milhões de km² em todo o território brasileiro, excedendo em cerca de 800 mil Km² o limite oficial do bioma (Figura 8) (FRANÇOSO, 2016c).

Nos dois cenários analisados, deverá se expandir, chegando a cerca de quatro milhões de km² de extensão. A previsão da ampliação das condições climáticas favoráveis ao Cerrado será notadamente acentuada nos limites dos biomas Mata Atlântica e Amazônia, refletindo a exposição da floresta naquelas regiões a condições climáticas desfavoráveis no futuro (FRANÇOSO, 2016c).

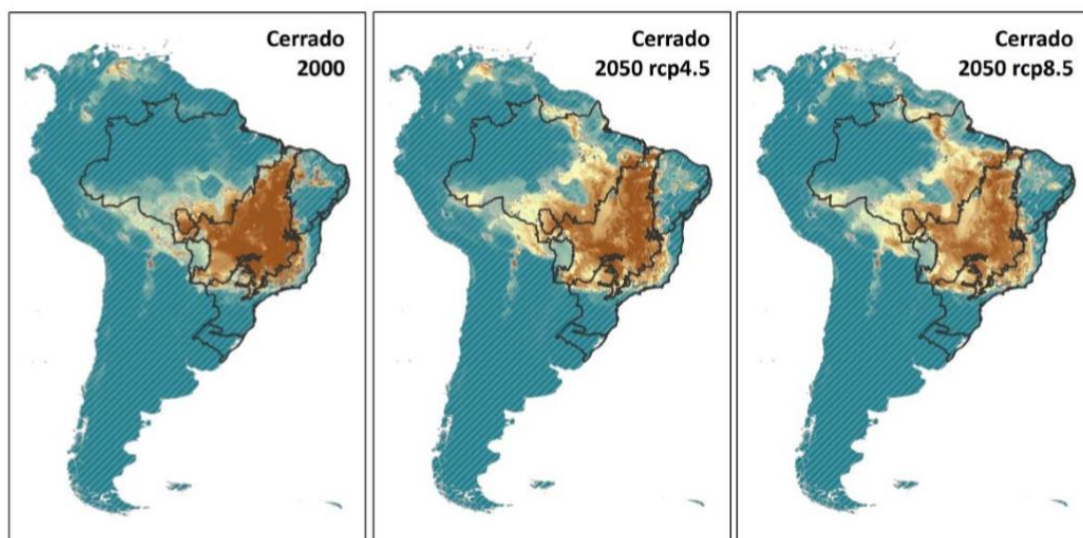


Figura 8: Mapa atual e projeções de nicho climático do Cerrado para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

4.1.4 Mata Atlântica

Atualmente o nicho climático da Mata Atlântica cobre mais de um milhão de Km² do território nacional (Figura 9). A área em que essas condições climáticas ocorrem, porém, será reduzida para cerca de 500 mil km² no cenário RCP 4.5 e para 380 mil km² no cenário RCP 8.5. Essa exposição a condições adversas ao bioma se dará especialmente ao longo dos afluentes do Rio Paraná, em São Paulo e Minas Gerais, e nas áreas de Floresta Estacional, nos estados Rio de Janeiro e Espírito Santo. São Paulo e Minas Gerais são regiões de transição entre a Mata Atlântica e o Cerrado, sendo que este será favorecido pelas futuras condições climáticas (FRANÇOSO, 2016c). Também é notável a projeção de exposição da Mata Atlântica a condições desfavoráveis na sua porção central (Espírito Santo e Bahia).

4.1.5 Pampa

O nicho climático do Pampa atualmente ocorre principalmente na região Sul do Brasil e no Uruguai (Figura 10). No cenário RCP 4.5, esse nicho tende a aumentar fora dos limites nacionais. No Brasil, deverá haver redução da distribuição desse nicho climático. Já no cenário RCP 8.5 é observada a retração da sua distribuição, tanto dentro quanto fora do país (FRANÇOSO, 2016c).

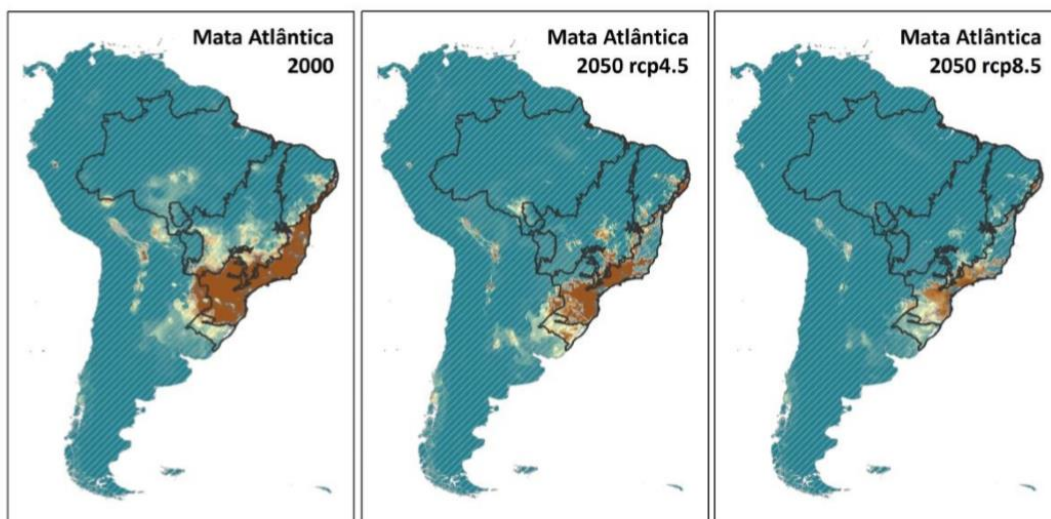


Figura 9: Mapa atual e projeções de nicho climático da Mata Atlântica para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

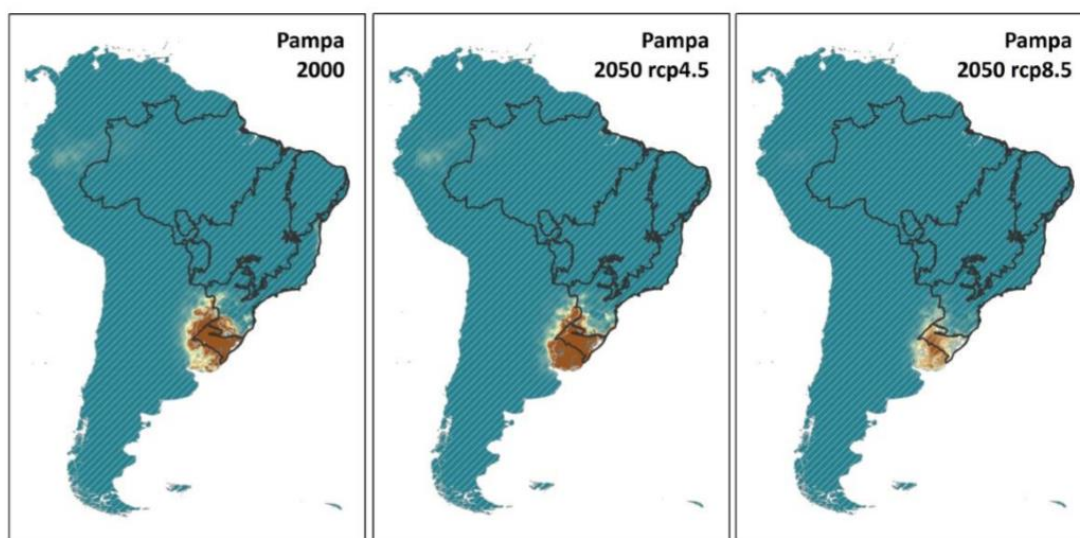


Figura 10: Mapa atual e projeções de nicho climático do Pampa para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

4.1.6 Pantanal

O nicho climático do Pantanal deverá ter leve expansão, passando de 226 mil km² para até 231 mil km² no cenário RCP 8.5. Entretanto, embora haja expansão da área, a localização muda bastante. No cenário RCP 4.5, projeta-se uma expansão fora dos limites brasileiros, o que é observado em menor intensidade no cenário RCP 8.5 (Figura 11) (FRANÇOSO, 2016c).

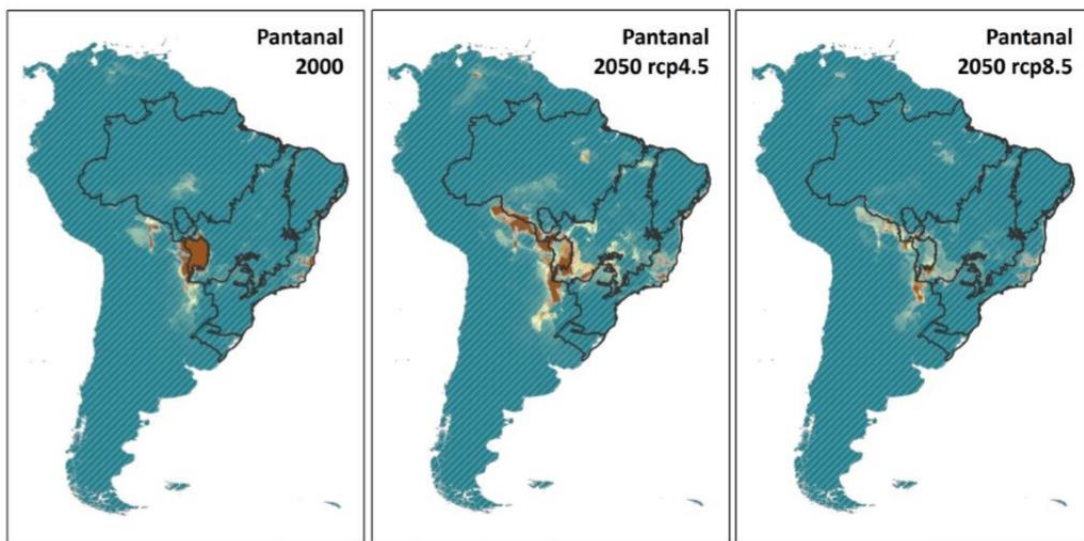


Figura 11: Mapa atual e projeções de nicho climático do Pantanal para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

4.1.7 Áreas de contato entre os nichos climáticos dos biomas brasileiros

Segundo França (2016c), extrapolações e sobreposições entre dois ou mais nichos climáticos dos biomas são esperadas (Figura 12). Isso ocorre porque a transição climática e, conseqüentemente, a transição das diferentes vegetações clímax que definem os biomas, pode ser gradual ou discreta, e tem a influência de acidentes geográficos, como rios, ou podem se estender por dezenas ou até centenas de quilômetros. Nas atuais áreas de contato dos nichos climáticos, ocorrem os “ecótonos”, que são compostos de manchas de diferentes tipos de vegetação, intercaladas na paisagem, abrigando distintas comunidades que ocorrem lado a lado (MARIMON *et al.*, 2006, *apud* FRANÇOSO 2016c).

Entretanto, os mapas dos nichos climáticos futuros mostram também situações em que as sobreposições desaparecem, como no caso da sobreposição entre o nicho climático da Amazônia e do Cerrado. Um desafio é prever que tipo de bioma será favorecido nas áreas em que não há contato ou sobreposição previstos e nas áreas em que os modelos não preveem nichos climáticos para os biomas atuais com base nas variáveis climáticas que os definem atualmente. Essas áreas aparecem em cinza nos mapas na Figura 12. Pode-se observar que os modelos reproduzem a situação em 2000 praticamente sem lacunas, inclusive com sobreposição de biomas nas áreas atualmente

reconhecidas como de transição. Entretanto, em 2050, os modelos não preveem qual será o bioma em amplas áreas do território nacional, reduzindo-se muito as áreas de sobreposição ou contato entre biomas.

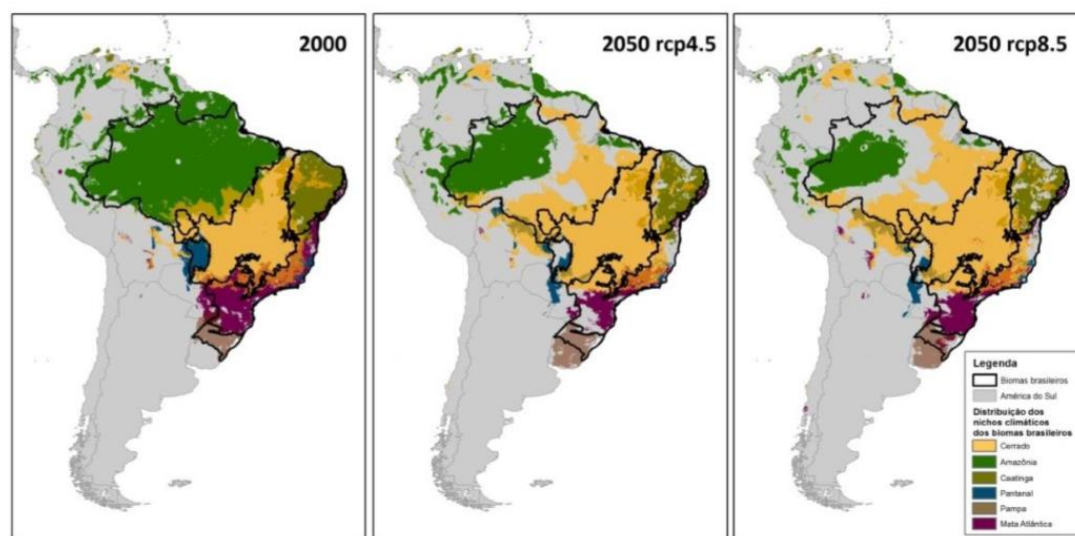


Figura 12: Mapa atual e projeções dos nichos climáticos dos biomas para o ano de 2050 em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5), com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016c).

4.1.8 Ecossistemas aquáticos continentais

Nos ecossistemas fluviais da Amazônia, espera-se variações ainda maiores entre as vazões e níveis das épocas de cheia e seca. Com variações intensas nos rios principais, igarapés e lagoas marginais podem ficar sem água durante a estação seca, ou diminuir muito a concentração de oxigênio dissolvido e aumentar significativamente a temperatura.

No Cerrado e na Caatinga, a sazonalidade também deve afetar mais os rios. Chuvas mais concentradas e intensas no Cerrado aumentarão os eventos violentos (enxurradas). Durante a seca, no Cerrado e na Caatinga, serão mais frequentes os rios e riachos que secarão completamente (intermitentes). No Sul do País, a maior pluviosidade e chuvas intensas e concentradas devem aumentar os eventos de inundações.

4.1.9 Ecossistemas costeiros e marinhos

No século XX, a elevação do nível dos oceanos alcançou entre 12 e 22 cm e as previsões são de que o nível relativo do mar continuará subindo (SILVA BEZERRA; AMARAL; KAMPEL, 2014). As áreas de deposição e erosão de sedimentos também

mudarão, tanto devido à elevação do nível do mar, quanto devido a mudanças nas correntes marinhas e novo padrão de tempestades. O aumento do nível dos oceanos e o maior dinamismo das paisagens podem impactar os ecossistemas costeiros, destruindo trechos e formando novas áreas para colonização pelos seres vivos. Assim, para o futuro, além da elevação do nível do mar, pode-se esperar paisagens costeiras mais dinâmicas, forçando os limites de adaptação das comunidades bióticas.

A acidificação e aquecimento das águas do mar devem aumentar os eventos de branqueamento de corais. Menor proteção da costa por recifes de coral e aumento do nível dos oceanos podem deixar as paisagens costeiras ainda mais dinâmicas.

4.2 EXPOSIÇÃO DAS ESPÉCIES

Lemes (2016c) desenvolveu modelos correlativos para a modelagem de nicho climático, que correlacionam as ocorrências das espécies com as condições climáticas de cada local, gerando modelos de adequabilidade de ocorrência e possibilitando a projeção dos seus nichos climáticos tanto no presente, quanto no futuro. Os modelos de nicho climático assumem que a espécie exibe uma capacidade de dispersão ilimitada e ausência de interações biológicas (SOBERÓN 2007). Isto é, capacidade de dispersão e interações biológicas são ignorados pelos modelos.

Os grupos taxonômicos abordados foram indicadores utilizados no módulo de monitoramento básico pelos programas de monitoramento da biodiversidade em unidades de conservação pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), selecionados a partir de oficinas com a comunidade científica e comunitários locais, uma criteriosa revisão da literatura e aspectos de viabilidade e qualidade da indicação biológica (Pereira *et al.* 2013).

Para projetar as áreas que serão climaticamente adequadas no futuro, o LEMES (2016c) utilizou dados do modelo de circulação atmosférica HadGEM2 (MARTIN *et al.* 2011) para dois cenários de concentração de gases estufa para o ano de 2050, RCP 4.5 e RCP 8.5, elaborados pelo último relatório do IPCC (2014)¹⁴.

Uma limitação desses modelos, porém, é que eles não levam em consideração as interações das espécies com os ecossistemas e com outras espécies, assim como supõem

¹⁴ Para mais detalhes, consultar o trabalho original.

que as espécies possuem capacidade ilimitada de dispersão. Esses aspectos são de modelagem complexa e por isso não puderam ser abordados neste documento.

Anfíbios

A modelagem de nicho climático desenvolvida por Lemes (2016c) para cinco espécies de anfíbios que ocorrem no Brasil – rãzinha-de-folhiço *Barycholos ternetzi*, rãzinha-come-capim *Dermatonotus muelleri*, perereca-verde *Hypsiboas albomarginatus*, rã-cambô *Phyllomedusa bicolor* e sapo-cururuzinho *Rhinella ornata* – mostra a redução da área e mudança da localização de parte dos nichos climáticos de três das espécies, sendo o caso mais notável a rã-cambô *Phyllomedusa bicolor*, cuja perspectiva futura é dramática, já que o deslocamento da sua área de ocorrência para o Centro-Oeste, como previsto pelo modelo, é improvável devido às diferenças no ecossistema e à distância. Pela mesma razão, é improvável que a perereca-verde *Hypsiboas albomarginatus* e o sapo-cururuzinho *Rhinella ornata* se expandam para as novas áreas previstas pelos modelos no Norte do País. A única espécie que apresentou aumento da área de seu nicho climático foi a rãzinha de folhiço *Barycholos ternetzi* (Figura 13).

Aves

Lemes (2016c) também modelou os nichos climáticos das aves chauá *Amazona rhodocorytha*, trepador-coleira *Anabazenops fuscus*, soldadinho *Antilophia galeata*, trepadorzinho *Heliobletus contaminatus*, macuquinho-da-várzea *Scytalopus iraiensis*, sabiá-coleira *Turdus albicollis* e uirapuruzinho *Tyranneutes stolzmanni*. Observa-se que os nichos climáticos podem se expandir ou retrair em diferentes cenários climáticos para diferentes espécies, ou mesmo para a mesma espécie (Figura 14). As espécies que mais perdem área são sabiá-coleira e uirapuruzinho. O nicho climático do soldadinho se expande em direção ao Norte. O nicho climático do chauá e do trepador-coleira se expande em áreas isoladas ao norte, o que não significa que ocupará essas áreas, uma vez que são distantes e isoladas das localizações presentes dos nichos climáticos das duas espécies. Em relação à extensão dos nichos climáticos, não há uma tendência geral dessas espécies consideradas vulneráveis. Entretanto, mudanças na localização, considerando que muitos ecossistemas estarão muito reduzidos e fragmentados, pode ter efeitos importantes.

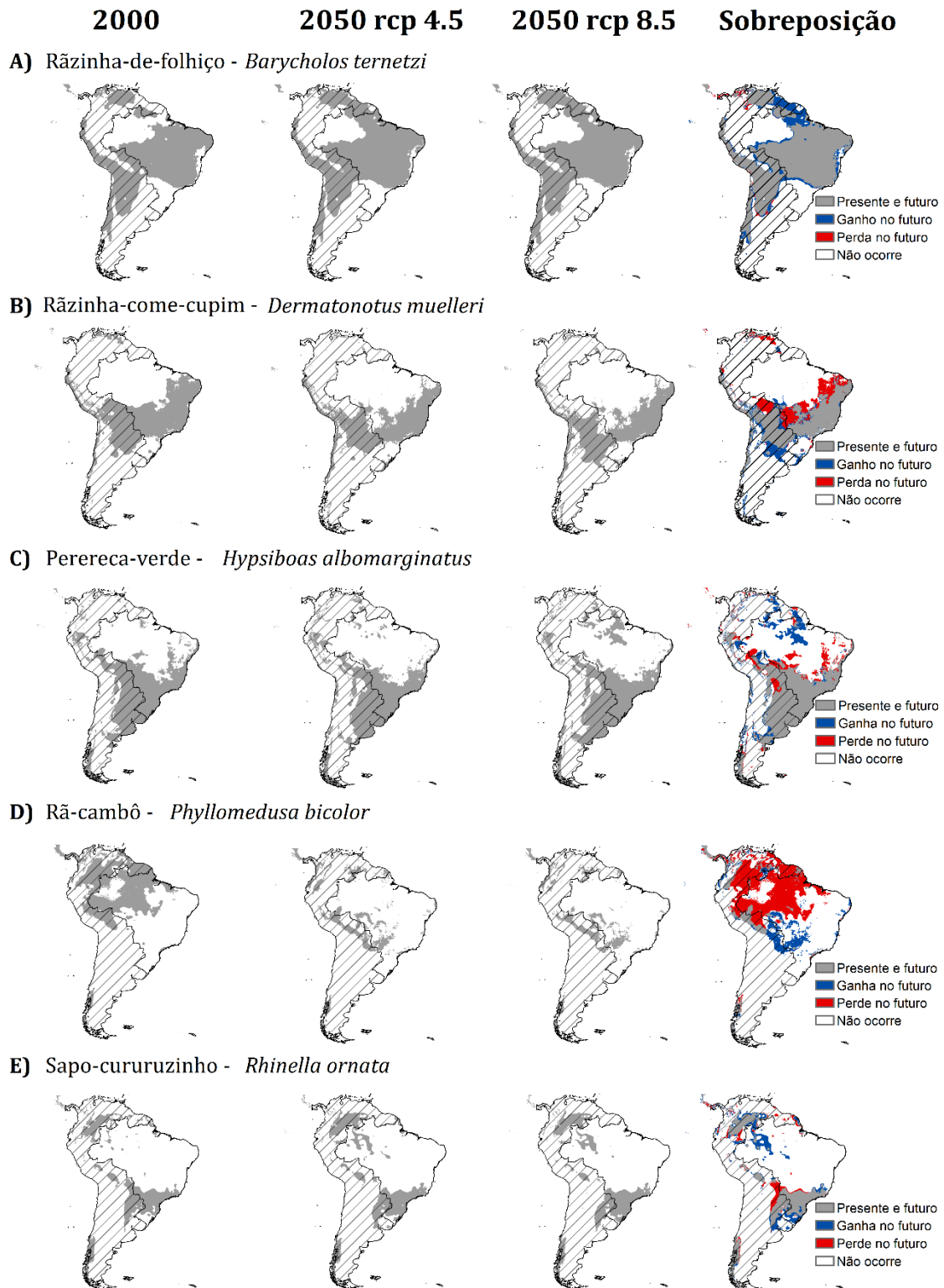


Figura 13: Distribuição do nicho climático de *Barycholos ternetzi*, *Dermatonotus muelleri*, *Hypsiboas albomarginatus*, *Phyllomedusa bicolor* e *Rhinella ornata*, espécies de anfíbios que ocorrem no Brasil (Fonte: LEMES, 2016c).

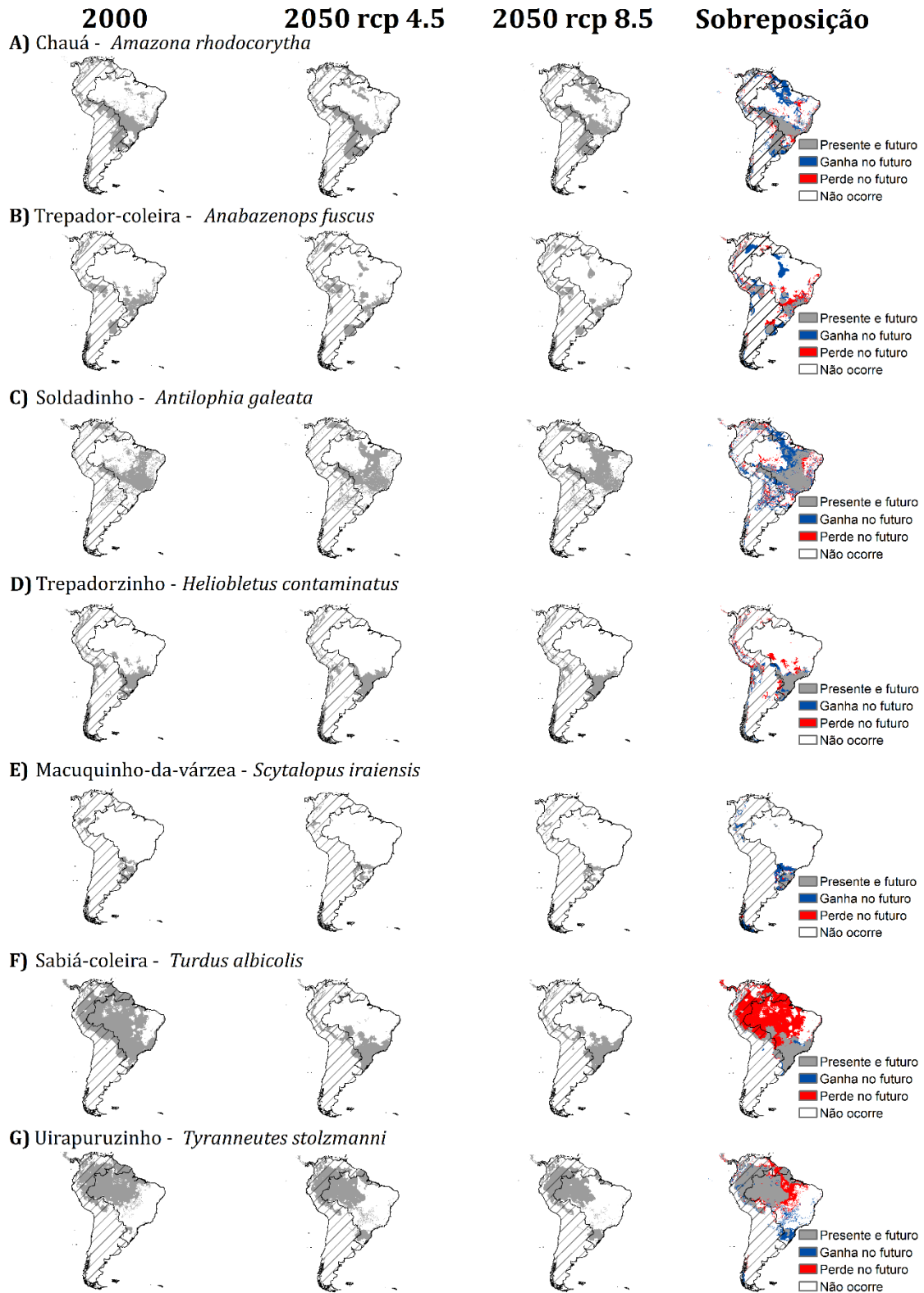


Figura 14: Distribuição do nicho climático de *Amazona rhodocorytha*, *Anabazenops fuscus*, *Antilophia galeata*, *Culicivora caudata*, *Gubernetes yetapa*, *Heliobletus contaminatus*, *Scytalopus iraiensis*, *Turdus albicollis* e *Tyrannetes stolzmanni*, espécies de aves que ocorrem no Brasil (Fonte: LEMES, 2016c).

Mamíferos

Lemes (2016c) ainda modelou os nichos climáticos dos mamíferos saruê ou gambá-de-orelha-preta *Didelphis aurita*, mocó *Kerodon rupestres*, graxaim-do-campo *Lycalopex gymnocercus*, macaco-de-cheiro *Saimiri sciureus* e anta brasileira *Tapirus terrestris* (Figura 15). Com exceção da anta, cujo nicho climático deverá aumentar, os nichos climáticos podem diminuir ou aumentar, ou permanecer com área semelhante, dependendo do cenário.

Borboletas

Lemes (2016c) projetou o nicho climático das borboletas *Junonia evarete*, *Moneuptychia soter*, *Opsiphanes invirae*, *Smyrna blomfildia*, *Yphrhimoides celmis* e *Zaretis itys*. A extensão dos nichos de *Junonia evarete*, *Moneuptychia soter*, *Smyrna blomfildia*, e *Zaretis itys* será reduzida, nos dois cenários (RCP 4.5 e 8.5). *Opsiphanes invirae* terá seu nicho climático aumentado (Figura 16).

Conclusão sobre mudança do clima e os nichos climáticos das espécies

A mudança do clima vai impactar a localização do nicho climático da maioria das espécies de forma mais ou menos intensa, dependendo da espécie do cenário de concentração de gases de efeito estufa. Para algumas espécies, pode significar uma expansão da sua área de ocorrência. Para outras, vai significar uma redução. O efeito quantitativo, em termos de área, é importante, mas a localização do nicho climático pode ser ainda mais crucial: isto é, se a extensão da área favorável a uma espécie fica a mesma, mas a área muda completamente de localização, isso representa dificuldades imensas de adaptação, pois implica na migração para a nova área e a inserção numa nova comunidade biótica.

Entretanto, os modelos desenvolvidos pelo Lemes (2016c) avaliaram um número de espécies muito restrito. Nesse contexto, não foi possível identificar uma tendência geral, indicando que a situação das espécies deve ser avaliada caso a caso, com foco especial nas espécies com distribuição restrita (endêmicas), ameaçadas e com habitat fragmentado ou com previsão de fragmentação no futuro.

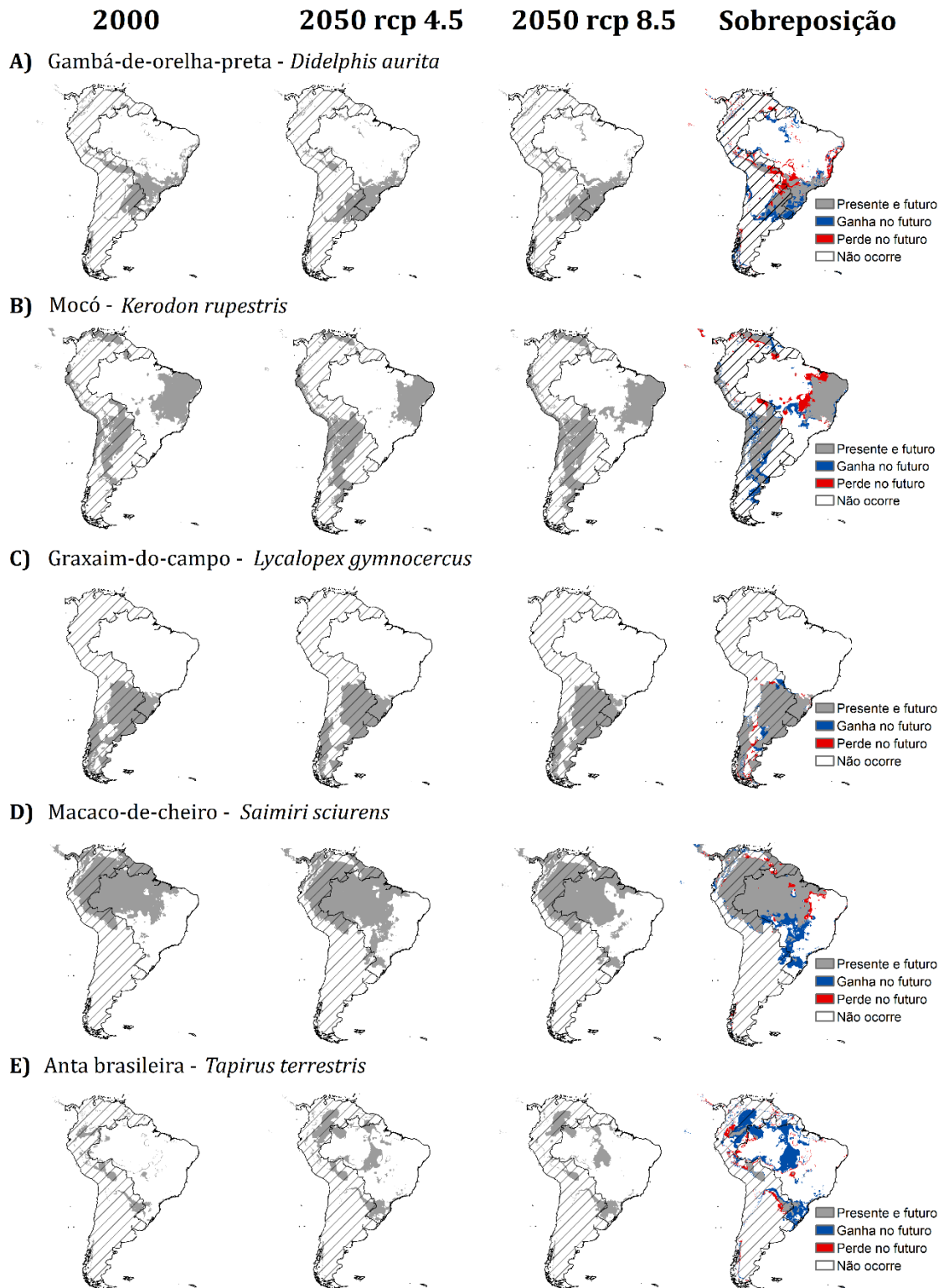


Figura 15: Distribuição do nicho climático de *Didelphis aurita*, *Kerodon rupestris*, *Lycalopex gymnocercus*, *Saimiri sciurens* e *Tapirus terrestris*, espécies de mamíferos que ocorrem no Brasil (Fonte: LEMES, 2016c).

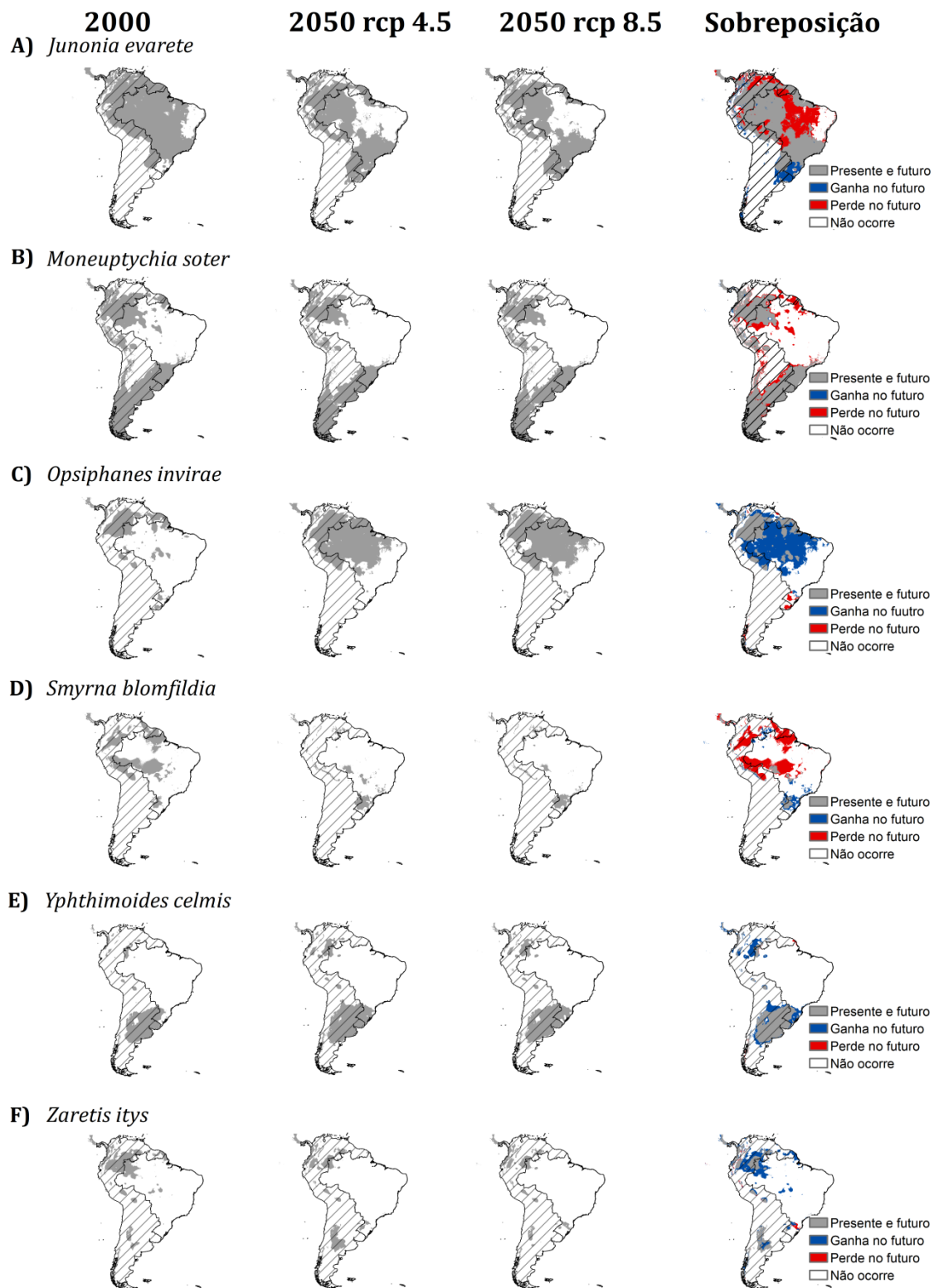


Figura 16: Distribuição do nicho climático de *Junonia evarete*, *Moneuptychia soter*, *Opsiphanes invirae*, *Smyrna blomfieldia*, *Yphthimoides celmis* e *Zaretis itys*, espécies de borboletas que ocorrem no Brasil (Fonte: LEMES, 2016c).

5 CONCLUSÃO: PROVÁVEIS IMPACTOS SOBRE A BIODIVERSIDADE

As perspectivas para a biodiversidade brasileira são alarmantes em decorrência da mudança do clima: ecossistemas em estresse climático e fragmentados, espécies em declínio em decorrência da diminuição ou mudança da distribuição geográfica de seu nicho climático, comunidades bióticas desorganizadas, espécies invasoras, perda da diversidade genética, etc.

Nesta conclusão, o foco são os impactos prováveis, resultantes da exposição e sensibilidade de ecossistemas e espécies, discutindo-se as conclusões do Plano Nacional de Adaptação (PNA) sobre esses aspectos à luz dos novos dados apresentados neste Produto.

5.1 ECOSSISTEMAS SOB ESTRESSE

5.1.1 Ecossistemas terrestres

De acordo com as projeções desenvolvidas por França (2016d), as áreas em dos biomas brasileiros com possível impacto da mudança do clima em 2050 chegarão a 55% no cenário RCP 4.5 e a 66% no cenário RCP 8.5 (Figuras 17 e 18, Tabela 4). Isso significa que essas áreas estarão sob estresse climático, ou seja, os valores dos parâmetros climáticos serão desfavoráveis para a ocorrência dos biomas atuais, de acordo com os modelos desenvolvidos, mesmo que uma mudança ainda não tenha ocorrido.

Nos dois cenários, o França (2016d) aponta que os biomas sob maior estresse climático serão a Amazônia (54% e 66% respectivamente em cada RCP) e o Pantanal (55% e 65%).

No PNA, a discussão de ecossistemas foi baseada em formações vegetais. Neste trabalho, a análise está baseada em biomas. As conclusões são compatíveis, entretanto, a análise no nível de biomas não leva em consideração o tipo de solo característico dos ecossistemas.

Amazônia

O estresse climático sobre a Amazônia reforça a gravidade da situação e a extrema vulnerabilidade climática do País em decorrência dos impactos sobre os ecossistemas. A floresta amazônica é extremamente importante como provedora de serviços

ecossistêmicos para o Brasil e para o mundo, notadamente na geração de chuvas sobre o território nacional além do bioma (NOBRE, 2014), onde são essenciais para a agricultura, geração de energia e abastecimento humano.

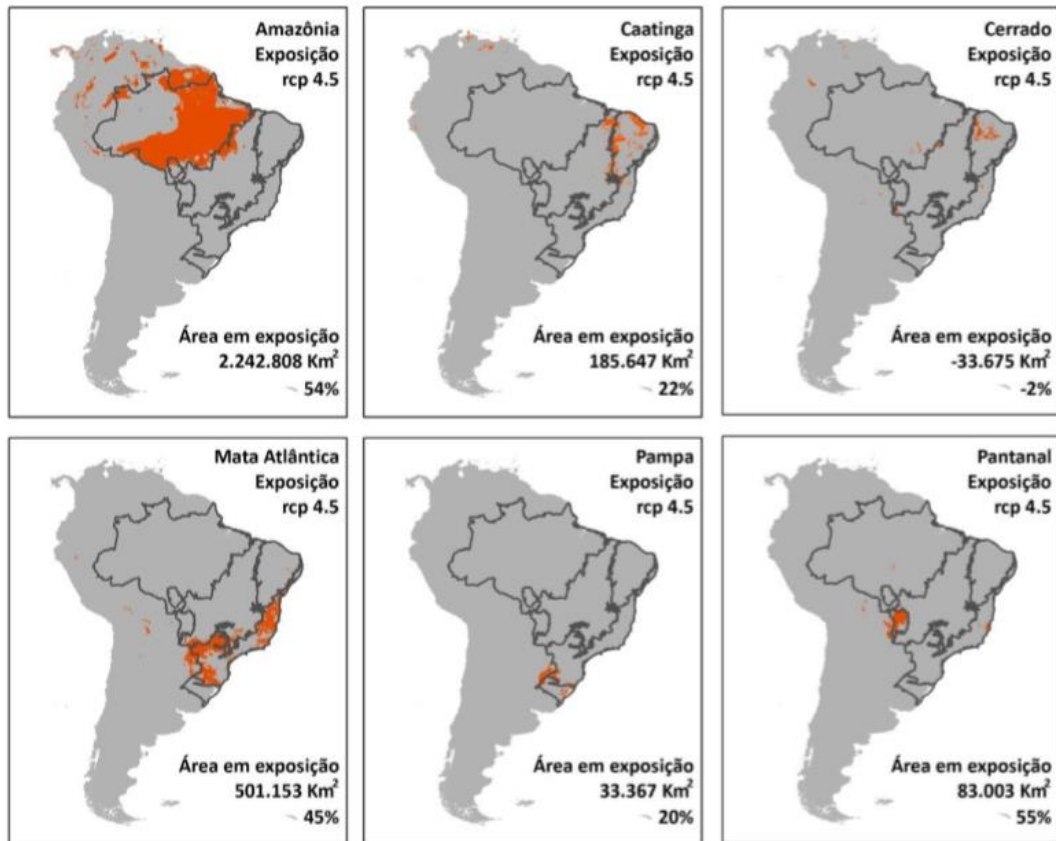


Figura 17: Áreas sob estresse climático no cenário RCP 4.5, considerando as diferenças na distribuição dos nichos climáticos dos biomas brasileiros em 2000 e em 2050, com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016d).

Os impactos do estresse climático sobre a floresta são, principalmente, o ressecamento do seu interior, tornando-as vulneráveis ao fogo. A fragmentação do ecossistema e as atividades humanas que utilizam o fogo como parte, ou mesmo base, do manejo da vegetação, além da extração seletiva de madeira, aumenta o risco de incêndios florestais e processos de feedback positivo que poderão causar o colapso da floresta (COCHRANE; LAURANCE, 2008; COCHRANE, 2009; SOARES-FILHO *et al.*, 2012). Por outro lado, a Amazônia ainda representa o maior ecossistema florestal tropical contínuo do planeta, com ampla distribuição de áreas protegidas extensas, conectadas em mosaicos, e com legislação florestal protegendo mais de 80% das propriedades, criando corredores ecológicos que podem facilitar a adaptação.

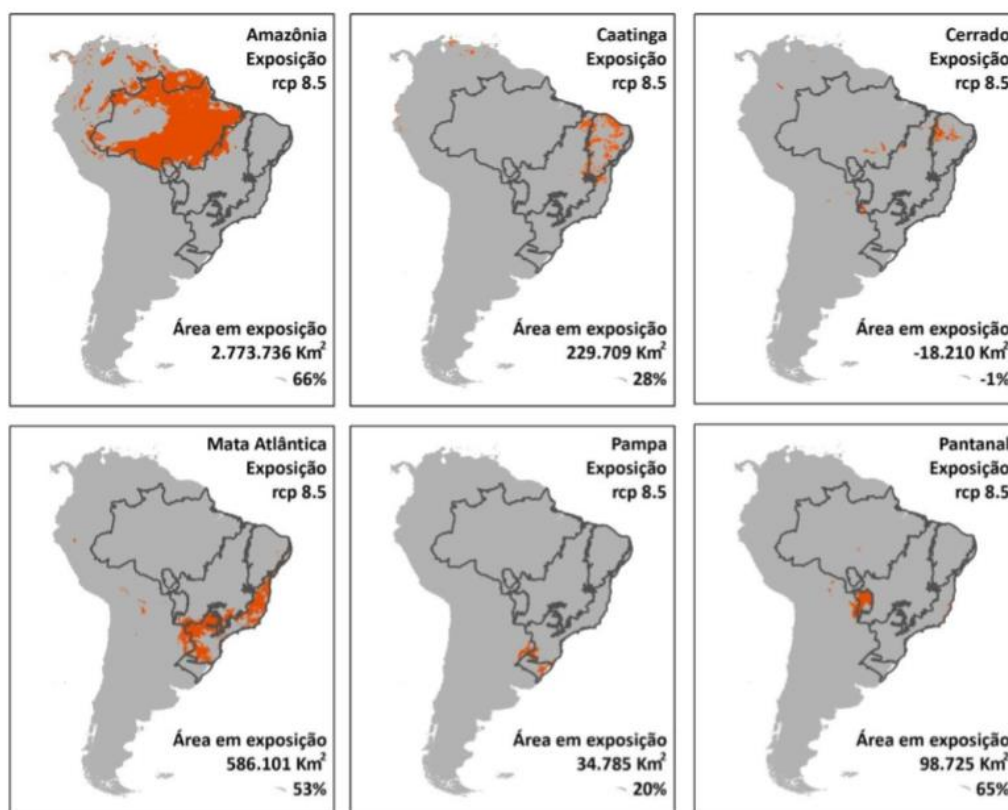


Figura 18: Áreas sob estresse climático no cenário RCP 8.5 (pessimista), considerando as diferenças na distribuição dos nichos climáticos dos biomas brasileiros em 2000 e em 2050, com base em modelos HADGEM2-ES (Fonte: FRANÇOSO, 2016d).

Tabela 4: Áreas sob estresse climático (exposição), considerando as diferenças na distribuição dos nichos climáticos (NC) dos biomas brasileiros em 2000 e em 2050, com base em modelos HADGEM2-ES em duas projeções de concentração de gases de efeito estufa (RCP4.5 e RCP8.5) (Fonte: FRANÇOSO, 2016d)¹⁵.

	Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pampa	Pantanal
Área oficial do bioma (Km ²)	4.176.762	826.512	2.039.374	1.105.845	170.088	151.314
Área de distribuição do NC em 2000	3.817.033	764.314	1.935.910	929.838	159.157	149.073
Área de distribuição do NC em 2050	1.574.225	578.667	1.969.585	428.685	125.790	66.070
Área em exposição (2000 - 2050)	2.242.808	185.647	-33.675	501.153	33.367	83.003
Percentual em exposição em 2050	54%	22%	-2%	45%	20%	55%
Área de distribuição do NC em 2050	1.043.297	534.605	1.954.120	343.737	124.372	50.348
Área em exposição (2000 - 2050)	2.773.736	229.709	-18.210	586.101	34.785	98.725
Percentual em exposição em 2050	66%	28%	-1%	53%	20%	65%

¹⁵ Nas projeções de Françoso (2016d), o Cerrado apresentou área negativa de exposição (-2% e -1%) para os dois cenários. Isso ocorreu porque, para o ano base de 2000, nem todo o limite oficial desse bioma foi preenchido com a área da distribuição do nicho climático representado pelo modelo. Em 2050 as projeções indicam que haverá um aumento da área de distribuição do nicho climático do Cerrado dentro dos seus próprios limites, nos dois cenários analisados, sendo projetado maior incremento da área de distribuição no cenário de RCP 4.5. Entretanto, a projeção de que o bioma não estará sob estresse climático não implica que as espécies estarão livres dessa exposição, que deve ser estudada para cada uma.

O PNA aponta que, na Amazônia, o aumento da temperatura poderá causar e/ou exacerbar condições de seca para algumas espécies, devido ao aumento da evapotranspiração. Mais seco, o interior da floresta pode ficar suscetível a incêndios florestais e à mortalidade de plantas. Essas condições serão mais comuns nas regiões leste e no extremo oeste do bioma, conforme afirma França (2016d). Entretanto, as projeções de clima utilizadas por França (2016d) apontam uma situação ainda mais grave, com redução da precipitação e aumento da sazonalidade da temperatura no bioma na região leste e sudoeste do bioma. Na Amazônia, aumento da sazonalidade da temperatura indica extremos de temperaturas altas. Assim, a combinação dessas duas condições indica dificuldades mais intensas que as apontadas no PNA, resultando nas áreas sob estresse climático apontadas nas Figuras 17 e 18 (acima).

Considerando a grande extensão da área sob estresse climático da Amazônia, deverão ser monitoradas as emissões de gases de efeito estufa pela alta taxa de mortalidade de árvores, que poderá ocorrer nesse bioma (FRANÇO, 2016d). Das mais de 12 mil espécies de Angiospermas que ocorrem na Amazônia, cerca de 65% são endêmicas (JBRJ 2016, *apud* FRANÇO, 2016d). Há uma elevada possibilidade do desaparecimento de uma parcela significativa dessas espécies (FRANÇO, 2016d).

Cerrado

As condições favoráveis ao bioma Cerrado serão mantidas nas suas regiões atuais de ocorrência e serão ampliadas sobre a área dos outros biomas, notadamente na Amazônia e na Mata Atlântica. Entretanto, a temperatura e a sazonalidade da temperatura irão aumentar dentro da região atual do bioma, afetando, entre outros aspectos, o balanço hídrico e a evapotranspiração, o que pode impactar as espécies, embora o bioma continue o mesmo. No PNA, apontou-se que pode ocorrer a redução das formações florestais e aumento das formações abertas, reduzindo o porte e a densidade de árvores nas fitofisionomias deste bioma, o que é compatível com as projeções do clima futuro (FRANÇO, 2016a) em que este trabalho está baseado.

Caatinga

As projeções indicam que as áreas em exposição na Caatinga somarão mais de 185 mil km² em manchas dentro do bioma, no contato com o Cerrado e em áreas

litorâneas. A principal consequência das alterações climáticas sobre um bioma parece ser a fragmentação das áreas contínuas da sua vegetação típica, com consequências importantes para a dinâmica das populações da fauna e flora. Vinte e quatro por cento da extensão da Caatinga são Áreas Chave para a Biodiversidade (GIULIETTI *et al.*, 2009 *apud* FRANÇOSO, 2016d), dadas pela presença de espécies raras. Deve ser dada atenção às essas áreas e também às cerca de mil espécies endêmicas de Angiospermas (FRANÇOSO, 2016d).

No PNA, apontou-se que, no bioma Caatinga, o aumento da temperatura e redução da pluviosidade poderiam agravar processos de desertificação em curso, associados principalmente à intensificação da perda da cobertura vegetal por mudança de uso do solo. Entretanto, as projeções de clima (FRANÇOSO, 2016a) que embasam este trabalho indicam somente aumento da temperatura no bioma, sendo que o impacto nos processos de desertificação é incerto, embora o aumento da temperatura possa aumentar a perda de água por evapotranspiração.

Mata Atlântica

Françoso (2016d) indica ainda que 45% da Mata Atlântica estará exposta à mudança do clima, totalizando mais de 500 mil km². Toda a região central do bioma, na costa da Bahia e Espírito Santo, estará exposta. Apesar da avançada alteração na paisagem da Mata Atlântica, há um grande número de espécies raras e endêmicas, sendo 39% do seu território são consideradas Áreas Chave para a Biodiversidade (GIULIETTI *et al.* 2009; JBRJ, 2016, *apud* Françoso, 2016d). O elevado grau de fragmentação da Mata Atlântica e a concentração da população brasileira no bioma tornam o ecossistema ainda mais vulnerável.

O PNA aponta que o aumento da temperatura na Mata Atlântica, assim como na Amazônia, pode aumentar a evapotranspiração, causando e/ou exacerbando condições de seca para algumas espécies. A floresta, mais seca, pode ficar mais suscetível a incêndios florestais e a mortalidade de plantas. Essas condições serão mais comuns na região central do bioma, conforme afirma Françoso (2016d).

Pampa

As projeções indicam ainda que, dentro do território brasileiro, 20% da área do Pampa estará sob exposição para os dois cenários estudados. Um quarto das espécies de

Angiospermas presentes nesse bioma é endêmico (JBRJ 2016, *apud* FRANÇOSO, 2016d). De acordo com as projeções de clima utilizadas neste trabalho (FRANÇOSO, 2016a), o parâmetro que apresenta mudança significativa no bioma será temperatura média. O PNA indicava que haveria maior precipitação, e por isso, uma tendência de mudança do bioma com maior arborização e possível expansão de florestas. Essa projeção de aumento de chuvas, porém, não foi confirmada pelo modelo utilizado neste trabalho.

Pantanal

O aspecto geomorfológico característico do Pantanal submete as diversas fitofisionomias a alagamentos periódicos (POTT; POTT 2000, 1994, *apud* FRANÇOSO, 2016d). Assim, Françaoso (2016d) aponta que mesmo que o envelope climático se desloque, pode ser que nunca ocorram os pulsos de inundação, e muitas das espécies com adaptações ao alagamento não poderão colonizar áreas com condições geomorfológicas diferentes, podendo desaparecer em poucas décadas. Das mais de 1300 espécies de Angiospermas que ocorrem no Pantanal, 12% são exclusivas desse bioma, que conta com 25% do seu território considerados Áreas Chave para a Biodiversidade (ACB) (GIULIETTI *et al.* 2009; JBRJ, 2016, *apud* Françaoso, 2016d).

Interação entre os biomas

De forma geral, o estresse climático aponta para a savanização de boa parte da Amazônia e da Mata Atlântica. Proteger as espécies e áreas de contato do Cerrado com os outros biomas pode ser importante para a colonização de outros ambientes no futuro, de modo que as espécies adaptadas a ambientes mais sazonais tenham a oportunidade de colonizar novas áreas (FRANÇOSO, 2016d). Já a região central do bioma deve ser protegida por apresentar alta proporção de espécies endêmicas, que perfazem cerca de 40% das Angiospermas desse bioma.

Com a mudança da localização dos nichos climáticos dos biomas, o que acontecerá aos ecótonos ganha importância. Como as comunidades dos ecótonos já estão atualmente sob estresse climático, pois muitas vezes o clima de transição não é favorável a nenhuma das duas comunidades que ocorrem na região, essas comunidades podem apresentar capacidade de adaptação importante para enfrentar o estresse climático futuro (FRANÇOSO, 2016d). Entretanto, as projeções desenvolvidas para este trabalho não esclarecem o que acontecerá aos ecótonos brasileiros.

5.1.2 Ecossistemas fluviais

Na Amazônia, grandes variações de vazão poderão afetar a biodiversidade aquática, com impactos sobre a pesca e o transporte das populações ribeirinhas. Na cheia, com a elevação maior, os rios poderão mudar de curso com maior frequência, aumentando as áreas com vegetação pioneira nas margens, geralmente mais produtiva, mas menos diversificada. No Cerrado e na Caatinga, eventos de chuva intensa, com enxurradas, podem afetar a estabilidade das comunidades aquáticas. No sul do País, mais chuva pode também causar mais erosão, levando nutrientes em excesso para os rios e lagoas.

Em todas as regiões, espera-se aumento da temperatura, que deve afetar mais os ambientes lacustres e os rios de planície, que correm em áreas desmatadas e aqueles com menor vazão. Embora a temperatura da água tenha menor variação que a temperatura atmosférica, a adaptação da biodiversidade às novas condições de temperatura pode ser mais difícil nos ambientes fluviais que nos ambientes terrestres uma vez que a temperatura média muda. Isso se dá porque rios serpenteiam acompanhando o relevo, o que limita a direção de uma potencial migração dos organismos em busca de melhores condições.

5.1.3 Ecossistemas costeiros e marinhos

Na Zona Costeira e Marinha, alguns ecossistemas-chave para a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos são os estuários, manguezais, lagoas costeiras, apicuns, salgados, restingas, e recifes de coral.

Estuários, manguezais, apicuns, salgados

Nos estuários e manguezais, a influência da mudança do clima será complexa. Manguezais protegem a zona costeira, particularmente os estuários, contra tempestades, mas são sensíveis à deposição de areia, que pode chegar por rios atingidos por assoreamento e chuvas intensas.

Um outro fator importante para os manguezais, que pode resultar da mudança do clima, é a vazão dos rios nos estuários: com baixa vazão dos rios, o mar penetra mais no estuário e a maior salinidade pode impactar esses ecossistemas. O aumento do nível do mar causado pelo aquecimento global piora o problema. Por isso, a proteção e

recuperação das matas ciliares dos rios é importante, particularmente nos que formam manguezais nos seus estuários.

No caso da elevação do nível do mar, a adaptação do manguezal seria penetrar terra adentro, mas a ocupação humana pode ser um obstáculo (SILVA BEZERRA; AMARAL; KAMPEL, 2014). Além dos manguezais, outros ecossistemas costeiros, como os apicuns e salgados são sensíveis à elevação do nível do mar, e sua adaptação é semelhante, com o mesmo desafio. Assim, deve-se mapear as possíveis áreas de expansão dos manguezais e demais ecossistemas costeiros, mantendo-as protegidas e desocupadas.

Com o aumento das temperaturas médias também se espera uma gradual migração dos ecossistemas de manguezais em direção ao sul do País, ultrapassando os limites climáticos atuais da distribuição deste sistema que ocorre até Santa Catarina.

Além disso, no caso dos manguezais, é importante a manutenção da vazão dos rios e a redução da sua carga de sedimentos mais pesados (areia), o que implica a recuperação das matas ciliares dos rios que formam estuários e de seus tributários.

Lagoas costeiras, dunas e restingas

Lagoas costeiras, dunas e restingas também tendem a ser impactadas. Além do dinamismo mais acentuado da costa, com a incidência maior de ressacas, marés de tempestade e até mesmo ciclones (região Sul), as lagoas costeiras podem ficar mais aquecidas com o aumento da temperatura, com efeitos negativos sobre a biota.

Entretanto, novas restingas e lagoas poderão se formar, com o desenvolvimento de comunidades bióticas pioneiras.

Recifes de coral

Com o aquecimento das águas, pode haver branqueamento dos recifes de coral (LEÃO; KIKUCHI; OLIVEIRA, 2008a, 2008b), com impactos sobre os organismos que dependem desses ecossistemas.

5.2 ESPÉCIES SOB ESTRESSE

Em um esforço de síntese podemos apontar que os principais impactos prováveis da mudança do clima sobre as espécies e populações serão mudanças: 1) na fenologia, 2) nas interações bióticas, 3) nas taxas de extinção e 4) e nas distribuições das espécies.

As espécies serão afetadas pela redução e deslocamento da área abrangida pelos respectivos nichos climáticos e pelos impactos nos ecossistemas e nas demais espécies. O deslocamento da área de abrangência dos nichos climáticos poderia ser compensado com o deslocamento da área de ocorrência das espécies. Entretanto, esse tipo de adaptação não é trivial, já que a capacidade de dispersão das plantas e de alguns grupos da fauna é limitada (PEARSON 2006, *apud* FRANÇOSO, 2016d). Conforme aponta França (2016d), “a ideia de deslocamento da biota é abstrata e infundada no horizonte temporal de 50 anos” (PEARSON; DAWSON 2003, *apud* FRANÇOSO, 2016d).

Os processos que permitem o deslocamento da área de ocorrência das espécies e alterações nas comunidades são lentos e graduais, e ocorrem em intervalos de milhares de anos (LEDRU *et al.*, 2002, 1998; LEDRU, 1993; SERVANT *et al.*, 1993; LEDRU, 1972; SALGADO-LABOURIAU 2005; BARBERI *et al.*, 2000; PARIZZI *et al.*, 1998; SALGADO-LABOURIAU, 1997; FERRAZ-VICENTINI; SALGADO-LABOURIAU, 1996, *apud* FRANÇOSO, 2016d).

Dessa forma, a tendência para muitas espécies que serão desfavorecidas pela mudança do clima deve ser a redução de sua abundância e até mesmo extinção. O desaparecimento dessas espécies pode abrir espaço para espécies invasoras e oportunistas (TELLER *et al.*, 2016; BELLARD *et al.*, 2013, *apud* FRANÇOSO, 2016d), o que traria, ainda, consequências do efeito cascata das mudanças climáticas (FRANÇOSO, 2016d).

Os efeitos da ausência de espécies-chave nos ecossistemas são difíceis de prever, assim como de seu deslocamento para novas áreas e da recomposição das comunidades bióticas. Quanto maior a velocidade da mudança do clima, mais difícil será essa adaptação.

5.3 LACUNAS DE CONHECIMENTO

A revisão sobre as respostas da biodiversidade brasileira à mudança do clima levantou 59 estudos publicados entre 2003 e 2015, e mostrou que o ritmo das pesquisas vem acelerando (mais de 70% dos estudos foram publicados nos últimos três anos). A maior parte dos estudos teve abrangência continental e o bioma com maior destaque foi o Cerrado, com 29% dos estudos (Figura 19A). Não foram encontrados estudos específicos para os biomas Pampa e Pantanal. Os estudos encontrados diferiram

amplamente por grupo taxonômico. As plantas foram o grupo taxonômico mais frequente, seguidas por invertebrados e aves (Figura 19B). Não foram encontrados registros de estudos para ambientes marinhos ou de água doce (LEMES, 2016a), revelando uma enorme lacuna de informação.

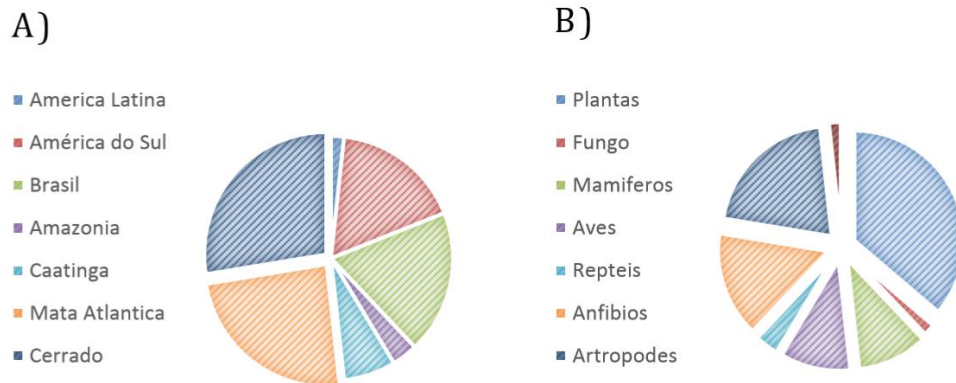


Figura 19: Frequência dos estudos sobre a resposta da biodiversidade à mudança do clima por (A) abrangência e (B) grupo taxonômico (Fonte: LEMES, 2016b).

Ainda, a ciência da predição dos impactos do clima sobre os ecossistemas e as espécies ainda está em fase inicial do seu desenvolvimento. Por exemplo, Lemes (2016b) aponta que não há um consenso na literatura sobre o melhor algoritmo de modelagem preditiva da resposta da biodiversidade ao clima futuro ou a melhor forma de avaliá-los. Apesar das suas limitações, os modelos preditivos têm sido utilizados para prever o impacto das mudanças climáticas. Dos 59 estudos analisados, três foram experimentos e os demais utilizaram modelos preditivos.

A revisão sobre as respostas da biodiversidade à fragmentação levantou 167 estudos publicados entre 1997 e 2015, sendo mais de 55% dos estudos publicados nos últimos cinco anos (LEMES, 2016b). São, assim, mais abundantes que os estudos sobre a resposta à mudança do clima. Além disso, enquanto os estudos sobre a resposta da biodiversidade à mudança do clima são em sua maioria preditivos, os de fragmentação avaliam impactos já ocorridos.

Da mesma forma que os estudos sobre a resposta da biodiversidade à mudança do clima, os estudos sobre a resposta da biodiversidade à fragmentação apresentaram grandes diferenças em termos dos grupos taxonômicos estudados. A principal temática dos estudos foi a resposta da biodiversidade considerando os efeitos do tamanho e do isolamento entre fragmentos (56%) na composição, riqueza e abundância das espécies.

O efeito de borda também foi bastante estudado, principalmente, para a Mata Atlântica (22%) (Figura 20).

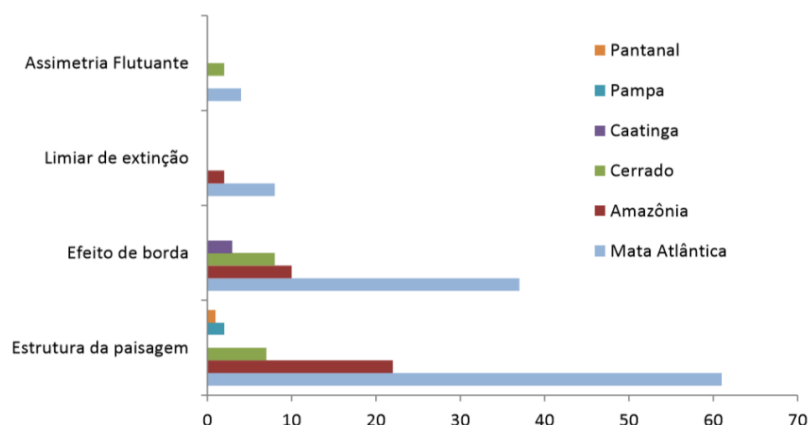


Figura 20: Temática dos estudos por bioma.

Nota-se, assim, a expressiva lacuna dos estudos com foco na fragmentação de ambientes aquáticos e marinhos, e dos estudos com foco nos biomas Amazônia, Caatinga, Pantanal e Pampa. Essa assimetria é notável também quando se trata da temática dos estudos, que apresenta a mesma concentração na Mata Atlântica e Amazônia (biomas florestais), apesar da fragmentação que também ocorre em outros biomas (LEMES, 2016b).

5.4 DIRETRIZES PARA ADAPTAÇÃO

A mudança do clima poderá impactar de forma grave a biodiversidade brasileira nos seus três níveis: ecossistemas, espécies e diversidade genética. Embora todos os ecossistemas serão afetados, a consolidação dos estudos realizada neste trabalho mostra que os ecossistemas atingidos de forma mais intensa serão o bioma Amazônia, particularmente na sua porção leste, e a Mata Atlântica, na sua região central.

Os ecossistemas mais fragmentados apresentarão maior dificuldade para adaptação de suas espécies e estarão mais sensíveis à mudança do clima. Na Amazônia, além da fragmentação em si, mesmo nas áreas mais preservadas, a presença de grandes rios pode ser obstáculo para a migração das espécies, assim como os grandes eixos de desmatamento criados pelas estradas.

Assim, em todos os ecossistemas, é importante manter e recuperar a conexão entre as áreas de vegetação nativa, e melhorar a permeabilidade das áreas de cultivos,

pastagens e ocupações urbanas ao movimento das espécies, permitindo sua migração para as novas áreas favoráveis. A manutenção e recuperação dessas áreas de conexão deve ser combinada com a possibilidade dessas áreas proverem serviços ecossistêmicos e contribuírem para a Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE).

Grandes áreas de ecossistemas nativos são prioritárias para a conservação, pois são menos sensíveis à mudança do clima e são mais resilientes. Essas grandes áreas conservadas serão ainda mais importantes onde os ecossistemas florestais estiverem sob estresse climático (leste e sudoeste da Amazônia e área central da Mata Atlântica), onde medidas de prevenção e combate a incêndios florestais também serão importantes para postergar e suavizar os impactos.

Muitas espécies estarão expostas a situações climáticas adversas e a ecossistemas em mudança que representarão desafios de adaptação. Frequentemente, uma adaptação das espécies não será possível. Para prevenir a perda dessas espécies, será necessário apoiá-las com migração assistida e conservação *ex-situ* (fora do ambiente natural, em criatórios, plantios e bancos de material genético).

Essas diretrizes são as mesmas recomendadas pelo Plano Nacional de Adaptação (PNA).

6 REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, B. da R.; LORINI, M. L.; GRELLE, C. E. de V. Modelagem Preditiva de Distribuição de Espécies Ameaçadas de Extinção: Um Panorama das Pesquisas. **Oecologia Australis**, v. 17, n. 4, p. 483–508, 2014.
- ANACLETO, T. C.; OLIVEIRA, G. MÉTODOS PARA INDICAÇÃO DE ÁREAS PARA CONSERVAÇÃO: UMA ANÁLISE A PARTIR DA MODELAGEM DE NICHOS DE TATUS, NO ESTADO DE MATO GROSSO. **Caminhos de Geografia**, v. 15, n. 51, 2014.
Disponível em:
<<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/26018>>.
Acesso em: 22 fev. 2015.
- BLOIS, J. L.; ZARNETSKE, P. L.; FITZPATRICK, M. C.; FINNEGAN, S. Climate change and the past, present, and future of biotic interactions. **Science**, v. 341, n. 6145, p. 499–504, 2013.
- BRASIL. **Avaliação do estado do conhecimento da diversidade biológica do Brasil**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2006.
- BRASIL. **Quarto Relatório Nacional para a Convenção sobre Diversidade Biológica: Brasil**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente/ Diretoria do Programa Nacional de Conservação da Biodiversidade - DCBio, 2010. .
- BRASIL/MMA. **Convenção sobre diversidade biológica - cdb/cópia do decreto legislativo no. 2, de 5 de junho de 1992**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 1992.
- COCHRANE, M. A. Fire, land use, land cover dynamics, and climate change in the Brazilian Amazon. In: **Tropical Fire Ecology**. [s.l.] Springer, 2009. p. 389–426.
- COCHRANE, M. A.; LAURANCE, W. F. Synergisms among fire, land use, and climate change in the Amazon. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 37, n. 7, p. 522–527, 2008.
- COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R. S.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, B. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253–260, 1997.
- DAWSON, T. P.; JACKSON, S. T.; HOUSE, J. I.; PRENTICE, I. C.; MACE, G. M. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. **science**, v. 332, n. 6025, p. 53–58, 2011.
- DE GROOT, R.; FISHER, B.; CHRISTIE, M. Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. In: TEEB (Ed.). **TEEB Ecological and Economic Foundations**. Edited by Pushpam Kumar. Earthscan, London and Washington. [s.l.] Routledge, 2010.

- DE GROOT, R. S. **A functional ecosystem evaluation method as a tool in environmental planing and decision making.** Wageningen, The Netherlands, , 1986. .
- DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M. J. A typology for the classification, description, and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, v. 41, 2002.
- DE MARCO JÚNIOR, P.; SIQUEIRA, M. F. Como determinar a distribuição potencial de espécies sob uma abordagem conservacionista. **Megadiversidade**, v. 5, p. 65–76, 2009.
- FRANÇOSO, R. D. **Relatório do Produto nº 2 do Contrato nº 2015/000191 – BRA/11/001: Mapas do clima em 2050.** Brasília (DF): Projeto BRA/11/001, 2016a. .
- FRANÇOSO, R. D. **Relatório do Produto nº 1 do Contrato nº 2015/000191 – BRA/11/001: Parâmetros de clima mais relevantes para análise do impacto da mudança do clima sobre a biodiversidade.** Brasília (DF): Projeto BRA/11/001, 2016b. .
- FRANÇOSO, R. D. **Relatório do Produto nº 3 do Contrato nº 2015/000191 – BRA/11/001: Mapas da distribuição espacial futura de nichos climáticos dos biomas brasileiros.** Brasília (DF): Projeto BRA/11/001, 2016c. .
- FRANÇOSO, R. D. **Relatório do Produto nº 4 do Contrato nº 2015/000191 – BRA/11/001: Mapa das áreas sob estresse climático (exposição).** Brasília (DF): Projeto BRA/11/001, 2016d. .
- GIANNINI, T. C.; ACOSTA, A. L.; GARÓFALO, C. A.; SARAIVA, A. M.; ALVES-DOS-SANTOS, I.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Pollination services at risk: Bee habitats will decrease owing to climate change in Brazil. **Ecological Modelling**, v. 244, p. 127–131, 2012.
- HARLEY, C. D. Climate change, keystone predation, and biodiversity loss. **Science**, v. 334, n. 6059, p. 1124–1127, 2011.
- HILLERISLAMBERS, J.; HARSCH, M. A.; ETTINGER, A. K.; FORD, K. R.; THEOBALD, E. J. How will biotic interactions influence climate change–induced range shifts? **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1297, n. 1, p. 112–125, 2013.
- HUETING, R.; REIJNDERS, L.; DE BOER, B.; LAMBOOY, J.; JANSEN, H. The concept of environmental function and its valuation. **Ecological Economics**, v. 25, p. 31–35, 1998.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira.** [s.l: s.n.]
- IHLOW, F.; DAMBACH, J.; ENGLER, J. O.; FLECKS, M.; HARTMANN, T.; NEKUM, S.; RAJAEI, H.; ROEDDER, D. On the brink of extinction? How climate change may affect global chelonian species richness and distribution. **Global Change Biology**, v. 18, n. 5, p. 1520–1530, 2012.

- IPCC. Summary for Policymakers. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; MACH, K.; MASTRANDREA, M.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDEA, P. R.; WHITE, L. L. (Ed.). **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**. Cambridge, UK e New York, NY: Cambridge University Press, 2014. p. 1–32.
- LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P. de; OLIVEIRA, M. de D. M. de. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. **Biota Neotropica**, v. 8, n. 3, p. 69–82, 2008a.
- LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P. de; OLIVEIRA, M. de D. M. de. Coral bleaching in Bahia reefs and its relation with sea surface temperature anomalies. **Biota Neotropica**, v. 8, n. 3, p. 0–0, 2008b.
- LEMES, P. **Relatório do Produto nº 1 do Contrato nº 2015/000139 – BRA/11/001: Respostas da biodiversidade aos impactos da mudança do clima**. Brasília (DF): Projeto BRA/11/001, 2016a. .
- LEMES, P. **Relatório do Produto nº 2 do Contrato nº 2015/000139 – BRA/11/001: Respostas da biodiversidade aos impactos da fragmentação da vegetação nativa**. Brasília (DF): Projeto BRA/11/001, 2016b. .
- LEMES, P. **Relatório do Produto nº 3 do Contrato nº 2015/000139 – BRA/11/001: Análise dos impactos da distribuição dos nichos climáticos futuros sobre a biodiversidade**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2016c. .
- LOYOLA, R. D.; LEMES, P.; FALEIRO, F. V.; TRINDADE-FILHO, J.; MACHADO, R. B. Severe loss of suitable climatic conditions for marsupial species in Brazil: challenges and opportunities for conservation. **PloS one**, v. 7, n. 9, p. e46257, 2012.
- MARENGO, J. **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 (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2007.
- MARINI, M. Â.; BARBET-MASSIN, M.; LOPES, L. E.; JIGUET, F. Predicted Climate-Driven Bird Distribution Changes and Forecasted Conservation Conflicts in a Neotropical Savanna. **Conservation Biology**, v. 23, n. 6, p. 1558–1567, 2009a.
- MARINI, M. Â.; BARBET-MASSIN, M.; LOPES, L. E.; JIGUET, F. Major current and future gaps of Brazilian reserves to protect Neotropical savanna birds. **Biological Conservation**, v. 142, n. 12, p. 3039–3050, 2009b.
- MARINI, M. Â.; BARBET-MASSIN, M.; LOPES, L. E.; JIGUET, F. Predicting the Occurrence of Rare Brazilian Birds with Species Distribution Models. **Journal of Ornithology**, v. 151, n. 4, p. 857–866, 3 abr. 2010a.

- MARINI, M. Â.; BARBET-MASSIN, M.; LOPES, L. E.; JIGUET, F. Geographic and seasonal distribution of the Cock-tailed Tyrant (*Alectrurus tricolor*) inferred from niche modeling. **Journal of Ornithology**, v. 154, n. 2, p. 393–402, 2013.
- MARINI, M. Â.; BARBET-MASSIN, M.; MARTINEZ, J.; PRESTES, N. P.; JIGUET, F. Applying ecological niche modelling to plan conservation actions for the Red-spectacled Amazon (*Amazona pretrei*). **Biological Conservation**, v. 143, n. 1, p. 102–112, 2010b.
- MEYER, A. L.; PIE, M. R.; PASSOS, F. C. Assessing the exposure of lion tamarins (*Leontopithecus* spp.) to future climate change. **American Journal of Primatology**, v. 76, n. 6, p. 551–562, 2014.
- MEYER, A. L. S. Integrando modelagem de nicho ecológico e de dados em sig na avaliação da exposição de *Leontopithecus* (primates: callitrichinae) as mudanças climáticas. 2013. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br:8080/dspace/handle/1884/30419>>. Acesso em: 10 fev. 2015.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Eossistemas e o bem-estar humano: estrutura para uma avaliação - resumo**. [s.l.] Island Press, 2005.
- NOBRE, A. D. **O futuro climático da amazônia: relatório de avaliação científica**. São José dos Campos: Articulação Regional Amazônica, 2014.
- OLIVEIRA, H. R.; CASSEMIRO, F. A. Potential effects of climate change on the distribution of a Caatinga's frog *Rhinella granulosa* (Anura, Bufonidae). **Iheringia. Série Zoologia**, v. 103, n. 3, p. 272–279, 2013.
- PARMESAN, C. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 37, n. 1, p. 637–669, 2006.
- PBMC. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1**. Rio de Janeiro (RJ): COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. .
- PIE, M. R.; MEYER, A. L.; FIRKOWSKI, C. R.; RIBEIRO, L. F.; BORNSCHEIN, M. R. Understanding the mechanisms underlying the distribution of microendemic montane frogs (*Brachycephalus* spp., Terrarana: Brachycephalidae) in the Brazilian Atlantic Rainforest. **Ecological Modelling**, v. 250, p. 165–176, 2013.
- SHELDON, K. S.; YANG, S.; TEWKSBURY, J. J. Climate change and community disassembly: impacts of warming on tropical and temperate montane community structure. **Ecology Letters**, v. 14, n. 12, p. 1191–1200, 2011.
- SILVA BEZERRA, D. da; AMARAL, S.; KAMPEL, M. Impactos da elevação do nível médio do mar sobre o ecossistema manguezal: a contribuição do sensoriamento remoto e modelos computacionais. **Ciência e Natura**, v. 35, n. 2, p. 152–162, 2014.

- SIMON, L. M.; OLIVEIRA, G. de; BARRETO, B. de S.; NABOUT, J. C.; RANGEL, T. F. L. V. B.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Effects of global climate changes on geographical distribution patterns of economically important plant species in cerrado. **Revista Árvore**, v. 37, n. 2, p. 267–274, 2013.
- SIQUEIRA, M. F. de; PETERSON, A. T. Consequências das mudanças climáticas globais na distribuição geográfica de espécies arbóreas de Cerrado. **Biota Neotropica**, v. 3, n. 2, 2003. Disponível em: <<http://www.biotaneotropica.org.br/v3n2/pt/abstract?article+BN00803022003>>. Acesso em: 24 fev. 2015.
- SOARES-FILHO, B.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais**. Belém (PA): Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003. p. 1–16.
- SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M.; CERQUEIRA, G. C.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; VOLL, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p. 520–523, 2006.
- SOARES-FILHO, B.; SILVESTRINI, R.; NEPSTAD, D.; BRANDO, P.; RODRIGUES, H.; ALENCAR, A.; COE, M.; LOCKS, C.; LIMA, L.; HISSA, L.; STICKLER, C. Forest Fragmentation, Climate Change and Understory Fire Regimes on the Amazonian Landscapes of the Xingu Headwaters. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 4, p. 585–598, 1 abr. 2012.
- SOUZA, T. V. de; LORINI, M. L.; ALVES, M. A. S.; CORDEIRO, P.; VALE, M. M. Redistribution of threatened and endemic Atlantic forest birds under climate change. **Natureza & Conservação**, n. 9, p. 214–218, 2011.
- VALE, M. M.; ALVES, M. A. S.; LORINI, M. L. Mudanças Climáticas: desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade brasileira. **Oecologia Australis**, v. 13, n. 3, p. 518–534, 2009.
- VIEIRA, T. B.; MENDES, P.; OPREA, M. Priority areas for bat conservation in the state of Espírito Santo, southeastern Brazil. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 7, n. 2, p. 88–96, 2012.
- ZARNETSKY, P. L.; SKELLY, D. K.; URBAN, M. C. Biotic multipliers of climate change. **Science**, v. 336, n. 6088, p. 1516–1518, 2012.
- ZIMBRES, B. Q.; DE AQUINO, P. D. P. U.; MACHADO, R. B.; SILVEIRA, L.; JÁCOMO, A. T.; SOLLMANN, R.; TÔRRES, N. M.; FURTADO, M. M.; MARINHO-FILHO, J. Range shifts under climate change and the role of protected areas for armadillos and anteaters. **Biological Conservation**, v. 152, p. 53–61, 2012.