



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro Biomédico
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Clarice Braúna Mendes

**Impactos da fragmentação de habitat sobre o clima: uma análise
global**

Rio de Janeiro
2019

Clarice Braúna Mendes

Impactos da fragmentação de habitat sobre o clima: uma análise global



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Jayme Augusto Prevedello

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

M538 Mendes, Clarice Braúna.
Impactos da fragmentação de habitat sobre o clima: uma análise global. – 2019.
64 f. : il.

Orientador: Jayme Augusto Prevedello
Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.

1. Habitat (Ecologia) - Teses. 2. Mudanças climáticas - Teses. 3. Paisagens fragmentadas - Teses. 4. Ecologia das paisagens - Teses. I. Prevedello, Jayme Augusto. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes. III. Título.

CDU 591.522

Patricia Bello Meijinhos CRB7/5217 -Bibliotecária responsável pela elaboração da ficha catalográfica

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Clarice Braúna Mendes

Impactos da fragmentação de habitat sobre o clima: uma análise global

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 11 de fevereiro de 2019.

Orientador:

Prof. Dr. Jayme Augusto Prevedello
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes – UERJ

Banca examinadora:

Prof. Dr. Bruno Henrique Pimentel Rosado
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes – UERJ

Prof. Dr. Heitor Evangelista da Silva
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes – UERJ

Prof.^a Dra. Maria Lucia Lorini
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Jayme Prevedello, pela seriedade, profissionalismo e responsabilidade com a qual conduziu esta orientação. Tenho a satisfação de poder dizer que não padeci do mal do orientador “Mestre dos Magos” durante esta etapa acadêmica tão difícil. Foram inúmeras as tardes em que passamos pensando sobre novos passos para a dissertação e quebrando a cabeça com os scripts do R. Foi paciente comigo, e me deu segurança quando mais um “erro” aparecia na tela do computador. Mostrou-se um exemplo não apenas de profissional, mas também de pessoa. Espero que nossa caminhada tenha sido tão enriquecedora para ti quanto foi para mim!

A todos os professores e equipe técnica do PPGEE, que me acolheram e não fizeram, em momento algum, eu me sentir uma estranha no ninho. A camaradagem e o conhecimento que vocês dividiram comigo é algo que não irei esquecer! Mesmo com dificuldades, o PPGEE nunca negou recursos quando eu precisei, e ainda conseguiu se colocar em nível de excelência junto a outros programas do país. Agradeço também à Capes (o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001) pela bolsa de mestrado, e ao CNPq e à Faperj, pelos auxílios financeiros diversos.

A todos aqueles que contribuíram para o melhoramento deste trabalho: à professora Nena Bergallo, que fez excelentes sugestões para o tratamento estatístico do projeto. Ao Matheus do PPGMA, que dispôs do seu tempo para me ajudar a compreender a captura e processamento de imagens de satélite. À Gisa, pelo auxílio com os *rasters* de altitude e análises espaciais no R e no ArcGis. À minha mãe, que me ajudou a compreender melhor a relação das variáveis biofísicas do meu projeto. Ao Leo, por confeccionar boa parte das imagens do trabalho no Photoshop.

A todos da UFRJ que colaboraram para enriquecer a minha formação durante o mestrado: aos professores Eduardo Arcoverde e Rita Portela pela oportunidade de participar como tutora de campo de Ecologia Vegetal em Macaé. Um agradecimento especial à Cris, excelente pessoa e profissional, que me acolheu e me ensinou

muitíssimo sobre a experiência pedagógica. Aos alunos de Ecologia Básica, e aos monitores da disciplina, o convívio com vocês foi sensacional! Aos organizadores da Biosemana, pela oportunidade em ministrar um minicurso no evento.

A todos os colegas e amigos do PPGEE, pelo convívio descontraído e intelectualmente construtivo, em especial às figuras carimbadas da “salinha” e do Lepai que participavam dos seminários! A troca de ideias, de memes, de dicas de formatação e o apoio foram fundamentais nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos de longa data, que se fizeram presentes nos melhores e nos piores momentos: à galera do Fundão, a todas do SapaGames e aqueles de Viçosa! Obrigada pelo apoio emocional, pelas palavras de conforto e por também compartilharem e deixarem os momentos felizes ainda mais luminosos! Obrigada pelas viagens, tanto físicas quanto mentais, e pelas jogatinas mais loucas!

A Pedro e Dolores, profissionais atenciosos, responsáveis por me ajudarem a encontrar maior equilíbrio mental e emocional. A todos da equipe GFTEAM de Jiu-Jitsu, em especial ao mestre Rui Camargo, por também terem me ajudado nesse aspecto. Sem a ajuda de vocês, a caminhada teria sido muito mais difícil.

A todos da minha família, de sangue e de coração, que apesar de não ver com frequência, se fazem presentes com boas vibrações e carinho sempre! Vocês continuam a me ensinar que o que realmente importa são as conexões afetivas que criamos e mantemos! Obrigada por me ajudarem a cultivar meu lado espiritual.

Ao meu namorado e companheiro, Leo, sempre com alguma palavra ou jogo de tabuleiro para me acalmar. Muito obrigada pela sua infinita paciência, pela atenção e boa vontade, pelas palavras de afeto e pelo abraço caloroso quando eu mais precisava. Obrigada por me fazer reconectar com a natureza, seja nas Agulhas Negras, no Pico do Boné ou na Floresta da Tijuca. E muito, muito obrigada mesmo por ser uma fonte de sorriso depois de um dia pesado de trabalho.

Aos meus pais, Ernani e Rita, sem os quais absolutamente nada disso seria possível. Que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando incondicionalmente, de todas as formas possíveis. Que me ajudaram a me levantar das quedas, mas que também me deixaram caminhar sozinha para que eu evoluísse. Obrigada pelo carinho, pelo amor, pelos retiros espirituais em Viçosa, na Bahia ou no sertão, e pela atenção que me destinam com tanta dedicação. Que o mundo tenha mais espíritos bons como vocês!

Do or do not. There is no try.

Yoda

RESUMO

MENDES, C.B. *Impactos da fragmentação de habitat sobre o clima: uma análise global*. 2019. 64f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

A fragmentação de habitat pode tornar as paisagens mais quentes e secas devido ao aumento da quantidade de bordas em habitats. O processo também pode, entretanto, resfriar as paisagens e deixá-las mais úmidas, como descrito no fenômeno da “brisa de vegetação” (*vegetation breeze*). A plausibilidade dessas duas hipóteses alternativas ainda não é clara, uma vez que a magnitude dos efeitos da fragmentação de habitat sobre o clima foi raramente quantificada. Essa é uma limitação importante, pois a fragmentação de habitat pode afetar a estrutura das comunidades biológicas e o funcionamento dos ecossistemas. O objetivo deste estudo foi o de quantificar, pela primeira vez, os impactos da fragmentação de habitat no clima no nível da paisagem em escala global. Foram obtidos dados de satélite referentes à cobertura florestal (ano de 2000) e a cinco variáveis climáticas: temperatura diurna, temperatura noturna, temperatura diária (média entre diurna e noturna), albedo e evapotranspiração. As análises foram executadas separadamente para cada região climática (tropical = 20°S-20°N; temperada = 20°S-50°S e 20°N-50°N; boreal = >50°S e >50°N). Usando a abordagem analítica da “janela móvel” (*moving window*), foram comparados pares de paisagens com quantidade de habitat (cobertura florestal) semelhante (diferença <5%), mas níveis de fragmentação distintos (número de manchas florestais). Cada par continha uma paisagem relativamente mais “fragmentada” (> 10 manchas) e outra mais “contínua” (<10 manchas). Controlou-se os efeitos da altitude (<50 m) e calculou-se a diferença de cada variável climática entre as células de cada par de paisagens. Para investigar as relações entre as variáveis, foi utilizada uma análise de caminhos. A fragmentação de habitat diminuiu as temperaturas diária e diurnas nas três regiões climáticas do mundo. Por outro lado, a fragmentação reduziu a temperatura noturna nos trópicos, mas aumentou nas regiões temperada e boreal. Em todas as regiões climáticas, a fragmentação de habitat aumenta a área de contato entre a floresta e a matriz, resultando em resfriamento final devido à crescente evapotranspiração, à distribuição de umidade na paisagem e aos fluxos turbulentos de ar. Nas regiões temperada e boreal, entretanto, o aquecimento noturno provavelmente é decorrente da redução do efeito antagônico da evapotranspiração sobre o albedo nas manchas florestais. Os resultados indicam um efeito inesperado da fragmentação de habitat sobre a temperatura nas paisagens, trazendo novas implicações teóricas em escala global. Por essa razão, um novo modelo conceitual foi proposto, unificando os efeitos da fragmentação de habitat tanto em escala local, quanto na escala da paisagem.

Palavras-chave: Perda de habitat. Fragmentação *per se*. Cobertura florestal. Mudança climática. Alterações biofísicas. Efeito de borda.

ABSTRACT

MENDES, C.B. *Impacts of habitat fragmentation on climate: a global analysis*. 2019. 64f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Habitat fragmentation may make landscapes drier and hotter due to increases in the amount of habitat edges. The process, however, can also reduce temperatures and raise humidity at the landscape-level, as described in the "vegetation breeze" phenomenon. The plausibility of these two alternative hypotheses is still unclear, since the magnitude of the effects of habitat fragmentation on climate has rarely been quantified. This is an important limitation, since habitat fragmentation can affect the structure of biological communities and ecosystems functioning. The objective of this study was to quantify, for the first time, the impacts of habitat fragmentation at the landscape-level climate on a global scale. Satellite data were obtained for forest cover (year 2000) and five climatic variables: daytime temperature, nighttime temperature, daily temperature (daytime and nighttime), albedo and evapotranspiration. The analyses were performed separately for each climatic region (tropical = 20° S-20° N, temperate = 20° S-50° S and 20° N-50° N, boreal $\geq 50^\circ$ S and $\geq 50^\circ$ N). Using a "moving window" approach, we compared pairs of landscapes with similar amount of forest cover (difference <5%), but different levels of fragmentation (number of forest patches). Each pair contained one relatively more "fragmented" (<10 patches) and one more "continuous" (>10 patches) landscape. We controlled the effect of altitude (<50m) and calculated the difference of each climatic variable between the cells of each pair of landscapes. We used path analysis to investigate the relationships between the variables. Habitat fragmentation has reduced daily and daytime temperatures in the three climatic regions across the world. On the other hand, the fragmentation reduced the nocturnal temperature in the tropics, but increased in the temperate and boreal regions. In all climatic regions, habitat fragmentation increases the contact area between the forest and the matrix, resulting in final cooling due to increased evapotranspiration, the distribution of moisture in the landscape, and turbulent air fluxes. In temperate and boreal regions, however, nocturnal warming is probably due to the reduction of the antagonistic effect of evapotranspiration on the albedo in forest patches. The results indicate an unexpected effect of habitat fragmentation on temperature on the landscape-level, bringing new theoretical implications on a global scale. For this reason, a new conceptual model was proposed to unify the effects of habitat fragmentation on both local and landscape scale.

Keywords: Habitat loss. Fragmentation *per se*. Forest cover. Climate change. Biophysical change. Edge effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Relações entre a métrica de fragmentação e as variáveis climáticas	24
Figura 2 -	Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas	28
Figura 3 -	Um novo modelo conceitual dos efeitos da fragmentação de habitat sobre o clima	39
Figura 4 -	Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 10 manchas (sem controle da autocorrelação espacial)	61
Figura 5 -	Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 30 manchas (sem controle da autocorrelação espacial)	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Efeito da fragmentação de habitat sobre as variáveis LST nas regiões climáticas, com limiares de 10 e 30 manchas e sem controle da autocorrelação espacial	49
Tabela 2 -	Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região tropical.....	52
Tabela 3 -	Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região temperada.....	54
Tabela 4 -	Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região boreal.....	56
Tabela 5 -	Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas com limiar de 10 manchas e controle da autocorrelação espacial.....	58

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
1	MATERIAIS E MÉTODOS	18
1.1	Dados de cobertura florestal, clima e altitude	18
1.2	Dados de fragmentação florestal	21
1.3	Abordagem da janela móvel	21
1.4	Análise da fragmentação florestal no clima ao redor do mundo	23
1.5	Controle da autocorrelação espacial	25
2	RESULTADOS	27
2.1	Efeitos diretos da fragmentação de habitat na temperatura	27
2.2	Efeitos indiretos da fragmentação de habitat na temperatura	29
3	DISCUSSÃO	31
3.1	Variação do poder das variáveis resposta nos modelos globais de caminhos	31
3.2	Efeitos da fragmentação de habitat sobre a temperatura mediados pelas variáveis biofísicas	32
3.2.1	<u>Efeitos da fragmentação de habitat sobre as variáveis biofísicas</u>	32
3.2.2	<u>Efeitos das variáveis biofísicas sobre a temperatura</u>	35
3.3.	O efeito direto da fragmentação de habitat sobre a temperatura	36
3.4	Um novo modelo conceitual	37
	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A – Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas (sem controle da autocorrelação espacial)	49
	APÊNDICE B – Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos nas regiões climáticas	52
	APÊNDICE C – Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 30 manchas e controle da autocorrelação espacial	58
	APÊNDICE D – Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas com limiares de 10 e	

30 manchas (sem controle da autocorrelação espacial)	61
--	----

INTRODUÇÃO

Os processos combinados de perda e fragmentação de habitat são considerados causas primárias da perda de biodiversidade e da degradação de ecossistemas ao redor do mundo (WILSON et al., 2016), afetando diferentes níveis de organização ecológica (ROBINSON et al., 1992). Evidências empíricas têm sugerido que a perda de habitat, definida como a simples redução na quantidade original de habitat, tem efeitos fortes e negativos sobre a biodiversidade (FAHRIG 2003, 2017). Por outro lado, a magnitude e direção dos efeitos da fragmentação de habitat *per se* ainda são fonte de extenso debate. A fragmentação de habitat *per se* (daqui em diante, “fragmentação de habitat”) é definida como a simples subdivisão espacial do habitat, independente da perda de habitat (FAHRIG 2003, 2017). Embora a fragmentação de habitat seja tradicionalmente considerada negativa para a biodiversidade (EWERS; DIDHAM, 2006), uma revisão recente sugeriu que a maior parte das respostas significativas da biodiversidade à fragmentação é positiva (FAHRIG, 2017). Essa revisão, entretanto, foi contestada por inúmeras razões, como o fato de ter sido baseada em um número limitado de estudos válidos, e por ter considerado apenas a variação da riqueza de espécies para suas análises, não a sua identidade (FLETCHER et al., 2018). Dessa forma, a despeito da extensa literatura acerca dos efeitos da fragmentação de habitat sobre as espécies e comunidades (EWERS; DIDHAM, 2006), a direção e a magnitude destes efeitos, assim como seus mecanismos específicos subjacentes, ainda não estão claros.

Recentemente proposto, um dos mecanismos pelo qual a fragmentação de habitat afetaria a biodiversidade em paisagens seria a alteração de condições climáticas (TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016). Tais condições incluem temperatura, radiação solar, umidade, correntes de vento e pressão do ar (CHEN et al., 1999; MURCIA, 1995; LAURANCE, 2004; SAUNDERS; HOBBS; MARGULES, 1991; TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016; YOUNG; MITCHELL, 1994). Variáveis microclimáticas são particularmente sensíveis a mudanças de cobertura florestal (CHEN et al., 1999), a qual normalmente intercepta tanto a radiação solar incidente quanto a radiação infravermelha refletida (MURCIA, 1995). A remoção da cobertura florestal pode levar a condições térmicas mais quentes e secas dentro dos fragmentos florestais remanescentes (CHEN et al., 1999). A fragmentação de habitat

também pode trazer efeitos inesperados em condições biofísicas locais (KAPOS, 1989; SAUNDERS; HOBBS; MARGULES, 1991), como variações no albedo e a evapotranspiração, que estão intimamente relacionadas à variação da temperatura da superfície terrestre (LI et al., 2015). Em relação aos impactos biológicos, extinções locais podem ocorrer caso as espécies não migrem ou não se adaptem aos novos cenários climáticos decorrentes da fragmentação de habitat (TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016). Essas extinções podem, em último caso, levar a mudanças do funcionamento dos ecossistemas (TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016).

Apesar da importância em potencial das mudanças climáticas causadas pela fragmentação de habitat, a compreensão dos efeitos desse processo sobre a temperatura ao nível da paisagem ainda é incipiente (ARROYO-RODRÍGUEZ et al., 2016). O principal motivo é uma incompatibilidade de escalas: enquanto a fragmentação de habitat ocorre na escala da paisagem (FAHRIG 2003), quase todos os estudos que buscam relacionar os efeitos desse processo no clima focaram a escala local, ou seja, a escala das manchas de habitat (CHEN; FRANKLIN; SPIES, 1995; DIDHAM; EWERS, 2014; DIDHAM; LAWTON, 1999; KAPOS, 1989; MAGNANO et al., 2015; MATLACK, 1993; POHLMAN; TURTON; GOOSEM, 2007; SAUNDERS et al., 1999; YAN; ZHONG; LIU, 2007; YOUNG; MITCHELL, 1994; WILLIAMS-LINERA, 1990). Esses estudos têm demonstrado que as temperaturas são geralmente mais altas na matriz ou nas bordas de fragmentos florestais, declinando exponencialmente em direção ao interior do fragmento. Como revisado por Arroyo-Rodríguez et al. (2016), esta variação térmica é esperada pelo menos durante o período diurno para fragmentos florestais. De fato, a exposição das bordas de manchas às variações climáticas extremas da matriz, geralmente composta por áreas distintas do habitat natural ou geradas pela mudança de uso do solo humana (HADDAD et al., 2015; WILCOVE; MCLELLAN; DOBSON, 1986), termina por alterar suas condições microclimáticas em diversos tipos florestais no mundo (EWERS; BANKS-LEITE, 2013). Como uma consequência dos conhecidos “efeitos de borda” (KUPFER; MALANSON; FRANKLIN, 2006), os gradientes de temperatura podem se estender em distâncias consideráveis dentro da mancha de habitat (TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016). No caso de pequenas manchas de habitat, o aumento da temperatura pode alcançar o seu interior, afetando-as como um todo (DIDHAM; LAWTON, 1999).

Como a fragmentação de habitat aumenta a quantidade de bordas em uma paisagem (FAHRIG, 2003), e as bordas costumam ser mais quentes que o interior das manchas (TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016), frequentemente assume-se que a fragmentação de habitat aumente a temperatura na escala da paisagem (EWERS; MARSH; WEARN, 2010; LAFORTEZZA et al., 2010; MALCOM, 1994). Contudo, esta hipótese – que será referida como a “hipótese do aquecimento” – tem sido criticada pela escassez de medições empíricas da temperatura entre paisagens com diferentes graus de fragmentação, e pela própria variabilidade das mudanças locais na interface matriz-mancha, especificamente no caso de fragmentos florestais (ARROYO-RODRÍGUEZ et al., 2016). Além disso, como observado anteriormente, a maior parte dos estudos focou a escala da mancha, quando na verdade a fragmentação de habitat é um processo que ocorre na escala da paisagem (MCGARIGAL; CUSHMAN, 2002; FAHRIG, 2003). Desta forma, ainda é discutível se é possível extrapolar os efeitos da escala local da mancha para alterações climáticas na escala da paisagem.

Em nítido contraste com a hipótese do aquecimento, tem se sugerido que um aumento na quantidade de bordas pode, na verdade, resultar em um resfriamento, e não aquecimento, na escala da paisagem (ARROYO-RODRÍGUEZ et al., 2016). Essa “hipótese do resfriamento” baseia-se no fenômeno denominado “brisa de vegetação” (*vegetation breeze*), que é decorrente da justaposição de áreas de vegetação removida (matriz aberta) com áreas florestadas em paisagens fragmentadas (COCHRANE; LAURANCE, 2008). Neste fenômeno, o ar sobre as florestas é resfriado pela evapotranspiração, enquanto que na matriz de vegetação aberta, distinta biofísicamente, esse resfriamento é drasticamente reduzido. O ar quente sobre a matriz ascende durante o período diurno, acarretando tanto na redução da pressão de ar sobre a superfície do solo quanto na captação de ar frio e úmido dos fragmentos florestais para a região da matriz (COCHRANE; LAURANCE, 2008). Em outras palavras, o ar quente sobre a matriz pode ser resfriado pelo ar proveniente dos fragmentos florestais adjacentes, enfraquecendo o gradiente de temperatura da borda para o interior dos fragmentos (ARROYO-RODRÍGUEZ et al., 2016). Conforme o ar ascendente se resfria, sua umidade se condensa em nuvens convectivas, que podem precipitar sobre a matriz (AVISSAR; LIU, 1996). O ar então é reciclado em ar frio e seco sobre a floresta (COCHRANE; LAURANCE, 2008). Desta forma, embora a brisa de vegetação remova umidade do interior das florestas,

esta é redistribuída na matriz adjacente (COCHRANE; LAURANCE, 2008). Este processo pode contribuir para diminuir as temperaturas sobre a matriz e, conseqüentemente, na paisagem, uma vez que a umidade local pode absorver a radiação solar incidente durante processos evaporativos (WEST et al., 2010). Haveria, então, redução da energia total disponível para ser transferida da superfície do solo para o ar na forma de calor (WEST et al., 2010).

É possível que a hipótese do aquecimento se aplique à maior parte dos estudos feitos em escala local, os quais analisam gradientes térmicos unidirecionais da matriz para o interior da mancha. Na escala da paisagem, por outro lado, os efeitos de resfriamento derivados da “brisa de vegetação” podem superar o aquecimento em escala local, resultando em resfriamento final. Essa possibilidade, no entanto, ainda não foi testada, uma vez que nenhuma análise na escala da paisagem foi realizada. Essa escassez provavelmente decorre da dificuldade de amostragem neste tipo de escala, bem como da inexistência de mapas de cobertura florestal em alta resolução até recentemente (HANSEN et al., 2013). As análises no nível da paisagem ao redor do mundo são fundamentais para se obter um quadro geral dos efeitos da fragmentação de habitat no clima em diferentes regiões, especialmente quando se considera que a influência relativa de variáveis biofísicas, como o albedo e a evapotranspiração, sobre a temperatura local, varia latitudinalmente (ANDERSON et al., 2011; BONAN, 2008; LI et al., 2015; PENG et al., 2014; SCHULTZ; LAURANCE; LEE, 2017; SNYDER; DELIRE; FOLEY, 2004; WEST et al., 2010).

O objetivo deste estudo foi quantificar, pela primeira vez, os impactos da fragmentação de habitat no clima na escala da paisagem em todo o mundo, para testar as hipóteses alternativas do aquecimento e do resfriamento. Para tanto, foram utilizados dados de cobertura florestal global em alta resolução espacial (30m), recentemente lançados (HANSEN et al., 2013). Foram comparados pares de paisagens com a mesma quantidade de cobertura florestal, mas com diferentes níveis de fragmentação florestal, testando, dessa forma, os efeitos da fragmentação de habitat (FAHRIG, 2003, 2017) sobre a temperatura. As análises avançaram substancialmente na compreensão teórica das conseqüências da fragmentação de habitat sobre o clima na escala da paisagem. Um novo modelo conceitual foi proposto, unificando os efeitos da fragmentação de habitat tanto em escala local, quanto na escala da paisagem. Espera-se que esse modelo forneça embasamento

para o suporte de ações de conservação e manejo, que visem mitigar cenários climáticos adversos decorrentes da fragmentação de habitat.

1 MATERIAIS E MÉTODOS

1.1 Dados de cobertura florestal, clima e altitude

Os dados de cobertura florestal global, disponíveis apenas para o ano de 2000, foram obtidos no *dataset* “*Global Forest Cover*”, disponibilizado por Hansen et al. (2013). O *dataset* é derivado de imagens do satélite Landsat 7ETM+ e inclui dados de toda a cobertura terrestre em um total de 128.8 Mkm², exceto pela Antártida e algumas ilhas do Ártico. A cobertura florestal é caracterizada como toda vegetação que apresente altura acima de 5m, tanto natural quanto plantada (HANSEN et al., 2013). Este limiar de altura é baseado na capacidade de se distinguir a vegetação arborizada de grande porte em imagens multiespectrais, particularmente aquelas presentes em sistemas de observação terrestre globais, como o Landsat e o MODIS (HANSEN; STEHMAN; POTAPOV, 2010). Apesar de ter sido recentemente criticado por não diferenciar florestas plantadas de nativas (TROPEK et al., 2014), acredita-se que esses mapas de alta resolução são adequados para a captação de características biofísicas, como capacidade evapotranspirativa da cobertura florestal ao redor do mundo. A cobertura florestal original é codificada como percentagem de cobertura por *pixel* (30 x 30m), variando de 0 (sem cobertura florestal) a 100% (*pixel* completamente coberto por floresta). As porcentagens foram convertidas em dados de presença-e-ausência de floresta de acordo com o “*International Geosphere-Biosphere Programme*” (IGBP) (FRIEDL et al. 2010): um *pixel* com 60% ou menos de cobertura florestal foi considerado como “ausente” de cobertura florestal (0), enquanto um *pixel* com mais de 60% de cobertura florestal foi considerado com “presença” de cobertura (1). A resolução do mapa de presença-e-ausência, originalmente de 30m, foi modificada para 0.05° (~ 5 km, equivalente a 400 x 400 *pixels* de 30m), de modo a se igualar à resolução das imagens das variáveis climáticas (veja abaixo). Para cada *pixel* de 5 x 5 km - de agora em diante tratado como “paisagem” - foi calculada a percentagem de cobertura florestal, variando de 0-100%, dividindo o número de *pixels* de 30m com floresta (1) pelo número total de *pixels* (400 x 400).

Foi utilizada a “*land surface temperature*” (LST), ou temperatura à superfície do solo, como variável principal para se detectar os efeitos diretos e indiretos da fragmentação florestal no clima. Para a modelagem dos efeitos indiretos, foram utilizadas duas variáveis climáticas intimamente relacionadas à variação de LST: a evapotranspiração (ET) e o albedo (LI et al., 2015). Os dados de LST e ET foram obtidos da coleção 5 de produtos MODIS (NASA LP DAAC, 2016), originalmente captados por satélite com hora de passagem a ~10:30 AM e 22:30 PM, tendo sido amplamente validados (MU; ZHAO; RUNNING, 2011; RUNNING et al., 2017; WAN, 2008) e usados em publicações prévias, como Li et al. (2015) e Peng et al. (2014). Para a LST, dados mensais do EOS-Terra-MODIS (MOD11C3), que incluíam observações diurnas e noturnas da temperatura (em °C), foram obtidos na resolução de 0.05°. Foi calculada também a temperatura *diária*, através do cálculo da média dos valores de LST *diurna* e *noturna*. Apenas os dados de LST com estimativa de erro de emissividade ≤ 0.02 e erro de LST ≤ 2 K (a unidade de medida de temperatura original deste *dataset*) foram selecionados, como forma de controle de qualidade (CQ).

Para a ET, foi utilizado o produto anual da média mensal acumulada MOD16A3 (em mm/mês), em resolução de 1 km (cerca de 0.0083°). A ET mensal é estimada com o algoritmo baseado na lógica da equação de Penman-Monteith, que utiliza dados meteorológicos diários e reanalisados, assim como propriedades dinâmicas da vegetação sob sensoriamento remoto em ciclos de 8 dias (MU; ZHAO; RUNNING, 2011; RUNNING et al., 2017). Essas propriedades, como o calor latente e a radiação infra-vermelha, são consideradas independentes dos produtos LST do MODIS (MU; ZHAO; RUNNING, 2011). A resolução original do produto foi modificada para 0.05° (aproximadamente 6 x 6 *pixels* originais) ajustando-a, portanto, aos dados de LST e de cobertura florestal. Para o CQ desses dados, foram selecionados apenas *pixels* (de 0.05°) para os quais todos os 36 *pixels* originais (0.0083°) continham dados.

Para o albedo, foi utilizado o produto albedo GLASS02B06 (Global LAnd Surface Satellites) (LIANG, 2012), um *dataset* baseado em ciclos de 8 dias do MODIS, da coleção albedo GLASS de 1 km de resolução (cerca de 0.0083°). O *dataset* GLASS também foi validado (Q., LIU et al., 2013) e utilizado em publicações prévias, como Li et al. (2015) e Peng et al. (2014). Este *dataset* foi gerado a partir de dados de sensoriamento remoto de diversas origens (ex.: produtos de albedo do

MODIS) e do desenvolvimento de novos algoritmos (Q., LIU et al., 2013). Os algoritmos foram especificamente aplicados para preencher lacunas de dados e melhorar os dados seriais de albedo (N., LIU et al. 2013). Comumente utilizado, o albedo MCD43C3 da coleção 5 de produtos MODIS apresentou poucos dados válidos de albedo para diferentes regiões globais no ano analisado neste estudo (2001, para variáveis climáticas). Este fato pode ser devido às condições atmosféricas desfavoráveis nos trópicos, como a intensa nebulosidade durante todo o ano, e aos ângulos solares de zênite em regiões de alta latitude (Q., LIU et al., 2013). Desta forma, optou-se pelo uso do produto albedo GLASS02B06 ao invés do produto MCD43C3. O produto albedo GLASS02B06 abrange tanto o albedo de céu negro quanto o albedo de céu branco. De forma semelhante a Li et al. (2015), o albedo final (albedo de céu azul) foi calculado a partir das médias mensais dos albedos de céu negro e branco e, posteriormente, das médias anuais. Apenas *pixels* com informações de boa qualidade ao longo de todo o ano foram considerados para o cálculo. Os índices selecionados para o CQ do GLASS foram de “00” e “01”, indicando incerteza <5% e <10%, respectivamente. A resolução dos dados originais também foi modificada para 0.05° (aproximadamente 6 x 6 *pixels* originais).

Para controlar a possível mudança de temperatura decorrente da variação altitudinal, foram obtidos dados de altitude do “*Global 30 Arc-Second Elevation*” (GTOPO30) (EROS, 1996), que é um modelo digital de elevação global. Este modelo retorna uma grade regular para o mundo inteiro, representando o relevo da Terra em um intervalo de amostragem de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km). O GTOPO30 é baseado em dados de elevação de diferentes fontes, como o “*Digital Elevation Terrain Data*” e o “*Digital Chart of the World*” (MILIARESIS; ARGIALAS, 2002). O modelo já foi utilizado em publicações prévias, como em Miliaresis e Argialas (2002) e Seyler et al. (2009), e tem sido considerado como uma significativa melhoria na disponibilidade de informações de ciência básica (GESCH; VERDIN; GREENLEE, 1999). A resolução dos dados originais também foi modificada para 0.05°, para se tornar compatível com dados do MODIS.

Todas as variáveis climáticas foram coletadas para o ano de 2001, ao invés do ano de 2000 (período de coleta da cobertura florestal). Foi considerado que haveria um provável atraso de resposta das variáveis climáticas ao longo do ano de 2000, que seria melhor detectada no ano de 2001. A variação sazonal de cada variável climática foi desconsiderada, focando apenas em sua média anual, uma vez

que não existem mapas de cobertura florestal global para distintas estações em um mesmo ano.

1.2 Dados de fragmentação florestal

Para se mensurar o grau de fragmentação florestal, foi calculado o número de manchas nas paisagens. Esta métrica de fragmentação é a mais intuitiva e mais frequentemente utilizada na literatura (FAHRIG, 2017), permitindo uma classificação ampla das paisagens em mais “fragmentadas” ou mais “contínuas” (ex.: paisagens com quantidade maior ou menor que 10 manchas, respectivamente). Foi utilizado o mapa de resolução de 30m de presença-e-ausência (1-0) de cobertura florestal, de acordo com a classificação do IGBP, para se quantificar o número de manchas para cada paisagem (*pixel* de 5 x 5 km). Um grupo contíguo de *pixels* de floresta (1) foi considerado uma mancha individual, de acordo com a “regra dos oitos vizinhos” (TURNER; GARDNER; O’NEILL, 2001).

1.3 Abordagem da janela móvel

Para se quantificar a relação entre a fragmentação florestal e o clima local ao redor do mundo, foi utilizada a abordagem da “janela móvel” (*moving window*), em semelhança a Li et al. (2015). Essa abordagem permitiu que fossem comparados pares de paisagens próximos (< 50 km) que se diferenciassem no número de manchas, mas que compartilhassem o mesmo clima regional. Desta forma, potenciais efeitos de confusão (ex.: latitude, distância em relação a grandes corpos d’água) foram minimizados. Cada janela possuía as dimensões de 9 x 5 *pixels* (longitude x latitude), equivalente a aproximadamente 50km x 28km, sendo que as janelas adjacentes se sobrepunham em 4 células longitudinalmente e em 2 células latitudinalmente.

Para ser considerada válida para a análise, a janela deveria apresentar pelo menos um par de paisagens que atendessem a três critérios:

- (i) Diferença <5% de cobertura florestal. Este critério garantia que o par de paisagens tivesse quantidade de habitat similar, mas variados níveis de fragmentação de habitat (número de manchas);
- (ii) Uma paisagem com <10 manchas e outra com >10 manchas. Este critério permitia que sempre se comparasse uma paisagem mais “contínua” e outra mais “fragmentada”. Resultados semelhantes foram obtidos quando se aplicou 30 manchas como valor de corte (APÊNDICE A, Tabela 1);
- (iii) Pares de paisagens com altitude semelhante (diferença <50 m). Essa medida controla fatores de confusão relacionados à queda de temperatura gradual devido ao aumento de altitude.

Quando mais de um par de paisagens atendeu aos três critérios em uma mesma janela, selecionou-se apenas o par com a maior diferença do número de manchas entre si. Isso permitiu obter pares de paisagens com grande variação em seus níveis de fragmentação. Além disso, a utilização de apenas um par de paisagens válido por janela maximizou a independência das observações e reduziu a possibilidade de autocorrelação espacial entre estas. Finalmente, quando um mesmo par de paisagens selecionado ocorreu em duas janelas adjacentes (as quais se sobrepunham parcialmente), apenas a primeira ocorrência foi utilizada para análises subsequentes.

Para cada par de paisagens selecionado, foi calculada a diferença do grau de fragmentação entre paisagens (ΔF) da seguinte forma:

$$\Delta F = F_f - F_c$$

No qual F_f é o número de manchas da paisagem mais “fragmentada” e F_c é o número de manchas da paisagem mais “contínua”. De maneira similar, foram calculadas posteriormente as diferenças de temperatura, evapotranspiração e albedo (ΔLST , ΔET e $\Delta albedo$, respectivamente) dentro de cada par de paisagens válido. Os valores obtidos de ΔLST , ΔET e $\Delta albedo$ representam diferenças “padronizadas”, uma vez que foram calculados entre paisagens com distintos níveis

de fragmentação florestal, mas com quantidade de habitat e clima regional semelhantes (as duas paisagens comparadas eram sempre relativamente próximas, <50 km de distância). Dessa forma, ao utilizar estas diferenças padronizadas em testes subsequentes, foi possível realizar uma análise robusta de como a fragmentação de habitat afetou o clima local ao redor do mundo. O tratamento dos mapas e a seleção de pares de paisagens foram feitos no R 3.4.2 (R CORE TEAM, 2017), utilizando os pacotes “*raster*” (HIJMANS et al., 2017), “*rgdal*” (BIVAND et al., 2018) e “*reshape*” (WICKHAM, 2017a).

1.4 Análise da fragmentação florestal no clima ao redor do mundo

Foram obtidos um total de 800 pares válidos de paisagens para a região tropical (20°S-20°N), 6105 pares válidos para a região boreal (>50°S e >50°N) e 5626 pares válidos para a região temperada (20°S-50°S e 20°N-50°N). Para se determinar os efeitos da fragmentação florestal no clima, foi utilizada uma análise de caminhos (*path analysis*) para explorar as inter-relações hierárquicas entre Δ LST, Δ ET, Δ albedo e as métricas de fragmentação. Nesse tipo de análise, as variáveis podem agir simultaneamente umas sobre as outras, em relações já presumidas de causa-e-efeito (GRACE, 2006). Os “coeficientes de caminho” são coeficientes de predição, podendo ser estimados como coeficientes padronizados, nos quais a variação prevista em uma variável devido à outra é medida em unidades de desvios-padrão (GRACE, 2008).

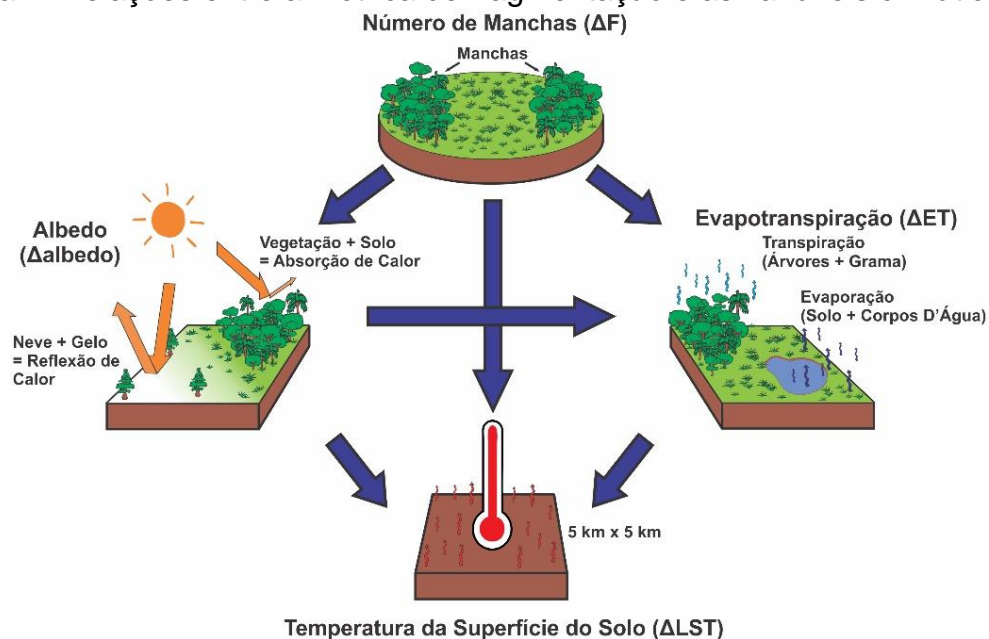
A análise de caminhos foi realizada separadamente para cada região climática, uma vez que a influência relativa do albedo e da evapotranspiração na temperatura local é distinta ao longo do gradiente latitudinal (ANDERSON et al., 2011; BONAN, 2008; LI et al., 2015; PENG et al., 2014; SNYDER; DELIRE; FOLEY, 2004; WEST et al., 2010). Foram estabelecidas as relações mais prováveis entre as variáveis de acordo com a literatura (ANDERSON et al., 2011; JACKSON et al., 2008; LI et al., 2015; PENG et al., 2014) da seguinte maneira (Figura 1):

- (i) Δ LST depende de Δ F, Δ albedo e Δ ET;

- (ii) Δalbedo depende de ΔF ;
- (iii) ΔET depende de ΔF e Δalbedo .

Cada relação correspondia a um submodelo; os três submodelos, combinados, formavam o modelo de caminhos global. Com base nesse modelo global, calculou-se os efeitos diretos, indiretos (produto dos coeficientes ao longo de cada caminho) e os efeitos totais (soma dos efeitos diretos e indiretos; GRACE, 2008) de ΔF em ΔLST (ver Figura 1).

Figura 1: Relações entre a métrica de fragmentação e as variáveis climáticas



Legenda: as setas indicam a direção das relações mais prováveis entre a métrica de fragmentação (número de manchas) e as demais variáveis climáticas. A variação da temperatura (ΔLST) é afetada pela variação da fragmentação (ΔF), pela variação do albedo (Δalbedo) e pela variação da evapotranspiração (ΔET). A variação do albedo é afetada unicamente pela variação da fragmentação, enquanto a variação da evapotranspiração é afetada tanto por ΔF quanto pela variação do albedo.

Foto: A autora e Leonardo Ramos, 2018

Também foi calculada a magnitude do efeito total da fragmentação sobre a temperatura na paisagem, com base no efeito total de ΔF sobre ΔLST , e no desvio-padrão da temperatura e da ΔF (GRACE, 2008). Para tanto, um $\Delta F = 100$ (ou seja, a fragmentação de uma mancha única de floresta em uma paisagem de 100 manchas), foi considerado como critério para avaliar a alteração correspondente na temperatura. A título de exemplificação, na região tropical, o efeito total de ΔF sobre

a ΔLST *diurna* foi estimado em -0.34 (soma dos coeficientes diretos e indiretos). Esta estimativa indica que um aumento de 1 desvio-padrão no número de manchas (desvio-padrão $\Delta F = 103.08$ manchas) reduziu a temperatura em 0.34 desvios padrão de temperatura, ou seja, em 0.48°C ($-0.34 \times 1.42^{\circ}\text{C}$, sendo 1.42°C o desvio-padrão de ΔLST). Realizamos as análises de caminhos separadamente para cada região (tropical, temperada e boreal) e para cada métrica de temperatura (*diária*, *diurna* e *noturna*) no ambiente R, com os pacotes “*lavaan*” (ROSSEEL et al., 2018) e “*scale*” (WICKHAM, 2017b).

1.5 Controle da autocorrelação espacial

A autocorrelação espacial pode violar o pressuposto de independência das observações, aumentando o erro do Tipo I (DINIZ-FILHO; BINI; HAWKINS, 2003; LEGENDRE, 1993). Para minimizar esse erro, controlou-se a possível autocorrelação espacial em cada um dos três submodelos que formavam o modelo global de caminhos. Foram construídas seis versões alternativas de cada submodelo; as seis versões continham as mesmas variáveis explicativas (ΔF , Δ albedo e Δ ET), mas diferentes estruturas de autocorrelação: nenhuma (modelo nulo), esférica (corSpher), linear (corLin), quadrática racional (corRatio), gaussiana (corGaus), ou exponencial (corExp) (ZUUR et al., 2009). A estrutura de correlação apresentava-se na forma “= longitude + latitude”, conforme implementado no pacote R “*nlme*” (PINHEIRO et al., 2018).

Para cada submodelo, comparou-se o ajuste das seis versões alternativas para se determinar a estrutura de autocorrelação mais adequada. O ajuste do modelo foi comparado através da seleção de modelos baseada no AICc (BURNHAM; ANDERSON, 2002), utilizando o pacote do ambiente R “*MuMIn*” (BARTON, 2018). Devido ao longo tempo computacional para se ajustar todos os modelos a todo o conjunto de dados de cada região, foi utilizada uma subamostra aleatória ($n = 800$) para cada região climática. O tamanho da subamostra escolhida (800) foi o tamanho da amostra da região com menos observações válidas (região tropical). Em todas as comparações (exceto para a ΔLST noturna dependendo da

ΔET na região boreal), os modelos com algum tipo de estrutura de autocorrelação foram sempre mais plausíveis que o modelo sem estrutura (APÊNDICE B, Tabelas 2 a 4; APÊNDICE C, Tabela 5). Dessa maneira, a estrutura de autocorrelação do modelo mais plausível em cada seleção de modelos foi utilizada para a análise final de caminhos, que combinou os três submodelos. Nesta análise final, empregou-se todos os pares de paisagens válidos (e não as subamostras) de cada região climática para maximizar a robustez da análise. Os resultados obtidos com o controle de autocorrelação espacial foram semelhantes aos resultados sem este controle, sendo, portanto, robustos (APÊNDICE A, Tabela 1; APÊNDICE C, Tabela 5; APÊNDICE D, Figuras 4 e 5).

2 RESULTADOS

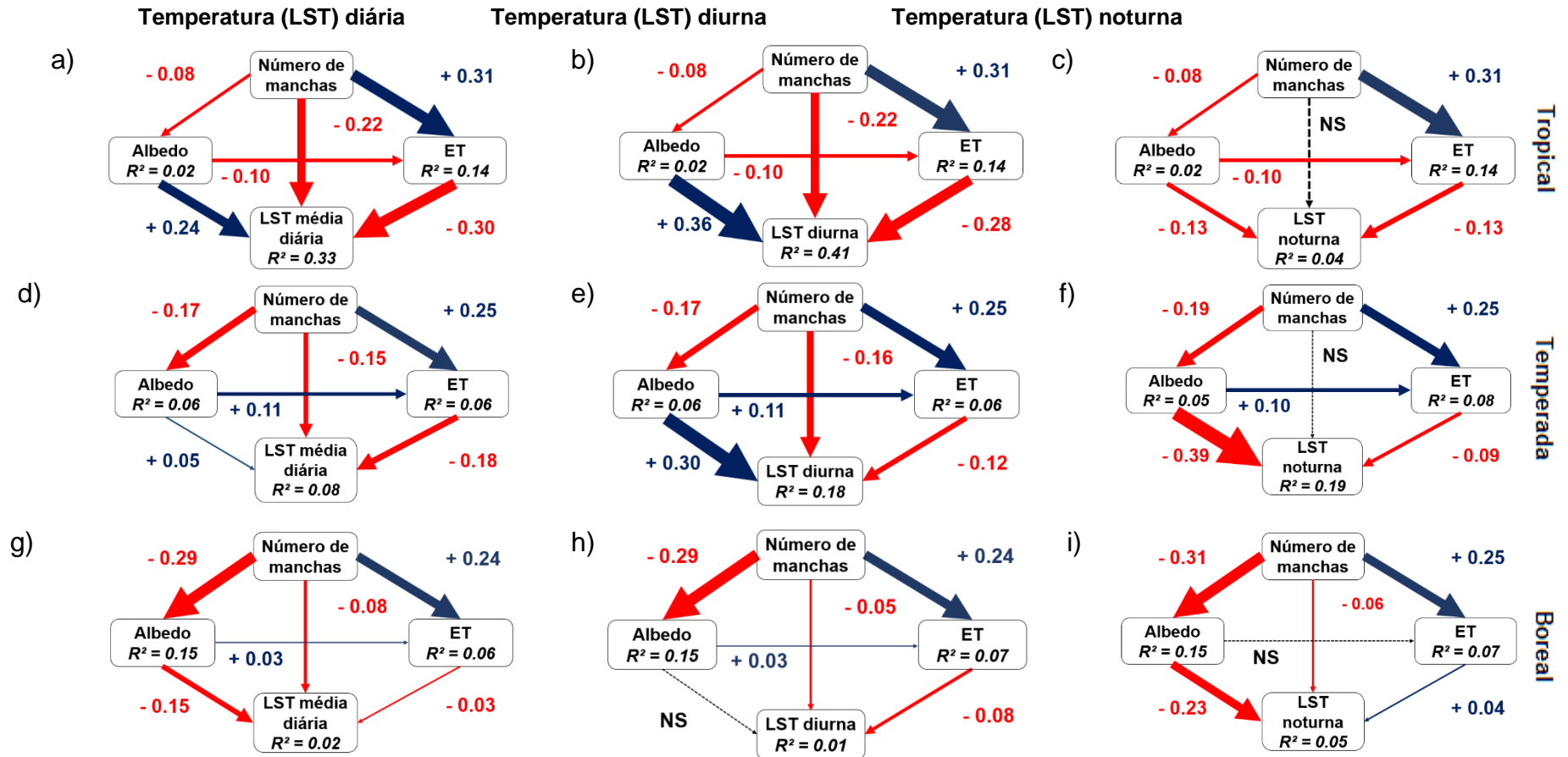
Tanto os efeitos diretos quanto os indiretos da fragmentação de habitat na temperatura variaram entre as regiões climáticas (Figura 2). De acordo com a análise de caminhos, a fragmentação de uma única mancha de floresta em 100 manchas numa paisagem levou a um resfriamento da temperatura *diária* (média da noturna e diurna) de -0.26°C em regiões tropicais, -0.16°C em regiões temperadas e -0.04°C em regiões boreais (para estatísticas completas, ver APÊNDICE C, Tabela 5). Da mesma forma, a fragmentação de habitat levou a um resfriamento consistente da temperatura *diurna* em regiões tropicais (-0.47°C), temperadas (-0.38°C) e boreais (-0.08°C). Por outro lado, enquanto a fragmentação do habitat reduziu ligeiramente a temperatura *noturna* em regiões tropicais (-0.07°C), ela aumentou-a ligeiramente nas regiões temperada e boreal ($+0.05^{\circ}\text{C}$ e $+0.02^{\circ}\text{C}$, respectivamente).

Em geral, a variação da evapotranspiração e da temperatura foi mais bem explicada pelos seus respectivos submodelos na região tropical, como evidenciado pelos valores de R^2 (Figuras 2a-c). A única exceção foi para a temperatura *noturna* tropical, cuja variação foi pouco explicada nesta região ($R^2 = 0.04$; Figura 2c). O submodelo da temperatura *diurna* tropical apresentou o maior poder explanatório dentre todos os submodelos de todas as regiões climáticas ($R^2 = 0.41$; Figura 2b). Por outro lado, a variação do albedo foi mais explicada na região boreal ($R^2 = 0.15$; Figuras 2g-i).

2.1 Efeitos diretos da fragmentação de habitat na temperatura

Em quase todas as regiões climáticas (tropical, temperada ou boreal), e para a maioria das medidas de temperatura (*diária*, *diurna* ou *noturna*), o efeito *direto* da fragmentação de habitat sobre a temperatura foi negativo (setas verticais e inclinadas na Figura 2). Em outras palavras, quanto mais fragmentada a paisagem, menor sua temperatura. As únicas exceções foram para a temperatura *noturna* nas regiões tropical e temperada, nas quais o efeito direto não foi significativo (Figuras

Figura 2: Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas



Legenda: (a)-(c) modelos da região tropical; (d)-(f) modelos da região temperada; (g)-(i) modelos da região boreal. Efeitos indiretos do número de manchas são mediados pela evapotranspiração (ET) e pelo albedo. As setas são proporcionais aos coeficientes padronizados das análises de caminhos (números). Setas azuis e vermelhas indicam, respectivamente, relações positivas e negativas. Os coeficientes para relações não significativas (NS; $P < 0.05$) foram ocultados. Os valores de R² indicam o coeficiente de determinação das variáveis resposta.

Fonte: A autora, 2018

2c e 2f). Os efeitos diretos mais fortes da fragmentação sobre a temperatura ocorreram na região tropical, para as temperaturas *diária* e *diurna* (Figuras 2a-b).

2.2 Efeitos indiretos da fragmentação de habitat na temperatura

A fragmentação de habitat também apresentou efeitos *indiretos* claros sobre a temperatura, mediados por mudanças na evapotranspiração e no albedo (setas diagonais na Figura 2). Em todas as regiões climáticas, a fragmentação de habitat teve um efeito positivo sobre a evapotranspiração e um efeito negativo sobre o albedo (Figura 2). O efeito da fragmentação de habitat sobre a evapotranspiração foi mais forte na região tropical (coeficiente = +0.31), e praticamente o mesmo nas regiões temperada e boreal (+0.25 e +0.24, respectivamente, exceto a temperatura *noturna* boreal; Figura 2). Em contraste, o efeito da fragmentação sobre o albedo foi mais fraco na região tropical, (-0.08; Figuras 2a-c), e mais forte na região boreal, principalmente no período noturno (de -0.29 a -0.31; Figuras 2g-i).

Os efeitos do albedo sobre as temperaturas *diária* e *diurna* foram mais fortes na região tropical (+0.24 e +0.36, respectivamente; Figuras 2a-b), sendo o efeito mais fraco para a temperatura *diária* registrado na região temperada (+0.05; Figura 2d) e para a temperatura *diurna* na região boreal (não significativo; Figura 2h). O efeito do albedo sobre a temperatura *noturna* foi mais forte na região temperada (-0.39; Figura 2f) e mais fraco na região tropical (-0.13; Figura 2c). Para todas as temperaturas, os efeitos diretos da evapotranspiração foram mais fortes na região tropical (*diária*: -0.30; *diurna*: -0.28; *noturna*: -0.13; Figuras 2a-c) e mais fracos na região boreal, exceto para o período noturno (*diária*: +0.03; *diurna*: +0.08; *noturna*: +0.04; Figuras 2g-i).

O aumento em evapotranspiração geralmente acarretou na redução da temperatura (Figura 2). A única exceção foi a temperatura *noturna* na região boreal, na qual a evapotranspiração aumentou a temperatura (Figura 2i). Os efeitos do albedo sobre a evapotranspiração foram negativos e mais fortes na região tropical (setas horizontais nas Figuras 2a-c), enquanto foram positivos e mais fracos (quando significativos) nas regiões temperada e boreal (Figuras 2d-i).

A diminuição do albedo apresentou efeitos opostos nas temperaturas *diurna* e *noturna*: tanto para a temperatura *diária* quanto para a temperatura *diurna*, a diminuição do albedo acarretou em aumento da temperatura (Figuras 2). Para a temperatura *noturna*, entretanto, a diminuição do albedo causou uma diminuição na temperatura. A região boreal foi uma exceção, uma vez que, para a temperatura *diária*, a diminuição do albedo diminuiu a temperatura, e para a temperatura *diurna*, a relação foi não significativa (Figuras 2g-h).

3 DISCUSSÃO

De forma geral, para o intervalo de tempo analisado neste estudo, quanto mais fragmentada foi uma dada paisagem, menor foi a sua temperatura média (diária), corroborando a hipótese do resfriamento e rejeitando a hipótese do aquecimento. A magnitude desse resfriamento variou latitudinalmente, sendo maior nos trópicos e menor na região boreal. O efeito de resfriamento final das paisagens, detectado no presente estudo, é aparentemente contra-intuitivo, uma vez que a maior parte dos estudos indica que os efeitos de borda tendem a aumentar a temperatura local, como revisado por Tuff, Tuff e Davies (2016). Os resultados do presente estudo, entretanto, mostram que não é correto extrapolar efeitos de borda locais para a paisagem como um todo.

3.1 **Variação do poder de explicação das variáveis resposta nos modelos globais de caminhos**

Observou-se, em geral, um baixo poder de explicação da variação (R^2) das variáveis resposta para todos os modelos globais de caminhos nas diferentes regiões climáticas (Figura 2). Uma das razões pela qual isso ocorreria seria a desconsideração da sazonalidade do albedo e da evapotranspiração ao longo do ano nos modelos globais deste estudo. Essa sazonalidade possui papel relevante para as regiões temperada e boreal, por ser um reflexo da complexa expansão e diminuição da cobertura de neve ao longo do ano (ANDERSON et al., 2011; BONAN, 2008; LI et al., 2015, 2016; PENG et al., 2014; SCHULTZ; LAURANCE; LEE, 2017; SNYDER; DELIRE; FOLEY, 2004). Para a região tropical, a sazonalidade também apresenta papel relevante através de mecanismos relacionados à capacidade de evapotranspiração da vegetação (EWERS; BANKS-LEITE, 2013). Na região tropical, por outro lado, o poder de explicação da variação das variáveis resposta foi, no geral, maior que o das demais regiões climáticas. Sugere-se, portanto, que a sazonalidade nas regiões de alta latitude tem importância relativa maior sobre o clima do que o efeito da fragmentação de habitat. As

exceções são os submodelos que incluem o albedo, que possuem maior ajuste na região boreal que nas demais regiões climáticas (Figura 2), justamente devido à sua complexa relação albedo-vegetação; e os modelos globais de caminhos envolvendo a temperatura *noturna*, mais bem ajustados nas regiões temperada e boreal (Figura 2f e 2i), uma vez que as variações desta temperatura estão intimamente relacionadas à quantidade de radiação infravermelha refletida pelo efeito do albedo no período diurno (LI et al., 2015; PENG et al., 2014; SCHULTZ; LAURANCE; LEE, 2017).

O baixo poder de explicação da variação das variáveis resposta pode residir na falta de inclusão dos tipos de solo na escala da paisagem nas análises, já que estes estão relacionados ao aumento ou à diminuição da magnitude dos efeitos do fenômeno da “brisa de vegetação” (HONG; LEACH; RAMAN, 1994). A não inclusão de variáveis usualmente utilizadas em modelos complexos dos efeitos das mudanças de uso de solo sobre o clima, como aerossóis atmosféricos, formação de nuvens e mecanismos retroativos nas interações mar-cobertura de gelo (WEST et al., 2010), também pode ter reduzido o poder de explicação dos modelos. Apesar dessas limitações, foi possível detectar efeitos claros da fragmentação de habitat sobre o clima e suas variações ao longo do gradiente latitudinal. Esses efeitos foram constatados devido principalmente ao uso da abordagem da janela móvel, que permitiu comparar paisagens próximas com condições similares, mas com diferentes graus de fragmentação.

3.2 Efeitos da fragmentação de habitat sobre a temperatura mediados pelas variáveis biofísicas

3.2.1 Efeitos da fragmentação de habitat sobre as variáveis biofísicas

O efeito positivo da fragmentação de habitat sobre a evapotranspiração (Figura 2) pode ser decorrente da crescente área de contato dos fragmentos florestais remanescentes com a matriz. A fragmentação de habitat resulta não apenas na exposição do fragmento florestal às condições climáticas externas mais

extremas da matriz (EWERS; BANKS-LEITE, 2013), mas também no aumento da quantidade de bordas na paisagem (FAHRIG, 2003). A maior parte dessas bordas apresenta, em estágios iniciais de sucessão, temperaturas mais elevadas, menor umidade, além de maior incidência de radiação solar e maior exposição ao vento (MURCIA, 1995). Tais condições nas bordas podem resultar em taxas de evapotranspiração maiores através de variados mecanismos biofísicos, como, por exemplo: a diminuição da concentração do vapor de água entre as folhas e a atmosfera, por meio redução da umidade e do aumento da temperatura, ocorrendo a facilitação dos processos de difusão do vapor de ar (KERBAUY, 2004). O solo também pode perder umidade por processos de evaporação, devido ao aumento da radiação solar na região da borda (KAPOS, 1989; RANNEY; BRUNER; LEVENSON; 1981).

Em estágios sucessionais posteriores, a propagação de espécies secundárias e o crescimento de ramos e folhas das árvores originais protegem o solo da radiação solar direta, mas, em contrapartida, estão mais expostas a esta radiação (CAMARGO; KAPOS, 1995). Essa maior exposição pode resultar em maiores taxas de transpiração (CAMARGO; KAPOS, 1995). Dessa forma, em ambos os estágios de sucessão em bordas de fragmentos florestais, uma maior quantidade de bordas por paisagem pode contribuir para o aumento das taxas de evapotranspiração. O aumento das taxas de evapotranspiração é mais acentuado na região tropical, o que foi constatado neste estudo, devido à sua maior disponibilidade de umidade no solo em comparação com as demais regiões climáticas (SENEVIRATNE et al., 2010) (Figura 2). Além disso, especula-se que em regiões tropicais nas quais há suprimento de água adequado a gramíneas em regiões sombreadas, como aquelas próximas à região de interseção da matriz e da borda de fragmento, a resistência da superfície foliar baixa promove taxas de transpiração ainda maiores que áreas florestais (SCHUTTLEWORTH, 1991).

A literatura recente postula que possíveis efeitos da fragmentação de habitat tipicamente aumentariam o albedo das paisagens através de mecanismos como os distúrbios na região do dossel, a perda de biomassa relacionada aos efeitos de borda, e à substituição da vegetação nativa por espécies pioneiras (CORLETT, 2014). Os resultados do presente estudo, entretanto, apontam que a fragmentação de habitat diminui o albedo na escala da paisagem em todas as regiões climáticas, com maior intensidade na região boreal e menor na região tropical (Figura 2). Uma

das possibilidades levantadas para a diminuição do albedo na região boreal, que pode ser estendida para latitudes maiores da região temperada, seria a substituição de espécies nativas decíduas por espécies perenes em fragmentos florestais remanescentes. Esse processo, já reportado em florestas boreais europeias em resposta às mudanças climáticas globais (SCHUMAN; SHUGART; O'HALLORAN, 2011), pode levar à diminuição do albedo devido à sobreposição da vegetação escura (menor albedo) sobre neve de maior refletância (maior albedo) durante o inverno (BETTS; BALL, 1997). Algumas destas espécies perenes possuem maior tolerância a temperaturas mais altas (KHARUK; RANSON; DVINSKAYA, 2007), condição térmica comum às bordas de fragmentos (MURCIA, 1995; TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016), apresentando, portanto, vantagens competitivas durante o processo de colonização de fragmentos florestais remanescentes. Como na região tropical não há influência de cobertura de neve e os efeitos de borda parecem de fato favorecer o estabelecimento de vegetação com albedo mais elevado (GIAMBELUCCA et al., 1997), o efeito da fragmentação de habitat sobre a diminuição do albedo é possivelmente mais fraco nesta região, o que foi constatado nesse estudo (Figuras 2a-c).

Uma outra possibilidade levantada, que pode se aplicar à região tropical e às regiões temperadas com pouca ou nenhuma neve, é a perda da vegetação nativa em bordas de fragmentos florestais devido à ação do vento, com consequente abertura de dossel. Esse processo já é conhecido e descrito na literatura, particularmente em regiões tropicais (CHEN; FRANKLIN; SPIES, 1992; KAPOS, 1989; FERREIRA; LAURANCE, 1997). Quando o albedo da superfície do solo é significativamente diferente do albedo da vegetação, mudanças na cobertura vegetal que exponham o solo podem ser importantes (BERBET; COSTA, 2003): neste caso, assumimos que o albedo do solo é menor que o da vegetação. Em dosséis parcialmente abertos, a radiação solar incidente é refletida repetidas vezes por estruturas vegetais e pela própria superfície do solo, de modo que a absorção de radiação é aumentada e o albedo é diminuído (BERBET; COSTA, 2003). O resultado seria, então, a diminuição do albedo em resposta à fragmentação de habitat. Essa suposição, entretanto, ainda é carente de respaldo na literatura.

3.2.2 Efeitos das variáveis biofísicas sobre a temperatura

O resfriamento causado pela evapotranspiração em diversas escalas tem sido relatado em revisões e estudos na literatura, sendo dominante na região tropical (ALKAMA; CESCATTI, 2016; ANDERSON et al., 2011; BONAN, 2008; DUVEILLER; HOOKER; CESCATTI, 2018; JACKSON et al., 2008; LI et al., 2015, 2016; PENG et al., 2014; SCHULTZ; LAURANCE; LEE, 2017; SNYDER; DELIRE; FOLEY, 2004; WEST et al., 2010). Esse efeito ocorre por meio da absorção de energia requerida para a conversão da água líquida em outro estado físico, processo conhecido como perda de calor latente (WEST et al., 2010). Há, então, redução da energia total disponível para ser transferida da superfície do solo para o ar na forma de calor (perda de calor sensível) (WEST et al., 2010), resultando em diminuição de temperatura. Altas taxas de evapotranspiração podem estar relacionadas, finalmente, a paisagens com temperaturas menores, como foi constatado em todas as regiões climáticas (Figura 2), exceto para a temperatura *noturna* na região boreal (Figura 2i). Neste caso, não há um mecanismo biofísico que explique o efeito direto de aquecimento da temperatura devido à evapotranspiração nesta região climática, sendo provavelmente mediado por alguma variável não incluída no modelo global de caminhos (ex.: mecanismos retroativos nas interações mar-cobertura de gelo).

Novamente, como o papel da evapotranspiração é dominante na região tropical, esta foi a região climática que apresentou efeito de resfriamento mais forte (Figuras 2a-c). Este efeito foi mais acentuado durante o período diurno que o noturno em todas as regiões climáticas (Figura 2), pois as taxas de evapotranspiração noturnas costumam ser naturalmente menores que as do período diurno (ROSADO et al., 2012). O resfriamento, inclusive, foi mais intenso no período noturno na região tropical do que na região temperada (Figura 2c), um resultado já esperado: a evapotranspiração noturna tropical pode ser maior que a própria evapotranspiração diurna de regiões de altas latitudes (LI et al., 2015), repercutindo, portanto, nas temperaturas finais.

O aumento da temperatura *diurna* em regiões de alta latitude, como a boreal e a temperada, já é conhecido pela diminuição do albedo durante o inverno (LI et al., 2015; PENG et al., 2014), principalmente devido à sobreposição da vegetação escura sobre a neve de maior refletância (BETTS; BALL, 1997). Nesse cenário, há

maior liberação de calor sensível, provocando o aumento de temperatura do ar (WEST et al., 2010). Esse processo pode ocorrer nessas regiões em decorrência da substituição de espécies nativas decíduas por espécies perenes em bordas de fragmentos florestais. Durante o verão, a perda de espécies decíduas, que possuem maior potencial de resfriamento (ANDERSON et al., 2011) também poderia acarretar um efeito de aquecimento. O efeito climático da diminuição do albedo na região tropical, entretanto, é menos claro.

A diminuição da temperatura *noturna* devido à diminuição do albedo em todas as regiões climáticas (Figura 2) não é condizente com o reportado na literatura, que geralmente prediz um aquecimento nessas condições (LI et al., 2015; PENG et al., 2014). Supõe-se que quanto maior a energia absorvida pelas florestas durante o dia, maior será o aquecimento noturno (LI et al., 2015). Isso porque as regiões florestadas possuem grande calor específico, fazendo com que as espécies vegetais percam calor mais lentamente e que o dossel permaneça aquecido durante a noite (HOUSPANOSSIAN; NOSETTO; JOBBÁGY, 2013). Neste sentido, análises posteriores se fazem necessárias para uma melhor compreensão deste resultado.

O efeito da diminuição do albedo sobre a evapotranspiração em todas as regiões climáticas (Figura 2) também não foi condizente com o reportado na literatura. Se de fato ocorresse uma substituição de espécies nativas decíduas por espécies perenes nas regiões de altas latitudes, por exemplo, esperar-se-ia uma diminuição das taxas de evapotranspiração, uma vez que florestas perenes tipicamente possuem menores frações de evapotranspiração que florestas decíduas (BALDOCCHI et al., 2000). Na região tropical, por sua vez, a diminuição do albedo pode estar relacionada à abertura de clareiras em regiões de bordas de fragmentos florestais, que resulta em aumento da evapotranspiração (ver seção anterior), e não em sua diminuição. Esses resultados inesperados parecem indicar que avaliações futuras seriam necessárias para se determinar como a diminuição do albedo afeta a evapotranspiração nas diferentes regiões climáticas.

3.3 O efeito direto da fragmentação de habitat sobre a temperatura

A diminuição da temperatura pelo efeito direto da fragmentação de habitat está relacionada à possível redistribuição da umidade na escala da paisagem. O microclima no interior de fragmentos florestais tende a ser mais frio, úmido e com menos variações diárias, enquanto a matriz, normalmente composta por pastos ou áreas agrícolas, apresenta temperaturas mais elevadas e com maior variação (GEIGER; ARON; TODHUNTER, 2003; FETCHER; OBERHAUER; STRAIN; 1985). Essa diferença de microclima também implica em uma diferença de pressão entre as duas regiões da paisagem, resultando na captação do ar úmido interno dos fragmentos florestais (gerado por processos evapotranspirativos) pela região da matriz, como descrito no fenômeno da “brisa de vegetação” (COCHRANE; LAURANCE, 2008). Esse fenômeno explica o porquê de diversas bordas apresentarem taxas de umidade menores que o interior de fragmentos florestais remanescentes (CHEN; FRANKLIN; SPIES, 1995; DIDHAM; LAWTON, 1999; HENNENBERG et al., 2008). O resultado é, possivelmente, o resfriamento do ar quente sobre a matriz, já que a umidade local pode absorver a radiação solar incidente durante processos evaporativos (WEST et al., 2010), e o consequente enfraquecimento do gradiente de temperatura da borda para o interior dos fragmentos (ARROYO-RODRÍGUEZ et al., 2016).

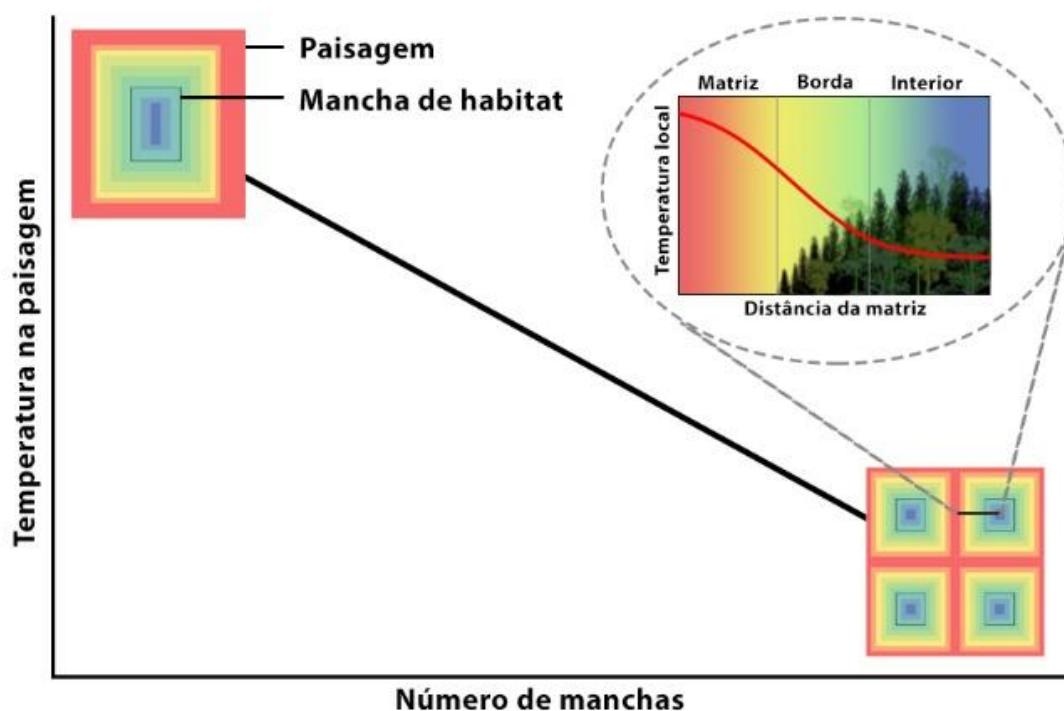
Para que a captação do ar úmido do interior dos fragmentos florestais ocorra, entretanto, é necessário que o ar originalmente quente sobre a matriz ascenda durante o período diurno (COCHRANE; LAURANCE, 2008). Esse movimento convectivo resfria o ar, promovendo a condensação da umidade em nuvens que precipitam sobre a matriz (COCHRANE; LAURANCE, 2008), sendo particularmente mais intenso em ambientes com maior heterogeneidade (AVISSAR; LIU, 1996; AVISSAR; SCHIMDT, 1998), como, por exemplo, paisagens fragmentadas. Desta forma, a fragmentação de habitat resultaria em temperaturas menores na escala da paisagem não apenas pela captação e redistribuição da umidade do interior de fragmentos florestais na matriz, mas também pelo aumento da precipitação nesta região (COCHRANE; LAURANCE, 2008).

3.4 Um novo modelo conceitual

A análise dos efeitos da fragmentação de habitat sobre o clima na escala específica da paisagem não foi realizada por nenhum estudo até o presente momento, fato provavelmente decorrente da dificuldade de amostragem neste tipo de escala, bem como da escassez de mapas de cobertura florestal em alta resolução (HANSEN et al., 2013). Com a utilização deste recurso, foi possível chegar à conclusão de que quanto mais fragmentada for uma paisagem, menor será a sua temperatura. Apesar de contradizer a hipótese do aquecimento (ver seção “Introdução”), este resultado não exclui a possibilidade das bordas de fato apresentarem temperaturas maiores que o interior de fragmentos florestais. O aquecimento na escala da mancha e o resfriamento na escala da paisagem podem, na verdade, não ser excludentes, como proposto em um novo modelo conceitual neste estudo (Figura 3).

No modelo, o aquecimento local na escala da mancha se dá por meio do contato próximo da região da matriz, de temperaturas mais elevadas e variáveis (GEIGER; ARON; TODHUNTER, 2003; FETCHER; OBERHAUER; STRAIN; 1985), com os gradientes de temperatura se estendendo a distâncias consideráveis dentro da mancha de habitat (TUFF, K; TUFF, T; DAVIES, 2016). Na escala da paisagem, a fragmentação de habitat pode acarretar provável diminuição da temperatura por mecanismos subjacentes à “brisa de vegetação” e aos efeitos de resfriamento da evapotranspiração, como proposto neste estudo. O aquecimento na escala local, inclusive, pode ser uma das causas responsáveis pelo aumento das taxas evapotranspirativas, devido à diminuição da concentração do vapor de água entre as folhas e a atmosfera (KERBAUY, 2004). Assim, embora o aquecimento em escala local não possa ser extrapolado para a escala da paisagem, como inicialmente sugerido na hipótese do aquecimento, é necessário compreender que os distintos efeitos da fragmentação sobre o clima nas duas escalas são sinérgicos, e não antagônicos. A unificação destes efeitos, além de ser uma nova abordagem teórica na ecologia, traz novas e desafiadoras perspectivas à biologia da conservação, pois será necessário avaliar em qual escala, mancha ou paisagem, haverá efeito mais preponderante da alteração do clima sobre a fisiologia, comportamento e evolução dos organismos.

Figura 3 - Um novo modelo conceitual dos efeitos da fragmentação de habitat sobre o clima



Legenda: modelo conceitual propondo diferenças no efeito da fragmentação sobre a temperatura conforme diferentes escalas de estudo. A escala da mancha é representada pela ilustração contida no balão pontilhado à direita, na qual há redução da temperatura local conforme se aumenta a distância em relação à matriz (vermelho: mais quente; azul: mais frio). A escala da paisagem, por sua vez, é representada pelas duas ilustrações próximas aos eixos do gráfico: a paisagem mais acima e mais próxima do eixo de variação da temperatura, possui uma única mancha de habitat. Por outro lado, a paisagem mais abaixo e próxima ao eixo de variação do nível de fragmentação, possui quatro manchas de habitat. Nas duas paisagens, há a mesma quantidade de habitat, mas distintos níveis de fragmentação. Nesta escala da paisagem, constata-se que, quanto maior o número de manchas em uma paisagem, menor será a sua temperatura final.

Fonte: A autora e Leonardo Ramos, 2018

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo apontam que quanto mais fragmentada for uma paisagem, menor será a sua temperatura média (diária), corroborando a hipótese do resfriamento e rejeitando a hipótese do aquecimento. Embora o efeito de resfriamento final das paisagens devido à fragmentação de habitat seja aparentemente contra-intuitivo, alguns mecanismos subjacentes a esse processo explicam a diminuição da temperatura, como, por exemplo, as correntes convectivas da brisa de vegetação que redistribuem a umidade e precipitação na paisagem, ou as maiores taxas de evapotranspiração. Esses mecanismos estão diretamente relacionados aos efeitos de borda, que incluem fatores como a exposição a condições térmicas mais extremas, e também à substituição de espécies nativas por pioneiras ou secundárias. Dessa forma, quanto mais fragmentada uma paisagem, mais intensos serão os efeitos de resfriamento, devido à maior quantidade de bordas.

Os efeitos diretos e indiretos da fragmentação sobre a temperatura na escala da paisagem variam ao longo do gradiente latitudinal. Efeitos mediados pela evapotranspiração são, no geral, mais fortes na região tropical, condizente com a alta concentração de umidade no solo nessa região. Os efeitos mediados pelo albedo na região tropical, entretanto, não foram muito distintos em intensidade em comparação às demais regiões climáticas. Modelos de caminho tiveram maior poder de explicação na região tropical, em particular os submodelos que envolvessem a evapotranspiração. Esses resultados parecem indicar que a evapotranspiração é uma variável de grande importância na compreensão dos efeitos da fragmentação na temperatura na escala da paisagem.

Ainda serão necessários estudos mais aprofundados para esclarecer os efeitos do albedo sobre a evapotranspiração e as diferenças do efeito dessa variável climática sobre a temperatura nos períodos diurno e noturno. A adição de maior número de variáveis climáticas aos modelos globais de caminhos pode ser uma

alternativa interessante. Da mesma forma, ainda é necessário esclarecer quais os exatos mecanismos que regem algumas diferenças nos padrões latitudinais e temporais dos efeitos da fragmentação de habitat sobre o clima.

A principal contribuição deste trabalho reside na construção de um modelo conceitual, que concilia os distintos efeitos da fragmentação sobre o clima na escala da mancha e na da paisagem, enfatizando que eles são sinérgicos, e não antagônicos. A unificação destes efeitos em diferentes escalas traz novas perspectivas teóricas e aplicadas, que podem contribuir para entender e mitigar os efeitos da perda e fragmentação de habitat sobre a biodiversidade global, especialmente no atual cenário de mudanças climáticas e de perda global de espécies. Além disso, este trabalho se propõe a ser uma interface entre os estudos puramente climatológicos e os estudos puramente ecológicos, fornecendo embasamento teórico para a compreensão dos efeitos da fragmentação de habitat sobre o clima para ambos os campos acadêmicos.

REFERÊNCIAS

- ALKAMA, S.; CESCATTI, A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science.*, v. 351, n. 6273, p. 600-604, Feb. 2016.
- ANDERSON, R.G. et al. Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Front. Ecol. Environ.*, v. 9, n. 3, p. 174–182, Apr. 2011.
- ARROYO-RODRÍGUEZ, V. et al. Does forest fragmentation cause an increase in forest temperature? *Ecol. Res.*, v. 32, n. 1, p. 81-88, Nov. 2016.
- AVISSAR, R.; LIU, Y. Three-dimensional numerical study of shallow convective clouds and precipitation induced by land surface forcing. *J. Geophys. Res.*, v. 101, n. D3, p. 7499-7518, Mar. 1996.
- AVISSAR, R.; SCHMIDT, T. An Evaluation of the Scale at which Ground-Surface Heat Flux Patchiness Affects the Convective Boundary Layer Using Large-Eddy Simulations. *J. Atmos. Sci.*, v. 55, n. 16, p. 2666-2689, Aug. 1998.
- BALDOCCHI, D. et al. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. *Global. Change. Biol.*, v. 6, n. S1, p. 69-83, Oct. 2008.
- BARTON, K. *MuMIn*: Multi-Model Inference. R package version 1.40.4. 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/MuMIn/MuMIn.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2018.
- BERBET, M.L.C.; COSTA, M.H. Climate Change after Tropical Deforestation: Seasonal Variability of Surface Albedo and Its Effects on Precipitation Change. *J. Clim.*, v. 16, n. 12, p. 2009-2014, June 2003.
- BETTS, A.K.; BALL, J.H. Albedo over the boreal forest. *J. Geophys. Res.*, v. 102, n. D24, p. 28901–28909, Dec. 1997.
- BIVAND, R. et al. *rgdal*: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. R package version 1.3-3. 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2018.
- BONAN, G.B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science.*, v. 320, n. 5882, p. 1444-1449, June 2008.
- BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretical Approach*. New York: Springer-Verlag, 2002.
- CAMARGO, J.L.C.; KAPOS, V. Complex edge effects on soil moisture and microclimate in central Amazonian forest. *J. Trop. Ecol.*, v. 11, n. 2, p. 205-221, May 1995.
- CHEN, J.; FRANKLIN, T.F.; SPIES, T.A. Vegetation responses to edge environments in old-growth Douglas-fir forest. *Ecol. Appl.*, v. 2, n. 4, p. 387-396, Nov. 1992.

- CHEN, J.; FRANKLIN, T.F.; SPIES, T.A. Growing-season microclimatic gradients from clearcut edges into old-growth Douglas-fir forest. *Ecol. Appl.*, v. 5, n. 1, p. 74-86, Feb. 1995.
- CHEN, J. et al. Microclimate in forest ecosystem and landscape ecology - Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *Bioscience.*, v. 49,n. 4, p. 288–297, April 1999.
- COCHRANE, M.A.; LAURANCE, W.F. Synergisms among Fire, Land Use, and Climate Change in the Amazon. *Ambio.*, v. 37, n. 7, p. 522-527, Dec. 2008.
- CORLETT, R.T. Forest fragmentation and climate change. In: KETTLE, C.J.; KOH, L.P. (Ed.). *Global Forest Fragmentation*. Wallingford: CAB International, 2014. p. 69-78.
- DIDHAM, R.K.; EWERS, R.M. Edge Effects Disrupt Vertical Stratification of Microclimate in a Temperate Forest Canopy. *Pac. Sci.*, v. 68, n. 4, p. 493-508, Feb. 2014.
- DIDHAM, R.K.; LAWTON, J.H. Edge Structure Determines the Magnitude of Changes in Microclimate and Vegetation Structure in Tropical Forest Fragments. *Biotropica.*, v. 31, n. 1, p. 17–30, Mar. 1999.
- DINIZ-FILHO, J.A.F.; BINI, L.M.; HAWKINS, B.A. Spatial autocorrelation and red herrings in geographical ecology. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, v. 12, n.1, p. 53–64, Jan. 2003.
- DUVEILLER, G.; HOOKER, J.; CESCATTI, A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nat. Commun.*, v. 9, n. 679, p. 1-12, Feb. 2018.
- EWERS, R.M.; BANKS-LEITE, C. Fragmentation Impairs the Microclimate Buffering Effect of Tropical Forests. *PLOS.One.*, v. 8, n. 3, e58093, Mar. 2013.
- EWERS, R.M.; DIDHAM, R.K. Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biol. Rev.*, v. 81, n. 1, p. 117-142, Feb. 2006.
- EWERS, R.M.; MARSCH, C.J.; WEARN, O.R. Making statistics biologically relevant in fragmented landscapes. *Trends. Ecol. Evol.*, v. 25, n. 12, p. 699–704, Dec. 2010.
- FAHRIG, L. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, v. 34, p. 487-515, Aug. 2003.
- FAHRIG, L. Ecological Responses to Habitat Fragmentation per Se. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, v. 48, p. 1-23, May 2017.
- FETCHER, N.; OBERBAUER, S.F.; STRAIN, B.R. Vegetation effects on microclimate in lowland tropical forest in Costa Rica. *Int. J. Biometeor.*, v. 29, n. 2, p. 145-155, Jan. 1985.
- FERREIRA, L.V.; LAURANCE, W.F. Effects of Forest Fragmentation on Mortality and Damage of Selected Trees in Central Amazonia. *Conserv. Biol.*, v. 11, n.3, p. 797-801, June 1997.

- FLETCHER, R. et al. A critical evaluation of ecological responses to habitat fragmentation. *J. Appl. Ecol.*, v. 226, p. 9-15, July 2018.
- FRIEDL, M.A. et al. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote. Sens. Environ.*, v. 114, n. 1, p. 168-182, Jan. 2010.
- GIAMBELLUCA, T.W. et al. Observations of albedo and radiation balance over post-forest land-surfaces in the eastern Amazon Basin. *Journal of Climate*, v. 10, n. 5, p. 919-928, May. 1997.
- GEIGER, R.; ARON, R.H.; TODHUNTER, P. *The climate near the ground*. Lanham: Rowman and Littlefield Publishers, 2003.
- GESCH, D.B.; VERDIN, K.L.; GREENLEE, S.K. New Land Surface Digital Elevation Model Covers the Earth. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union.*, v. 80, n. 6, p. 69-70, Feb. 1999.
- GRACE, J.B. *Structural Equation Modeling and Natural Systems*. New York: Cambridge University Press, 2006.
- GRACE, J.B. Structural Equation Modeling for Observational Studies. *J. Wildl. Manag.*, v. 72, n. 1, p. 14-22, Jan. 2008.
- HADDAD, N.M. et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Sci. Adv.*, v. 1, n.2, e1500052, Mar. 2015.
- HANSEN, M.C.; STEHMAN, S.V.; POTAPOV, P.V. Quantification of global gross forest cover loss. *PNAS*, v. 107, n. 19, p. 8650-8655, May 2010.
- HANSEN, M.C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, v. 342, n. 6160, p. 850-853, Nov. 2013.
- HENNENBERG, K.J. et al. Detection of seasonal variability in microclimatic borders and ecotones between forest and savanna. *Basic. Appl. Ecol.*, v. 9, n.3, p. 275-285, May 2008.
- HIJMANS, R.J. et al. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. R package version 2.6-7. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2017.
- HONG, X.; LEACH, M.J.; RAMAN, S. Role of vegetation in generation of mesoscale circulation. *Atmos. Environ.*, v. 29, n. 16, p. 2163-2176, Aug. 1995.
- HOUSPANOSSIAN, J.; NOSETTO, M.; JOBBÁGY, E. G. Radiation budget changes with dry forest clearing in temperate Argentina. *Global. Change. Biol.*, v. 19, n.4, p. 1211-1222, Apr. 2013.
- JACKSON, R.B. et al. Protecting climate with forests. *Environ. Res. Lett.*, v. 3, n. 4, 044006, Nov. 2008.
- KAPOS, V. Effects of isolation on the water status of forest patches in the Brazilian Amazon. *J. Trop. Ecol.*, v. 5, n. 2, p. 173-185, May 1989.

- KHARUK, V.; RANSON, K.; DVINSKAYA, M. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in Central Siberia. *Eur. J. For. Res.*, v. 10, n. 2, p. 163–171, Jan. 2007.
- KERBAUY, G.B. *Fisiologia Vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.
- KUPFER, J.A.; MALANSON, G.P.; FRANKLIN, S.B. Not seeing the ocean for the islands: the mediating influence of matrix-based processes on forest fragmentation effects. *Global. Ecol. Biogeogr.*, v. 15, n. 1, p. 8–20, Jan. 2006.
- LAURANCE, W.F. Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. *Philos. Trans. R. Soc.Lond. B. Biol. Sci.*, v.359, n. 1443, p. 345–352, Mar. 2004.
- LAFORTEZZA, R. et al. Assessing the impacts of forest fragmentation in New Zealand: scaling from survey plots to landscapes. *Global. Ecol. Biogeogr.*, v. 19, n. 5, p. 741–754, Aug. 2010.
- LI, Y. et al. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nat. Commun.*, v. 6, n. 6603, p. 1-8, Mar. 2015.
- LI, Y. et al. Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature. *J. Geophys. Res-Atmos.*, v. 121, n. 1, p. 14372–14386, Dec. 2016.
- LIANG, Q.L. *Albedo Product Data Collection (1985-2010)*. Beijing: Beijing Normal University, 2012. Global Land Surface Products
- LIU, N.F. et al. A statistics-based temporal filter algorithm to map spatiotemporally continuous shortwave albedo from MODIS data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 17, n. 6, p. 2121–2129, Jun. 2013.
- LIU, Q. et al. Preliminary evaluation of the long-term GLASS albedo product. *Int.J. Digit.Earth.*, v. 6, n. 1, p. 69-95, Jun. 2013.
- LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology*, v. 74, n. 6, p. 1659-1673, Sep. 1993.
- MALCOM, J.R. Edge effects of central Amazonian forest fragments. *Ecology*, v. 75, n. 8, p. 2438–2445, Dec. 1994.
- MAGNANO, L.F.S. et al. Microclimatic conditions at forest edges have significant impacts on vegetation structure in large Atlantic forest fragments. *Int. J. Biodivers. Conserv.*, v. 24, n. 9, p. 2305–2318, Sep. 2015.
- MATLACK, G.R. Microenvironment variation within and among forest edge sites in the eastern United States. *Biol. Cons.*, v. 66, n. 3, p. 185-194, Dec. 1993.
- MCGARIGAL, K.; CUSHMAN, S.A. Comparative evaluation of experimental approaches to the study of habitat fragmentation effects. *Ecol. Appl.*, v. 12, n. 2, p. 335–345, Apr. 2002.
- MILIAREISIS, G.C.; ARGIALAS, D.P. Quantitative representation of mountain objects extracted from the global digital elevation model (GTOPO30). *Int. J. Remote Sens.*, v. 23, n. 5, p. 949–964, Mar. 2002.

- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.*, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, Aug. 2011.
- MURCIA, C. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *TREE*, v. 10, n. 2, p. 58-62, Feb. 1995.
- NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool>. Acesso em: 11 julho 2017.
- PENG, S. et al. Afforestation in China cools local land surface temperature. *PNAS*, v. 111, n. 8, p. 2915–2919, Feb. 2014.
- POHLMAN, C.L.; TURTON, S.M.; GOOSEM, M. Edge effects of linear canopy openings on tropical rain forest understory microclimate. *Biotropica*, v. 39, n.1, p. 62–71, Jan. 2007.
- PINHEIRO, J. et al. *nlme*: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-137. 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/nlme.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- R Development Core Team. *A language and environment for statistical computing*. Version 3.4.2. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 13 mar. 2017.
- RANNEY, J. W.; BRUNER, M. C.; LEVENSON, J. B. The importance of edge in the structure and dynamics of forest islands. In: BURGESS, R. L.; SHARPE, D. M. (Ed.). *Forest island dynamics in Man-dominated landscapes*. New York: Springer-Verlag, 1981. p. 67-95.
- ROBINSON, G.R. et al. Diverse and Contrasting Effects of Habitat Fragmentation. *Science*, v. 257, n. 5069, p. 524-526, July 1992.
- ROSADO, B.H.P. et al. Diversity in nighttime transpiration behavior of woody species of the Atlantic Rain Forest, Brazil. *Agri. For. Meteorol.*, v. 158-159, n. 1, p. 13– 20, Jun. 2012.
- ROSSEEL, Y. et al. *lavaan*: Latent Variable Analysis. R package version 0.6-1. 2018. Disponível em: <<http://users.ugent.be/~yrosseel/lavaan/lavaanIntroduction.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- RUNNING, S.W. et al. *User's Guide: MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm*. Version 1.0. Sioux Falls: NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017.
- SAUNDERS, D.A.; HOBBS, R.J.; MARGULES, C.R. Biological Consequences of Ecosystem Fragmentation: A Review. *Conserv. Biol.*, v. 5, n. 1, p. 18-32, Mar. 1991.
- SAUNDERS, S.C. et al. Modeling temperature gradients across edges over time in a managed landscape. *Forest. Ecol. Manag.*, v. 117, n. 1-3, p. 17–31, May 1999.

- SCHUMAN, J.K.; SCHUGART, H.H.; O'HALLORAN, T.L. Sensitivity of Siberian larch forests to climate change. *Global. Change. Biol.*, v. 17, n. 7, p. 2370–2384, Apr. 2011.
- SCHUTTLEWORTH, W.J. Tropical Deforestation: Albedo and the Surface-Energy Balance. *Clim. Change.*, v. 19, n. 1, p. 123-133, Sep. 1991.
- SEYLER, F. et al. Watershed delineation for the Amazon sub-basin system using GTOPO30 DEM and a drainage network extracted from JERS SAR images. *Hydrol. Process.*, v. 23, n. 22, p. 3173–3185, Oct. 2009.
- SNYDER, P.K.; DELIRE, C.; FOLEY, J.A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Clim. Dynam.*, v. 23, n. 3-4, p. 279–302, Sep. 2004.
- SENEVIRATNE, S.I. et al. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.*, v. 99, n. 3-4, p. 125–161, May 2010.
- TUFF, K.T.; TUFF, T.; DAVIES, K.F. A framework for integrating thermal biology into fragmentation research. *Ecol. Lett.*, v. 19, n. 4, p. 361-374, Apr. 2016.
- TURNER, M.G.; GARDNER, R.G.; O'NEILL, R.V. *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. New York: Springer, 2001.
- TROPEK, R. et al. Comment on “High-resolution global maps of 21st-century forest cover change”. *Science*, v. 344, n. 6187, p. 981, May 2014.
- EROS US Geological Survey. *GTPO30 Global Digital Elevation Model*. Sioux Falls, South Dakota: EROS Data Center, 1996. GTPO30.
- WEST, P.C. et al. An alternative approach for quantifying climate regulation by ecosystems. *Front. Ecol. Environ*, v. 9, n. 2, p. 126-133, Feb. 2010.
- WANG, Z. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface. *Remote. Sens. Environ.*, v.112, n.1, p. 59–74, Jan. 2008.
- WICKHAM, H. *reshape*: Flexibly Reshape Data. R package version 0.8.7. 2017a. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/reshape/reshape.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.
- WICKHAM, H. *scales*: Scale Functions for Visualization. R package version 0.5.0. 2017b. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/scales/scales.pdf>>. Acesso em: 3 set. 2017.
- WILCOVE, D.S.; MCLELLAN, C.H.; DOBSON, A.P. (1986). Habitat fragmentation in the temperate zone. In: SOULÉ, M.E. (Ed.), *Conservation Biology*, Sunderland: Sinauer, 1986. p. 237–256.
- WILSON, M.C. et al. Habitat fragmentation and biodiversity conservation: key findings and future challenges. *Landscape. Ecol.*, v. 31, n. 2, p. 219-227, Feb. 2016.
- WILLIAMS-LINERA, G. Vegetation Structure and Environmental Conditions of Forest Edges in Panama. *J. Ecol.*, v. 78, n. 2, p. 356-373, Jun. 1990.

YAN, M.; ZHONG, Z; LIU, J. Habitat fragmentation impacts on biodiversity of evergreen broadleaved forests in Jinyun Mountains, China. *Front. Biol. (Beijing)*, v. 2, n. 1, p. 62–68, Mar. 2007.

YOUNG, A.; MITCHELL, N. Microclimate and vegetation edge effects in fragmented podocarp-broadleaf forest in New Zealand. *Biol. Cons.*, v. 67, n. 1, p. 63-72, Dec. 1994.

ZUUR, A. et al. Mixed effects models and extensions in Ecology with R. In: GAIL, R.M. et al. (Ed.), *Statistics for Biology and Health*. New York: Springer, 2009. p 938-939.

APÊNDICE A - Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas (sem controle da autocorrelação espacial)

Tabela 1- Efeito da fragmentação de habitat sobre as variáveis LST nas regiões climáticas, com limiares de 10 e 30 manchas e sem controle da autocorrelação espacial (continua)

Limiar de 10 manchas					
Região*	Variável LST (°C)	Efeito total da fragmentação (ΔF) sobre a LST	σ (F)	σ (Variável LST)	Mudança na variável LST (°C) (Aquecimento/Resfriamento)
Tropical	Temperatura média diária	-0.39	103.1	0.83	-0.31
	Temperatura diurna	-0.41	103.1	1.42	-0.57
	Temperatura noturna	-0.08	103.1	0.75	-0.06
Temperada	Temperatura média diária	-0.23	76.2	0.62	-0.19
	Temperatura diurna	-0.30	76.2	1.20	-0.47
	Temperatura noturna	0.09	76.2	0.76	0.09
Boreal	Temperatura média diária	-0.04	60.5	0.44	-0.03
	Temperatura diurna	-0.09	60.5	0.65	-0.10
	Temperatura noturna	0.03	60.5	0.65	0.03

Tabela 1 - Efeito da fragmentação de habitat sobre as variáveis LST nas regiões climáticas, com limiares de 10 e 30 manchas e sem controle da autocorrelação espacial (continuação)

Limiar de 30 manchas					
Região*	Variável LST (°C)	Efeito total da fragmentação (ΔF) sobre a LST	σ (F)	σ (Variável LST)	Mudança na variável LST(°C) (Aquecimento/Resfriamento)
Tropical	Temperatura média diária	-0.33	102.2	0.85	-0.27
	Temperatura diurna	-0.35	102.2	1.50	-0.51
	Temperatura noturna	-0.04	102.2	0.80	-0.03
Temperada	Temperatura média diária	-0.2	77.8	0.61	-0.16
	Temperatura diurna	-0.27	77.8	1.20	-0.42
	Temperatura noturna	0.09	77.8	0.75	0.09
Boreal	Temperatura média diária	-0.02	70.6	0.45	-0.01
	Temperatura diurna	-0.09	70.6	0.68	-0.09
	Temperatura noturna	0.06	70.6	0.67	0.06

Tabela 1 - Efeito da fragmentação de habitat sobre as variáveis LST nas regiões climáticas, com limiares de 10 e 30 manchas e sem controle da autocorrelação espacial (conclusão)

Legenda: a magnitude do efeito total da fragmentação (ΔF) sobre as variáveis LST ($^{\circ}\text{C}$) foi estimada a partir da soma dos efeitos diretos e indiretos dos modelos globais de caminhos, e do desvio-padrão (σ) da variável LST e da ΔF . Foi considerado um $\Delta F = 100$ (fragmentação de uma mancha única de floresta em uma paisagem de 100 manchas) como critério para avaliar a mudança na variável LST (aquecimento/resfriamento) para limiares de 10 e 30 manchas.

* Tropical = 20°S - 20°N ; Temperada = 20°S - 50°S e 20°N - 50°N ; Boreal = $>50^{\circ}\text{S}$ e $>50^{\circ}\text{N}$.

Fonte: A autora, 2018

APÊNDICE B- Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos nas regiões climáticas

Tabela 2 - Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região tropical (continua)

Tropical (20°S-20°N)														
Temperatura média diária					Temperatura diurna					Temperatura noturna				
LST					LST					LST				
Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi
corExp	6	-961.33	0.00	1	corExp	6	-907.04	0.00	0.999	corExp	6	-1103.53	0.00	0.924
corRatio	6	-974.17	25.68	0	corSpher	6	-914.18	14.29	0.001	corRatio	6	-1106.5	5.94	0.047
corGaus	6	-984.56	46.45	0	corRatio	6	-918.7	23.31	0.000	corLin	6	-1107.01	6.96	0.028
Nenhuma	5	-988.26	51.81	0	corGaus	6	-932.02	49.96	0.000	corGaus	6	-1114.17	21.28	0.000
corLin	6	-987.71	52.75	0	Nenhuma	5	-934.97	53.84	0.000	Nenhuma	5	-1128.08	47.08	0.000
corSpher	6	-988.25	53.83	0	corLin	6	-934.38	54.68	0.000	corSpher	6	-1128.08	49.11	0.000
Albedo					Albedo					Albedo				
Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi
corExp	4	-984.03	0.00	1	corExp	4	-984.03	0.00	1	corExp	4	-984.03	0.00	1
corLin	4	-999.02	29.98	0	corRatio	4	-999.05	30.03	0	corLin	4	-999.05	30.03	0
corRatio	4	-1010.88	53.69	0	corGaus	4	-1010.88	53.69	0	corRatio	4	-1010.88	53.69	0
corGaus	4	-1049.08	130.09	0	Nenhuma	4	-1049.08	130.09	0	corGaus	4	-1049.08	130.09	0
Nenhuma	3	-1127.9	285.71	0	corLin	3	-1127.9	285.71	0	Nenhuma	3	-1127.9	285.71	0
corSpher	4	-1127.89	287.72	0	corSpher	4	-1127.89	287.72	0	corSpher	4	-1127.89	287.72	0
Evapotranspiração					Evapotranspiração					Evapotranspiração				
Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi
corExp	5	-1042.01	0.00	1	corExp	5	-1042.01	0.00	1	corExp	5	-1042.01	0.00	1
corSpher	5	-1053.36	22.68	0	corSpher	5	-1053.36	22.68	0	corSpher	5	-1053.36	22.68	0

Tabela 2 - Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região tropical (conclusão)

Tropical (20°S-20°N)														
Evapotranspiração					Evapotranspiração					Evapotranspiração				
Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi
corRatio	5	-1054.61	25.20	0	corRatio	5	-1054.61	25.20	0	corRatio	5	-1054.61	25.20	0
corLin	5	-1056.15	28.28	0	corLin	5	-1056.15	28.28	0	corLin	5	-1056.15	28.28	0
corGaus	5	-1070.03	56.04	0	corGaus	5	-1070.03	56.04	0	corGaus	5	-1070.03	56.04	0
Nenhuma	4	-1080.48	74.92	0	Nenhuma	4	-1080.48	74.92	0	Nenhuma	4	-1080.48	74.92	0

Legenda: para cada submodelo dos modelos globais de caminhos, há seis versões alternativas de estruturas de autocorrelação que contém as mesmas variáveis explicativas (ΔF , Δ albedo e ΔET). As versões de estruturas são a esférica (corSpher), linear (corLin), quadrática racional (corRatio), gaussiana (corGaus), ou exponencial (corExp). O modelo sem estrutura de autocorrelação é o modelo nulo (Nenhuma). O ajuste dos modelos com diferentes estruturas de autocorrelação foram comparados através da seleção de modelos baseada no AICc. df, graus de liberdade; AICc, Critério de Informação de Akaike corrigido; Δ AICc, máximo AICc - mínimo AICc; wi, peso do Critério de Akaike.

Fonte: A autora, 2018

Tabela 3 - Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região temperada (continua)

Temperada (20°S-50°S e 20°N-50°N)														
Temperatura média diária					Temperatura diurna					Temperatura noturna				
LST					LST					LST				
Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi
corRatio	6	-1044.8	0.00	0.412	corRatio	6	-1115.51	0.00	0.812	corExp	6	-1070.18	0.00	0.980
corExp	6	-1044.51	0.29	0.356	corExp	6	-1117.1	3.18	0.166	corRatio	6	-1074.05	7.75	0.020
corSpher	6	-1046.37	3.13	0.086	corGaus	6	-1119.69	8.37	0.012	corGaus	6	-1079.95	19.55	0.000
corGaus	6	-1046.75	3.88	0.059	corLin	6	-1120.45	9.89	0.006	Nenhuma	5	-1084.6	26.82	0.000
corLin	6	-1047.05	4.49	0.044	corSpher	6	-1120.8	10.58	0.004	corLin	6	-1084.6	28.84	0.000
Nenhuma	5	-1048.1	4.55	0.042	Nenhuma	5	-1123.91	14.76	0.001	corSpher	6	-1084.6	28.85	0.000
Albedo					Albedo					Albedo				
Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi
corExp	4	-1114.7	0.00	0.995	corExp	4	-1120.5	0.00	0.692	corRatio	4	-1127.22	0.00	0.993
corRatio	4	-1119.98	10.56	0.000	corRatio	4	-1121.31	1.62	0.308	corExp	4	-1132.17	9.91	0.007
corSpher	4	-1134.64	39.88	0.000	corGaus	4	-1131.73	22.46	0.000	corGaus	4	-1137.58	20.72	0.000
corGaus	4	-1146.07	62.75	0.000	corLin	4	-1132.33	23.67	0.000	corSpher	4	-1139.45	24.46	0.000
Nenhuma	3	-1177.25	123.10	0.000	Nenhuma	4	-1134.49	25.96	0.000	corLin	4	-1140.05	25.67	0.000
					corSpher	3	-1134.49	27.98	0.000	Nenhuma	3	-1155	53.55	0.000
Evapotranspiração					Evapotranspiração					Evapotranspiração				
Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi	Estrutura	df	AICc	Δ AICc	wi
corRatio	5	-1053.15	0.00	0.578	corExp	5	-1067.76	0.00	0.918	corExp	5	-1153.65	0.00	0.799
corExp	5	-1054.54	2.78	0.144	corRatio	5	-1070.79	6.07	0.044	corRatio	5	-1155.03	2.76	0.201
corGaus	5	-1054.58	2.87	0.138	corGaus	5	-1079.1	6.46	0.036	corGaus	5	-1164.66	22.02	0.000
corSpher	5	-1054.81	3.32	0.110	Nenhuma	4	-1076.04	14.53	0.001	Nenhuma	4	-1196.01	82.69	0.000
Nenhuma	4	-1057.1	5.88	0.031	corLin	5	-1076.03	16.55	0.000	corLin	5	-1196	84.71	0.000
					corSpher	5	-1076.04	16.56	0.000	corSpher	5	-1196.01	84.71	0.000

Tabela 3 - Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região temperada (conclusão)

Legenda: resumo do ajuste dos modelos com diferentes estruturas de autocorrelação através da seleção de modelos baseada no AICc. df, graus de liberdade; AICc, Critério de Informação de Akaike corrigido; Δ AICc, máximo AICc - mínimo AICc; w_i , peso do Critério de Akaike. A ausência de alguma estrutura de autocorrelação indica que aquela estrutura não foi incluída automaticamente nas análises pelo ambiente R no processo de seleção de modelos.

Fonte: A autora, 2018

Tabela 4 - Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região boreal (continua)

Boreal (>50°S e >50°N)														
Temperatura média diária					Temperatura diurna					Temperatura noturna				
LST					LST					LST				
Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi
corGaus	6	-1093.13	0.00	0.256	corRatio	6	-1164.88	0.00	0.559	corRatio	6	-1140.57	0.00	0.633
corRatio	6	-1093.19	0.12	0.241	corExp	6	-1165.12	0.49	0.437	corExp	6	-1141.95	2.76	0.159
corExp	6	-1093.49	0.72	0.178	corLin	6	-1170.13	10.51	0.003	corGaus	6	-1142.22	3.30	0.121
corLin	6	-1093.53	0.80	0.172	corGaus	6	-1171.1	12.45	0.001	corLin	6	-1142.84	4.55	0.065
Nenhuma	5	-1094.97	1.66	0.112	Nenhuma	5	-1179.34	26.90	0.000	Nenhuma	5	-1145.28	7.38	0.016
corSpher	6	-1094.97	3.67	0.041	corSpher	6	-1179.34	28.92	0.000	corSpher	6	-1145.27	9.41	0.006
Albedo					Albedo					Albedo				
Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi
corExp	4	-1064.35	0.00	0.879	corExp	4	-1100.83	0.00	0.951	corLin	4	-1060.73	0.00	0.235
corRatio	4	-1066.87	5.03	0.071	corRatio	4	-1103.37	5.97	0.048	corSpher	4	-1060.88	0.30	0.203
corSpher	4	-1067.52	6.34	0.037	corGaus	4	-1107.68	14.59	0.001	corGaus	4	-1060.95	0.45	0.188
corLin	4	-1068.59	8.48	0.013	Nenhuma	4	-1109.02	17.28	0.000	corRatio	4	-1061.33	1.21	0.129
corGaus	4	-1072.29	15.88	0.000	corLin	4	-1109.38	18.00	0.000	Nenhuma	3	-1062.37	1.26	0.125
Nenhuma	3	-1078.01	25.29	0.000	corSpher	3	-1118.65	34.51	0.000	corExp	4	-1061.4	1.34	0.120
Evapotranspiração					Evapotranspiração					Evapotranspiração				
Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi	Estrutura	df	AICc	ΔAICc	wi
corExp	5	-1061.4	0.00	0.775	corExp	5	-1106.46	0.00	0.999	Nenhuma	4	-1090.27	0.00	0.296
corRatio	5	-1062.77	2.73	0.198	corRatio	5	-1113.21	13.48	0.001	corLin	5	-1089.77	1.03	0.177
corGaus	5	-1065.45	8.10	0.014	corGaus	5	-1112	31.08	0.000	corGaus	5	-1089.9	1.27	0.157
Nenhuma	4	-1066.83	8.84	0.009	Nenhuma	4	-1130.05	45.15	0.000	corSpher	5	-1089.96	1.40	0.147
corSpher	5	-1066.84	10.87	0.003	corLin	5	-1130.01	47.08	0.000	corExp	5	-1090.21	1.91	0.114
					corSpher	5	-1130.05	47.17	0.000	corRatio	5	-1090.27	2.02	0.108

Tabela 4 - Performance das estruturas de autocorrelação dos submodelos da análise de caminhos na região boreal (conclusão)

Legenda: resumo do ajuste dos modelos com diferentes estruturas de autocorrelação através da seleção de modelos baseada no AICc. df, graus de liberdade; AICc, Critério de Informação de Akaike corrigido; Δ AICc, máximo AICc - mínimo AICc; w_i , peso do Critério de Akaike. A ausência de alguma estrutura de autocorrelação indica que aquela estrutura não foi incluída automaticamente nas análises pelo ambiente R no processo de seleção de modelos.

Fonte: A autora, 2018

APÊNDICE C - Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 10 manchas e controle da autocorrelação espacial

Tabela 5 - Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas com limiar de 10 manchas e controle da autocorrelação espacial (continua)

Tropical (20°S-20°N)						
Variável LST (°C)	Efeito da ΔF sobre a LST	σ (F)	σ (Variável LST)	Mudança na variável LST (°C) (Aquecimento/Resfriamento)	Variável climática	Estrutura
Temperatura média diária	-0.33	103.1	0.83	-0.26	Temperatura (°C)	corExp
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Temperatura diurna	-0.34	103.1	1.42	-0.47	Temperatura (°C)	corExp
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Temperatura noturna	-0.01	103.1	0.75	-0.07	Temperatura (°C)	corExp
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Temperada (20°S-50°S e 20°N-50°N)						
Variável LST (°C)	Efeito da ΔF sobre a LST	σ (F)	σ (Variável LST)	Mudança na variável LST (°C) (Aquecimento/Resfriamento)	Variável climática	Estrutura

Tabela 5 - Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas com limiar de 10 manchas e controle da autocorrelação espacial (continuação)

Temperada (20°S-50°S e 20°N-50°N)						
Variável LST (°C)	Efeito da ΔF sobre a LST	σ (F)	σ (Variável LST)	Mudança na variável LST (°C) (Aquecimento/Resfriamento)	Variável climática	Estrutura
Temperatura média diária	-0.20	76.2	0.62	-0.16	Temperatura (°C)	corRatio
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corRatio
Temperatura diurna	-0.24	76.2	1.20	-0.38	Temperatura (°C)	corRatio
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Temperatura noturna	0.05	76.2	0.76	0.05	Temperatura (°C)	corExp
					Albedo	corRatio
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Boreal (>50°S e >50°N)						
Variável LST (°C)	Efeito da ΔF sobre a LST	σ (F)	σ (Variável LST)	Mudança na variável LST (°C) (Aquecimento/Resfriamento)	Variável climática	Estrutura

Tabela 5 - Efeito da fragmentação de habitat sobre a LST nas regiões climáticas com limiar de 10 manchas e controle da autocorrelação espacial (conclusão)

Variável LST (°C)	Efeito da ΔF sobre a LST	σ (F)	Boreal (>50°S e >50°N)		Variável climática	Estrutura
			σ (Variável LST)	Mudança na variável LST (°C) (Aquecimento/Resfriamento)		
Temperatura média diária	-0.05	60.5	0.44	-0.04	Temperatura (°C)	corGaus
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Temperatura diurna	-0.07	60.5	0.65	-0.08	Temperatura (°C)	corRatio
					Albedo	corExp
					Evapotranspiração (mm/mês)	corExp
Temperatura noturna	0.02	60.5	0.65	0.02	Temperatura (°C)	corRatio
					Albedo	corLin
					Evapotranspiração (mm/mês)	Nenhuma

Legenda: a magnitude do efeito total da fragmentação (ΔF) sobre as variáveis LST (°C) foi estimada a partir da soma dos efeitos diretos e indiretos dos modelos globais de caminhos, e do desvio-padrão (σ) da variável LST e da ΔF . Foi considerado um $\Delta F = 100$ (fragmentação de uma mancha única de floresta em uma paisagem de 100 manchas) como critério para avaliar a mudança na variável LST (aquecimento/resfriamento) para o limiar de 10 manchas. As versões de estruturas são a esférica (corSpher), linear (corLin), quadrática racional (corRatio), gaussiana (corGaus), ou exponencial (corExp). O modelo sem estrutura de autocorrelação é o modelo nulo (Nenhuma). O ajuste dos submodelos com diferentes estruturas de autocorrelação envolvendo as variáveis climáticas foram comparados através da seleção de modelos baseada no AICc.

Fonte: A autora, 2018

APÊNDICE D - Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiares de 10 e 30 manchas (sem controle da autocorrelação espacial)

Figura 4 - Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 10 manchas (sem controle da autocorrelação espacial) (continua)

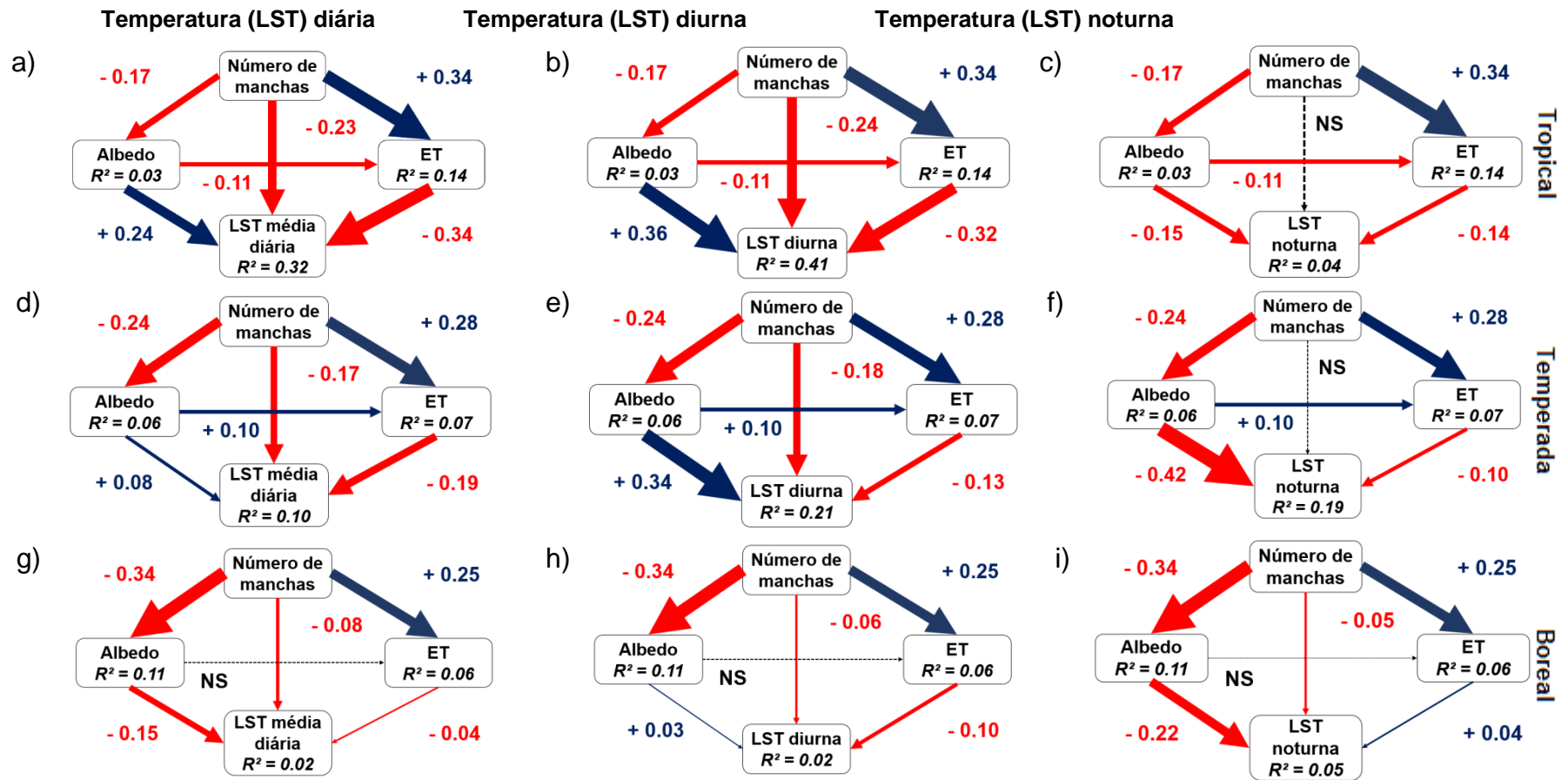
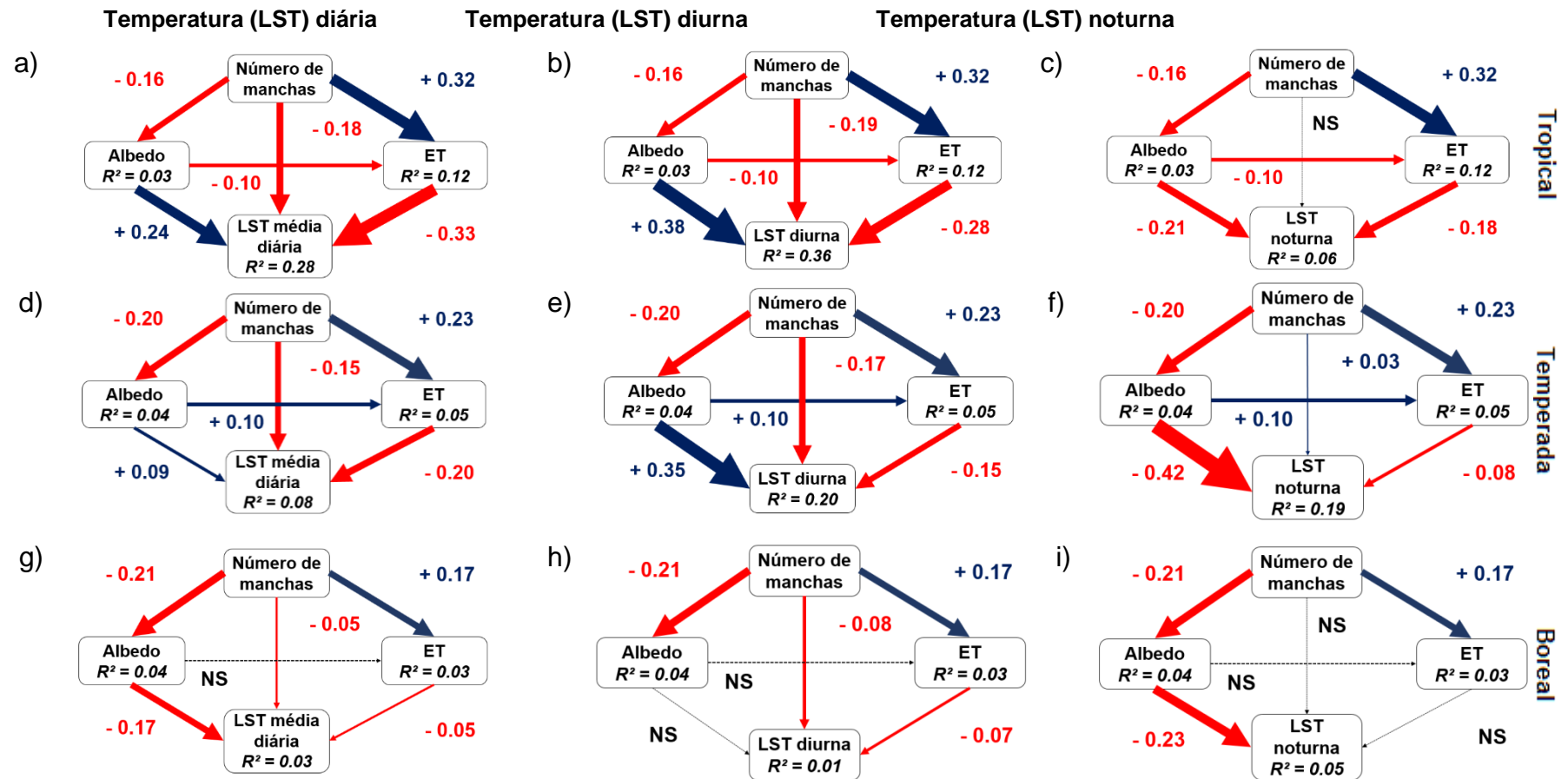


Figura 4 - Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 10 manchas (sem controle da autocorrelação espacial) (conclusão)

Legenda: (a)-(c) modelos da região tropical; (d)-(f) modelos da região temperada; (h)-(j) modelos da região boreal. Efeitos indiretos do número de manchas são mediados pela evapotranspiração (ET) e pelo albedo. As setas são proporcionais aos coeficientes padronizados das análises de caminhos (números). Setas azuis e vermelhas indicam, respectivamente, relações positivas e negativas. Os coeficientes para relações não significativas (NS; $P < 0.05$) foram ocultados. Os valores de R^2 indicam o coeficiente de determinação das variáveis resposta.

Fonte: A autora, 2018

Figura 5 - Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 30 manchas (sem controle da autocorrelação espacial) (continua)



Legenda: (a)-(c) modelos da região tropical; (d)-(f) modelos da região temperada; (h)-(i) modelos da região boreal. Efeitos indiretos do número de manchas são mediados pela evapotranspiração (ET) e pelo albedo. As setas são proporcionais aos coeficientes padronizados das análises de caminhos (números). Seta azuis e vermelhas indicam, respectivamente, relações positivas e negativas. Os coeficientes para relações não significativas (NS; $P < 0.05$) foram ocultados.

Figura 5 - Modelos globais de caminhos diretos e indiretos da fragmentação sobre a LST nas regiões climáticas, com limiar de 30 manchas (sem controle da autocorrelação espacial) (conclusão)

Os valores de R^2 indicam o coeficiente de determinação das variáveis resposta.

Fonte: A autora, 2018