



BIOCAPACIDADE DOS BIOMAS BRASILEIROS A PARTIR DE CONCEITOS DA PEGADA ECOLÓGICA EMERGÉTICA

Wallan Azevedo dos Santos^I
Milton Erthal Junior^{II}
Renato Gomes Sobral Barcellos^{III}

^I Instituto Federal Fluminense, Mestrado SAEG, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

^{II} Instituto Federal Fluminense, Mestrado SAEG, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

^{III} Instituto Federal Fluminense, Mestrado SAEG, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo: O objetivo deste trabalho é avaliar a biocapacidade (BC) dos biomas brasileiros utilizando os conceitos da Pegada Ecológica Emergética. Dados climáticos e da cobertura florestal foram interpolados pelo método de Kriging. No ano de 2016, a BC brasileira foi de 42,11 gha/cap, uma das maiores do mundo. A área de cobertura florestal foi investigada e simulada em dois cenários: otimista (com 100% de cobertura florestal) e pessimista (apenas 10%). A Amazônia, que contribui com metade da BC brasileira, reduziria sua contribuição em 88% em um cenário pessimista. A Mata Atlântica contribuiu com apenas 1,9% da BC nacional, contudo, em um cenário otimista, aumentaria em 690% sua contribuição. A redução do desmatamento, das queimadas e a expansão das áreas protegidas por lei são medidas que impactam positivamente a BC dos biomas estudados. Esta metodologia pode ser empregada como um indicador da qualidade ambiental pois é aderente aos princípios do Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável; Emergia; Indicadores de Sustentabilidade; Gestão Ambiental.

São Paulo. Vol. 24, 2021

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180134r2vu2021L5AO>

Introdução

Um modelo de desenvolvimento equilibrado deve estar embasado em múltiplos níveis de sustentabilidade: institucional, cultural, ambiental, político e territorial (ALVES et al., 2011). Um aspecto importante da sustentabilidade ambiental refere-se ao valor do capital natural dos ecossistemas e sua compensação pelos serviços ambientais prestados a sociedade (CHAN et al., 2017). Com base nesta estimativa pode-se definir como os recursos naturais ali presentes podem ser explorados (energia, água, alimentos, madeira etc.) e sua ação mitigatória aos efeitos da poluição e degradação da natureza (regulação climática, purificação do ar e da água, manutenção do ciclo de nutrientes etc.).

Uma forma de se avaliar o quão sustentável é o modelo de desenvolvimento de uma localidade, região ou um país é a estimativa da biocapacidade (BC). A BC consiste na capacidade que uma área tem para ofertar recursos naturais e assimilar os resíduos gerados pela população residente (WACKERNAGEL et al., 2005). Desta forma, a BC é um parâmetro interessante para apontar um limite entre as atividades humanas e os ecossistemas (YANG et al., 2018). Por este motivo, este indicador tem aplicações diversas para a gestão do território, como em estratégia na geopolítica, na competitividade entre as empresas, nas relações governamentais e para avaliar a qualidade de vida da população (NICCOLUCCI et al., 2012).

Além da BC, outros indicadores de sustentabilidade são empregados em muitos países para amparar o processo de tomada de decisão sobre a gestão do território. Estes indicadores facilitam a compreensão dos dados sobre impactos ambientais, a escala geral de degradação e o monitoramento ambiental (WIEDMAN; BARRETT, 2010). As metodologias mais utilizadas com esta finalidade são: Produtividade Primária Líquida (NPP) (LIETH, 1973), Pegada Ecológica (PE) (WACKERNAGEL; REES, 1996) e a Análise Emergética (ODUM, 1996). A Pegada Ecológica, assim como a BC, pode ser utilizada para avaliar níveis de sustentabilidade em diferentes escalas: indivíduo, instituição, processo, cidade ou um país (WACKERNAGEL, REES, 1996; GALLI et al., 2016).

Para avaliar o fluxo dos serviços ambientais dos ecossistemas, o método da PE torna-se mais eficaz se associado com a Análise Emergética (ZHAO et al., 2005; CHEN; CHEN, 2006; SICHE et al., 2008; NAKAJIMA; ORTEGA, 2016). A emergia é um fator de transformidade usado para corrigir as externalidades do fluxo de energia usado na produção de produtos e serviços, as quais não são contabilizadas pela economia clássica. Assim, a PEE é um indicador mais completo e robusto, fornecendo um panorama mais exato do nível de sustentabilidade de determinado local e sua realidade ecológica (Wiedmann & Barrett, 2010).

Zhao et al., (2005) é um dos trabalhos pioneiros no uso da PEE para avaliar a sustentabilidade ambiental, em um estudo de caso na província de Gansu, na China. O trabalho mostra que os dados do método convencional da PE estavam subestimados. Esta mesma metodologia foi empregada por Chen e Chen (2006) para estimar o nível de sustentabilidade do consumo na sociedade chinesa entre 1981 e 2001 e uma nova proposta para este país foi feita por Yang et al. (2018). Bagliani et al. (2008) investigaram a sustentabilidade ambiental da província de Siena na Itália e concluíram que o método

da PE em combinação com a BC permite uma investigação mais detalhada dos aspectos ambientais da região. Siche et al. (2008) propõe algumas melhorias na metodologia de aferição da PEE e aplica seu estudo em diversos países.

Pereira e Ortega (2012) foram pioneiros em estimar a biocapacidade brasileira através da PEE e por proporem algumas modificações ao método desenvolvido por Zhao et al. (2005). Para calcular a BC, Pereira e Ortega (2012) adicionam uma nova categoria de valores a serem adicionados na base de cálculo, as “áreas não ocupadas pelo homem”, sendo que este parâmetro foi usado no presente estudo. Ainda no Brasil, Nakajima e Ortega (2016) avaliaram a capacidade de suporte da região de Ibiúna, utilizando a Análise Emergética para aprimorar o diagnóstico dos problemas ambientais e, assim, fundamentar possíveis políticas públicas voltadas para preservação da natureza.

Por ser considerado o maior credor ecológico do planeta (MARCHI, 2011), o Brasil encontra-se em uma importante posição mundial em termos de BC, apresentando um cenário favorável na nova economia verde. O país possui um extenso território, diversidade geográfica, variedade de clima e vegetação, proporcionando a formação de diferentes biomas e ecossistemas. No entanto, a destruição da vegetação nativa, as queimadas, o uso arbitrário dos solos e a poluição são os principais fatores que promovem o declínio dos serviços ambientais proporcionados pelos biomas brasileiros (Quadro 1) e, conseqüentemente, a BC da nação (GONZALEZ; ANDRADE, 2015). O crescimento populacional também é preocupante devido à falta de planejamento e práticas conservacionistas.

Algumas iniciativas vêm sendo tomadas com o intuito de avaliar e monitorar os níveis de degradação dos biomas brasileiros, tais como o Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) de 1988, o Sistema de Detecção do Desmatamento em Tempo Real (DETER) de 2004, e o Programa de Monitoramento Ambiental dos Biomas Brasileiros (PMABB) de 2007 (MMA, 2016). No entanto, ao analisar as informações e dados de forma isolada, não é possível estabelecer com clareza o ponto de equilíbrio entre a necessidade de desenvolvimento humano e a capacidade de suporte dos biomas. Além disso, se faz necessário o planejamento da ocupação das áreas ainda preservadas.

Os fatores que mais contribuem para o incremento da BC dos ecossistemas naturais são: precipitação, incidência de ventos, radiação solar e o nível de cobertura vegetal (PEREIRA, ORTEGA, 2012; NAKAJIMA, ORTEGA, 2016). As variáveis climáticas e da cobertura florestal podem se apresentar de forma bem heterogênea em diferentes regiões de um mesmo bioma e, por este motivo, impactar a BC a nível regional. Este tipo de estudo, com indicações de variações de dados dos biomas (Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pampas, Pantanal e o Sistema Costeiro-Marinho) precisam ser formulados para subsidiar a ocupação do território e uso sustentável dos recursos naturais ali presentes. Considerando as altas taxas de desflorestamento observadas nesses biomas nos últimos anos é possível inferir que esta intervenção humana impacta negativamente a PE e a BC nacional. Estas questões de pesquisa motivaram a condução deste estudo.

Desse modo, o objetivo deste trabalho consiste em calcular a biocapacidade dos biomas brasileiros, utilizando como base os conceitos do método da Pegada Ecológica Emergética (PEE), com uso de dados georreferenciados e tratados com auxílio de sof-

ware para cálculo das interpolações dos dados e apresentar os resultados na forma de mapas. Para avaliar a relação entre o nível de desmatamento dos biomas e sua BC foram simuladas três situações: uma realista, tendo como base os dados do ano de 2016 (os mais atualizados na ocasião da concepção da modelagem), um cenário otimista (100% de cobertura florestal) e outro pessimista (10% de cobertura florestal).

Metodologia

A metodologia proposta neste trabalho se baseou no método da PEE para avaliação da BC dos biomas brasileiros, a partir de adaptações que possibilitaram uma análise detalhada para avaliar o impacto provocado pelas ações humanas nos biomas. De maneira resumida a metodologia deste trabalho foi estruturada em seis etapas: a) caracterização do estudo de caso; b) obtenção de dados a partir de bases oficiais; c) uso de Sistemas de Informações Geográficas para tratamento de dados climáticos e elaboração de mapas; d) cálculo da PEE e BC; e) Simulação de cenários extremos; f) análise de sensibilidade.

a) Caracterização do objeto de estudo

A BC brasileira foi estimada no ano de 2016, pois durante a elaboração da modelagem matemática este foi o ano mais recente com informações disponíveis para operar o modelo. O Brasil é um país que se destaca em muitos parâmetros importantes para a contabilidade ambiental planetária. Com 8.514.876,599 km² de área territorial e mais os 6.700.000 km² de zona costeira e marinha, ocupa cerca de 47% da América do Sul e é o quinto maior país do mundo (IBGE, 2019). Com aproximadamente 14% de toda biota mundial, o país tem a maior biodiversidade do planeta, sendo o primeiro signatário da Convenção sobre a Diversidade Biológica (CDB) (GODINHO; DA MOTA, 2013). Atualmente, o território brasileiro encontra-se dividido em sete biomas: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal, Pampas, Caatinga e o Sistema Costeiro-Marinheiro (MMA, 2016; IBGE, 2019). Em função da megadiversidade, endemismo e a destruição das áreas naturais os biomas Mata Atlântica e Cerrado são considerados hotspots mundiais, ou seja, uma das áreas mais ricas em biodiversidade e ao mesmo tempo uma das mais ameaçadas do planeta (NUNES CARVALHO et al., 2010). A tabela 1 apresenta a área total, cobertura florestal remanescente, áreas protegidas por Unidades de Conservação e principais ameaças dos biomas brasileiros.

b) Coleta de Dados

Os dados necessários para estimar a BC do território brasileiro foram obtidos em bancos de dados de relatórios oficiais de órgãos governamentais e ONGs. A base de dados de 2016 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) foi consultada para obter informações demográficas como: área territorial, população e áreas urbanizadas. Neste ano a população brasileira era de 206.081.432 habitantes, a quinta maior população da Terra. A delimitação dos biomas foi obtida em IBGE (2019). Para estimar

a população mundial e a BC dos espaços não ocupados pelo homem foram consultados, respectivamente, o World Bank (2016) e CIA (2016). Os dados referentes à cobertura vegetal preservada dos biomas foram obtidos do MMA (2016) e SOS MA (2016). As variáveis climáticas (insolação, precipitação e ventos) foram consultadas a partir de relatórios disponibilizados pelos órgãos nacionais CRESESB (2000, 2012) e INPE (2011), enquanto que a localização das estações meteorológicas foi obtida no INMET (2016). A base científica Emergy Society Database (2017) foi utilizada para a consulta de valores de transformidades e densidade emergética global. Os procedimentos analíticos empregados neste estudo foram baseados nos artigos científicos de Odum (1996, 2000), Pereira e Ortega (2012), Zhao et al. (2005).

Tabela 1 – Área original, área preservada, área em UCs e principais ameaças dos sete biomas brasileiros

Biomass	Extensão Territorial (km ²)	Cobertura florestal remanescente (%)	Área em UCs (%)	Principais ameaças
Amazônia	4.230.490	81,0	27,7	- Desmatamento e Queimadas - Mineração - Agricultura e pecuária de larga escala - Estabelecimento de grandes empreendimentos públicos, como a construção de hidrelétricas
Cerrado	2.047.146	54,5	8,6	- Desmatamento - Pecuária extensiva - Agricultura
Mata Atlântica	1.059.027	12,5	10,1	- Uso demasiado de recursos naturais - Urbanização desordenada - Riscos de extinção da flora e fauna - Ocupação irregular do solo
Caatinga	825.750	54,4	7,6	- Desmatamento - Sobrepastejo - Riscos de extinção da flora e fauna
Pampas	178.243	46,0	2,7	- Desertificação - Sobrepastejo - Introdução de espécies exóticas - Ocupação irregular do solo
Pantanal	151.186	85,0	4,6	- Construção de hidroelétricas - Lixiviação de nutrientes - Assoreamento - Esgotamento sanitário - Agricultura canavieira

Sistema Costeiro-Marinho	6.700.000	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - Introdução de espécies exóticas - Desmatamento de manguezais e restingas - Agricultura itinerante - Agropecuária - Mineração - Urbanização desordenada - Esgotamento sanitário
--------------------------	-----------	---	---	--

Fonte: Os autores, 2018.

Legenda: UC = Unidade de Conservação. Fonte: Adaptado de CERRI et al., 2007; SAWYER, 2009; PILLAR et al., 2009; NUNES CARVALHO et al., 2010; ALMEIDA, 2016; UBIRAJARA et al., 2016; RÊGO et al., 2018).

c) Cálculo da interpolação e Produção dos mapas

Seguindo a proposta metodológica empregada nos artigos de (MELLINO et al., 2015; SUN et al., 2015; YANG et al., 2018; ZHOU et al., 2009) foi utilizado neste trabalho um software tipo Computer Assisted Design - CAM chamado Surfer (Golden Software, Inc.) para a inserção dos valores das variáveis climáticas: vento, irradiação solar, precipitação e o georreferenciamento dos dados.

Utilizando 141 pontos georreferenciados relativos às estações meteorológicas do INMET (2016) se atribuiu os valores de velocidade dos ventos, precipitação e insolação naquele ponto. Os pontos foram agrupados de acordo com os limites territoriais dos biomas e as estações meteorológicas existentes. Após a determinação dos valores dos pontos para cada parâmetro a ser considerado, precipitação, velocidade dos ventos e insolação, estes foram interpolados através do método de Kriging, a fim de facilitar a visualização e variação dos valores encontrados nas linhas de isovalores. Através dos cálculos efetuados foi gerado também um mapa de isovalores para a biocapacidade. A krigagem é um método de geoestatística que permite por interpolação e autocorrelação que os dados obtidos de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos não amostrados. Por este motivo, a krigagem em muitos casos traz vantagens em relação a outros métodos (SANTOS et al., 2016).

A finalidade do uso da interpolação é facilitar o contraste dos valores extremos e a identificação das anomalias de maiores valores e menores valores e como ocorre a variação entre estes pontos espacialmente. O método Kriging é definido como um método de interpolação da distância inversa com um sistema de ponderação no qual o valor em um nó da malha de pontos é ponderado a partir de uma soma de pontos dentro de uma zona de influência. A semelhança dos valores é maior quanto menor for a distância entre os pontos de interpolação. A semelhança reduz até que a uma distância determinada os

valores perdem sua semelhança (HENGL, 2009).

A determinação desses pontos permitiu a estimativa dos valores em uma planilha eletrônica, na qual foram realizados os cálculos para a determinação do fluxo emergético e BC. Importante ressaltar que por serem poucos pontos representativos para todo o território nacional mesmo representando somente os valores diretamente sobre os pontos, não seria possível ter uma avaliação mais consistente da variação espacial dos valores, sendo necessário, portanto, um método de interpolação que ressaltasse as anomalias. Visualmente para os mapas fica mais evidente para o leitor o contraste dos resultados para os biomas.

Os recursos renováveis como o potencial químico da chuva (INPE, 2011), a radiação solar (CRESESB, 2000) e o vento (CRESESB, 2012) que incidem anualmente nos sete biomas brasileiros, incluindo a zona costeira, foram estimados a partir das Equações 1, 2 e 3 (PEREIRA e ORTEGA, 2012). Os dados climáticos foram obtidos a partir de informações disponíveis na base de dados de órgãos como INPE e CRESESB.

$$\text{Energia Solar (J)} = A_s \times I_m \times (1 - A_l) \times F \quad \text{Equação 1}$$

Em que, A_s = Área do espaço em m^2 ; I_m = Insolação média em $kWh/m^2 \cdot ano$; A_l = Albedo; F = Fator de conversão $3,60 \times E+06$ de J para kWh.

$$\text{Energia do Potencial Químico da Chuva (J)} = A_s \times P \times \rho_{H_2O} \times W_{qp} \quad \text{Equação 2}$$

Em que, P = Pluviosidade em m/ano ; ρ_{H_2O} = Densidade da água em kg/m^3 ; W_{qp} = Potencial químico da água em J/kg .

$$\text{Energia dos Ventos (J)} = A_s \times \rho_{Ar} \times C \times V_m \times 3,14E+07 \text{ (s/ano)} \quad \text{Equação 3}$$

Em que, C = Coeficiente de Arrasto; ρ_{Ar} = Densidade do ar kg/m^3 ; V_m = Velocidade média do vento em m/s .

d) Biocapacidade

A divisão do território brasileiro em seus sete biomas, incluindo a zona costeira, foi o primeiro passo para a estimativa da BC. Devido à diversidade ecossistêmica e climática de cada bioma nacional, fez-se necessário uma coleta de dados representativa do espaço em estudo para que os resultados expressassem as variações esperadas nos biomas.

Além dos biomas, foram incluídas as categorias de áreas urbanas e áreas globais não ocupadas pelo ser humano. As áreas globais desabitadas, apesar de não contribuírem de forma expressiva na contabilidade da BC na metodologia convencional, foram con-

sideradas de forma proporcional ao território estudado. Os Desertos, geleiras e oceanos são considerados áreas globais não ocupadas pelo homem. Os aspectos metodológicos empregados nesta fase foram fundamentados no artigo de Pereira e Ortega (2012), com as devidas atualizações destas áreas, a partir de CIA (2016). A estimativa da BC destas áreas difere, em alguns aspectos, das estimativas anteriores. Como essas áreas constituem espaços comuns globais, o valor obtido do fluxo emergético foi dividido pela população global e não pela população da região analisada.

Em seguida foram calculados os fluxos de energia renováveis que incidem em cada espaço, conforme as Equações 1, 2 e 3. Após determinar os fluxos de energia renovável que incidem nestes espaços, foi feita a conversão para fluxos emergéticos (seJ/ano) (Equação 4), tendo como base os fatores de transformidade (seJ/J) de cada tipo de energia renovável, obtidos na base de dados Energy Database (2017) e Odum (2000).

$$\text{Emergia (seJ/ano)} = E \times T \quad \text{Equação 4}$$

Em que, E= Energia disponível em J/ano; T= Transformidade em seJ/J. As unidades base da emergia solar são Joules de energia solar equivalente (seJ). O fator de transformidade apresenta uma relação de proporcionalidade entre energia e emergia, a qual é definida como quantidade de emergia necessária para gerar uma unidade de energia de outro tipo, ou seja, emergia por unidade de energia (seJ/J). A transformidade de um produto é calculada somando-se todas as entradas de emergia do processo e dividindo-se pela energia agregada do produto. Quanto maior a quantidade de transformações de energia necessárias para a obtenção de um produto ou execução de um processo, maior será o valor da transformidade (ODUM, 1996; VOORA, THRIFT, 2010).

Após este procedimento foi feito o somatório do fluxo emergético incidente em cada espaço. Este fluxo consiste na quantidade de emergia incorporada a partir de fluxos energéticos de entrada e saída de um sistema. Desta forma, obtiveram-se os valores de emergia por pessoa, dividindo cada fluxo emergético pela população do país. Por fim, a BC foi estimada dividindo-se o resultado da etapa anterior para cada ecossistema pelo fator de densidade emergética global (DEG) (Equação 5). A densidade emergética pode ser definida como o fluxo emergético por unidade de tempo e área e serve como meio de se realizar comparações entre ecossistemas distintos, indicando o nível de atividade humana nestas áreas.

$$\text{Biocapacidade (gha/cap)} = (\Sigma Fr) / \text{DEG} \quad \text{Equação 5}$$

Em que, Fr= Fluxo Renovável per capita em seJ/cap; DEG= Densidade Emergética Global em seJ/gha. O valor utilizado de DEG (3,10 E +14) foi calculado no trabalho de Zhao et al. (2005) e foi calculado pela razão entre a emergia renovável total do planeta (seJ/ano) e sua área, que é expresso em hectares globais (gha). A unidade gha representa a quantidade de hectares de produtividade média mundial para terras e águas produtivas

para sustentar padrão de consumo da população mundial. Além disso, fornece informações a respeito da quantidade de energia necessária para manter a estrutura e funções de determinado ecossistema ou região (Odum, 1996, 2000; Pereira, Ortega, 2012).

e) Simulação de Cenários Extremos

A partir das equações apresentadas anteriormente para determinação dos fluxos de energia (Equação 1, 2 e 3) foi possível identificar que o parâmetro área remanescente de vegetação exerce impacto expressivo no resultado final do fluxo de energia e, consequentemente, da BC. No entanto, com intuito de demonstrar a importância da preservação dos biomas e suas funções ambientais, neste estudo, realizaram-se três análises em duas abordagens distintas.

A primeira análise consistiu no estado atual da BC dos biomas brasileiros, tendo como base seu estado de degradação. Para esta análise os dados referentes à cobertura vegetal preservada dos biomas foram obtidos do MMA (2016) e SOS MA (2016). A segunda análise consiste em uma simulação da BC considerando os sete biomas com 100% de sua cobertura vegetal intacta, caracteristicamente sem alterações antrópicas. Este seria considerado como um cenário de completa harmonia entre o desenvolvimento humano e a preservação ambiental. Na terceira análise foi simulado um cenário drástico, no qual foi considerado um alto nível de degradação ambiental, com apenas 10% de área remanescente dos biomas brasileiros. Com base nestas três abordagens pôde-se avaliar o capital natural que representa os biomas brasileiros.

f) Análise de Sensibilidade

Devido a existência de possíveis variações dos dados de entrada em cada ecossistema avaliado, uma análise de sensibilidade foi feita com base no desvio padrão ($\pm 1 \sigma$) dos parâmetros (radiação solar, precipitação média, ventos e área preservada) para avaliar como essa variação impactará nos resultados finais. Vale ressaltar que esta análise não foi aplicada a espaços globais não habitados pelo ser humano devido à sua complexidade e indisponibilidade de dados seguros para realizar a contabilização

Resultados

Ao analisar o mapa dos ventos (Figura 1a), verifica-se que sua incidência é mais intensa nos Pampas, Caatinga e Mata Atlântica, enquanto que a Amazônia apresentou o menor índice eólico. Em relação aos níveis de radiação solar (Figura 1b), as regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, onde se localizam a Caatinga, Mata Atlântica, Zona Costeira e Cerrado, apresentaram os maiores níveis. Tendo como base o mapa de precipitação pluvial (Figura 1c), percebe-se que as mais altas concentrações de chuvas ocorrem na Amazônia e que a Caatinga é caracterizada por extremos climáticos apresentando a menor pluviometria e a mais alta taxa de radiação solar.

A radiação solar (J), obtida pela Equação 1, apresenta o maior potencial energético quando comparada com o potencial químico da chuva (Equação 2) e eólico (Equação 3). No entanto, a contribuição solar em fluxo emergético é limitada pelo fator de transformabilidade ($Tr = 1 \text{ sej.j}^{-1}$), visto que é considerada uma fonte primária de energia (Odum, 1996). As variáveis vento ($Tr = 2,45E + 03 \text{ sej.j}^{-1}$) e potencial químico da chuva ($Tr = 3,06E + 04 \text{ sej.j}^{-1}$) apresentam fatores de transformabilidade maiores e marcantes variações de intensidade intra e inter biomas. Em termos emergéticos (sej), o vento exerce mais influência na Caatinga, nos Pampas e na Zona Costeira-Marinha, enquanto que o potencial químico da chuva foi a principal fonte de energia para os biomas, especialmente na Amazônia. Com base nos fluxos emergéticos de entrada, foi possível estimar a biocapacidade dos biomas brasileiros.

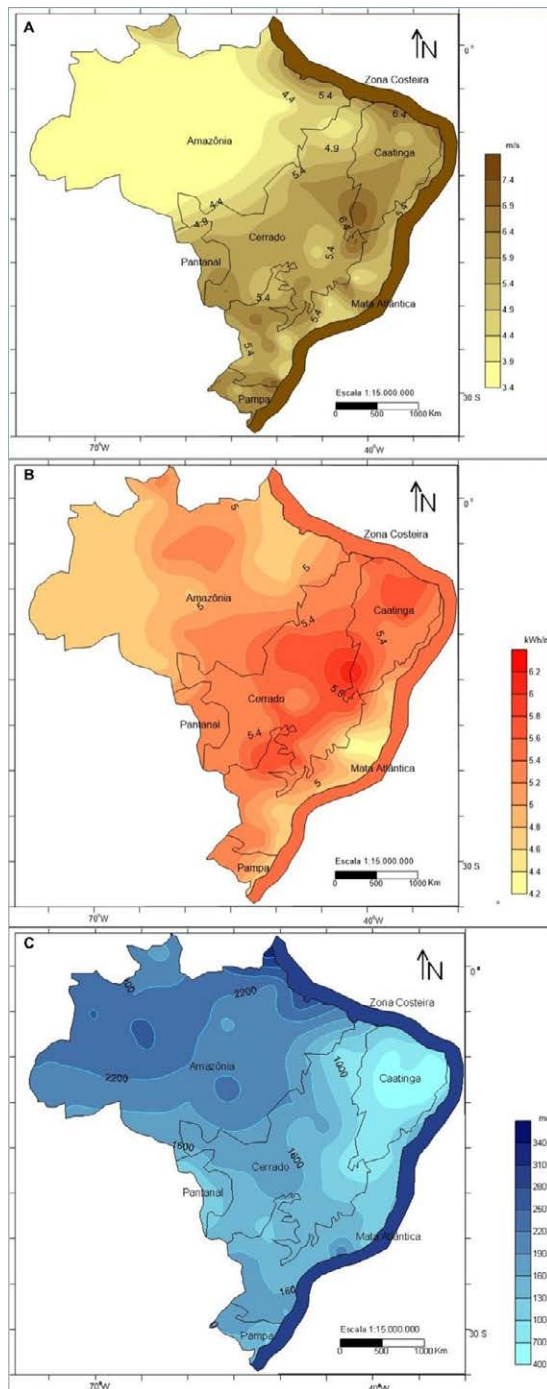
A Amazônia contribui com cerca da metade da BC da nação. O Cerrado, que ocupa 1/4 do território nacional, contribui com 14,8% da BC brasileira. O Sistema Costeiro-Marinho contribui com significativos 17% da BC. A Mata Atlântica por outro lado, mesmo com sua expressiva contribuição em biodiversidade e extensão territorial, contribui pouco para a BC do país. O Pantanal, que é 7,4 vezes menor que a Mata Atlântica, contribui com quase o mesmo percentual.

Os biomas brasileiros contribuem com uma BC de 38,42 gha/cap. Este é o espaço que cada cidadão brasileiro tem para obter os recursos naturais necessários para atender as suas demandas de consumo (água, energia, alimentos etc.) e para assimilar os resíduos gerados pela exploração e o consumo dos recursos naturais (gases do efeito estufa, lixo, agrotóxicos). A unidade adotada na contabilidade da PE e BC - hectares globais (gha) - representa hectares de terra ou água biologicamente produtivas no planeta.

As áreas urbanizadas apresentam uma pequena contribuição para a BC nacional, apenas 0,3%, mas os espaços globais desabitados pelo homem contribuíram com 3,59 gha/cap. É preciso destacar a contribuição dos oceanos na composição desse índice, mostrando a importância que eles exercem para manter o equilíbrio ecológico global. A contribuição dos espaços globais não ocupados foi mais significativa do que os biomas Caatinga, Mata Atlântica, Pampas e Pantanal.

O valor total da BC do Brasil, considerando os fluxos emergéticos, foi de 42,11 gha/cap em 2016. Esse valor representa a área necessária para atender as demandas de consumo e assimilação de rejeitos de cada cidadão brasileiro. As informações detalhadas sobre a composição do indicador da BC do Brasil podem ser visualizadas no documento suplementar 1.

Figura 1 – Mapas de incidência de ventos (A), radiação solar (B) e precipitação média (C) nos biomas brasileiros construídos pelo SIG



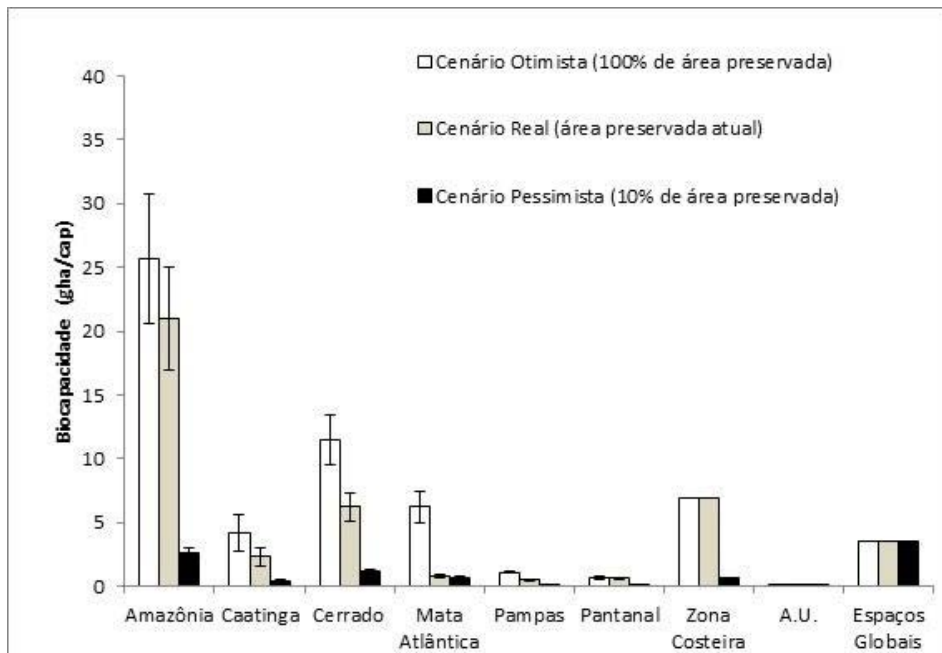
Fonte: Os autores, 2018.

Simulações de Cenários Extremos

Sob uma ótica otimista, considerando o cenário de plena preservação da cobertura vegetal (100%) nota-se os maiores biomas em extensão territorial, Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga; tem potencial para ampliar o índice de BC. Se este valor hipotético fosse atingido o conjunto dos biomas seria de 59,9 gha/cap, o que representa um incremento de 42% em relação a BC do ano de 2016. A Mata Atlântica apresentou ampla variação no valor da biocapacidade, um significativo aumento de 5,43 gha/cap (cerca de 690% a mais que no ano de 2016). O Pampa apresentou o segundo maior aumento percentual de biocapacidade (cerca de 115%). No Cerrado, essa variação correspondeu a um aumento de 5,25 gha/cap (84%). A Caatinga apresentou um aumento na biocapacidade de 1,86 gha/cap (82%). A Amazônia obteve uma variação de apenas (22%), entretanto esta correspondeu a um significativo acréscimo de 4,71 gha/cap.

A simulação do cenário pessimista, com apenas 10% da vegetação preservada, mostra que a BC seria reduzida em 9,2 gha/cap, cerca de quatro vezes menor do que a BC em 2016. O Pantanal e a Amazônia teriam redução de cerca de 90% da BC. O Cerrado teria redução 5,08 gha/cap (82%), enquanto que na Mata Atlântica a BC reduziria apenas 0,2 gha/cap (21%).

Figura 2 – Simulação da Biocapacidade média dos biomas brasileiros e sua comparação com o ano de 2016. As barras verticais indicam os desvios padrões



Fonte: Os autores, 2018.

A BC do Sistema costeiro-marinho não sofreu variação nas simulações de cenários. A ausência de cobertura vegetal e/ou a falta de dados sobre os níveis de degradação deste bioma.

Análise de Sensibilidade

Com base no desvio padrão ($\pm 1 \sigma$) dos parâmetros de entrada em cada bioma, detectou-se alta variabilidade nos dados de saída em cada ecossistema. Esta análise foi aplicada apenas para os dados de 2016. Assim como ocorreu na simulação de cenários extremos, os maiores desvios foram observados em ordem decrescente, respectivamente, nos biomas da Amazônia (± 4 gha/cap), Cerrado (1,09 gha/cap), Caatinga (0,75 gha/cap) e Mata Atlântica (0,15 gha/cap). No caso de um desvio padrão positivo, o valor encontrado para BC foi de 48,31, 15% maior que o valor médio. No caso de um desvio padrão negativo, o valor encontrado para BC foi de 35,92 gha/cap, 17% menor que o valor médio.

Mapa da BC dos Biomas

Os biomas têm características únicas, conferindo-lhes um padrão geral que permite distingui-los entre si. No entanto, isso não significa que um padrão uniforme seja observado em toda a sua extensão territorial. Com o objetivo de evidenciar como as variações dos parâmetros de entrada de cada ponto de coordenadas dos biomas impactam em sua BC, elaborou-se, com auxílio do SIG, o mapa da BC dos biomas brasileiros (Figura 3).

É possível observar no mapa que alguns biomas apresentam variações abruptas da BC em seus domínios. A BC da Amazônia, por exemplo, pode variar entre 4 gha/cap e 34 gha/cap. Por outro lado, biomas como os Pampas, a Mata Atlântica, Pantanal e a Caatinga apresentam uma conformação mais homogênea quanto a BC (Figura 3). Os resultados apresentados na análise de sensibilidade corroboram a afirmação anterior quanto a variabilidade de dados climáticos. Essa diversidade climática influencia diretamente o fluxo de energia dos recursos naturais dentro de cada território.

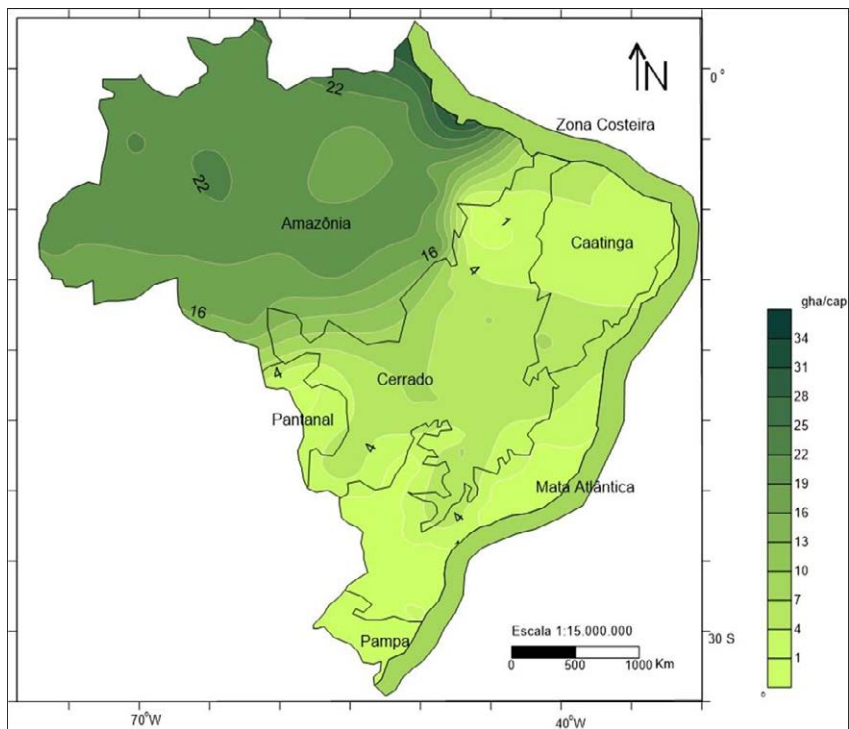
Discussão

O Brasil é a nação com a maior BC do planeta, mas sua PE vem aumentando ao longo dos últimos 50 anos, comprometendo o saldo ecológico do país (SARKODIE, 2021). A primeira quantificação da BC brasileira foi feita por Hallis et al. (2006), usando o método convencional da PE, e foi estimada em 9,9 gha/cap. Venetoulis e Talberth (2007) empregaram o método da PE baseada na Produtividade Primária Líquida (NPP) e sugeriram que a BC era de 29,16 gha/cap. Em um trabalho divulgado em 2012, que usou o método da Pegada Ecológica Emergética, Pereira e Ortega estimaram que a BC do Brasil em 2008 foi de 64,71 gha/cap. Segundo estes autores, os biomas brasileiros, com 45,21 gha/cap, contribuíram de forma significativa na composição do valor total. Estes autores propuseram a inserção dos “espaços globais não ocupados pelo homem” (desertos,

oceanos, glaciares) na composição do valor da BC, uma proposta acatada neste estudo.

Nesse trabalho estimamos em 42,11 gha/cap a BC dos biomas do Brasil, enquanto Pereira e Ortega (2012), estimaram em 49,5 gha/cap. Ou seja, entre 2008 e 2016 houve redução de aproximadamente 15% da BC brasileira. O valor da BC expressa a área dos ecossistemas necessária para atender as demandas de cada cidadão brasileiro, ou seja, cada cidadão teria uma cota de uso de aproximadamente 42 hectares globais de área (WACKERNAGEL et al., 2005). Ressalta-se que a unidade hectares globais anuais (gha) não representa um valor real em si, mas um valor representativo entre a disponibilidade de recursos naturais e o impacto causado pela poluição ambiental.

Figura 3 – Mapa da distribuição da biocapacidade dos Biomas Brasileiros



Fonte: Os autores, 2018.

A comparação entre PE e BC é uma forma de se interpretar o quão saudável está o equilíbrio entre as atividades antrópicas e os ecossistemas a nível regional. A relação entre estes indicadores nos reporta ao “balanço ecológico” de uma dada região (cidade, estado, país, etc). Uma das premissas para que o desenvolvimento a sustentabilidade se confirme é que o índice da BC exceda a PE, pois assim o balanço ecológico será positivo (YUE et al., 2013). Portanto, o monitoramento destes dois indicadores de sustentabilidade pode

ser usado em políticas públicas que visem um modelo de desenvolvimento econômico e social em equilíbrio com a capacidade de suporte dos ecossistemas nativos. Através do monitoramento destes indicadores pode-se prever a adoção de medidas, como o reflorestamento e planejamento da expansão de núcleos urbanos, como medidas que visem um modelo de desenvolvimento harmonioso para a sociedade (WACKERNAGEL, 2005).

A estimativa da BC por abordagens NPP e Emergética refletem melhor a realidade de uma área quando comparada com a PE convencional que normalmente apresenta valores subestimados e, portanto, vem sendo questionada quanto a sua representatividade e funcionalidade (GALLI et al., 2016). No entanto, a análise emergética também apresenta limitações. Há um debate sobre a composição do fator de transformidade emergética de alguns itens devido à complexidade de se aferir alguns sistemas (BIA et al., 2015). Deve-se considerar também a localização geográfica aonde o fluxo está sendo medido e as sazonalidades climáticas, já que a emergia é um fator de transformação que expressa o quanto de energia solar (J) é necessária para gerar uma unidade de recurso (produto, energia, processo) produzido (ODUM, 1996).

Vale ressaltar que os fatores de transformidade são altamente mutáveis com o tempo e que sua mensuração dependerá do nível de aplicação da metodologia. Contudo, quando contabilizamos o fluxo de energia de um processo ou produto sob a ótica da emergia, este incorpora algumas dimensões que não são consideradas na PE convencional, como o esforço do trabalho humano, a perda de solo e a disposição de resíduos no ambiente, por exemplo (BAI et al., 2015), externalidades que não são contabilizadas no sistema econômico atual. É fundamental que todas as transformidades utilizadas estejam considerando a mesma baseline, o que permite comparações. O trabalho de Brown et al. (2016), por exemplo, propõem que a energia das ondas, geotermal e solar (seJ.J-1) sejam as baseline dos fatores de transformidade emergética, pois podem ser aferidos de forma mais rigorosa. Os autores estimaram que a baseline da biosfera é de $12,1 E+24$ sej.year⁻¹.

A principal contribuição deste estudo foi o desenvolvimento de uma modelagem que permitisse estimar a BC dos biomas brasileiros e compreender a distribuição espacial dos fluxos de energia (radiação solar, ventos, cobertura florestal) e expor o resultado em mapa. A integração da metodologia da Pegada Ecológica Emergética com os dados climáticos georreferenciados são fundamentais para mapear e estimar a oferta, o consumo e o impacto de recursos em diferentes níveis de abrangência (MELLINO et al., 2015; YANG et al., 2018). Há evidências de que o indicador da PE seja mais realista quando usado em convergência com o uso de dados georreferenciados e emergia (ZHOU et al., 2009; SUN et al., 2015). A associação dessas técnicas pode representar de forma mais fiel o efeito das pressões antrópicas nos ecossistemas e seu estado ambiental (MELLINO et al., 2015; YANG et al., 2018).

O modelo proposto neste artigo considerou o somatório de fluxos de energia renovável incidente nos ecossistemas brasileiros: radiação solar, ventos e potencial químico da chuva, enquanto que as estimativas anteriores de Zhao et al. (2005) e Pereira e Ortega (2012), foram considerados apenas o potencial químico da chuva como o maior fluxo emergético em espaços bioprodutivos. Além disso, esses autores, por razões práticas,

optaram por utilizar um valor médio para este recurso, enquanto este estudo partiu da utilização da estimativa dos três parâmetros climáticos, estimados por informações georreferenciadas dos diversos pontos no território brasileiro. Este procedimento melhorou a estimativa da BC, pois leva em consideração as variações climáticas dos biomas estudados.

Os resultados foram expressos em unidades per capita e foi utilizada a população brasileira nos cálculos da BC em todas as áreas, exceto os espaços globais que utiliza a população mundial. Em trabalhos futuros sugere-se que o número de habitantes seja avaliado em cada bioma. Este procedimento certamente irá conferir mais exatidão aos mapas de BC. A metodologia aqui empregada considerou a população brasileira em 2016, 206 milhões de habitantes do Brasil (IBGE, 2016), e essa população foi distribuída uniformemente entre os biomas estudados.

A análise de sensibilidade (desvio padrão apresentado na Figura 2) detectou que pequenas variações nos parâmetros de entrada nos biomas impactam com grandes mudanças nos dados de saída em cada ecossistema. Os resultados mostram que além da extensão territorial, o nível de cobertura florestal dos biomas e a população são fatores que afetam significativamente o valor da BC. Ao contrário da extensão do bioma, os parâmetros população e a cobertura florestal são parâmetros que podem ser manipulados a partir de políticas públicas voltadas para a implantação de um modelo de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.

As simulações dos dois cenários de cobertura florestal (10% e 100%) permitiu visualizar com clareza o quão importante é a presença das matas nativas. Essa ação evidenciou a necessidade da elaboração de programas e políticas voltadas para conscientização ambiental da população brasileira quanto à conservação do capital natural dos biomas para suportar a demanda humana. Santiago e Couto (2020) mostram uma clara relação entre os índices de desflorestamento e o desenvolvimento socioeconômico do Brasil no início do século atual e destacam a falta de sustentabilidade deste modelo devido a efemeridade do recurso natural que vem impulsionando os indicadores de desenvolvimento do país. Algumas iniciativas vêm sendo tomadas conforme foi a Instituição do Código Florestal Brasileiro (1934, 1965) e o decreto da Lei Nº 12.727, de 17 de Outubro de 2012, que em seu Art. 1ºA “[...] estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos” (BRASIL, 2012).

No entanto, o que se observa nos últimos anos é o avanço do desmatamento das florestas nativas se refletem na queda da BC dos biomas mais atingidos. Queimadas, a expansão da fronteira agrícola e a criação de gado são os motivos mais frequentes da perda da vegetação nativa. Na Amazônia e no Cerrado, por exemplo, a taxa de desflorestamento vem aumentando nos últimos anos e as ações do atual governo estão se refletindo na intensificação deste quadro (TRIGUEIRO et al., 2020; WEST, FEARNSSIDE, 2021).

Os resultados da análise de sensibilidade mostram como o comportamento das variáveis climáticas influenciam o fluxo de energia dos recursos naturais dentro de cada

território. A variabilidade natural dos dados climáticos de cada bioma é esperada, no entanto, a distribuição desuniforme de estações climatológicas no território em estudo certamente contribuem para aumentar o erro experimental.

A Mata Atlântica foi intensamente degradada ao longo dos últimos séculos, mesmo no período pré-cabralino pelos índios nativos (DEAN, 1995). A BC deste bioma aumentaria significativamente se a cobertura florestal se estendesse. Atualmente, a área de floresta nativa é de apenas 12,5% (MMA, 2016; SOS MA, 2016), valor muito próximo ao simulado pelo cenário pessimista, e por isso impactou negativamente o indicador da BC. Esta informação sugere atenção a vulnerabilidade ambiental deste bioma e a urgência de tomadas de decisões que visem sua preservação e regeneração. É o bioma brasileiro mais ameaçado por ações antrópicas, abriga cerca de 72% da população brasileira e por apresentar altos níveis de endemismo é classificada como um hotspot ao nível global (ALMEIDA, 2016).

A Amazônia, devido ao índice elevado de áreas preservadas, incidência de chuvas e extensão territorial, apresentou a maior contribuição para BC brasileira, cerca de 50%. Com mais de 1,5 milhões de espécies catalogadas a Amazônia é considerada a maior reserva de biodiversidade mundial. Contudo, a sustentabilidade deste bioma vem sendo ameaçada (UBIRAJARA et al., 2016). Estimativas indicam que a taxa de desmatamento da Amazônia foi intensa entre 2000 e 2008, mas a partir de 2014 voltou a se intensificar (CERRI et al., 2007; WEST, FEARNESIDE, 2021). O governo brasileiro vem implantando programas e políticas públicas (PRODES, DETER, PMABB) na tentativa de reduzir e monitorar este problema (MMA, 2016).

Cerca de 20 milhões de habitantes vivem no Cerrado, um extenso bioma que ocupa 1/4 do território nacional e que contribui com 14,8% da BC brasileira. O Cerrado é considerado um hotspot mundial por apresentar abundância de espécies endêmicas, sendo reconhecido como a savana mais rica do mundo, abrigando pouco mais de 11 mil espécies de plantas nativas. De acordo com Sawyer (2009) a taxa de desmatamento anual é de aproximadamente 30.000 km².

A Caatinga devido ao clima semiárido e o desmatamento é um bioma extremamente frágil e sujeito à desertificação (NUNES CARVALHO et al., 2010). O Pampa e o Pantanal são considerados os menores biomas brasileiros (IBGE, 2019). O Pampa é composto por ecossistemas naturais de alta biodiversidade que dão suporte a serviços ambientais fundamentais como a conservação de recursos hídricos, provimento de recursos genéticos, a disponibilidade de polinizadores, entre outros (PILLAR et al., 2009). O Pantanal, por sua vez, apresenta uma das maiores extensões úmidas contínuas do planeta e abriga uma diversidade única. O Pantanal, apesar de ser muito menor que a Mata Atlântica em extensão territorial, contribui de forma similar para a BC. Isso pode ser explicado pelos dados da cobertura florestal que é mais extensa no Pantanal.

O Sistema Costeiro-Marinheiro contribui com significativos 17% da BC brasileira. Este bioma é ocupado, em sua parte continental, por Formações Pioneiras (restingas, mangues, dunas, etc.), com influências do mar e fluviomarinha e tem uma faixa de mar de 200 milhas náuticas (IBGE, 2019). Sua porção territorial corresponde a uma faixa

complexa, dinâmica e altamente mutável, sujeitas a ação de diversos processos geológicos entre o domínio continental e marinho. O Sistema Costeiro-Marinho vem sendo descaracterizado pelas ações antrópicas relacionado principalmente pelo uso e ocupação do solo (AMARAL, JABLONSKI, 2005; LINS-DE-BARROS, 2017).

O saldo positivo da BC brasileira (42 gha/cap) e o fato de termos a maior BC entre as nações (SARKODIE, 2021), não significa que este quadro não possa ser melhorado. Há muito a se fazer para melhorar a qualidade dos serviços ecossistêmicos brasileiros, como: expansão das Unidades de Conservação, diminuição do desmatamento a partir do aumento de fiscalização da exploração e comércio clandestino de recursos renováveis, uso de técnicas agrícolas sustentáveis e utilização de fontes de energia renováveis (Lei Nº 9.478, 1997). Desse modo, torna-se fundamental a existência de políticas de conscientização da sociedade quanto às questões ambientais e a necessidade de manutenção e preservação dos ecossistemas brasileiros.

As previsões apontadas no relatório IPBES (2018) reforçam a necessidade de se monitorar e apontar meios para a ocupação de áreas preservadas, pois a extrapolação em longo prazo dos limites ecossistêmicos, como já constatado em muitas regiões a nível global, pode ser a causa de colapsos econômicos e sociais no futuro. O relatório destaca que atualmente apenas 25% dos ecossistemas terrestres ainda não sofreram impacto significativo e prevê uma redução assustadora, de apenas 10%, para o ano de 2050. Os locais mais vulneráveis a perdas expressivas são a África subsaariana, Ásia e as Américas do Sul e Central (IPBES, 2018).

Este estudo apresenta algumas limitações. A coleta de informações por meio de trabalho de campo, em tempo real, e uma calibração precisa do método de interpolação podem melhorar a eficácia da metodologia empregada. A falta de dados seguros sobre a Zona Costeira: extensão de área preservada, dados climáticos e mensuração dos impactos ambientais torna imprecisa a estimativa real da BC deste ecossistema. A análise apresentada não incluiu as áreas de pastagem, cultivo e florestas, podendo ser no futuro admitidas como inserção de novas variáveis o que calibraria mais ainda os resultados da modelagem. Os fatores de transformidade são influenciados pelas variações regionais, temporais e ao sistema produtivo dos bens e serviços consumidos em determinado local. Este aspecto requer o detalhamento e geração de dados primários a nível local para que o modelo seja mais preciso. Para o refinamento dos mapas climáticos (Fig. 1 e Fig. 3) sugere-se o uso de dados disponíveis na base espacial de dados climáticos em formato grid (raster), com alta resolução espacial (FICK e HIJMANS, 2017).

Conclusões

No ano de 2016 a biocapacidade dos biomas brasileiros foi de 42,11 gha/cap. Este valor corresponde a área ecossistêmica que cada cidadão brasileiro precisa para absorver a poluição gerada e suas demandas por recursos naturais. Os biomas Amazônico e o Sistema Costeiro-Marinho contribuíram expressivamente com este valor, devido ao seu elevado capital natural, a extensão de suas áreas e a preservação da floresta amazônica.

Para aumentar o valor da BC brasileira os parâmetros população e tamanho de áreas preservadas podem ser ajustados a partir de políticas públicas voltadas a um modelo de Desenvolvimento Sustentável. Desse modo, torna-se fundamental a existência de políticas de conscientização da sociedade quanto às questões ambientais e a necessidade de manutenção e preservação dos ecossistemas brasileiros como: o cumprimento da legislação ambiental vigente no país, principalmente a Lei da Proteção da Vegetação Nativa e o Novo Código Florestal, a expansão do número de Unidades de Conservação e a promoção da educação ambiental são alguns dos mecanismos que poderiam impactar positivamente a BC brasileira, principalmente a Mata Atlântica e o Cerrado (Figura 2).

Os resultados encontrados neste estudo podem ser usados para amparar tomadas de decisões sobre o uso dos recursos naturais e sua relação com o meio ambiente. O uso de dados climáticos georreferenciados (GIS) foi útil para observar, através de mapas, o mosaico da BC de cada bioma estudado. Esta metodologia apresenta potencial de replicabilidade a nível local ou regional. Para trabalhos futuros, sugere-se a calibração das técnicas de interpolação e determinação de dados climáticos e demográficos em tempo real, o que permitirá um detalhamento ainda mais preciso dos resultados.

Agradecimentos

A bolsa de estudos de Wallan Azevedo dos Santos concedida pelo Instituto Federal Fluminense. Aos pareceristas do manuscrito que contribuíram com apontamentos valiosos para a melhoria do trabalho.

Referências

- ALMEIDA, D. **Recuperação Ambiental Da Mata Atlântica**. 3. ed. Ilhéus, Bahia: Editus, 2016.
- ALVES, J. B.; DENARDIN, V. F.; DA SILVA, C. L. Aproximações entre os principais indicadores de sustentabilidade e as alternativas ao desenvolvimento propostas por E. Leff. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 13, n. 24, dez. 2011.
- AMARAL, A. C. Z., JABLONSKI, S. Conservação da biodiversidade marinha e costeira no Brasil. **Megadiversidade**, v.1, n.1, p. 43-51, jul. 2005.
- BAI, X.; WEN, Z.; AN, S.; LI, B. Evaluating sustainability of cropland use in Yuanzhou county of the Loess Plateau, China using an Emergy-Based Ecological Footprint. **Plos One**, v. 10, n. 3, p. 1-15, 2015. doi:10.1371/journal.pone.0118282.
- BRASIL. **Lei Nº 12.727, de 17 de Outubro de 2012**. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as

Leis nº s 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12727.htm. Acesso em: 20 de mar. 2018.

BROWN, M.T., CAMPBELL, D.E., DE VILBISS, C., ULGIATI, S. The geobiosphere emergy baseline: a synthesis. *Ecol. Model.* 339, 92-95. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.03.018>.

CMMAD – Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente E Desenvolvimento. **Nosso Futuro Comum**. 2a Ed. Tradução De Our Common Future. 1a Ed. 1988. Rio De Janeiro, Editora Da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CERRI, C.E. et al. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. **Agriculture, Ecosystems And Environment**, v.122 p.58-72, 2007.

CRESESB. Centro De Referência Para Solar e Eólica Sérgio De Salvo Brito. **Atlas solarimétrico do Brasil**, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

_____. Centro De Referência Para Solar e Eólica Sérgio De Salvo Brito **Atlas do potencial eólico brasileiro**, 2012. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

CIA. Central Intelligence Agency. **The World Factbook**, 2016. Disponível em: <http://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>. Acesso em: 15 Mar. 2017.

CHAN, K.M.A. *et al.* Payments for ecosystem services: Rife with problems and potential for transformation towards sustainability. **Ecological Economics**, 140, p. 110-122, 2017.

CHEN, B.; CHEN, G. Q. Ecological footprint accounting based on emergy—A case study of the Chinese society. **Ecological Modelling**, v. 198, n. 1–2, p. 101–114, set. 2006.

DEAN, W. A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira. Trad. C.K. Moreira. São Paulo: Cia. das Letras, 1995.

GODINHO, R. S.; DA MOTA, M. J. P. Desafios da Convenção sobre a diversidade biológica. **Revista de Direito da Cidade**, v. 5, n. 2, p. 106–136, 2013.

EMERGY SOCIETY DATABASE. The Emergy Society. **Transformities list**, 2017. Disponível em: <https://www.emergysociety.com/emergy-society-database/>. Acesso em: 17 Mar. 2017.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, pg. 4302-4315, 2017.

GALLI, A. et al. Questioning the Ecological Footprint. **Ecological Indicators**, v. 69, p. 224–232, out.2016.

GONZALEZ, M. H. G.; ANDRADE, D. C. A sustentabilidade ecológica do consumo em Minas Gerais: uma aplicação do método da pegada ecológica. **Nova Economia**, v. 25, n. 2, p. 421–446, ago. 2015.

HAILS, C. et al. **Living Planet Report 2006**. World Wide Fund for Nature

International (WWF), Zoological Society of London (ZSL), Global Footprint Network, Gland, Suíça, 2006.

HENGL, T. **A practical guide to geo-statistical mapping**. 2.ed. Amsterdam: University of Amsterdam, 291p., 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População Brasileira** (2016). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 Mar. 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/15842-biomass.html?=&t=publicacoes>. Acesso em dezembro de 2019, 2019.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Precipitação Acumulada**, 2011. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso em: 10 Mar. 2017.

IPBES. **Worsening Worldwide Land Degradation Now “Critical”, Undermining Well-Being of 3.2 Billion People**. IPBES, 2018. Disponível em: <https://www.ipbes.net/news/media-release-worsening-worldwide-land-degradation-now-%E2%80%99critical%E2%80%99-undermining-well-being-32>>. Acesso em: 10 Abr. 2018.

LINS-DE-BARROS, F.M. Integrated coastal vulnerability assessment: a methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions - case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. **Ocean & Coastal Management**, v.149, p.1-11, 2017.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Mapa de cobertura vegetal dos Biomas Brasileiros**, 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 10 Mar. 2017.

MARCHI, C. M. D. F. Cenário mundial dos resíduos sólidos e o comportamento corporativo brasileiro frente à logística reversa. **Perspectivas em Gestão & Conhecimento**, João Pessoa, v. 1, n. 2, p. 118–135, jul/dez. 2011.

MELLINO, S.; BUONOCORE, E.; ULGIATI, S. The worth of land use: A GIS–emergy evaluation of natural and human-made capital. **Science of The Total Environment**, v. 506–507, p. 137–148, fev. 2015.

NAKAJIMA, E. S.; ORTEGA, E. Carrying capacity using emergy and a new calculation of the ecological footprint. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 1200–1207, jan. 2016.

NICCOLUCCI, V. et al. Biocapacity vs Ecological Footprint of world regions: A geopolitical interpretation. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 23–30, maio 2012.

NUNES CARVALHO, J. L. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, abr. 2010.

ODUM, H.T. **Environmental accounting, emery and decision making**. New York: J. Wiley. 370 p. 1996.

ODUM, H.T.; BROWN, M.T.; WILLIAMS, S.B. **Handbook of Emery Evaluations Folios 1–4**. Center for Environmental Policy. University of Florida, Gainesville. 2000.

PEREIRA, L.; ORTEGA, E. A modified footprint method: The case study of Brazil. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 113–127, mai. 2012.

PILLAR, V. D.P. et al. **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA; 2009.

RÊGO, J. C. L.; SOARES, A. G.; DA SILVA, F. S. Loss of vegetation cover in a tropical island of the Amazon coastal zone (Maranhão Island, Brazil). **Land Use Policy**, v.71, p. 593–601, fev. 2018.

SANTIAGO, A. R.; do COUTO, H. T. Z. Socioeconomic development versus deforestation: considerations on the sustainability of economic and social growth in most Brazilian municipalities. **Environmental Development**, v. 35, pg. 100520, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100520>

SARKODIE, S. A. Environmental performance, biocapacity, carbon & ecological footprint of nations: drivers, trends and mitigation options. **Science of the Total Environment**, v. 751, pg. 141912, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141912>

SAWYER, D. Fluxos de carbono na Amazônia e no Cerrado: um olhar socioecossistêmico. **Sociedade e Estado**, v.24, n.1, p. 149-171, jan/abr 2009.

SICHE, J. R. et al. Sustainability of nations by indices: Comparative study between environmental sustainability index, ecological footprint and the emery performance indices. **Ecological Economics**, v. 66, n. 4, p. 628–637, jul. 2008.

SUN, X. et al. The ecological security evaluation research of Shangri-La based on GIS and RS. 23 ed. **International Conference on Geoinformatics**. Whuan, China, IEEE, jun. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7378634/>>. Acesso em: 20 fev. 2018

SOS MA - FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Nossa causa**, 2016. Disponível em: <http://www.sosma.org.br>. Acessado em 16 de Março de 2017.

TRIGUEIRO, W. R.; NABOUT, J. C.; TESSAROLO, G. Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Management**, v. 275, pg. 111243, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111243>

UBIRAJARA, O. et al. **Economic valuation of changes in the Amazon forest area: priority areas for biodiversity conservation in the brazilian Amazon**. Ed. CRS/UFGM, 32p., 2016.

VENETOULIS, J.; TALBERTH, J. Refining the Ecological footprint. **Environment Development and Sustainability**, Springer, v.10 n.4, p. 441-469, jul. 2008.

VOORA, V.; THRIFT, C. **Using Emergy to Value Ecosystem Goods and Services**. International Institute for Sustainable Development (IISD), 91p., 2010.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth**, New Society Publishers, 1996.

WACKERNAGEL, M. et al. **National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The Underlying Calculation Method**, Global Footprint Network, Oakland, California, 2005.

WEST, T. A. P.; FEARNESIDE, P. M. Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. **Land Use Policy**, v. 100, pg. 105072, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105072>

WIEDMANN, T.; BARRETT, J. A Review of the Ecological Footprint Indicator: Perceptions and Methods. **Sustainability**, v. 2, n. 6, p. 1645–1693, 7 jun. 2010.

WORLD BANK. **Global Economic Prospects**, June 2016, Divergences and Risks. The World Bank, 2016. Disponível em: <https://www.worldbank.org/> Acesso em: 20 fev. 2018.

YANG, Q. et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 678–695, maio 2018.

YUE, D.; GOU, J.; HUI, C. Scale dependency of biocapacity and the fallacy of unsustainable development. **Journal of Environmental Management**, v. 126, pg. 13-19, 2013.

ZHAO, S.; LI, Z.; LI, W. A modified method of ecological footprint calculation and its application. **Ecological Modelling**, v. 185, n. 1, p. 65–75, jun. 2005.

ZHOU, T.; WANG, Y.; WANG, F. A dynamic assessment of Ecological Footprint and Biocapacity in Guangzhou using RS and GIS. **Urban Remote Sensing Event**, Joint, IEEE, 2009.

Wallan Azevedo dos Santos

✉ wallan.azevedo@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5925-4908>

Submetido em: 20/06/2018

Aceito em: 18/07/2021

2021;24e:01342

Milton Erthal Junior

✉ miltonerthal@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9959-3568>

Renato Gomes Sobral Barcellos

✉ rgsbarcellos@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8989-9985>

Como citar: SANTOS, W.A.; ERTHAL JR., M., BARCELLOS, R. G. S. Biocapacidade dos biomas brasileiros a partir de conceitos da pegada ecológica emergética. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo, v. 24, p. 1-24, 2021.

BIOCAPACIDAD DE BIOMAS BRASILEÑOS BASADOS EN CONCEPTOS DE LA HUELLA ECOLÓGICA EMERGÉTICA

Wallan Azevedo dos Santos
Milton Erthal Junior
Renato Gomes Sobral Barcellos

São Paulo. Vol. 24, 2021

Artículo original

Resumen: El objetivo de este trabajo es evaluar la biocapacidad (BC) de biomas brasileños utilizando los conceptos del método de Huella Ecológica Emergente. Los datos sobre el clima y la cobertura forestal se interpolaron utilizando el método Kriging. En 2016, el BC brasileño era de 42,11 gha / cap, uno de los más grandes del mundo. El área de cobertura forestal de los biomas fue investigada y simulada en dos escenarios: optimista (con una cobertura forestal del 100%) y pesimista (solo el 10%). La Amazonia, que aporta la mitad del BC brasileño, reduciría su contribución en un 88% en un escenario pesimista. La Mata Atlántica aportó sólo el 1,9% de la CB nacional, sin embargo, en un escenario optimista, aumentaría su contribución en un 690%. La reducción de la deforestación, los incendios y la expansión de áreas protegidas por ley son medidas que impactan positivamente la CB de los biomas estudiados. Esta metodología se puede utilizar como indicador de la calidad ambiental ya que se adhiere a los principios del Desarrollo Sostenible.

Palabras-clave: Desarrollo Sostenible; Emergía; Indicadores de Sostenibilidad; Gestión ambiental.

Como citar: SANTOS, W.A.; ERTHAL JR., M.; BARCELLOS, R. G. S. Biocapacidad de biomas brasileños basados en conceptos de la huella ecológica emergética *Ambiente & Sociedade*. São Paulo, v. 24, p. 1-24, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180134r2vu2021L5AO>

Biocapacity of Brazilian Biomes from using concepts of the Emergy Ecological Footprint

Wallan Azevedo dos Santos
Milton Erthal Junior
Renato Gomes Sobral Barcellos

São Paulo. Vol. 24, 2021
Original Article

Abstract: The aim of this work is to assess the biocapacity (BC) of Brazilian biomes using the concepts of the Emergy Ecological Footprint method. Climate and forest cover data were interpolated using the Kriging method. In 2016, the Brazilian BC was 42.11 gha / cap, one of the largest in the world. The biome's forest coverage area was investigated and simulated in two scenarios: optimistic (with 100% forest coverage) and pessimistic (only 10%). The Amazon, which contributes half of the Brazilian BC, would reduce its contribution by 88% in a pessimistic scenario. The Atlantic Forest contributed only 1.9% of the national BC, however, in an optimistic scenario, it would increase its contribution by 690%. The reduction of deforestation, fires and the expansion of areas protected by law are measures that positively impact the BC of the studied biomes. This methodology can be used as an indicator of environmental quality as it adheres to the principles of Sustainable Development.

Keywords: Environmental Management; Emergy; Sustainability Indicators; Sustainable Development.

How to cite: SANTOS, W.A.; ERTHAL JR., M.; BARCELLOS, R. G. S. Biocapacity of Brazilian Biomes from using concepts of the Emergy Ecological Footprint. *Ambiente & Sociedade*. São Paulo, v. 24, p. 1-24, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180134r2vu2021L5AO>