

Serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista: tendências espaço-temporais e desafios para o planejamento territorial

*Priscila Ikematsu
José Alberto Quintanilha*

Resumo

O artigo analisa a oferta de serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista (MMP), região marcada por intenso crescimento urbano e desenvolvimento econômico. Nesse contexto, a urbanização é um dos principais vetores de mudança ambiental, afetando significativamente a qualidade e disponibilidade desses serviços. Para apoiar a formulação de políticas públicas, o estudo realizou uma avaliação espaço-temporal, individual e integrada, de quatro serviços ecossistêmicos em dois anos históricos (1985 e 2015) e dois cenários tendenciais (2030 e 2050). Utilizando modelagem, mapeamentos e análises espaciais, foram identificadas interações entre os serviços, com destaque para trade-offs, sinergias e áreas de alta (hotspots) e baixa (coldspots) oferta de serviços ecossistêmicos. Os resultados indicam tendência de declínio na capacidade de controle de erosão, armazenamento de carbono e regulação hídrica, além de baixos valores de provisão de habitat ao longo do período analisado. As Regiões Metropolitanas do Vale do Paraíba/Litoral Norte e da Baixada Santista destacam-se por apresentar elevados índices de serviços ecossistêmicos. Essas áreas de alta oferta coincidem, em grande parte, com Unidades de Conservação, reforçando sua importância e sinalizando regiões estratégicas para a criação

de novas áreas protegidas ou ações governamentais de conservação. O estudo também aponta desafios para a integração dos serviços ecossistêmicos no planejamento da MMP, como a heterogeneidade territorial, limitações na modelagem ambiental e complexidade na governança. Os achados são relevantes para orientar estratégias de conservação e recuperação ambiental, promovendo uma abordagem integrada para a gestão desses serviços em uma região estratégica do Brasil.

Palavras-chave: Mudança no Uso da Terra; Avaliação Regional; Oferta de Serviços Ecossistêmicos.

1. INTRODUÇÃO

Os serviços ecossistêmicos são os bens ou benefícios que os ecossistemas fornecem às pessoas, direta ou indiretamente (MEA, 2005). Contudo, pressões antrópicas como urbanização, crescimento populacional, industrialização e atividades agropecuárias vêm comprometendo esses serviços, com impactos negativos sobre a biodiversidade, o habitat natural, a água, o ar e a qualidade de vida (Carpenter et al., 2005; Grizzetti et al., 2016; Hernandez et al., 2010; MEA, 2005).

Desde a Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA), um grande número de trabalhos foi publicado associando o uso e ocupação do solo e a potencial oferta de serviços ecossistêmicos. No entanto, ainda são escassos os estudos que realizam análises espaço-temporais integradas de múltiplos serviços ecossistêmicos (Aryal; Maraseni; Apan, 2022). A integração temporal e espacial dos serviços, especialmente frente às mudanças no uso do solo e a cenários futuros, permanece um desafio na pesquisa científica (Obiang Ndong; Therond; Cousin, 2020).

Além disso, apesar do reconhecimento da importância da conservação de áreas para a melhoria do fornecimento de serviços ecossistêmicos, ainda são insuficientes as pesquisas sobre a relação entre os diversos serviços ecossistêmicos no contexto de áreas intensamente urbanizadas e de grande extensão territorial (Elmqvist *et al.*, 2015; Gómez-Baggethun; Barton, 2013; Wang *et al.*, 2022), como é o caso da Macrometrópole Paulista (MMP).

A MMP é o maior aglomerado urbano do Brasil, com mais de 53 mil km², possui elevada densidade demográfica, grande número de atividades econômicas e interesses diversos que influenciam sobremaneira no fornecimento dos serviços ecossistêmicos desse importante território brasileiro (Emplasa, 2013; Tavares, 2018).

A MMP (Figura 1) engloba os municípios pertencentes às Regiões Metropolitanas de São Paulo (RMSP), do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), de Campinas (RMC), da Baixada Santista (RMBS), de Sorocaba (RMS), de Jundiaí (RMJ) e de Piracicaba (RMP); e à unidade regional de Bragantina (URB). Cada uma dessas unidades regionais tem potencialidades diferenciadas de desenvolvimento econômico, social e

urbano. Coexistem áreas de alto e baixo dinamismo, conectadas por elementos inerentes à realidade macrometropolitana, como: a conurbação das suas áreas urbanizadas; a infraestrutura ampliada de comunicações e transportes, energia e saneamento básico; bem como os eixos urbano-industriais e os centros de pesquisa, culturais e turísticos (Cunha *et al.*, 2013; Emplasa, 2014; Galvão, 2017; Negreiros; Santos; Miranda, 2015).

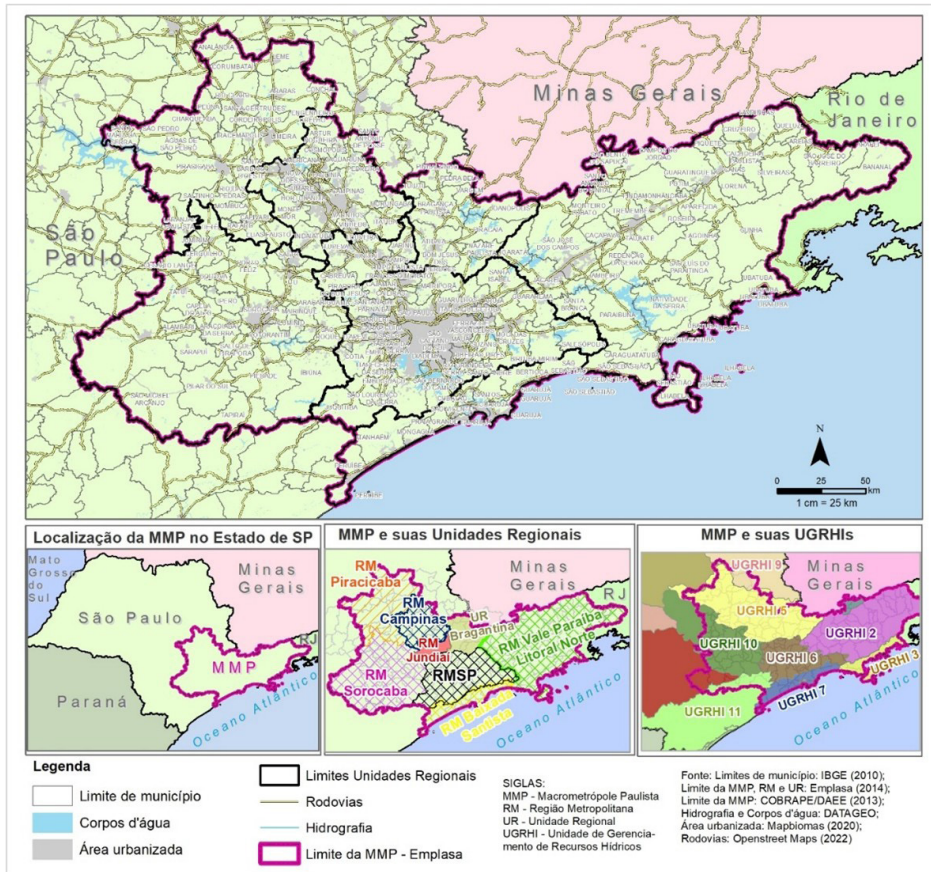


Figura 1 – Limite da MMP e de suas unidades regionais.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou realizar uma avaliação espaço-temporal, individual e integrada, da oferta de quatro serviços ecossistêmicos em configurações de uso e cobertura da terra histórico e futuro, no contexto de planejamento desse grande complexo metropolitano expandido.

2. METODOLOGIA

Este estudo foi estruturado em quatro etapas principais: (i) análise espaço-temporal do uso e cobertura da terra; (ii) mapeamento de quatro serviços ecossistêmicos;

(iii) análise integrada quantitativa e espacial; e (iv) discussão dos desafios para sua incorporação no planejamento territorial da MMP. Os procedimentos metodológicos detalhados podem ser consultados em Ikematsu (2022) e Ikematsu e Quintanilha (2023). A análise abrangeu as oito Unidades Regionais da MMP, considerando suas diferentes dinâmicas de desenvolvimento (Figura 2).

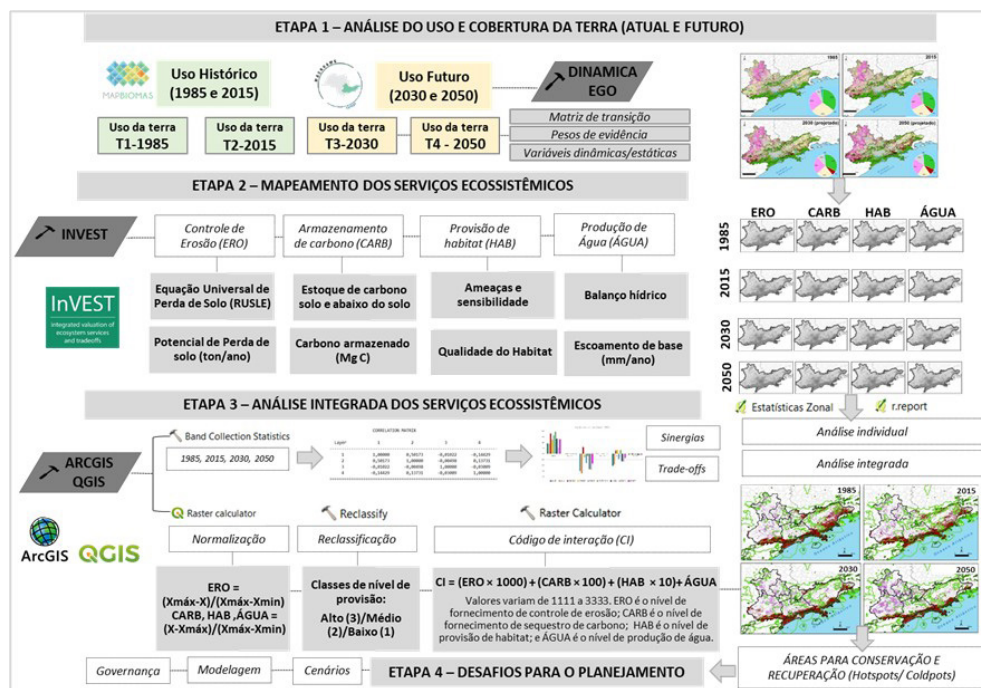


Figura 2 – Fluxograma metodológico.

Fonte: Ikematsu (2022).

2.1 Análise da mudança do uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra, que é um dos principais impulsionadores de mudança no padrão espacial e na provisão geral de serviços ecossistêmicos, foi analisado para os anos de 1985, 2015, 2030 e 2050. Os anos iniciais (1985 e 2015) foram selecionados pela existência de dados do Projeto Mapbiomas (Souza et al., 2020), cujos mapas têm sido amplamente utilizados em estudos ambientais no Brasil. As classes da legenda original do Mapbiomas foram agrupadas para facilitar a análise histórica e a modelagem dinâmica, resultando em seis classes para a simulação dos cenários: 1. Floresta Natural, 2. Floresta Plantada, 3. Pastagem, 4. Agricultura, 5. Área urbanizada e 6. Corpos d'água.

As projeções para os anos de 2030 e 2050 foram feitas de modo a contribuir com o cumprimento da Agenda 2030 da ONU e do Plano Estadual de Ação Climática Net Zero

– 2050, respectivamente. Os dados foram obtidos de Machado e Freitas (2021), que utilizaram o software Dinamica EGO (Soares-Filho *et al.*, 2003) para as simulações. As projeções estimadas por esse método são realizadas por regressão espacial, tendo como base as variações de usos da terra ocorridos no passado (matriz e taxas de transição) e variáveis estáticas e dinâmicas (proximidade com estradas, corpos hídricos, setores urbanos, áreas protegidas, áreas montanhosas, tipo de solo e elevação do terreno).

2.2 Mapeamento de serviços ecossistêmicos

A MMP é uma região onde já são frequentes problemas ambientais como processos erosivos (Cruz *et al.*, 2017), mudanças climáticas (Araújo *et al.*, 2020), segurança hídrica (Cobrape; Dae, 2013; Jacobi; Cibim; Leão, 2015), deslizamentos/inundações (BITAR; MOMM, 2021) e perda de *habitat*. Nesse contexto, quatro serviços ecossistêmicos foram avaliados por meio do software InVEST (*Integrated Evaluation of Ecosystem Services and Tradeoffs*) (Sharp *et al.*, 2018), a saber: “Controle de erosão” (ERO), “Armazenamento de carbono” (CARB), “Provisão de habitat” (HAB) e “Regulação hídrica” (ÁGUA). Quatro modelos do InVEST foram adotados: *Sediment Delivery Ratio* (SDR), *Carbon*, *Habitat quality* (HQ) e *Seasonal water yield* (SWY). As informações cartográficas foram uniformizadas para uma resolução de 30×30 m e projetados para o Sistema de referência SIRGAS 2000, no sistema de projeção UTM no fuso 23 S, os quais foram utilizados como dados de entrada no software InVEST.

2.2.1. Controle de erosão

O modelo *Sediment Delivery Ratio* (SDR) do InVEST calcula a perda anual de solo usando a equação universal de perda de solo revisada (RUSLE), a partir dos dados do Modelo Digital de Elevação (NASA JPL, 2020), bacias hidrográficas, Erosividade da chuva (K) (TEIXEIRA, 2019), Erodibilidade do solo (K) (Rossi, 2017; Mannigel *et al.*, 2002), uso e cobertura da terra e fator de uso e cobertura da terra e manejo, sendo C – fator uso e manejo e P – fator práticas conservacionistas. Os valores de C e P foram obtidos de Silva (2004); Ribeiro (2015); Pavani (2018).

2.2.2. Armazenamento de carbono

O modelo *Carbon* do InVEST simplifica o ciclo do carbono e assume uma mudança linear no sequestro de carbono ao longo do tempo, a qual está intrinsecamente relacionada às mudanças no uso e cobertura da terra. O sequestro geral de carbono é a soma de valores indicativos da biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo, matéria orgânica do solo e matéria orgânica morta, os quais são associados às classes de uso e cobertura da terra. Foram adotados os dados dos reservatórios de carbono sugeridos por Pavani *et al.* (2018).

2.2.3. Provisão de habitat

O modelo *Habitat Quality* do InVEST assume que os padrões de biodiversidade podem ser estimados pela análise de mapas de uso e cobertura da terra em conjunto com as informações de ameaças. Neste modelo, a qualidade do *habitat* serve como um *proxy* para a biodiversidade, estimando a extensão do *habitat* e sua degradação nas paisagens. Três fontes de ameaça para representar os impactos antrópicos no *habitat* foram definidas: agricultura, área urbanizada e rodovias (pavimentadas e sem pavimentação). Os dados necessários para o modelo incluem mapas de uso da terra, dados de ameaças e fontes de ameaças. A constante de meia saturação foi fixada em 0,05, seguindo a orientação de (Sharp *et al.*, 2018).

2.2.4. Regulação hídrica

O modelo *Seasonal water yield* (SWY) do InVEST calcula índices espaciais que quantificam a contribuição relativa de uma parcela da paisagem para a geração do escoamento de base sazonal e fluxo rápido (Sharp *et al.*, 2018). Os parâmetros de entrada foram a precipitação média mensal e a evapotranspiração mensal de referência (Fick; Hijmans, 2017), o modelo digital de elevação (NASA JPL, 2020), as classes de uso e cobertura da terra, os grupos hidrológicos de solos (Rossi, 2017); e as bacias hidrográficas. A relação entre o uso e cobertura da terra, o tipo de solo, *curve number*, valores mensais do coeficiente de evapotranspiração (K_c) foram obtidos de Sartori *et al.* (2005) e Marques (2018). O número de eventos de chuva foi calculado a partir do banco de dados disponibilizado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE, 2022). Adotaram-se os parâmetros de entrada e a função padrão da sazonalidade da precipitação ($\alpha = 1/12$), função da topografia local e dos solos ($\beta_i = 1$), e os parâmetros da fração de recarga de pixels ($\gamma = 1$) do modelo.

2.3 Análise integrada dos serviços ecossistêmicos

Os dados dos quatro serviços ecossistêmicos, nos quatro anos analisados (1985, 2015, 2030 e 2050), foram normalizados em uma escala de 0 a 1 para que os maiores valores correspondessem a uma maior oferta de cada serviço.

Para avaliar especialmente as relações entre os quatro serviços ecossistêmicos, foi adotada a base conceitual do método proposto por Cademus *et al.* (2014), a partir de Carr e Zwick (2008), adaptando para a identificação de hotspots/coldspots de serviços ecossistêmicos (Egoh *et al.*, 2008; Schröter *et al.*, 2017; Schröter; Remme, 2016). Os valores normalizados foram agrupados em três classes de nível de provisão para cada um dos quatro serviços ecossistêmicos, cujos limiares foram definidos a partir do cálculo das estatísticas descritivas e avaliação de suas distribuições de frequências acumuladas. Em seguida, os valores foram codificados em 1, 2 e 3, representando níveis de provisão baixo, médio e alto, respectivamente.

Para representar espacialmente e quantitativamente essas classes, códigos de interação (CI) foram definidos a partir da combinação do nível do serviço ecossistêmico individual, conforme equação 1:

$$CI = (ERO \times 1000) + (CARB \times 100) + (HAB \times 10) + \text{ÁGUA (equação 1)}$$

Onde: CI é o código de interação formado por quatro dígitos; ERO é o valor do serviço de controle de erosão; CARB é o valor do serviço de armazenamento de carbono; HAB é o valor do serviço de provisão de *habitat*; e ÁGUA é o valor do serviço de regulação hídrica.

Os códigos de saída foram números entre 1111 (todos os quatro serviços apresentam os menores valores de fornecimento) e 3333 (todos os quatro serviços com os valores máximos de fornecimento). Os códigos de interação foram agrupados em duas classes para definir *coldspots*, ou seja, aquelas áreas com pelo menos três serviços no menor nível de fornecimento e os *hotspots*, que representaram as sinergias mais fortes entre os serviços; ou seja, áreas com pelo menos 2 serviços no maior nível de fornecimento.

Por fim, avaliou-se a concordância espacial entre os *hotspots* e *coldspots* e as Unidades de Conservação de Proteção Integral e de Uso sustentável definidas pela Lei Federal nº 9.985/2000 para analisar a correspondência espacial entre os locais com maior/menor sinergias e as áreas legalmente protegidas. Essa Lei instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC).

2.4 Desafios para incorporar os serviços ecossistêmicos no planejamento territorial da MMP

A partir dos resultados obtidos, do conhecimento adquirido na elaboração dos produtos cartográficos e da experiência empírica da pesquisadora, discute-se a implicação dos resultados em relação às políticas de uso da terra e planos de gestão que podem ser adotados, bem com os desafios para incorporar os serviços ecossistêmicos no planejamento territorial da MMP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação espaço-temporal de serviços ecossistêmicos em diferentes cenários

A Figura 3 e a Tabela 1 apresentam os resultados obtidos no mapeamento dos serviços ecossistêmicos na MMP nos quatro anos analisados, bem com o seu principal vetor de mudança: o uso e cobertura da terra.

Os resultados revelam que as mudanças no uso e cobertura da terra entre 1985 e 2015 são dominadas por transições de sistemas naturais para ambientes agrícolas ou

urbanos, com decréscimo das classes de Floresta Natural e Pastagem, e acréscimo das Florestas Plantadas e das áreas urbanizadas. Para os cenários de 2030 e 2050, projeta-se a continuidade dessas tendências, com leve redução da vegetação natural, retração das pastagens, expansão das florestas plantadas e crescimento contínuo da urbanização, embora com variações nas dinâmicas regionais observadas na MMP.

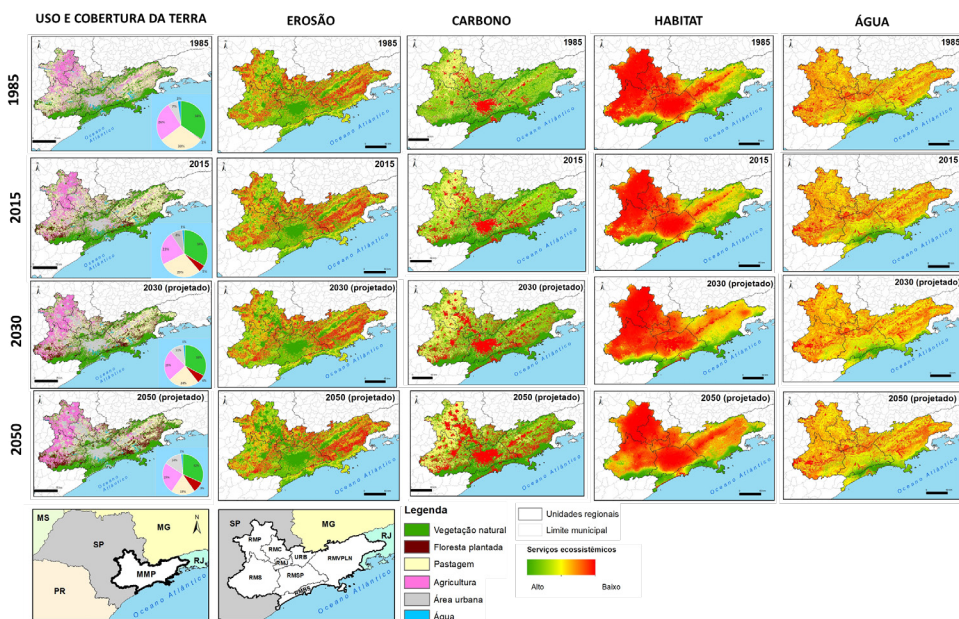


Figura 3 – Indicadores de serviços ecossistêmicos nos diferentes cenários de uso e cobertura da terra (1985, 2015, 2030 e 2050).
 Fonte: Ikematsu (2022).

Tabela 1 – Valores médios dos indicadores de serviços ecossistêmicos na MMP e suas Unidades Regionais de 1985 a 2050, indicando as tendências de aumento e diminuição do fornecimento dos serviços

Serviço ecossistêmico	Unidade Regional	ANO				Tendência	Serviço ecossistêmico	Unidade Regional	ANO				Tendência
		1985	2015	2030	2050				1985	2015	2030	2050	
Perda de solo (ton)	MRJ	64,35	73,35	71,58	68,14	↔	Habitat quality	MRJ	0,18	0,15	0,13	0,13	↔
	MRP	67,57	73,49	80,22	80,30	↔		MRP	0,13	0,06	0,09	0,07	↔
	MRBS	58,49	55,45	60,88	63,03	↔		MRBS	0,67	0,68	0,60	0,58	↔
	MRC	22,02	81,74	103,45	132,60	↔		MRC	0,10	0,09	0,08	0,07	↔
	MRS	51,28	66,13	69,79	75,71	↔		MRS	0,34	0,27	0,20	0,24	↔
	MRSO	27,27	59,60	62,61	65,20	↔		MRSO	0,22	0,22	0,22	0,20	↔
	MRVPLN	115,41	145,58	174,60	214,80	↔		MRVPLN	0,45	0,46	0,57	0,55	↔
	RUB	125,04	208,36	228,07	242,62	↔		RUB	0,29	0,26	0,37	0,33	↔
Estoque de Carbono (Mg)	SPM	74,27	98,94	109,74	124,23	↔	SPM	0,33	0,31	0,32	0,28	↔	
	MRJ	133,78	126,34	125,01	123,45	↔	MRJ	430,93	422,93	419,19	411,13	↔	
	MRP	48,55	53,49	51,24	48,18	↔	MRP	464,29	463,75	451,88	443,95	↔	
	MRBS	298,86	297,25	295,48	293,23	↔	MRBS	1.005,75	1.003,48	1.001,83	1.001,21	↔	
	MRC	34,67	42,58	40,86	38,65	↔	MRC	499,33	494,63	489,34	483,43	↔	
	MRS	116,37	115,52	111,58	106,33	↔	MRS	455,75	449,24	445,55	443,83	↔	
	MRSO	180,26	168,18	165,81	162,52	↔	MRSO	686,56	678,25	674,21	671,94	↔	
	MRVPLN	154,13	153,96	151,18	147,92	↔	MRVPLN	586,96	567,77	558,11	552,89	↔	
	RUB	124,03	117,69	115,66	113,57	↔	RUB	510,56	504,86	482,76	483,50	↔	
	SPM	131,21	129,83	127,09	123,64	↔	SPM	555,91	552,81	543,57	545,27	↔	

Legenda: Baixa oferta de serviços ecossistêmicos Alta oferta de serviços ecossistêmicos

Fonte: Ikematsu (2022).

Os dados corroboram a análise realizada por Gonçalves *et al.* (2021a) e Machado e Freitas (2021) que identificaram transições significativas de sistemas naturais para ambientes agrícolas ou urbanos. Apesar de, no cômputo geral, não ter ocorrido uma variação substancial nas porcentagens de vegetação nativa na MMP e suas unidades regionais, é preciso observar que ocorre a perda de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos associados à perda de florestas maduras e degradação de áreas mais preservadas. Conforme destacado por Calaboni *et al.* (2020), a substituição de florestas mais antigas por outras mais jovens e, também, processos concomitantes e variados de perda e ganho de vegetação nativa nas diferentes unidades regionais da MMP podem levar à redução da oferta de serviços ecossistêmicos como erosão do solo, sequestro e fixação de carbono, proteção da biodiversidade e provisão de serviços ecossistêmicos hídricos.

Os resultados obtidos com o InVEST indicaram que a oferta dos serviços ecossistêmicos analisados vem sendo negativamente afetada pelas mudanças no uso e cobertura da terra e que essas mudanças foram distintas a depender do serviço ecossistêmico e da Unidade Regional avaliada, conforme mostrado em Ikematsu e Quintanilha (2023). De maneira geral, a MMP apresentou diminuição da capacidade de controle de erosão, armazenamento de carbono e regulação hídrica e valores baixos de provisão de *habitat* nos quatro anos avaliados.

A Região Metropolitana da Baixada Santista, a porção ao sul da Região Metropolitana de São Paulo e a porção norte da Região Metropolitana do Vale do Paraíba/Litoral Norte, apresentaram valores relativamente mais altos para os quatro indicadores avaliados, enquanto a Região Metropolitana de Campinas, Piracicaba, Jundiaí e Unidade Regional de Bragantina tiveram os menores scores no cômputo geral. Os valores mais altos de controle de erosão e armazenamento de carbono estiveram associados à existência de floresta natural nas diversas unidades regionais, notadamente no corredor de Biodiversidade da Serra do Mar e Corredor Ecológico da Mantiqueira (Ikematsu; Quintanilha, 2023).

3.2 Hotspots e coldspots entre serviços ecossistêmicos

As áreas que apresentam os maiores valores (*hotspots*) e os menores valores (*coldspots*) de múltiplos serviços ecossistêmicos nos quatro anos analisados (1985, 2015, 2030 e 2050), juntamente com as Unidades de Conservação que ocorrem na MMP estão apresentadas na Figura 4.

Os *hotspots*, ou seja, as áreas contendo pelo menos dois serviços com as pontuações mais altas, ocuparam aproximadamente 26% e 27% de toda a área de estudo em 1985 e 2015, respectivamente, e se concentraram na Região Metropolitana da Baixada Santista; sul e norte da Região Metropolitana do Vale do Paraíba/Litoral Norte; e sul da Região

Metropolitana de São Paulo e Sorocaba. As tendências para 2030 e 2050 indicam uma redução das áreas com os maiores valores dos quatro serviços ecossistêmicos, passando para cerca de 18% no último ano, sendo mais um indicador da tendência de diminuição da oferta de serviços ecossistêmicos integrados devido às alterações no uso e cobertura da terra na MMP (Ikematsu, 2022; Ikematsu; Quintanilha, 2023).

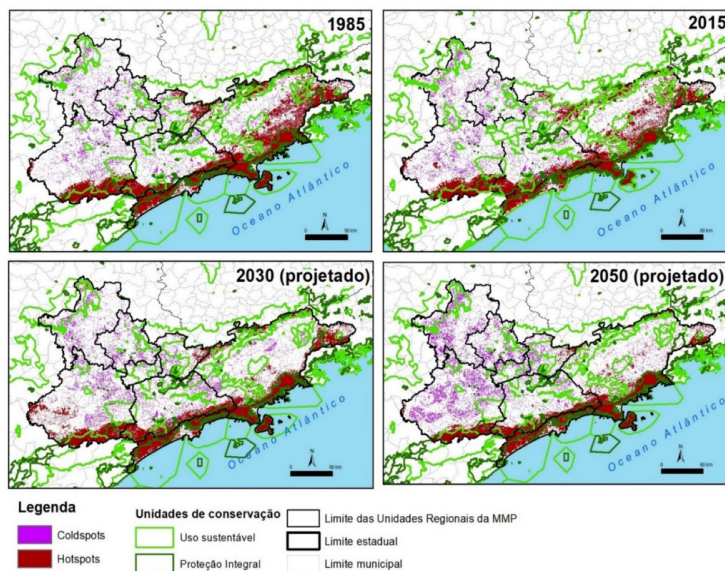


Figura 4 – *Hotspots* e *coldspots* de serviços ecossistêmicos na MMP e suas Unidades Regionais em 1985, 2015, 2030 e 2050.

Fonte: Ikematsu (2022).

Esse fato indica a importância de políticas públicas voltadas à conservação e recuperação de áreas provedoras de múltiplos serviços ecossistêmicos. Por outro lado, os *coldspots*, ou seja, as áreas contendo pelo menos três ou mais serviços ecossistêmicos com as pontuações mais baixas, ocupavam aproximadamente 17 % de toda a área de estudo em 1985 e 2015 e se concentraram na Região Metropolitana de Sorocaba e de Piracicaba, ocorrendo de forma esparsa na área de estudo e geralmente coincidiram com áreas de pastagem e de cursos d'água. As tendências para 2030 e 2050 indicam um aumento das áreas com os menores valores dos quatro serviços ecossistêmicos, passando para cerca de 18% e 23 % da área mapeada nos cenários projetados para 2030 e 2050, respectivamente (Ikematsu, 2022; Ikematsu; Quintanilha, 2023).

Tanto as áreas de *hotspots* de serviços ecossistêmicos individuais e agrupados, bem como as áreas que não estão fornecendo múltiplos serviços em sua plenitude (*coldspots*) indicam, ainda, áreas que devem priorizadas para reduzir o impacto negativo das atividades humanas no ecossistema e favorecer a proteção e conservação ecológica regional.

As áreas de alto desempenho e aquelas adjacentes a elas indicam prioridades de conservação. Nas áreas de dominância de um serviço apenas, intervenções de restauração podem aumentar a oferta de múltiplos serviços ecossistêmicos. Ainda que não seja possível alcançar altos valores de todos os serviços ecossistêmicos, soluções de gestão sustentável são capazes de aumentar a oferta de serviços ecossistêmicos e melhorar seu desempenho geral (Spanò *et al.*, 2017).

3.3 Desafios para a inclusão dos serviços ecossistêmicos no planejamento territorial da MMP

Considerando a abordagem adotada neste estudo, três grandes grupos de desafios para incorporar os serviços ecossistêmicos no planejamento territorial da MMP foram delimitados, a saber: avaliação dos serviços ecossistêmicos em diferentes cenários; modelagem ambiental dos serviços ecossistêmicos; e governança multinível (Ikematsu, 2022).

Inicialmente, deve-se destacar que diversos serviços ecossistêmicos são fornecidos em uma área tão extensa e heterogênea quanto é a MMP. O trabalho avaliou apenas quatro, pois quanto maior o número de serviços prioritários, mais complexa é a realidade a ser analisada e maiores são as exigências de tempo e recursos na avaliação posterior, podendo gerar resultados que não sejam concretos nem específicos (Kosmus; Renner; Ullrich, 2012). A complexidade, fragmentação e heterogeneidade das paisagens em áreas altamente urbanizadas na MMP também são fatores relevantes para a avaliação de serviços ecossistêmicos em diferentes cenários.

No que concerne aos desafios associados à modelagem ambiental dos serviços ecossistêmicos, mencionam-se o pré-processamento de dados, a qualidade e a escala dos dados de entrada. A dinâmica entre serviços ecossistêmicos em diferentes trajetórias, impulsionada por fatores biofísicos e decisões de gestão, também são relevantes em análises na escala macrometropolitana. As incertezas associadas à modelagem ambiental, bem como a impossibilidade de contemplar todas as dimensões, interações, variações e fatores envolvidos nas diferentes unidades regionais ao longo do tempo e espaço nas simulações (Cavender-Bares *et al.*, 2015; Deng; Li; Gibson, 2016), também fazem parte dos obstáculos para a modelagem de serviços ecossistêmicos na MMP.

Cabe ressaltar, finalmente, a importância da governança multinível na MMP para que qualquer ação proposta seja passível de realização nesse território amplo e complexo. A abordagem multinível tem sido considerada adequada para lidar com a natureza multidimensional de questões ambientais prementes, como a questão dos serviços ecossistêmicos, pois esses problemas se manifestam em vários níveis, do local ao global, e precisam ser abordados de acordo (Gonçalves *et al.*, 2021b). No entanto, ela é muitas vezes desafiadora, dado o ambiente institucional complexo em que é

implementada e à necessidade de coordenar vários atores em vários níveis. A descentralização administrativa estabelecida pela Constituição brasileira de 1988 resultou em um planejamento muito mais local do que regional, devido à municipalização que garantiu maior autonomia política aos municípios e que ainda predomina sobre os interesses que ultrapassam os limites administrativos (Tavares, 2018).

Assim, é preciso uma maior conexão entre as pesquisas teóricas e as práticas executadas pelas diferentes instâncias de governança. Isso pode ser realizado por meio de fóruns de discussão temáticos e permanentes que integrem academia, poder público, terceiro setor, entre outros. Processos de elaboração de políticas públicas de forma participativa, também representam uma forma de conectar conhecimentos e instituições em prol de um planejamento em bases sustentáveis. A governança necessária deve incluir a redução de conflitos, harmonização de interesses e integração de políticas que apontem para uma gestão baseada em ecossistemas (Gonçalves *et al.*, 2021b), bem como para uma governança integrada, policêntrica e participativa (Jacobi *et al.*, 2020).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise conduzida neste estudo destacou a dinâmica complexa dos serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista (MMP), evidenciando a variabilidade espaço-temporal desses serviços e identificando áreas de alta e baixa provisão dos mesmos. É crucial reconhecer que a MMP enfrenta sérias ameaças à provisão dos quatro serviços avaliados, cuja degradação acarretaria impactos adversos não apenas ambientais, mas também socioeconômicos e para a saúde humana.

O roteiro metodológico delineado permitiu não só a análise individual dos serviços ecossistêmicos, mas também a sua integração, oferecendo uma visão abrangente da situação na MMP e suas unidades regionais. Isso demonstra claramente como mudanças no uso da terra podem afetar a oferta desses serviços, fornecendo *insights* cruciais para a gestão do capital natural e o planejamento territorial.

É notável que as áreas de maior sinergia, onde múltiplos serviços são abundantemente fornecidos (*hotspots*), coincidem em grande parte com as Unidades de Conservação, ressaltando a importância dessas áreas protegidas para a prestação de serviços ecossistêmicos e a conservação da biodiversidade. Por outro lado, identificamos também áreas que requerem atenção prioritária (*coldspots*), sugerindo a necessidade de intervenções direcionadas para mitigar os impactos das atividades humanas e promover a conservação ecológica regional.

Os resultados desse estudo oferecem importantes subsídios para orientar o planejamento de ações em conservação e recuperação ambiental de forma a maximizar os benefícios ambientais relacionados aos serviços ecossistêmicos avaliados nessa região estratégica do Brasil.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, G. P. DE *et al.* Planejamento e sustentabilidade urbana: uma análise do Plano de Ação da Macrometrópole Paulista. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 8, n. 1, p. 100–112, 2020.
- ARYAL, K.; MARASENI, T.; APAN, A. How much do we know about trade-offs in ecosystem services? A systematic review of empirical research observations. *Science of The Total Environment*, v. 806, p. 151229, 2022.
- BITAR, O. Y.; MOMM, S. Cartografia geotécnica como instrumento de planejamento territorial: as cartas de suscetibilidade na Macrometrópole Paulista. In: JACOBI, P.R.; TRAVASSOS, L.; SANTANA-CHAVES, I.M.; ANJOS, L.A.P.; LEONE, A.L.C.M. *Diálogos socioambientais da Macrometrópole Paulista: Kátia Canil e o seu legado*. São Paulo: IEE, 2021. v. 4.
- CADEMUS, R. *et al.* Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliotii* forests in Southeastern USA. *Forests*, v. 5, n. 6, p. 1409–1431, 2014.
- CALABONI, A. *et al.* ODS 15 Vida terrestre – Histórico, governança e perspectivas para conservação dos ecossistemas terrestres na Macrometrópole Paulista. In: FREY, K.; TORRES, P.H.C.; JACOBI, P.R.; RAMOS, R.F. (Orgs.). *Objetivos do desenvolvimento sustentável: desafios para o planejamento e a governança ambiental na macrometrópole paulista*. São Paulo: Editora UFABC, 2020.
- CARPENTER, S. R. *et al.* *Ecosystems and Human Well-Being: scenarios*. Washington: Island Press, 2005.
- CARR, M. H.; ZWICK, P. D. *Smart land-use analysis: The LUCIS Model. Land Use Conflict Identification Strategy*. Redlands, CA, USA: ESRI Press, 2008.
- CAVENDER-BARES, J. *et al.* A sustainability framework for assessing trade-offs in ecosystem services. *Ecology and Society*, v. 20, n. 1, 2015.
- COBRAPE - COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS; DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *Plano Diretor de Aproveitamento de Recursos Hídricos para a Macrometrópole Paulista no Estado de São Paulo: Relatório Final*. São Paulo: DAEE, 2013.
- COSTANZA, R. *et al.* Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, v. 28, p. 1–16, 2017.
- CRUZ, B. B. *et al.* Environmental fragility framework for water supply systems: a case study in the Paulista Macro Metropolis area (SE Brazil). *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 12, jun. 2017.
- CUNHA, J. M. P. *et al.* A mobilidade pendular na Macrometrópole Paulista: diferenciação e complementaridade socioespacial. *Cadernos Metrôpole*, v. 15, n. 30, p. 433–459, dez. 2013.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *Dados de chuva do Estado de São Paulo*. Destinatário: Priscila Ikematsu. [São Paulo], 3 de abr. 2022. mensagem eletrônica.

- DE GROOT, R. *et al.* Chapter 1 Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. In: KUMAR, P. (Ed.). *The economics of ecosystems and biodiversity ecological and economic foundations*. London: Earthscan, 2010a. 40 p.
- DENG, X.; LI, Z.; GIBSON, J. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management. *Journal of Geographical Sciences*, v. 26, n. 7, p. 953–968, 2016.
- DUARTE, G. T.; RIBEIRO, M. C.; PAGLIA, A. P. Ecosystem services modeling as a tool for defining priority areas for conservation. *PLoS One*, v. 11, n. 5, p. e0154573, 2016.
- DUNFORD, R. *et al.* Integrating methods for ecosystem service assessment: experiences from real world situations. *Ecosystem Services*, v. 29, p. 499–514, 2018.
- EGOH, B. *et al.* Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 127, n. 1–2, p. 135–140, 2008.
- ELMQVIST, T. *et al.* Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 14, p. 101–108, 2015.
- EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. *Plano de Ação da Macrometrópole Paulista (PAM) 2013-2040*. São Paulo: Emplasa, 2014. (Coleção Carteira de Projetos do PAM, 4).
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.
- GALVÃO, R. F. P. *O rural na urbanização paulista em contexto macrometropolitano*. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) — Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo: São Paulo, 2017.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; BARTON, D. N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, v. 86, p. 235–245, 2013.
- GONÇALVES, D. *et al.* Land use and land cover changes in São Paulo Macro Metropolis and implications for water resilience under climate change. *Sustentabilidade em Debate*, v. 12, n. 2, 2021a.
- GONÇALVES, L. R. *et al.* The dynamics of multiscale institutional complexes: the case of the São Paulo Macrometropolitan Region. *Environmental Management*, v. 67, n. 1, p. 109–118, 2021b.
- GRIZZETTI, B. *et al.* Ecosystem services for water policy: Insights across Europe. *Environmental Science and Policy*, v. 66, p. 179–190, 2016.
- HERNANDEZ, M. *et al.* The use of scenario analysis to assess water ecosystem services in response to future land use change in the willamette river Basin, Oregon. In: LIOTTA, P.; KEPNER, W.; LANCASTER, J.; MOUAT, D. (ed.). *Achieving environmental security: ecosystem services and human welfare*. Amsterdam: IOS Press, 2010. p. 97–111.
- IKEMATSU, P. *Dinâmica espaço-temporal da oferta de serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista*. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo: São Paulo, 2022.

- IKEMATSU, P.; QUINTANILHA, J. A. Spatio-temporal evaluation of ecosystem services in the São Paulo Macrometropolis, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RB-CIAMB)*, Rio de Janeiro, v. 58, n. 2, p. 304–316, 2023. DOI: 10.5327/Z2176-94781638
- JACOBI, P. R.; CIBIM, J.; LEÃO, R. DE S. Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil. *Estudos Avançados*, v. 29, n. 84, p. 27–42, 2015.
- JACOBI, P. R. *et al.* Capítulo 10: ODS 6 – Água potável e saneamento. In: FREY, K.; TORRES, P.H.C.; JACOBI, P.R.; RAMOS, R.F. (Orgs.). *Objetivos do desenvolvimento sustentável: desafios para o planejamento e a governança ambiental na Macrometrópole Paulista*. Santo André: Editora UFABC, 2020.
- KOSMUS, M.; RENNER, I.; ULLRICH, S. *Integração de serviços ecossistêmicos ao planejamento do desenvolvimento*. Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit, 2012.
- MACHADO, C. B. *et al.* Extreme Rainfall Events in the Macro-Metropolis of São Paulo: trends and connection with climate oscillations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 60, n. 5, p. 661-675, 2021.
- MARQUES, M. G. *Comparação de balanço hídrico na restauração de APP com mata nativa e sistema agroflorestal: um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica: São José dos Campos, 2018.
- MANNIGEL, A. R. *et al.* Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 24, p. 1335, 2002.
- MEA – MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- NASA JPL. *NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2020. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001. Acesso em: 14 abr. 2021.
- NEGREIROS, R.; SANTOS, S. M. M. DOS; MIRANDA, Z. A. I. DE. Nova escala de planejamento, investimento e governança na macrometrópole paulista. *Revista Iberoamericana de Urbanismo*, v. 12, ano 7, p. 121–136, 2015.
- OBIANG NDONG, G.; THEROND, O.; COUSIN, I. Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature. *Ecosystem Services*, v. 43, p. 101120, 2020.
- PAVANI, B. F. *et al.* Estimating and valuing the carbon release in scenarios of land-use and climate changes in a Brazilian coastal area. *Journal of Environmental Management*, v. 226, p. 416–427, 2018.
- PAVANI, B. F. *Pagamentos por serviços ecossistêmicos: proteção de recursos hídricos por Unidades de Conservação ambiental no Brasil*. Tese (Doutorado em Ciências) — Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 2018.

- RIBEIRO, T. C. L. *Mapeamento, quantificação e valoração do serviço ecossistêmico de retenção de sedimentos no trecho paulista da bacia do rio Paraíba do Sul*. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA: São José dos Campos, 2015.
- ROSSI, M. *Mapa pedológico do estado de São Paulo: revisado e ampliado*. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.
- SCHRÖTER, M.; REMME, R. P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: comparing hotspots with heuristic optimisation. *Landscape Ecology*, v. 31, n. 2, p. 431–450, fev. 2016.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, p. 5–18, 2005.
- SHARP, R. *et al. InVEST 3.5.0 User's Guide*. The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund., 2018.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H.; CAMARGO, P. *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. São Carlos: RIMA, 2004.
- SOARES-FILHO, B. S. *et al. Simulating the spatial patterns of change through the use of the Dinamica model*. Belo Horizonte, Brasil: INPE, 2003.
- SOUSA, M. C. *et al. Spatio-temporal dynamics of land use changes of an intense anthropized basin in the Brazilian semi-arid region*. Remote Sensing Applications. *Society and Environment*, v. 24, p. 100646, 2021.
- SOUZA, C. M. *et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine*. *Remote Sensing*, v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020
- SPANÒ, M. *et al. Are ecosystem service hotspots located in protected areas? Results from a study in Southern Italy*. *Environmental Science & Policy*, v. 73, p. 52–60, 2017.
- SUN, X.; LI, F. Spatiotemporal assessment and trade-offs of multiple ecosystem services based on land use changes in Zengcheng, China. *Science of the Total Environment*, v. 609, p. 1569–1581, 2017.
- TAVARES, J. Formação da macrometrópole no Brasil: Construção teórica e conceitual de uma região de planejamento. *EURE (Santiago)*, v. 44, n. 133, p. 115–134, set. 2018.
- TEIXEIRA, D. B. D. S. *Erosividade da Chuva no Estado De São Paulo Com Base Em Séries Sintéticas De Dados Pluviográficos*. Dissertação (Mestrado em Ciências)— Meteorologia Aplicada. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 2019.
- WANG, S. *et al. Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area*. *Sustainable Cities and Society*, v. 77, p. 103561, 2022.