

Cidades como elementos centrais nas transições climáticas

Cities as central elements in climate transitions

Marcos Buckeridge



resumo

Lidar com as mudanças climáticas no contexto urbano exige enfrentar questões complexas envolvendo política, legislação, tecnologia e comportamento humano. Este artigo examina as origens evolutivas do comportamento social humano e do surgimento das cidades. É apresentada uma visão sistêmica do que é chamado de fisiologia urbana. O ponto central é que, ao compreender como as cidades funcionam do ponto de vista do governo e da sociedade, estas possam se alinhar no sentido de encontrar as políticas públicas mais adequadas para enfrentar os efeitos das mudanças climáticas nas próximas décadas e propor um olhar às cidades como urbsistemas, para pensá-las como sistemas dinâmicos.

Palavras-chave: mudanças climáticas; sociedade; cidades; sistemas urbanos.

abstract

Dealing with climate change in an urban context demands addressing complex issues involving politics, legislation, technology, and human behavior. This paper examines the evolutionary origins of human social behavior and the emergence of cities. It presents a systemic view of what is called urban physiology. The central point is that, by understanding how cities function from the perspective of government and society, they can align themselves to find the most appropriate public policies to address the effects of climate change in the coming decades, and propose a view of cities as urban systems, to think of them as dynamic systems.

Keywords: climate change; society; cities; urban systems.

Uma transição de larga escala será essencial ainda neste meio de século para minimizar os impactos das mudanças climáticas. Embora muitos desses efeitos – como desmatamento, elevação do nível do mar e crescimento populacional – já estejam em curso, diversas tecnologias seguem disponíveis e podem ser aplicadas para mitigar e adaptar as sociedades às transformações climáticas.

Há quatro grandes transições: urbana, agrícola, ecossistêmica/florestal e costeira. As quatro transições interagem entre si e formam um sistema planetário complexo. Duas delas (ecossistêmica e costeira) são baseadas na natureza; as outras duas (agrícola e urbana) são artificiais, criadas pela espécie humana. Com

a intensa urbanização nos séculos XX e XXI, as cidades tornaram-se o principal ponto de convergência dos efeitos oriundos das demais transições.

Lidar com as mudanças climáticas no contexto urbano exige enfrentar questões complexas envolvendo política, legislação, tecnologia e comportamento humano. Para isso, é fundamental compreender como as cidades funcionam e como os mecanismos por trás de seu desenvolvimento têm raízes em processos biológicos e sociais que também aparecem em outras espécies sociais, como insetos e mamíferos, que desenvolveram estruturas “urbanas” análogas ao longo da história evolutiva.

MARCOS BUCKERIDGE é professor titular do Departamento de Botânica do Instituto de Biociências (IB) da USP e vice-diretor do Instituto de Estudos Avançados (IEA) da USP.

Esses comportamentos sociais evoluíram em um planeta em constante mudança climática ao longo de milhões de anos. No caso humano, o surgimento de assentamentos é relativamente recente – apenas nos últimos milhares de anos –, mas levou à formação de vilas, cidades médias e megalópoles que hoje abrigam bilhões de pessoas. A emergência das cidades modernas é resultado de uma combinação de fatores biológicos, antropológicos e físicos. Embora a história humana seja crucial, as leis da física e da biologia explicam em grande medida como as cidades surgem, funcionam e se organizam.

Como mamíferos sociais, talvez estejamos “condenados” a viver em grupos que seguem certas regras universais, tanto físicas quanto biológicas e psicológicas, especialmente aquelas derivadas da psicologia social.

A urbanização acelerada e o crescimento populacional foram amplamente sustentados por tecnologias baseadas em energia fóssil, especialmente no século XX. Isso nos levou à construção de cidades altamente dependentes de energia e de um consumo contínuo de bens e serviços, dos quais nos tornamos estruturalmente dependentes.

Apesar da centralidade da questão energética – principalmente da dependência dos combustíveis fósseis –, outras dimensões políticas, sociais, econômicas e tecnológicas também precisam ser ajustadas para que as cidades enfrentem com eficácia os impactos climáticos. Tecnologias como energias renováveis, agricultura ecológica, economia circular e o uso eficiente da água já estão disponíveis e podem fazer parte de uma resposta urbana mais sustentável.

São dois os elementos fundamentais para a efetiva aplicação de tecnologias que ajudam as cidades a se adaptar ao avanço

das mudanças climáticas: política pública e legislação. Políticas bem planejadas, sustentadas por consenso social, podem criar o ambiente necessário para que essas tecnologias prosperem (Buckeridge, 2021). Já a legislação funciona como um filtro. É por meio dela que ações de mitigação e adaptação climática se tornam viáveis, legítimas e sustentáveis a longo prazo.

Com o objetivo de dar suporte às ideias que envolvem as respostas das cidades às mudanças climáticas, num período em que uma das Conferências das Partes (COP30) tem base no Brasil, este artigo examina as origens evolutivas do comportamento social humano e do surgimento das cidades. Nele, apresento uma visão sistêmica do que chamamos de fisiologia urbana. Meu ponto central aqui é que, ao compreender como as cidades funcionam do ponto de vista do governo e da sociedade, estas possam se alinhar no sentido de encontrar as políticas públicas mais adequadas para enfrentar os efeitos das mudanças climáticas nas próximas décadas e propor um olhar às cidades como urbsistemas, para pensá-las como sistemas dinâmicos. Como subsídio às discussões durante a COP30, em todo o país e no mundo, sugere-se centralizar os focos da resiliência urbana, sem deixar de lado as demais transições necessárias.

A ORIGEM BIOLÓGICA DAS CIDADES

A humanidade não foi a primeira a criar estruturas urbanas. Muito antes do surgimento do *Homo sapiens*, outras espécies desenvolveram sistemas complexos que podem ser considerados “pré-urbanos”. Um exemplo notável e bem estudado é o das

formigas, que habitam a Terra há cerca de 400 milhões de anos. Muitas dessas espécies são classificadas como *eussociais* e formam castas funcionalmente distintas – rainhas, soldados e operárias –, apesar de compartilharem o mesmo DNA, que não difere em sequência, mas apenas nas posições das metilações no genoma.

Insetos *eussociais* operam como verdadeiras comunidades: cultivam fungos para alimentação, mantêm espaços para cuidados de saúde e gestão de resíduos, e funcionam a partir da interação coordenada de indivíduos, gerando um sistema complexo cujas relações em rede se chamam enxame – uma forma de organização baseada em regras simples que, em conjunto, resulta em comportamento emergente altamente estruturado.

Vários autores propuseram uma relação entre a organização da sociedade humana e os animais *eussociais*. Um dos principais é Edward Wilson, o propositor da área que passou a se chamar sociobiologia¹. Wilson não compara as cidades humanas diretamente com as das formigas, mas suas ideias implicam uma similaridade muito próxima entre os sistemas. Outra comparação de sistemas urbanos com outros animais é feita por Geoffrey West em seu livro *Scale*. Como comentarei mais abaixo, West caracteriza as cidades utilizando aspectos de sua estrutura física e o faz comparando-a com a estrutura física de comunidades biológicas.

O *Homo sapiens* é considerado uma espécie *eussocial*, operando de maneira seme-

lhante à de animais sociais, como insetos, pássaros, peixes e mamíferos. Só que nossa espécie é bem mais recente do que as citadas, de modo que a evolução de nossos agrupamentos é bastante derivada do ponto de vista evolutivo. Provavelmente, nossos agrupamentos são resultado da evolução de mamíferos *eussociais*.

Por outro lado, nossos agrupamentos em cidades são consideravelmente mais sofisticados, manifestando-se em estruturas como vilas, cidades e nações, baseados em cooperação e divisão de funções. As cidades humanas podem ser vistas como “formigueiros avançados”, com subsistemas interligados que sustentam seu funcionamento. No entanto, as cidades não são, por si sós, a menor unidade desses enxames sociais; elas resultam da integração de níveis menores de organização.

A ideia de que as cidades humanas derivam de processos evolutivos similares aos observados em outras espécies sociais tem base teórica plausível em diferentes disciplinas. A convergência entre os estudos de Wilson e West sugere que as cidades humanas podem ser vistas como um caso especial de adaptação evolutiva, com estruturas emergentes moldadas por pressões ecológicas, limitações físicas e interações sociais. Nesse sentido, nossas cidades são o resultado de milhões – talvez centenas de milhões – de anos de evolução biológica na Terra.

O SURGIMENTO DAS CIDADES HUMANAS

Do ponto de vista biológico, as cidades humanas são uma novidade. As primeiras evidências arqueológicas de urba-

1 Para uma visão geral das ideias de Wilson, ver o seu livro citado nas Referências. Para uma visão mais específica sobre a evolução da eussocialidade, ver o artigo de Nowak et al. (2010), também citado nas Referências deste artigo.

nização, como em Çatal Hüyük (7.000 a.C.), são muito recentes se comparadas à escala evolutiva, por exemplo, dos insetos sociais. Apesar disso, algumas características das cidades humanas refletem aquelas vistas em outras sociedades animais altamente organizadas, sugerindo que os sistemas urbanos evoluíram a partir de princípios compartilhados entre diferentes espécies sociais.

Com base nisso, é possível pensar em uma *teoria biológica dos sistemas urbanos* que não se limita aos humanos. Isso permitiria comparar e aprender com outras formas de urbanização não humanas e entender como os sistemas urbanos podem evoluir e se adaptar – especialmente em tempos de crise climática.

No campo humano, diversas teorias buscam explicar a origem das cidades. David Graeber e David Wengrow, em *A aurora de tudo*², argumentam que a urbanização seguiu caminhos múltiplos e não lineares ao redor do mundo, profundamente ligados à cultura, arte, ciência e organização social. Em contraste, Geoffrey West, em *Scale* (2017), adota uma abordagem física e quantitativa: ele propõe que o crescimento urbano segue leis alométricas³. Por exemplo, quando uma cidade dobra de tamanho, certos serviços públicos crescem em média 15%

além do dobro – um fenômeno conhecido como crescimento superlinear. Para West, esse padrão se repete em praticamente todas as cidades modernas⁴.

O contraste entre essas visões é notável: de um lado, uma trajetória histórica caótica e culturalmente diversificada; de outro, um modelo físico previsível. Seriam essas perspectivas mutuamente exclusivas? Ou seria possível que um desenvolvimento aparentemente caótico tenha ocorrido dentro de limites estruturais rígidos impostos pelas leis da física?

Autores como Jared Diamond, em *Armas, germes e aço*, oferecem uma abordagem intermediária, sugerindo que fatores geográficos e ecológicos orientaram o processo civilizacional de maneira parcialmente linear. Já Yuval Harari, em *Sapiens*, também se aproxima de uma leitura mais linear e orientada do desenvolvimento humano⁵.

FISIOLOGIA URBANA

As cidades podem ser vistas como *urbsistemas*, termo que tem inspiração na ideia de ecossistema: sistemas interativos compostos de elementos vivos (bióticos) e não vivos (abióticos), nos quais

2 Para apreciar uma visão dos autores sobre as cidades, ver o Capítulo 8, "Cidades imaginárias".

3 Alometria é o estudo da relação entre o tamanho de uma parte da cidade em relação ao seu tamanho total. Ela analisa como diferentes dimensões dos elementos funcionais de uma cidade crescem em proporções distintas, revelando padrões de crescimento, forma e função.

4 Ver os capítulos 6 e 7 do livro de West. A Figura 3, no Capítulo 1, demonstra a ideia usando o número de patentes em cidades de diferentes tamanhos.

5 Note que tanto Diamond quanto Harari não têm em seus respectivos livros um enfoque exclusivo nas cidades. Ambos as abordam de forma transversal, colocando-as em diversos contextos ao longo de seus livros. Um foco mais marcante, em ambos os casos, são os capítulos dedicados ao surgimento da agricultura, que é considerado um dos principais eventos que levaram a humanidade a formar cidades.

o fluxo de energia e matéria – iniciado pela fotossíntese – move-se por ciclos de assimilação, degradação e reciclagem (Buckeridge; Philippi, 2020). De forma análoga, os urbsistemas dependem de infraestrutura capaz de captar recursos como água, energia e materiais, processá-los, transformá-los em serviços e, por fim, gerenciar os resíduos produzidos de forma sustentável.

Assim como em qualquer ecossistema natural, os urbsistemas estão sujeitos à limitação de recursos – o que impõe a necessidade de eficiência crescente na reciclagem e no reaproveitamento de resíduos. Essa dinâmica levanta uma questão central: como intensificar a sustentabilidade urbana, garantindo que o uso de insumos se mantenha em equilíbrio com os limites ecológicos do planeta.

Um urbsistema pode ser definido como um sistema que importa e processa bens usando energia e água, transformando-os em serviços e resíduos, que devem ser tratados de forma sustentável.

A qualidade da operação do urbsistema depende fortemente de seu sistema regulatório. Leis, normas e políticas públicas são os mecanismos humanos que garantem ordem, justiça e estabilidade funcional ao sistema – assim como as práticas culturais cumprem esse papel em sociedades animais. O diferencial do urbsistema humano é sua alta complexidade, resultante da linguagem, consciência e tecnologia, que impulsionaram seu desenvolvimento acelerado a partir do século XIX com o avanço das ciências.

Ainda assim, a ideia de regulação e inovação não é exclusivamente humana. Animais sociais, como as formigas, aplicam

estratégias “tecnológicas” – ainda que em ritmos evolutivos muito mais lentos – para melhorar seus próprios sistemas sociais. A diferença está na escala e na velocidade com que os humanos alteram seus urbsistemas, graças à cognição, à capacidade simbólica e à invenção da ciência.

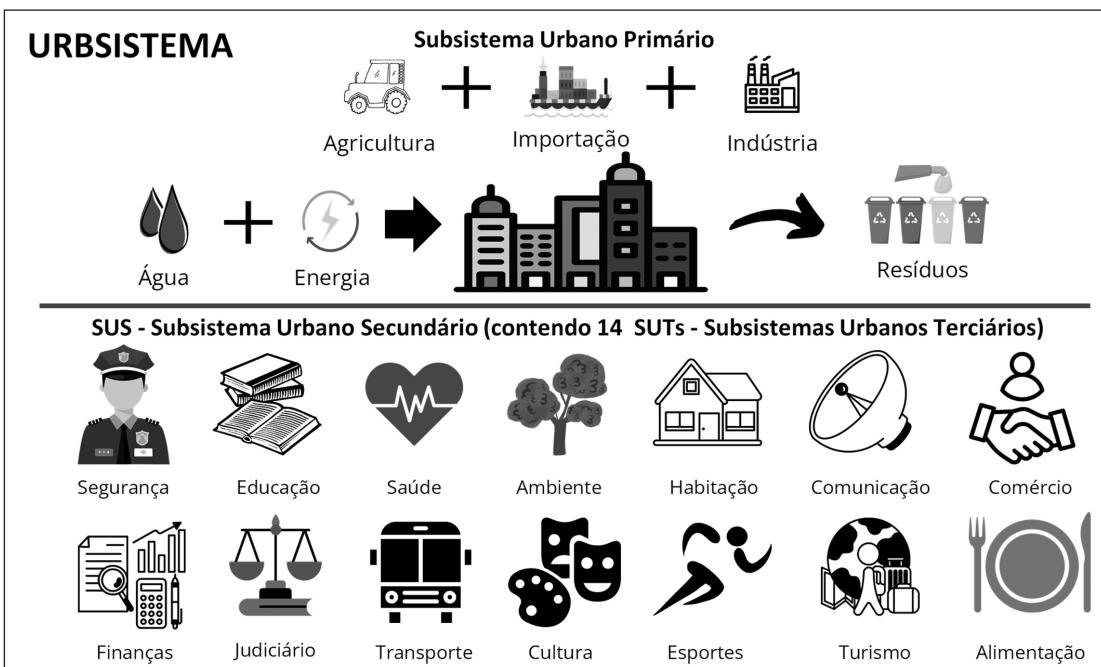
Para compreender melhor a resiliência urbana, propõe-se a seguinte hierarquia, representada na Figura 1:

- SUP: subsistema urbano primário – o urbsistema em seu conjunto;
- SUS: subsistema urbano secundário – rede de serviços essenciais;
- SUT: subsistema urbano terciário – serviços específicos (água, saúde, energia, transporte etc.).

Perturbações em um SUT podem escalar e afetar os níveis superiores (SUS e SUP), dependendo da força das interconexões entre os sistemas. Por exemplo, uma greve de coletores de lixo pode provocar transtornos temporários, mas uma seca prolongada pode comprometer toda a infraestrutura hídrica de uma cidade, levando a efeitos mais graves e até ao colapso.

Qual seria a menor unidade funcional de um urbsistema? Um bairro pode funcionar como tal? Em geral, não. Alguns bairros não dispõem da variedade de subsistemas urbanos terciários (SUTs) necessários para formar um urbsistema completo. É preciso haver uma rede mínima de SUTs interconectados que sustentem os serviços essenciais (SUS) para que um urbsistema seja reconhecido como tal. Caso os subsistemas não sejam completos em uma cidade, ela pode se conectar a outra cidade que os tenha e,

FIGURA 1



Estrutura do urbsistema, mostrando o subsistema urbano primário (SUP) em que produtos agrícolas e da indústria entram nas cidades. Para processar esses insumos, elas precisam de água e energia e, ao fim, produzem resíduos. Dentro da cidade, encontra-se o subsistema urbano secundário (SUS), que é composto de vários subsistemas urbanos terciários (SUTs). Estes últimos se interconectam em redes complexas, que é o que faz as cidades funcionarem. A qualidade do urbsistema depende da qualidade intrínseca e da harmonia entre os diferentes subsistemas

assim, importar os elementos faltantes. Por exemplo, se o sistema de saúde não atender a uma determinada cidade, pode-se desenvolver uma política pública para fazer com que uma cidade vizinha atenda à população da cidade com deficiência. O mesmo pode acontecer com os bairros em uma cidade, com interações que complementam mutuamente os serviços, funcionalizando assim o urbsistema.

A autonomia política dos urbsistemas varia conforme o arranjo federativo de cada país. Em nações como a Alemanha, as cidades desfrutam de maior independência administrativa. Já no Brasil, o

poder sempre esteve mais centralizado, o que limita a autonomia municipal para tomar decisões sobre políticas públicas – inclusive as relacionadas à crise climática. Isso não implica necessariamente má gestão, mas pode dificultar a implementação de soluções técnicas fundamentadas em ciência. Em contextos muito localizados, decisões influenciadas por emoções ou pressões sociais podem desconsiderar a complexidade dos desafios climáticos. Não quero dizer que pressões sociais não sejam importantes. O que é realmente importante é que as políticas públicas sejam cocriações entre a sociedade e o governo,

como expliquei no meu artigo no *Jornal da USP* em 2022 (Buckeridge, 2022)⁶.

As diferenças entre cidades pequenas, médias e grandes se refletem na intensidade e na complexidade de seus urbsistemas. Cidades muito pequenas ou muito grandes tendem a apresentar disfunções. A hipótese da existência de uma “janela ótima” para o funcionamento de urbsistemas eficientes é apoiada pelas leis alométricas urbanas.

Embora cada sistema urbano tenha características únicas, os elementos estruturais do SUS e do SUT apresentam funcionamento semelhante, independentemente da cidade. Isso sugere que há uma base biológica comum entre os sistemas urbanos desenvolvidos por espécies sociais, como formigas, aves e humanos. A identidade de uma cidade – turismo, indústria, finanças, serviços – molda seu perfil funcional. Grandes cidades multiúso (como São Paulo, Nova York e Tóquio) concentram múltiplos SUTs integrados. Países com várias cidades de perfis distintos funcionam como supersistemas urbanos, o que pode aumentar sua resiliência e autossuficiência.

IMPACTOS E ADAPTAÇÕES DOS URBSISTEMAS

Todas as espécies impactam seu meio, mas nenhuma como o *Homo sapiens*. A

urbanização humana gerou impactos sem precedentes: perda de biodiversidade, poluição atmosférica e oceânica, mudanças climáticas e transformações radicais na paisagem. Nenhuma outra espécie, nem mesmo os dinossauros, provocou alterações tão profundas e globais, o que leva a pensar que nossa espécie pode estar se autoinduzindo à extinção (Buckeridge, 2021).

A urbanização moderna, amparada por tecnologia, criou uma variedade de urbsistemas com diferentes níveis de complexidade e organização (a *urbandiversidade*), hoje distribuídos por todo o planeta. A adaptabilidade desses sistemas não é exclusiva da espécie humana, mas os humanos se destacam pela capacidade de redesenhar continuamente suas cidades.

O padrão superlinear mostrado por West ajuda a explicar a contínua atração exercida pelas cidades. A urbanização global cresceu rapidamente no século XX e, em 2006, a população urbana igualou-se à rural (3,3 bilhões cada). Desde então, a urbanização continua a crescer, com mais de 56,8% da população mundial vivendo em áreas urbanas – tendência que deve se intensificar nas próximas décadas.

CIDADES COMO REDES COMPLEXAS

Os urbsistemas podem ser compreendidos como redes dinâmicas, formadas por “nós” (subsistemas) conectados entre si por meio de interações funcionais. Seguindo os princípios das redes complexas descritos por Albert-László Barabási (2002), esses “nós” podem exibir diferentes graus de hierarquia e influência, variando ao longo do tempo.

Por exemplo, o transporte urbano exerce papel central durante o dia, perdendo rele-

6 Nesse artigo, eu comparo o desenvolvimento das políticas públicas cocriadas entre governo, academia e sociedade ao desenvolvimento de uma nova tecnologia. Proponho o uso de um análogo do indicador conhecido como TRL (*technology readiness levels*, em português numa tradução livre, nível de maturidade da tecnologia). No artigo, lancei a ideia do índice que chamo de MPP (maturidade das políticas públicas).

vância à noite. Essa dinâmica revela que os urbsistemas são estruturas adaptativas, nas quais a função de cada “nó” depende do contexto e do momento.

Pesquisas aplicadas – como o estudo conduzido por Jardim e Buckeridge (2020) durante a pandemia de covid-19, em São Paulo – mostram que essas abordagens podem ser usadas para entender vulnerabilidades urbanas frente a eventos extremos, sejam pandemias, greves, secas ou inundações. Nesse estudo, os autores mostraram a dinâmica das infecções em diferentes regiões e populações da cidade de São Paulo, caracterizando o avanço da pandemia na megalópole.

Os “ataques” aos urbsistemas – entendidos como perturbações externas – podem ser classificados por intensidade (maiores, médios ou menores) e por velocidade (rápidos ou lentos). Ataques rápidos, como enchentes e incêndios, são agudos e visíveis. Já os lentos, como a elevação do nível do mar ou o aumento gradual da temperatura, provocam efeitos crônicos e difíceis de mensurar no curto prazo.

O colapso da cidade de Mayapán, na península de Yucatán, por volta de 1450, é um exemplo histórico de ataque extremo, no qual a combinação entre crise climática (seca) e instabilidade sociopolítica levou à dissolução completa do sistema urbano (Kenett et al., 2022)⁷. Esse evento é um alerta sobre os limites da resiliência urbana frente a choques sucessivos.

AMEAÇAS CLIMÁTICAS ÀS CIDADES

As principais ameaças climáticas que afetam os urbsistemas contemporâneos

são ondas de calor, secas prolongadas, tempestades, inundações e a elevação do nível do mar. Esses eventos, isolados ou combinados, podem desequilibrar o funcionamento interno dos urbsistemas. A combinação de dois ou mais desses fatores, especialmente quando aliada a instabilidades sociopolíticas, pode gerar efeitos emergentes desproporcionais, numa espécie de “tempestade perfeita”⁸, cuja frequência pode aumentar com o avanço do aquecimento global. Um exemplo de tempestade perfeita foi o que ocorreu no estado do Rio Grande do Sul, no Brasil, em 2024. Nesse evento, não apenas uma, mas centenas de cidades foram vítimas de um fenômeno composto de elementos climáticos e problemas de gestão urbana.

A recuperação de cidades após eventos extremos exige investimentos financeiros e energéticos significativos. A operação de retorno ao equilíbrio precisa ser repetida a cada novo evento, elevando exponencialmente o custo de manutenção das cidades.

⁷ Mayapán, a capital dos maias, sucumbiu lentamente devido a alterações climáticas que incluíram secas severas. Porém, não foi somente o clima, mas uma combinação dele com questões sociopolíticas que fez com que a população abandonasse a cidade. O artigo citado detalha como evidências de diversas áreas propiciaram essas conclusões. Este é um exemplo que ilustra bem a complexidade dos fenômenos que podem ter mudanças climáticas como fatores preponderantes no desaparecimento de uma cidade.

⁸ Este termo é usado para eventos que combinam diversas causas improváveis ao mesmo tempo. No caso do Rio Grande do Sul, houve uma combinação de fatores como a força de uma frente fria (em parte relacionada às mudanças climáticas globais), a fase da maré, os altos níveis de vulnerabilidade urbana em várias cidades e limitações na gestão relacionadas às respostas a desastres. Todo um conjunto de fatores negativos agindo ao mesmo tempo na região tornou-a totalmente vulnerável, provocando um dos maiores desastres climáticos já registrados no Brasil.

A vulnerabilidade climática dos urbsistemas varia conforme sua geografia e sua estabilidade sociopolítica. Cidades com excesso de água (propensas a enchentes) e aquelas com escassez hídrica (ameaçadas por secas) respondem de forma diferente ao mesmo estressor ambiental. Além disso, a posição de certos subsistemas (SUTs) na rede urbana pode amplificar ou mitigar vulnerabilidades.

Por exemplo, em cidades como Londres, o sistema financeiro é altamente conectado a redes globais, o que pode conferir resiliência extra a outros serviços urbanos. Essas configurações de rede – únicas para cada cidade – determinam o grau de estabilidade e de capacidade de recuperação diante de crises. Cidades com sistemas sociopolíticos muito instáveis tornam-se ainda mais vulneráveis aos ataques do tipo visto em Mayapán.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Historicamente, urbsistemas têm enfrentado mudanças climáticas. A própria evolução dessas estruturas pode ter sido impulsionada por desafios ambientais. Agora, os humanos se deparam com um novo ponto crítico, comparável ao enfrentado no último período glacial. O avanço e a diversificação dos urbsistemas ao redor do mundo podem representar, por si sós, um meca-

nismo coletivo de adaptação. Assim como espécies sociais se agrupam para reduzir riscos, talvez as cidades humanas sejam uma resposta adaptativa ao novo clima global.

As mudanças climáticas são uma força motriz que induzirá transições rápidas e profundas nos urbsistemas do século XXI. Essas transformações acontecerão dentro de uma rede complexa de interações entre os diferentes níveis sistêmicos (SUT, SUS, SUP). Ataques aos urbsistemas – como eventos extremos – podem causar danos severos ou até colapsos. A compreensão dessas estruturas e de seus indicadores de vulnerabilidade será fundamental para formular políticas públicas eficazes e prevenir catástrofes.

Não há soluções simples. As transições urbanas exigem abordagens sistêmicas, integrando tecnologia, governança e conhecimento científico. Medidas setoriais focadas em aprimorar SUTs específicos podem melhorar o desempenho geral dos urbsistemas. Portanto, a capacidade das cidades de aplicar tecnologias de mitigação e adaptação será decisiva para enfrentar os desafios climáticos deste século.

Este texto destaca que os próximos anos trarão desafios complexos e multifacetados para a sociedade urbana. Os impactos variam conforme a localização, o grau de desenvolvimento e a conectividade dos urbsistemas. Reconhecer e agir sobre essas diferenças será essencial para construir um futuro urbano mais resiliente.

REFERÊNCIAS

- BARABÁSI, A. L. *Linked: the new science of the networks*. Nova York, Basic Books, 2002.
- BUCKERIDGE, M. S. "A perda da biodiversidade pode levar à extinção do *Homo sapiens?*", in E. Grandisoli et al. (orgs.). *Novos temas em emergência climática para os ensinos fundamental e médio*. São Paulo, IEE-USP, 2021.
- BUCKERIDGE, M. S. "Como falhar menos nas políticas públicas". *Jornal da USP*, São Paulo, 22/ago./2022. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/como-falhar-menos-nas-politicas-publicas/>.
- BUCKERIDGE, M. S.; PHILIPPI JÚNIOR, A. "Ciência e políticas públicas nas cidades: revelações da pandemia da covid-19". *Estudos Avançados*, v. 34, n. 99, 2020, pp. 141-56.
- GRAEBER, D.; WENGROW, D. *The dawn of everything: a new history of humanity*. Nova York, Farrar, Straus and Giroux, 2021.
- JARDIM, V. C.; BUCKERIDGE, M. S. "Análise sistêmica do município de São Paulo e suas implicações para o avanço dos casos de covid-19". *Estudos Avançados*, v. 34, n. 99, 2020, pp. 157-74.
- KENETT, D. J. et al. "Drought-induced civil conflict among the Ancient Maya". *Nature Communications*, v. 13, n. 3.911, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31522-x>.
- NOWAK, M. A.; TARNITA, C. E.; WILSON, E. O. "The evolution of eusociality". *Nature*, v. 466, n. 7310, pp. 1057-62, 2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature09205>.
- WEST, G. *Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life, in organisms, cities, economies, and companies*. Nova York, Penguin Press, 2017.
- WILSON, E. O. *The social conquest of Earth*. Nova York, Norton and Company, 2012.

A large-scale transition will be essential in the middle of this century to minimize the impacts of climate change. Although many of these effects—such as deforestation, sea level rise, and population growth—are already underway, several technologies remain available and can be applied to mitigate and adapt societies to climate change.

There are four major transitions: urban, agricultural, ecosystem/forest, and coastal. The four transitions interact with each other and form a complex planetary system. Two of them (ecosystem and coastal) are nature-based; the other two (agricultural and urban) are artificial, created by humans. With intense urbanization in the 20th and 21st centuries, cities have become the main point of convergence for the effects of the other transitions.

Dealing with climate change in an urban context requires addressing complex issues involving politics, legislation, technology, and human behavior. To do so, it is essential to understand how cities function and how the mechanisms behind their development are rooted in biological and social processes that also appear in other social species, such as insects and mammals, which have developed analogous “urban” structures throughout evolutionary history.

These social behaviors evolved on a planet undergoing constant climate change over millions of years. In the case of humans, the emergence of settlements is relatively recent—only in the last few thousand years—but it has led to the formation of villages, medium-sized cities, and megacities that are now home to billions of people. The emergence of

MARCOS BUCKERIDGE is a full professor in the Department of Botany at the Institute of Biosciences (IB) at USP and deputy director of the Institute for Advanced Studies (IEA) at USP.

modern cities is the result of a combination of biological, anthropological, and physical factors. Although human history is crucial, the laws of physics and biology largely explain how cities arise, function, and organize themselves.

As social mammals, we may be “condemned” to live in groups that follow certain universal rules, both physical and biological, and psychological, especially those derived from social psychology.

Fast urbanization and population growth were mostly powered by fossil fuel tech, especially in the 20th century. This led us to build cities that are super dependent on energy and constantly using stuff and services, which we have become structurally hooked on.

Despite the centrality of the energy issue—especially dependence on fossil fuels—other political, social, economic, and technological dimensions also need to be adjusted so that cities can effectively address climate impacts. Technologies such as renewable energy, ecological agriculture, circular economy, and efficient water use are already available and can be part of a more sustainable urban response.

There are two fundamental elements for the effective application of technologies that help cities adapt to advancing climate change: public policy and legislation. Well-planned policies, supported by social consensus, can create the necessary environment for these technologies to thrive (Buckeridge, 2021). Legislation, on the other hand, acts as a filter. It is through legislation that climate mitigation and adaptation actions become viable, legitimate, and sustainable in the long term.

To support ideas involving cities’ responses to climate change, at a time when one of the Conferences of the Parties (COP30) is based in Brazil, this paper examines the evolutionary origins of human social behavior and the emergence of cities. In it, I present a systemic view of what we call urban physiology. My central point here is that, by understanding how cities function from the perspective of government and society, they can align themselves to find the most appropriate public policies to address the effects of climate change in the coming decades and propose a view of cities as urban systems, to think of them as dynamic systems. As a contribution to the discussions during COP30, throughout the country and around the world, it is suggested that the focus be centralized on urban resilience, without neglecting the other necessary transitions.

THE BIOLOGICAL ORIGIN OF CITIES

Humankind was not the first to create urban structures. Long before the emergence of *Homo sapiens*, other species developed complex systems that can be considered “pre-urban.” A notable and well-studied example is that of ants, which have inhabited the Earth for about 400 million years. Many of these species are classified as eusocial and form functionally distinct castes—queens, soldiers, and workers—despite sharing the same DNA, which does not differ in sequence, but only in the positions of methylations in the genome.

Eusocial insects operate as true communities: they cultivate fungi for food, maintain spaces for health care and waste management, and function through the coordinated interaction of individuals, generating a complex system whose networked relationships are called a swarm—a form of organization based on simple rules that, together, result in highly structured emergent behavior.

Several authors have proposed a relationship between the organization of human society and eusocial animals. One of the main ones is Edward Wilson, the proponent of the field that came to be called sociobiology¹. Wilson does not compare human cities directly with those of ants, but his ideas imply a very close similarity between the systems. Geoffrey West makes another comparison of urban systems with other animals in his book *Scale*. As I will discuss below, West characterizes cities using aspects of their physical structure and does so by comparing them with the physical structure of biological communities.

Homo sapiens is considered a eusocial species, operating in a similar way to social animals such as insects, birds, fish, and mammals. However, our species is much more recent than those mentioned, so the evolution of our groupings is quite derivative from an evolutionary point of view. Our groupings are probably the result of the evolution of eusocial mammals.

On the other hand, our groupings in cities are considerably more sophisticated, manifesting themselves in structures such as villages, cities, and nations, based on cooperation and division of functions. Human cities can be seen as “advanced anthills,” with interconnected subsystems that sustain their functioning. However, cities are not, in themselves, the smallest unit of these social swarms; they result from the integration of smaller levels of organization.

The idea that human cities derive from evolutionary processes similar to those observed in other social species has a plausible theoretical basis in different disciplines. The convergence between Wilson and West’s studies suggests that human cities can be seen as a special case of evolutionary adaptation, with emerging structures shaped by ecological pressures, physical constraints, and social interactions. In this sense, our cities are the result of millions—perhaps hundreds of millions—of years of biological evolution on Earth.

THE EMERGENCE OF HUMAN CITIES

From a biological point of view, human cities are a novelty. The earliest archaeological evidence of urbanization, such as at Çatal Hüyük (7,000 BC), is very recent when compared to the evolutionary scale of, for example, social insects. Despite this, some characteristics of human cities reflect those seen in other highly organized animal societies, suggesting that urban systems evolved from principles shared among different social species.

1 For an overview of Wilson’s ideas, see his book cited in the References. For a more specific view on the evolution of eusociality, see the article by Novak et al. (2012), also cited in the References of this paper.

Based on this, it is possible to conceive of a biological theory of urban systems that is not limited to humans. This would allow us to compare and learn from other forms of non-human urbanization and understand how urban systems can evolve and adapt—especially in times of climate crisis.

In the humanities, various theories seek to explain the origin of cities. David Graeber and David Wengrow, in *The dawn of everything*², argue that urbanization followed multiple, non-linear paths around the world, deeply linked to culture, art, science, and social organization. In contrast, Geoffrey West, in *Scale* (2017), takes a physical and quantitative approach: he proposes that urban growth follows allometric³ laws. For example, when a city doubles in size, certain public services grow on average 15% beyond double—a phenomenon known as superlinear growth. For West, this pattern repeats itself in virtually all modern⁴ cities.

The contrast between these views is striking: on the one hand, a chaotic and culturally diverse historical trajectory; on the other, a predictable physical model. Are these perspectives mutually exclusive? Alternatively, is it possible that seemingly chaotic development has occurred within rigid structural limits imposed by the laws of physics?

Authors such as Jared Diamond, in *Guns, germs, and steel*, offer an intermediate approach, suggesting that geographical and ecological factors have guided the civilizational process in a partially linear manner. Yuval Harari, in *Sapiens*, also approaches a more linear and oriented reading of human development⁵.

URBAN PHYSIOLOGY

Cities can be seen as urban systems, a term inspired by the idea of ecosystems: interactive systems composed of living (biotic) and non-living (abiotic) elements, in which the flow of energy and matter—initiated by photosynthesis—moves through cycles of assimilation, degradation, and recycling (Buckeridge; Philippi, 2020). Similarly, urban systems depend on infrastructure capable of capturing resources such as water, energy, and materials, processing them, transforming them into services, and finally managing the waste produced sustainably.

2 For the authors' view of cities, see Chapter 8, "Imaginary Cities."

3 Allometry is the study of the relationship between the size of a part of a city and its total size. It analyzes how different dimensions of a city's functional elements grow in different proportions, revealing patterns of growth, form, and function.

4 See chapters 6 and 7 of West's book. Figure 3 in Chapter 1 illustrates the idea using the number of patents in cities of different sizes.

5 Note that neither Diamond nor Harari focuses exclusively on cities in their respective books. Both address them in a cross-cutting manner, placing them in various contexts throughout their books. A more striking focus in both cases is the chapters dedicated to the emergence of agriculture, which is considered one of the main events that led humanity to form cities.

As in any natural ecosystem, urban systems are subject to resource constraints, which impose the need for increasing efficiency in recycling and reusing waste. This dynamic raises a central question: how to intensify urban sustainability, ensuring that the use of inputs remains in balance with the planet's ecological limits.

An urban system can be defined as a system that imports and processes goods using energy and water, transforming them into services and waste, which must be treated sustainably.

The quality of an urban system's operation depends heavily on its regulatory system. Laws, standards, and public policies are the human mechanisms that ensure order, justice, and functional stability in the system, just as cultural practices fulfill this role in animal societies. The distinguishing feature of the human urban system is its high complexity, resulting from language, consciousness, and technology, which have driven its rapid development since the 19th century with the advancement of science.

Even so, the idea of regulation and innovation is not exclusively human. Social animals, such as ants, apply "technological" strategies—albeit at much slower evolutionary rates—to improve their own social systems. The difference lies in the scale and speed with which humans alter their urban systems, thanks to cognition, symbolic capacity, and the invention of science.

To better understand urban resilience, the following hierarchy is proposed, represented in Figure 1:

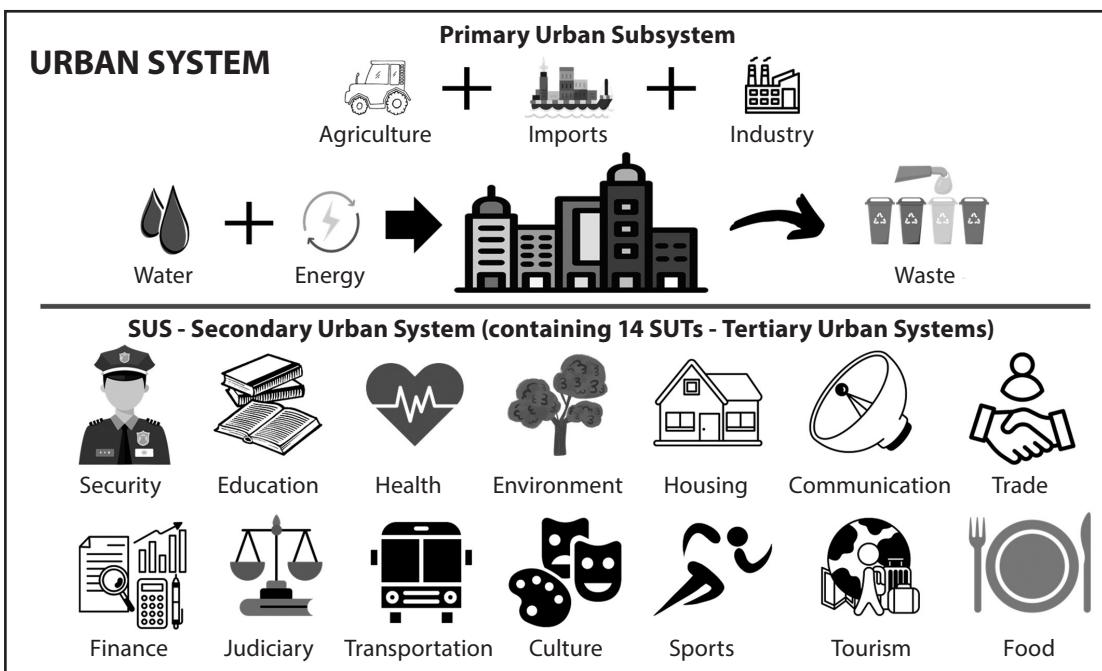
- SUP: primary urban subsystem – the urban system as a whole;
- SUS: secondary urban subsystem – network of essential services;
- SUT: tertiary urban subsystem – specific services (water, health, energy, transportation, etc.).

Disruptions in a SUT can escalate and affect higher levels (SUS and SUP), depending on the strength of the interconnections between systems. For example, a garbage collectors' strike may cause temporary disruption, but a prolonged drought can compromise a city's entire water infrastructure, leading to more serious effects and even collapse.

What would be the smallest functional unit of an urban system? Can a neighborhood function as such? In general, no. Some neighborhoods do not have the variety of tertiary urban subsystems (SUTs) necessary to form a complete urban system. There must be a minimum network of interconnected SUTs that support essential services (SUS) for an urban system to be recognized as such. If the subsystems are not complete in one city, it can connect to another city that has them and thus import the missing elements. For example, if the healthcare system does not serve a particular city, a public policy can be developed to have a neighboring city serve the city's population with disabilities. The same can happen with neighborhoods in a city, with interactions that complement each other's services, thus making the urban system functional.

The political autonomy of urban systems varies according to each country's federal arrangement. In countries such as Germany, cities enjoy greater administrative

FIGURE 1



Structure of the urban system, showing the primary urban subsystem (SUP) in which agricultural and industrial products enter cities. To process these inputs, cities need water and energy and ultimately produce waste. Within the city is the secondary urban subsystem (SUS), which is composed of several tertiary urban subsystems (SUTs). The latter are interconnected in complex networks, which is what makes cities function. The quality of the urban system depends on the intrinsic quality and harmony between the different subsystems

independence. In Brazil, however, power has always been more centralized, which limits municipal autonomy to make decisions on public policies—including those related to the climate crisis. This does not necessarily imply poor management, but it can hinder the implementation of science-based technical solutions. In much localized contexts, decisions influenced by emotions or social pressures may disregard the complexity of climate challenges. I do not mean to say that social pressures are not important. What is really important is that public policies are co-created between society and the government, as I explained in my paper in the Jornal da USP in 2022 (Buckeridge, 2022)⁶.

The differences between small, medium, and large cities are reflected in the intensity and complexity of their urban systems. Very small or very large cities tend to be

6 In this paper, I compare the development of public policies co-created between government, academia, and society to the development of new technology. I propose the use of an analogue of the indicator known as TRL (technology readiness levels). In the paper, I introduced the idea of an index that I call MPP (public policy maturity).

dysfunctional. Urban allometric laws support the hypothesis of the existence of an “optimal window” for the functioning of efficient urban systems.

Although each urban system has unique characteristics, the structural elements of the SUS and SUT function similarly, regardless of the city. This suggests that there is a common biological basis among urban systems developed by social species, such as ants, birds, and humans. A city’s identity—tourism, industry, finance, services—shapes its functional profile. Large multi-use cities (such as São Paulo, New York, and Tokyo) concentrate multiple integrated SUTs. Countries with several cities with distinct profiles function as urban supersystems, which can increase their resilience and self-sufficiency.

IMPACTS AND ADAPTATIONS OF URBAN SYSTEMS

All species influence their environment, but none as much as *Homo Sapiens*. Human urbanization has had unprecedented impacts: loss of biodiversity, atmospheric and ocean pollution, climate change, and radical transformations in the landscape. No other species, not even the dinosaurs, has caused such profound and global changes, leading us to believe that our species may be driving itself to extinction (Buckeridge, 2021).

Modern urbanization, supported by technology, has created a variety of urban systems with different levels of complexity and organization (urban diversity), now distributed across the planet. The adaptability of these systems is not unique to the human species, but humans stand out for their ability to continuously redesign their cities.

The superlinear pattern shown by West helps explain the continuing attraction of cities. Global urbanization grew rapidly in the 20th century, and in 2006, the urban population equaled the rural population (3.3 billion each). Since then, urbanization has continued to grow, with more than 56.8% of the world’s population living in urban areas—a trend that is expected to intensify in the coming decades.

CITIES AS COMPLEX NETWORKS

Urban systems can be understood as dynamic networks formed by “nodes” (subsystems) connected through functional interactions. Following the principles of complex networks described by Albert-László Barabási (2012), these “nodes” can show different degrees of hierarchy and influence, varying over time.

For example, urban transportation plays a central role during the day, losing relevance at night. This dynamic reveals that urban systems are adaptive structures, in which the function of each “node” depends on the context and the moment.

Applied research—such as the study conducted by Jardim and Buckeridge (2020) during the Covid-19 pandemic in São Paulo—shows that these approaches can be used

to understand urban vulnerabilities in the face of extreme events, whether pandemics, strikes, droughts, or floods. In this study, the authors showed the dynamics of infections in different regions and populations of the city of São Paulo, characterizing the advance of the pandemic in the megalopolis.

Attacks on urban systems—understood as external disturbances—can be classified by intensity (major, medium, or minor) and by speed (fast or slow). Fast attacks, such as floods and fires, are acute and visible. Slow attacks, such as rising sea levels or gradual temperature increases, cause chronic effects that are difficult to measure in the short term.

The collapse of the city of Mayapán, on the Yucatán Peninsula, around 1450, is a historical example of an extreme attack, in which the combination of climate crisis (drought) and sociopolitical instability led to the complete dissolution of the urban system (Kenett et al., 2022)⁷. This event is a warning about the limits of urban resilience in the face of successive shocks.

CLIMATE THREATS TO CITIES

The main climate threats affecting contemporary urban systems are heat waves, prolonged droughts, storms, floods, and rising sea levels. These events, either alone or in combination, can disrupt the internal functioning of urban systems. The combination of two or more of these factors, especially when coupled with socio-political instability, can generate disproportionate emergent effects, in a kind of “perfect storm,⁸” whose frequency may increase with the advance of global warming. An example of a perfect storm was the one that occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in 2024. In this event, not just one, but hundreds of cities were victims of a phenomenon composed of climatic elements and urban management problems.

The recovery of cities after extreme events requires significant financial and energy investments. The operation to return to equilibrium needs to be repeated with each new event, exponentially increasing the cost of maintaining cities.

The climate vulnerability of urban systems varies according to their geography and socio-political stability. Cities with excess water (prone to flooding) and those with water shortages (threatened by drought) respond differently to the same environmental

7 Mayapán, the capital of the Maya, slowly succumbed to climate change, which included severe droughts. However, it was not only the climate, but a combination of climate change and socio-political issues that caused the population to abandon the city. The paper cited details how evidence from various areas led to these conclusions. This is an example that illustrates well the complexity of the phenomena that can have climate change as a major factor in the disappearance of a city.

8 This term is used for events that combine several unlikely causes at the same time. In the case of Rio Grande do Sul, there was a combination of factors such as the strength of a cold front (partly related to global climate change), the tide phase, high levels of urban vulnerability in several cities, and management limitations related to disaster response. A whole set of negative factors acting at the same time in the region made it totally vulnerable, causing one of the biggest climate disasters ever recorded in Brazil.

stressor. In addition, the position of certain subsystems (SUTs) in the urban network can amplify or mitigate vulnerabilities.

For example, in cities such as London, the financial system is highly connected to global networks, which can provide extra resilience to other urban services. These network configurations—unique to each city—determine the degree of stability and resilience in the face of crises. Cities with highly unstable sociopolitical systems become even more vulnerable to attacks such as those seen in Mayapán.

FINAL CONSIDERATIONS

Historically, urban systems have faced climate change. The very evolution of these structures may have been driven by environmental challenges. Now, humans are facing a new tipping point, comparable to that faced in the last ice age. The advancement and diversification of urban systems around the world may represent, in themselves, a collective mechanism for adaptation. Just as social species group together to reduce risks, perhaps human cities are an adaptive response to the new global climate.

Climate change is a driving force that will induce rapid and profound transitions in 21st-century urban systems. These transformations will take place within a complex network of interactions between different systemic levels (SUT, SUS, SUP). Attacks on urban systems—such as extreme events—can cause severe damage or even collapse. Understanding these structures and their vulnerability indicators will be essential for formulating effective public policies and preventing catastrophes.

There are no simple solutions. Urban transitions require systemic approaches, integrating technology, governance, and scientific knowledge. Sectoral measures focused on improving specific SUTs can improve the overall performance of urban systems. Therefore, the ability of cities to apply mitigation and adaptation technologies will be decisive in addressing the climate challenges of this century.

This text highlights that the coming years will bring complex and multifaceted challenges for urban society. The impacts vary according to the location, degree of development, and connectivity of urban systems. Recognizing and acting on these differences will be essential to building a more resilient urban future.

REFERENCES

- BARABÁSI, A. L. *Linked: the new science of the networks*. New York, Basic Books, 2002.
- BUCKERIDGE, M. S. "A perda da biodiversidade pode levar à extinção do *Homo sapiens?*", in E. Grandisoli et al. (orgs.). *Novos temas em emergência climática para os ensinos fundamental e médio*. São Paulo, IEE-USP, 2021.
- BUCKERIDGE, M. S. "Como falhar menos nas políticas públicas". *Jornal da USP*, São Paulo, 22/ago./2022. Available at: <https://jornal.usp.br/artigos/como-falhar-menos-nas-politicas-publicas/>.
- BUCKERIDGE, M. S.; PHILIPPI JÚNIOR, A. "Ciência e políticas públicas nas cidades: revelações da pandemia da covid-19". *Estudos Avançados*, v. 34, n. 99, 2020, pp. 141-56.
- GRAEBER, D.; WENGROW, D. *The dawn of everything: a new history of humanity*. New York, Farrar, Straus and Giroux, 2021.
- JARDIM, V. C.; BUCKERIDGE, M. S. "Análise sistêmica do município de São Paulo e suas implicações para o avanço dos casos de covid-19". *Estudos Avançados*, v. 34, n. 99, 2020, pp. 157-74.
- KENETT, D. J. et al. "Drought-induced civil conflict among the Ancient Maya". *Nature Communications*, v. 13, n. 3.911, 2022. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31522-x>.
- NOWAK, M. A.; TARNITA, C. E.; WILSON, E. O. "The evolution of eusociality". *Nature*, v. 466, n. 7.310, pp. 1057-62, 2010. Available at: <https://www.nature.com/articles/nature09205>.
- WEST, G. *Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life, in organisms, cities, economies, and companies*. New York, Penguin Press, 2017.
- WILSON, E. O. *The social conquest of Earth*. New York, Norton and Company, 2012.