

Análise dos indicadores e métricas para a economia circular

EDSON LUIS KUZMA

UNIVERSIDADE DO OESTE DE SANTA CATARINA (UNOESC)

Agradecimento à órgão de fomento:

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Análise dos indicadores e métricas para a economia circular

1. Introdução

A economia circular (EC) ganha importância enquanto alternativa viável de transição para o desenvolvimento sustentável. A obtenção da maximização dos resultados com a minimização do uso de recurso demanda soluções efetivamente consistentes para articular desempenho econômico com equidade social e proteção ambiental (Cristóbal et al., 2018). Tão relevante quanto o estímulo à criação de novas possibilidades de avanço da economia circular é a avaliação dos seus efeitos sistêmicos numa escala mensurável (Husgafvel et al., 2018). Além de promover a conscientização e a ação propriamente dita de governos e empresas, as iniciativas de EC estimulam a implementação de princípios alinhados aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Avdiushchenko & Zajac, 2019).

O desenvolvimento de alternativas eficazes e alinhadas aos princípios da sustentabilidade para questões de ordem ambiental e social passa pela concepção de proposições inovadoras. A transição para uma economia circular implica na adoção de parâmetros para a incorporação de processos inovadores e soluções que efetivamente transformem o modelo de produção (Smol, Kulczycka, & Avdiushchenko, 2017). Ainda que a literatura forneça possibilidades interessantes de exemplos práticos já implementados, a mensuração dos fenômenos segue ainda em desenvolvimento (Veleva, Bodkin, & Todorova, 2017). A carência de indicadores quantitativos para os diversos modelos e iniciativas de economia circular apontam que os pontos chave para sua implementação em larga escala necessita de mensuração. As decisões quanto as ações sobre o fechamento dos ciclos de produção requerem embasamento em métricas, no desempenho e na quantificação de resultados, além da crença ou dos valores potencialmente envolvidos (Cayzer, Griffiths, & Beghetto, 2017).

A justificativa para realização do estudo está associada à necessidade de expansão do conhecimento sobre indicadores de economia circular e geração de possibilidades para avanços. As questões inerentes à transição para uma sociedade circular são relevantes para a definição de um futuro viável e sustentável (Sverko Grdic et al., 2020). A mensuração de seus efeitos e resultados demandam atenção por parte de pesquisadores como forma de geração de insights e fornecimento de base aos tomadores de decisões. Entretanto, o campo carece de pacificação quanto às articulações e direções nas quais a EC se projeta (Völker, Kovacic, & Strand, 2020). A falta de uniformidade quanto à definição do conceito de EC e suas métricas conturba o campo e permite a geração de expressões equivocadas da realidade. Portanto, esta revisão contribui para o desenvolvimento científico ao reunir métricas e indicadores de economia circular e avalia-los quanto a aspectos analíticos, alcance dos indicadores e níveis de inovação. Outras revisões mapearam o campo ao identificar e analisar os estudos quanto a validade e fundamentos da métricas (Corona et al., 2019), interpretação do “como” e “o que” os indicadores medem (Moraga et al., 2019), identificação de clusters de metodologias e perspectivas de avaliação (Parchomenko et al., 2019), monitoramento e avaliação do desempenho em economia circular (Saidani et al., 2019). Este estudo vai além de revisões sistemáticas de literatura já publicadas ao propor uma estrutura diferenciada de análise, atualizar o portfólio de métricas existentes e integrar a perspectiva de níveis de inovação associados às métricas de economia circular.

Portanto, o objetivo deste artigo é analisar as especificidades dos indicadores de economia circular quanto a aspectos de natureza analítica, alcance e amplitude das métricas e níveis de inovação associados à economia circular. Foram propostas categorias para avaliação da lógica apresentada pelos indicadores quanto aos seguintes aspectos: i) dimensões da sustentabilidade, ii) abordagem de mensuração da economia circular, iii) configuração do tema base, iv) enfoque dos indicadores, v) nível dos indicadores, vi) indicadores de nível micro, vii)

indicadores de nível meso, viii) indicadores de nível macro, iv) capacidade de inovação, x) granularidade da inovação, e xi) maturidade da inovação. O estudo fornece uma análise das principais características dos indicadores e métricas desenvolvidas para o campo da economia circular. A partir dos artigos revisados, suas limitações e recomendações, são traçados caminhos para futuros estudos relacionados à indicadores de economia circular.

O estudo está estruturado em seções. Além da introdução, na segunda seção está disposta a revisão de literatura, com a apresentação dos fundamentos teóricos pertinentes ao campo em estudo. Na terceira seção descreve-se o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento da revisão. Na quarta seção apresentam-se os resultados e aspectos estruturais da revisão sistemática, com a extração dos dados resultantes do mapeamento dos artigos. Na quinta seção são definidas e exploradas as dimensões analíticas, alcance dos indicadores e níveis de inovação. A sexta seção discute-se os principais achados do estudo. Na sétima seção são traçadas proposições para a pesquisa sobre indicadores e métricas de economia circular. A oitava seção conclui o estudo e aponta limitações.

2. Background sobre indicadores de economia circular

A economia circular consiste em um sistema regenerativo no qual as entradas de recursos virgens são reduzidas para a recirculação de materiais e componentes em ciclos, nas quais o valor dos produtos e materiais são mantidos pelo maior tempo possível (Schilkowski, Shukla, & Choudhary, 2019). Opõe-se ao sistema linear de produção no qual os fluxos de materiais são unidirecionais, com um início e um fim de vida que leva ao descarte no pós consumo (Elia, Gnoni, & Tornese, 2017). No sistema linear, a geração de resíduos é minimizada e a reutilização dos recursos ocorre por tantas vezes quanto for possível sua re inserção no sistema produtivo, criando valor pela reutilização. Nesse contexto, a economia circular é articulada à compreensão dos fluxos de materiais e energia, do design dos produtos e da avaliação do ciclo de vida dos produtos, de modo que o planejamento desses aspectos estimule o fechamento da produção em ciclos (Haupt & Hellweg, 2019).

O tema recebe crescente atenção por parte de pesquisadores, formadores de políticas e tomadores de decisão como uma alternativa para o desenvolvimento sustentável (Avdiushchenko & Zajac, 2019). A transição para a economia circular implica no desenvolvimento orientado para o longo prazo a partir da adoção de medidas de efetivamente consistentes quanto à sustentabilidade (Silvestri, Spigarelli, & Tassinari, 2019). Neste sentido, o desenvolvimento de métricas e ferramentas para avaliação dessa transição permite que os resultados obtidos sejam quantificados para o direcionamento rumo ao caminho mais assertivo. A literatura sobre indicadores de sustentabilidade apresenta variedade e amplitude que permite a mensuração do fenômeno de forma mais consistente do que ocorre com o campo da economia circular (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2018). O desenvolvimento de indicadores para avaliação da economia circular é recente e demanda maior articulação e objetividade para expansão de sua contribuição.

A nível macro a proposição de indicadores para a economia circular fornece suporte à tomada de decisão e constituição de políticas com metas definidas para diferentes atores envolvidos no processo de transição circular (Avdiushchenko & Zajac, 2019). O tema é amplamente discutido no âmbito da União Europeia, que registra notável avanço quanto à proposição de políticas e metas para os próximos anos. No cenário atual, os indicadores são amplamente difundidos em várias regiões do mundo. Além da União Europeia e China, o Japão e os EUA apresentam avanços promissores (Garcia-Bernabeu et al., 2020).

A nível micro, o monitoramento do avanço da economia circular fomenta sua implementação em diferentes setores, da manufatura ao setor de serviços e energia. Nos diferentes níveis, os indicadores devem apresentar características próprias de outras estruturas de mensuração que quantificam e analisam fenômenos (Almeida, Borsato, & Ugaya, 2017). A

aplicabilidade, comparabilidade a outros contextos, praticidade no uso e relevância são fatores que conferem validade e confiabilidade às métricas, assim como a articulação com as diferentes dimensões da sustentabilidade (Hanumante, Shastri, & Hoadley, 2019). O rigor metodológico, aliado à consistência teórica e alinhamento com a realidade devem ser comuns aos constructos que avaliam a circularidade de práticas associadas a economia circular. Portanto, são necessários indicadores que possibilitem o direcionamento em diferentes níveis para tornar a economia circular e sustentável numa perspectiva multidimensional.

A complexidade da economia circular implica em inovação na configuração do negócio, que deve recuperar, reenviar e recriar valor em cada ciclo pelo qual o material e energia passam em sua vida útil (Guldmann & Huulgaard, 2020). A transição para a EC demanda transformações em várias dimensões na organização, na de criação de valor, segmento de clientes, associados a sua capacidade de inovação. A inovação orientada ao produto, serviço ou processo demanda repactuação de relacionamentos existentes, que são expandidos para novos atores. Muito embora a transição para a EC permita que prática sejam reproduzidas, cada empresa conta com um conjunto complexo de elementos e fatores condicionantes, assim como barreiras e dificultadores (Prime et al., 2020).

As empresas inclinadas à incorporação da inovação, em contraste àquelas que permanecem conservadoras, favorecem as práticas de EC. Sua adoção leva a um processo de transformação tecnoeconômica (Cainelli, D'Amato, & Mazzanti, 2020). Nesse sentido, a inovação desempenha um importante papel na transição para uma sociedade mais sustentável, fornecendo repostas à demanda pelo fornecimento de produtos e serviços menos agressivos ao meio. Nesse sentido, a inovação é um caminho para o fechamento dos ciclos de produção e instituir os mecanismos necessários à consolidação da economia circular enquanto alternativa viável para o desenvolvimento sustentável.

Revisões recentes ampliam as possibilidades de desenvolvimento de novas métricas ao explorarem suas características, direcionamento e fragilidades metodológicas e teóricas. Elia, Gnoni e Tornese (2017) exploraram requisitos mensuráveis em indicadores de EC e mapearam métricas ambientais de análise de fluxo de material e avaliação do ciclo de vida. Kalmykova, Sadagopan e Rosado (2017) analisaram diferentes abordagens da economia circular e seus princípios com o objetivo de desenvolver ferramentas para a implementação e avaliação das estratégias circulares aplicáveis em diferentes segmentos da cadeia de valor. Corona et al. (2019) mapearam aspectos metodológicos de métricas de produtos e serviços e avaliaram seu alinhamento com o conceito de sustentabilidade para o fornecimento de recomendações. Moraga et al. (2019) propõem uma classificação para categorizar os indicadores segundo as estratégias e o escopo da medição em ciclos tecnológicos. Parchomenko et al. (2019) identificaram clusters de metodologias e perspectivas de avaliação da economia circular a partir de 63 métricas de mensuração. Saidani et al. (2019) propuseram uma taxonomia de indicadores de economia circular para monitoramento e avaliação do desempenho a partir de 55 conjuntos de indicadores. Kristensen e Mosgaard (2019) verificaram os indicadores no nível micro da economia circular e constataram que não há uma maneira comum de mensurar a reciclagem, manufatura e os demais princípios associados ao nível. Fellner e Lederer (2020) abordam a taxa de reciclagem como uma métrica para medir e promover a economia circular de forma prática. Kravchenko, Pigosso e McAloone (2020) propuseram uma estrutura para mensuração do desempenho da sustentabilidade para apoiar práticas e estratégias para a tomada de decisão focada em economia circular e sustentabilidade.

3. Método

O método utilizado nesta pesquisa é uma revisão sistemática de literatura. A pesquisa foi executada conforme protocolo e estágios de elaboração proposto por Tranfield, Denyer e Smart (2003). Num primeiro momento, executou-se testes para verificação dos possíveis termos

de busca a serem utilizados para a busca final de artigos que comporiam o portfólio de estudos a serem analisados. Os termos “circular economy”, “indicators” e “systematic review”, na combinação “AND”, foram testados nas bases Web of Science, ScienceDirect e Scopus, conforme descrito por Bonisoli, Galdeano-Gómez e Piedra-Muñoz (2018). Os artigos alinhados com a proposta da pesquisa foram analisados e serviram como parâmetro para a definição dos termos de busca final da presente revisão sistemática. A partir do retorno preliminar, outros conjuntos de palavras-chave relacionadas aos domínios teóricos da economia circular e de indicadores foram incorporadas.

A amostra final de termos de busca após o processo de teste foi (“circular economy” OR circularity) AND (indicator* OR score OR metric* OR measur* OR index OR assess* OR indice OR evaluation OR tool). Os termos de busca estão associados a dois elementos chave: economia circular e suas implicações, e indicadores e suas implicações. O caractere curinga “*” foi utilizado nas bases que suportam seu uso, conforme sugerido por Türkeli et al. (2018). A adoção desse procedimento permite capturar pesquisas com especificações semânticas mais abrangentes do que pode ser operado com a pesquisa tradicional, sem perder confiabilidade quanto ao retorno dos artigos.

A consulta definitiva da revisão sistemática foi executada nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Emerald, Google Scholar, Wiley Online Library, Sage, Springer, Taylor and Francis e JSTOR. Outras bases foram consultadas, mas retornaram artigos já indexados anteriormente. A decisão de adotar múltiplas bases objetiva a obtenção do retorno mais abrangente e completo, considerando as possibilidades e critérios de seleção utilizados. A busca foi executada nos dias 28 a 30 de junho de 2020. Nenhuma restrição cronológica foi utilizada na seleção de estudos. A busca nas bases retornou o quantitativo de artigos sumarizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Total de artigos científicos mapeados

Total of Papers					
Articles in the Business, Management and Accounting Area					
Combinações	Subject/Base				
	Scopus	Web of Science	ScienceDirect	Sage	Emerald
(“circular economy” OR circularity) AND (indicator* OR score OR metric* OR measur* OR index OR assess* OR indice OR evaluation OR tool)	608	230	1000	76	1000
	Taylor and Francis	Google Scholar	Springer	Wiley	JSTOR
	1000	1000	514	1000	268
Total	6696				

As bases ScienceDirect, Emerald, Taylor and Francis, Google Scholar e Wiley Online Library retornaram uma quantidade expressiva de artigos. Adotou-se o critério de seleção dos 1000 primeiros artigos de cada grupo de busca, ordenados pelo critério de relevância, que se baseia no número de citações. Os dados referentes aos artigos foram extraídos e analisados com o auxílio da ferramenta StArt.

Aplicou-se os critérios de inclusão: a) publicação em *journal* com revisão de pares, b) devem estar escritos em inglês, c) localizar o arquivo do documento na íntegra online, d) devem ser artigos completos, e) abordar relacionamento estrito com o foco do trabalho, f) área de *Business, Management and Accounting*. Os critérios de exclusão foram: a) estudos duplicados (apenas um dos estudos encontrados foi considerado), b) estudo redundante de algum autor (a versão mais completa foi considerada), c) periódico científico sem revisão de pares, jornais de negócios, revistas correntes, conferências, livros e sites, d) estudos exclusivamente teóricos, revisão de literatura, revisão sistemática de literatura, revisão integrativa, estudos bibliométricos, e) artigos resumidos ou tecnológicos, f) estudos que não abordam indicador ou

ferramenta cujo foco esteja alinhado ao escopo da pesquisa, g) estudos que não apresentam indicador, índice ou ferramenta, h) áreas diferentes a *Business, Management and Accounting*.

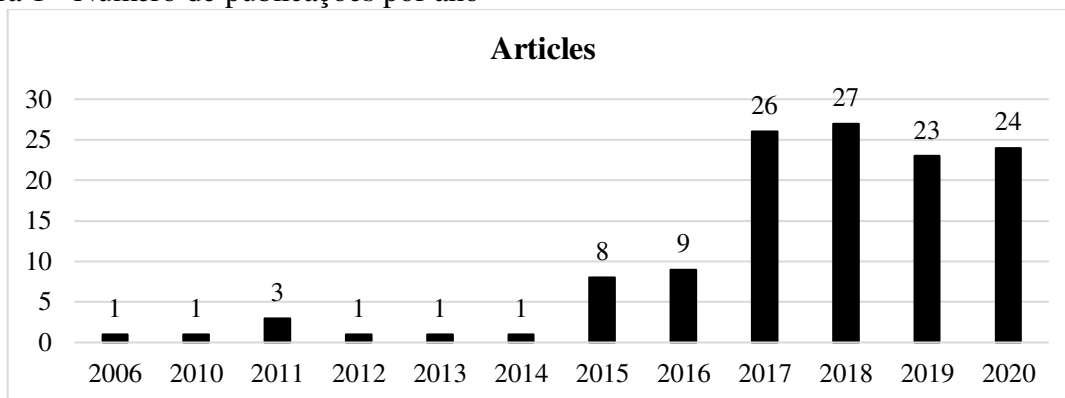
Os procedimentos gerais de seleção dos artigos são baseados nas recomendações da metodologia Prisma (Moher et al., 2015).

4. Aspectos estruturais dos artigos revisados

A revisão sistemática mapeou 125 artigos que tratam de indicadores, métricas ou ferramentas sobre mensuração da economia circular. Os artigos foram avaliados quanto à pertinência e enquadramento no escopo da revisão e as informações foram extraídas para a criação de categorias analíticas. A análise foi desenvolvida a partir da compreensão do escopo e da lógica que as pesquisas e os respectivos indicadores apresentam. São apresentados dados estruturais, elementos de ordem categórica, alcance dos indicadores e seu alinhamento aos níveis de inovação.

A Figura 1 apresenta a evolução do número de publicações por ano sobre o tema.

Figura 1 - Número de publicações por ano



A Figura 1 evidencia que a produção científica sobre indicadores de economia circular tem crescido nos últimos anos, sobretudo a partir de 2017. A primeira publicação mapeada (Zhou, Ang, & Poh (2006) apresenta uma medida objetiva que pode ser usada para comparar diferentes métodos de agregação para a construção de um índice ambiental composto. Os autores ratificam a importância do elemento de perda de informação em indicadores ambientais. A estrutura de avaliação composta é validada em um estudo de caso, aplicado ao contexto chinês. Quanto aos demais estudos, a evolução segue tímida até o ano de 2014, com crescimento em 2015 e 2016, e posterior alavancagem de 2017 até o presente momento. Ressalta-se que para o ano corrente, com base no que já foi realizado, espera-se que o tema continue obtendo projeção. Isso indica que o campo é promissor e está despertando interesse crescente por parte dos pesquisadores.

A média de citações por artigo é de 48,02, considerando o total de 6.002 citações obtidas pelos 125 estudos mapeados. O artigo mais citado é “How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005”, de autoria de Haas et al. (2015), que recebeu 485 citações conforme Google Scholar Citations. No total, 20 artigos receberam mais de 100 citações, 60 artigos entre 10 e 99 citações e outros 45 entre 0 e 9 citações.

A Tabela 2 apresenta as informações quanto aos journals nos quais os artigos foram publicados.

Tabela 2 – *Journals* por Número de Publicação

Journal	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Fator de Impacto JCR
Journal of Cleaner Production	35	28,0%	7.246
Resources, Conservation and Recycling	13	10,4%	8.086

Sustainability	9	7,2%	2.576
Journal of Industrial Ecology	7	5,6%	6.539
Ecological Economics	5	4,0%	4.482
Science of The Total Environment	4	3,2%	6.551
Waste Management	4	3,2%	5.448
Amfiteatru Economic	3	2,4%	1.625
Journal of Environmental Management	3	2,4%	5.647
International Journal of Life Cycle Assessment	3	2,4%	4.307
Energy Procedia	2	1,6%	-
International Journal of Production Research	2	1,6%	4.577
International Journal of Sustainable Engineering	2	1,6%	-
Omega	2	1,6%	5.324
Water	2	1,6%	2.544
Outros	28	22,4%	-
Total	125	100,00%	-

Os artigos foram publicados em 43 journals diferentes, considerando que 28 destes apresentam apenas uma publicação. Os journals que registram o maior número de publicações são o Journal of Cleaner Production (35 artigos), Resources, Conservation and Recycling (13 artigos), Sustainability (9 artigos), Journal of Industrial Ecology (7 artigos) e Ecological Economics (5 artigos), todos com escopo direcionado a temática de sustentabilidade. Estes journals representam 55% do total de publicações. Todos os journals com três citações ou mais apresentam Fator de Impacto JCR. A relevância do JCP para o campo é evidente. Seu escopo inclui pesquisa em diversas linhas, como produção mais limpa, questões ambientais e sustentabilidade em empresas, governos, instituições de ensino, regiões e sociedade. Seu Fator de Impacto JCR é de 7,246.

5. Dimensões analíticas de economia circular, alcance dos indicadores e níveis de inovação

A discussão dos resultados foi categorizada à luz das diferentes dimensões estabelecidas desta classificação - todos elementos identificados na literatura, considerando a seguinte ordenação: 5.1 Dimensões da sustentabilidade, 5.2 Abordagem de mensuração da economia circular, 5.3 Configuração do tema base, 5.4 Enfoque dos indicadores, 5.5 Nível dos indicadores, 5.6 Indicadores de nível micro, 5.7 Indicadores de nível meso, 5.8 Indicadores de nível macro, 5.9 Capacidade de inovação, 5.10 Granulidade da inovação, e 5.11 Maturidade da inovação .

5.1 Dimensões da sustentabilidade

Os indicadores revisados abordam diferentes dimensões da sustentabilidade. Entretanto, as estruturas carecem de integração de múltiplas abordagens, considerando a composição identificada. O conceito de concepção da sustentabilidade próprio da abordagem do Triple Bottom Line, implica no seu entendimento como sendo a articulação de elementos de ordem social, ambiental e econômico (Padin et al., 2016). O aspecto social é o mais negligenciado pelos indicadores, presente em apenas 36 destes. O resultado deficitário quanto ao elemento social é amplamente corroborado pela literatura (Mesa, Esparragoza, & Maury, 2018). Uma das principais críticas quanto à larga implementação da economia circular é justamente neste sentido. A atenção é voltada majoritariamente para fatores ambientais e ganhos econômicos, enquanto o retorno social é obtido de forma indireto ou mesmo não visado. O aspecto econômico compõe 96 indicadores, enquanto o ambiental é identificado em 119 destes. A proposição de indicadores com abordagem ambiental e econômica, concomitantemente, é identificada em 25 indicadores.

5.2 Abordagem de mensuração da economia circular

A abordagem teórica de mensuração da economia circular dos artigos pode ser categorizada em três bases distintas: Avaliação do Ciclo de Vida, Fluxo dos Materiais e

Indicador de Circularidade. O indicador de circularidade é tomado como a razão entre o valor econômico de cada sessão recirculada e o valor econômico de todas as partes do processo (Linder, Sarasini, & van Loon, 2017). O acompanhamento do fluxo de materiais permite às empresas adotar práticas que maximizem o uso de recursos originários de processos regenerativos, reduzindo a entrada de matéria-prima nova. A partir do mapeamento dos fluxos e trâmites de materiais, medidas de otimização, reciclagem e racionalização podem ser projetada para cada parte do processo produtivo (Busch, Dawson, & Roelich, 2017). A avaliação do ciclo de vida também é base para a implementação de circularidade nos produtos e materiais, ao propor avaliação semelhante quanto à identificação de possibilidades de fechamento dos ciclos (Lonca et al., 2018). Dos estudos analisados, as três abordagens apresentam paridade quanto à sua utilização, embora o estudo dos fluxos de materiais predomine em 49 artigos, enquanto os indicadores de circularidade e a avaliação do ciclo de vida estejam presentes em outros 46 indicadores cada.

5.3 Configuração do tema base

A configuração do tema base remete à especificação do arranjo de mensuração do indicador, que pode contemplar cinco possibilidades conforme os artigos analisados, a saber: longevidade, eficiência de recursos, indicador de desempenho, potencial de reutilização e taxa de reciclagem. A longevidade, abordada em apenas três indicadores, remete à mensuração da contribuição para retenção de material no ciclo produtivo, tomando como referência o tempo que um recurso permanece em uso (Franklin-Johnson, Figge, & Canning, 2016). A eficiência de recursos, que trata da otimização e maximização do uso de materiais e energia (Di Maio et al., 2017), é o elemento mais desenvolvidos nos indicadores (37 estudos). Num contexto de consolidação de práticas sustentáveis e circulares, a forma como as empresas utilizam os recursos com foco na eficiência é fundamental (Bracquené, Dewulf, & Dufrou, 2020). O indicador de desempenho encontra definição na razão entre o desempenho ambiental real e o desempenho ambiental ideal, na forma de obtenção de ganhos e benefícios mútuos na relação empresa versus ambiente natural (Huysman, et al., 2017). Essa condição é incluída em 28 indicadores. O potencial de reutilização trata do nível de implementação do reuso de materiais e insumos no processo produtivo circular, fazendo a reentrada constante de materiais pelo reuso de componentes (Park & Chertow (2014). O tema é incluso em 27 indicadores. Outros 25 artigos abordam a taxa de reciclagem (Huysman et al., 2015), que contribui para a reinserção de materiais no ciclo produtivo e reduz a carga ambiental do descarte.

5.4 Enfoque dos indicadores

O tópico de análise dos indicadores de economia circular especifica o foco que a mensuração do nível de circularidade toma no desenvolvimento dos indicadores, que assume a forma do índice de economia circular propriamente dito, circularidade do produto, circularidade da energia ou dos materiais. O Índice de Economia Circular trata de uma ferramenta de medição para mensurar o desempenho no contexto da economia circular, que é segmentado a partir dos estágios do ciclo de vida, avaliação de componentes e energia, e demanda por inserção de recursos novos no sistema (Di Maio & Rem, 2015; Griffiths & Cayzer, 2016). Essa configuração é tomada como base em 22 indicadores. Outras 12 métricas abordam o Índice de Circularidade do Produto, que consiste na reutilização, reciclagem, recomposição ou recondicionamento de produtos (Bracquené, Dewulf, & Dufrou, 2020). A maior parte dos indicadores (31 artigos) avalia as condições de circulação e permanência dos materiais no sistema produtivo. Esse índice mede o limite em que o fluxo restaurativo pode ser maximizado e o fluxo linear de materiais pode ser reduzido (Lonca et al., 2018). A possibilidade de implementar a circularidade a partir dos materiais é mais abundante que na condição de recircular produtos, porque nem sempre é possível reintroduzir para o uso um produto em

condições adversas (García-Barragán, Eyckmans, & Rousseau, 2019). O tema com menor inserção remete à permanência da energia no sistema produtivo (6 estudos), que depende da possibilidade pela qual o material pode ser reinserido na produção.

5.5 Nível dos indicadores

Os indicadores de economia circular podem ser avaliados quanto ao seu alcance em níveis micro, meso ou macro (Saidani et al., 2019). As ações avaliadas variam em função do nível de implementação que podem assumir, que resumem a amplitude do foco do indicador. Os indicadores a nível micro são predominantemente mais abundantes que as demais dimensões, visto que representam ações a nível de empresa, produto e consumidor. Nessa instância, a economia circular assume configuração localizada e direcionada para a menor unidade de análise e compreende posições nas quais os gestores e consumidores tem a maior influência (Kristensen & Mosgaard, 2020). Ao nível micro foram dedicados 72 dos 125 estudos de mensuração da economia circular revisados. O nível meso foi tratado em 12 métricas e compreende as ações voltadas às relações interfirma, simbiose industrial, parques industriais e cadeia de suprimentos. Descrevem circuitos mais complexos e completos que articulam ações ao longo de uma cadeia de produção, por exemplo (Genovese et al., 2017). O nível macro, foco de 41 indicadores, comporta o âmbito mais amplo da economia circular, direcionada sobretudo a formação de políticas (Mavi, & Mavi, 2019).

5.6 Indicadores de nível micro

O nível micro da economia circular pode ser decomposto em unidades de análise mais próximas da natureza das ações implementadas. Nesta revisão, os estudos foram categorizados em cinco possibilidades: produto, serviço, energia, componentes e materiais. A disposição dos itens neste tópico tende da categoria mais ampla (produto) à unidade menos divisível (materiais) da análise. As estratégias que medem a circularidade em produtos ou serviços consideram procedimentos para retardar os loops de recursos. A abordagem do produto é evidente em 78 indicadores, enquanto em serviços são registradas 13 métricas. Quanto aos componentes menos divisíveis (energia, componentes e materiais), a frequência registrada salienta a acumulação quanto à mensuração de indicadores que envolvem componentes (30 artigos) e materiais (32 artigos), enquanto o tema de energia é avaliado em apenas seis indicadores.

5.7 Indicadores de nível meso

O nível meso da economia circular implica na consideração de uma extensão que vai além do produto, e incorpora a compreensão da cadeia de suprimentos e as relações entre empresas. Nesse nível, foram estabelecidas as seguintes categorias: interfirma, simbiose, parques industriais/ecoparques e cadeia de suprimentos. O fechamento dos circuitos de produção são abordagens práticas que amplificam o alcance da economia circular e estimulam a adoção de operações alinhadas com os princípios da sustentabilidade. As relações interfirma são objeto de estudo de duas métricas revisadas, enquanto foi possível registrar outros quatro artigos com a temática direcionada a simbiose industrial. A otimização do uso de materiais e energia em parques industriais foi tratada em um indicador. Outros sete indicadores focaram em cadeias de suprimentos, buscando mensurar manifestações próprias da economia circular.

5.8 Indicadores de nível macro

No nível macro da economia circular estão as abordagens holísticas e que envolvem repercussões em aspecto mais amplo. Os artigos revisados direcionam esforços a mensuração do tema em cinco contexto distintos, a saber: cidades, províncias, nação, políticas e governo. A partir da análise dos artigos, identificou-se que as métricas são mais frequentemente relacionadas a políticas (32 artigos) e governos (27) que tem abrangência e força de

implementação em cenários que envolvem grupos econômicos e organizações de países. Tais estímulos podem ser o fator chave para o crescimento do desenvolvimento sustentável (Garcia-Bernabeu et al., 2020). A atuação dos governos assume um relevante papel na efetiva implementação de políticas de suporte à economia circular via regulamentação. As políticas estão associadas, em sua maioria, a decisões tomadas em países como a China e ao bloco econômico da União Europeia. A nível de cidade, sete indicadores foram identificados e um a nível de província. No âmbito nacional, as métricas representam 13 iniciativas listadas. O avanço de políticas nacionais e globais rumo à economia circular reforça o estímulo à proteção do meio ambiente e geração de oportunidades para o desenvolvimento sustentável.

5.9 Capacidade de inovação

A lógica de associação entre capacidade de inovação e economia circular compreende uma perspectiva de integração inerente aos dois constructos quanto aos recursos mínimos necessários para sua mobilidade. Os diferentes estágios do ciclo de vida da inovação demandam ações correspondentes para estímulo e continuidade do avanço da economia circular (Guldmann & Huulgaard, 2020). Por consequência, as métricas envolvidas também são influenciadas pela relação descrita. A dimensão de análise é baseado em El Bassiti (2018). Os indicadores de economia circular e o nível de avanço das práticas avaliadas apresentam maior afinidade com o estágio de implementação deste modelo de capacidade de inovação (39 artigos). O estágio compreende o esforço de mobilização dos recursos necessários e da especificação das ações a serem desenvolvidas, com foco no desempenho e na geração de competências. A entrega de resultados, neste ponto, é confluyente quanto as demandas e as urgências de avanço. Outros estágios recorrentes envolvem a validação (24 indicadores) e a exploração (28 indicadores), que remetem à instituição de parâmetros de avaliação, revisão de decisões, difusão de ideias potencialmente promissoras e verificação de seu impacto. Os indicadores listados alinham-se a essa perspectiva à luz da utilidade e pertinência que seus resultados podem apresentar.

5.10 Granulidade da inovação

Os estágios de granulidade da inovação têm interface com a economia circular pela perspectiva de integração dos diferentes pilares que o sustentam. A granulidade implica no alinhamento das atividades e decisões associadas a fatores de contexto, perfil dos atores e as capacidades de conhecimento (El Bassiti, 2018). Os fatores de contexto são identificados em 70 indicadores, e explicitam as dinâmicas resultantes das demandas e ações tomadas com objetivo de obtenção de resultados para questões chave sobre a transição para a economia circular. Considerando que as ações associadas a economia circular e sustentabilidade são predominantemente focadas no longo prazo, os elementos de contexto devem ser situados para viabilizar a efetividade da tomada de decisão. O estágio de conhecimento registra 43 indicadores e alinha-se a transformação de insumos, energia e materiais em saídas definidas, que implicam na consideração da reutilização, recondicionamento e reciclagem, por exemplo. O estágio do ator (10 artigos) prioriza a criação de responsabilidades e senso de contribuição com o todo.

5.11 Maturidade da inovação

A lógica da maturidade da inovação permite a visualização do ponto em que é possível a abordagem para implementação de processos de melhoria (El Bassiti, 2018). Demanda a revisão de suas próprias capacidades quanto a possibilidade de desenvolvimento e determinação de iniciativas para a economia circular. O escalonamento dos níveis indica que os indicadores revisadores apresentam a configuração predominantemente vinculado (35 estudos), gerenciado (44 estudos) e sustentado (38). O envolvimento dos diferentes atores vinculados à

implementação de ações em economia circular decorre das prioridades estabelecidas. A demanda por eficiência nos processos, sobretudo quanto ao aspecto da proteção ambiental e da viabilidade econômica, estimula a melhoria no desempenho do fechamento dos ciclos de produção e no consumo consciente. A colaboração coletiva na formulação de alternativas em diferentes áreas dá resposta ao mesmo problema de maximização de resultado como a minimização do uso de recursos. O avanço nos estágios é operado a partir do progresso em níveis específicos de prioridade, que levam à obtenção de maior potencial de sucesso na transição para a economia circular.

6. Discussão dos Resultados

Os artigos analisados que versam sobre indicadores e métricas de economia circular adotam uma pluralidade de metodologias e embasamentos teóricos que demonstram a riqueza de possibilidades que podem ser exploradas quanto ao desenvolvimento do tema. O campo é promissor e apresenta interesse crescente por parte de pesquisadores, sobretudo nos últimos quatro anos. A diversidade de percursos metodológicos e formas de abordagem demanda atenção quanto aos aspectos de validade e confiabilidade, próprios de pesquisas que abordam a mensuração e quantificação de fenômenos emergentes.

As estruturas de avaliação revisadas adotam critérios de aferição de rigor à pesquisa, assim como parâmetros que conferem aplicabilidade a contextos realistas e passíveis de reprodução. Os principais fatores considerados como relevantes no desenvolvimento dos indicadores remetem aos seguintes aspectos: a) abrangência de escopo, b) relevância quanto ao tema abordado, c) comparabilidade para contextos semelhantes, d) consistência metodológica e teórica, e) facilidade de uso, f) implementação facilitada, g) utilidade para a formação de políticas e tomada de decisão, h) simplificação, i) aplicabilidade a diferentes ciclos e recursos, j) orientação prioritária para situações factuais, k) normalização dos dados, l) realismo da construção teórica e interpretação, m) transparência quanto à obtenção e manipulação dos dados, n) possibilidade de aplicação de reteste, o) replicabilidade da métrica, p) adaptabilidade para outros contextos, q) integração com outros indicadores, r) modelo com metáfora compreensível para difusão, dentre outros. Esses critérios devem ser considerados em futuras métricas ou indicadores desenvolvidos para mensuração da economia circular.

A integração das dimensões social, econômica e ambiental, próprias das construções teóricas associadas a sustentabilidade, é falha em grande parte dos estudos. Muito embora a economia circular estimule o desenvolvimento prioritário no aspecto ambiental, o elemento social deve ser considerado em ferramentas que objetivem o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade das operações empresariais. Portanto, são necessárias métricas que avaliem o impacto social das ações em economia circular, integradas às demais dimensões. Outro fator limitante no escopo das métricas remete à falta de consenso a respeito da definição de economia circular. Ainda que a consolidação de um campo emergente seja operada a partir da experimentação e da argumentação, a confiabilidade de suas métricas é limitada pela inconsistência quanto à definição do que é e do que não é economia circular. Portanto, a definição teórica assertiva do modelo que mensura o fenômeno é necessária para possibilitar a validade da estrutura proposta.

Ainda que o processo de recirculação e reciclagem dos materiais, componentes e produtos evite a extração de recursos virgens da natureza, a análise sobre a carga de resíduos ou impactos ambientais, ainda que reduzidos, não é explorada pelos indicadores. Muito embora o dano ambiental dos processos orientados à economia circular seja severamente menor que nos processos lineares, as saídas e externalidades precisam ser consideradas para aprimoramento de sua eficiência. Nestes mesmo sentido, os indicadores e ferramentas são deficientes quanto à abordagem integrada da economia circular. Sobretudo os indicadores do nível micro apresentam tendenciosidade unidimensional de análise. Considerando que a

economia circular é um fenômeno essencialmente complexo, são necessárias métricas multidimensionais ou estudos que articulem diferentes aspectos para a composição de cenários que comportem a amplitude do tema e suas diversas manifestações.

O campo de indicadores para a economia circular é explorado majoritariamente no nível micro (produto, componentes e material). As pesquisas a nível meso e macro são menos frequentes, sobretudo considerando a perspectiva de análise das cadeias de suprimento de produtos específicos ou de um segmento da indústria. A abordagem dos indicadores não é sistêmica, em sua maioria, o que prejudica a compreensão holística dos fluxos técnicos e biológicos de materiais e energia. Sem a perspectiva sistêmica, a proposição de alternativas de aprimoramento e transição é comprometida para o fechamento dos ciclos, visto que possíveis laços que poderiam ser integrados na compreensão dos processos são ignorados. No nível macro, o principal ponto deficitário é a falta de definição quanto às metas. Os indicadores e ferramentas nos quais os objetivos são claramente definidos, a proposição de possibilidades de implementação, aprimoramento ou mesmo de compreensão são melhor condicionados para suporte à formação de políticas e tomada de decisão.

O campo carece de estudos comparativos e métricas para economias em desenvolvimento ou emergentes. Estes cenários apresentam particularidades e especificidades únicas quanto à organização do sistema produtivo, dinâmica econômica e avanço quanto à incorporação de valores associados à sustentabilidade, se comparados a economias desenvolvidas. Com exceção do contexto chinês que é amplamente estudado, os indicadores são focados em economias desenvolvidas nas quais as regulamentações estão avançadas e as políticas são definidas em relação às metas e papéis dos diferentes setores da sociedade. Em cenários menos avançados quanto a regulamentação e implementação da EC, as possibilidades de exploração poderiam originar métricas únicas que seriam potenciais fomentadoras de transição.

Uma característica importante quanto à análise da autoria dos indicadores é a participação de pesquisadores não vinculados a universidades. Registra-se a participação conjunta de pesquisadores associados a instituições como a Comissão Europeia e o Sustainable Europe Research Institute, o que indica a articulação na proposição de indicadores para a economia circular entre universidades e demais instituições. Portanto, a busca de métricas de economia circular é interessante para distintas esferas da sociedade, além daquelas tradicionalmente envolvidas.

Na interface entre indicadores de economia circular e exploração de aspectos relacionados a inovação, o campo é rico em possibilidades de desenvolvimento. Os estudos sobre inovação e transição para a economia circular carecem de métricas para avaliação e mensuração, o que significa a existência de oportunidade a ser explorada e desenvolvida em futuros indicadores. As iniciativas rumo ao fechamento dos ciclos, recirculação de materiais e componentes, proposição de modelos de negócios inteligentes e alinhados à perspectiva da economia circular passam pela modificação dos processos, procedimentos e valores de uma organização. Nesse sentido, compreender os diferentes níveis da inovação, capacidades, granularidade e nível de maturidade alinha-se à possibilidade assertiva de inserção da circularidade. A caracterização dos diferentes níveis, contexto e recursos necessários à inovação nas empresas tem interface à implementação de práticas circulares, motivo pelo qual os indicadores podem ser ferramentas na avaliação e composição do caminho mais confiável a ser seguido para execução de ambos os objetivos. Portanto, novos indicadores podem articular a categorização da inovação à economia circular como alternativa na edificação de métricas viáveis e pertinentes ao progresso do campo.

7. Proposta de Agenda para Pesquisas Futuras

Proposição 1: A construção de indicadores e métricas sobre o ciclo biológico dos materiais contribui na transição para a economia circular.

Os indicadores de economia circular a nível micro são majoritariamente desenvolvidos com foco na avaliação do ciclo de vida dos produtos e nos fluxos de materiais e componentes do ciclo técnico. As métricas negligenciam os ciclos biológicos dos materiais, sobretudo quando considerados os ganhos pela permanência dos materiais nos ciclos de produção. A perda de material biológico ou os ganhos por sua reincorporação na produção ou no meio devem ser melhor explorados para possibilitar a transição para a economia circular. O consumo de recursos deve ser observado em função do ciclo biológico por meio da regeneração nos processos. A observação da sustentabilidade em relação a recuperação e recriação de materiais possibilita a inclusão da análise do ciclo de vida em diferentes escalas de ciclos biológicos (Briassoulis, Pikasi, & Hiskakis, 2020).

Proposição 2: A estimação de ganhos sociais pela implementação da economia circular é condição para a sustentabilidade e alcance do desenvolvimento sustentável.

O aspecto social da economia circular é relevante para estimular processos participativos, abertos e transparentes que possibilitem o envolvimento de diferentes partes interessadas e planos locais de sustentabilidade a longo prazo (Buonocore et al., 2019). A transição para uma economia circular demanda a preservação dos meios de subsistência e condições dignas de trabalho as pessoas, a racionalização do uso de recursos para a maximização dos seus benefícios e redução de externalidades (Gravagnuolo, Angrisano, & Girard, 2019). O acesso a alimentos de qualidade e a preços justos, assim como a segurança de fornecimento de água e energia, inerentes ao ganho de desempenho ambiental e econômico da economia circular, são aspectos possíveis e necessários de serem avaliados em futuros estudos. Metodologias de avaliação e desenvolvimento do valor social são necessários para orientar a condução das decisões e as políticas no campo social (Coscieme et al., 2019)

Proposição 3: A avaliação da completa extensão da cadeia de suprimentos dos materiais fornece suporte à decisão mais assertiva quanto à economia circular.

A extensão da avaliação das práticas circulares ao longo de uma cadeia de produção implica na ampliação do alcance do desempenho circular. A análise de todos os possíveis elos ligados a produção e circulação de um produto permite que os diferentes fluxos e sentidos de circulação dos materiais seja avaliado quanto à incorporação de princípios circulares. Portanto, a reinserção e realimentação de materiais e componentes de um produto ao longo de sua cadeia de produção evita a extração de material virgem e possibilita que o ciclo técnico seja fechado dentro de um circuito de empresas (Gong et al., 2019). As perdas em potencial dos materiais e de valor são reduzidas e os ganhos são distribuídos aos parceiros próximos.

Proposição 4: A análise da circularidade no nível meso (interfima, simbiose, cadeia de suprimentos) contribui para a incorporação da economia circular nos processos produtivos.

O redesenho das relações entre empresas leva à criação de oportunidades e a consolidação de parcerias que geram desempenho e avanço para a economia circular (Bracquené, Dewulf, & Duflou, 2020). Os fluxos de material e insumos sofrem perdas reduzidas se as empresas que fazem parte da cadeia de produção operam num modelo ampliado de economia circular. O avanço quanto a práticas circulares estendidas e adaptadas ao nível meso ainda carece de ferramentas e métricas para avaliação de ganhos e geração de oportunidades (Gong et al., 2019). A adoção de práticas alinhadas à economia circular coloca as empresas organizadas em cadeia em vantagem àquelas que desenvolvem e buscam prosperidade sozinhas, além de possibilitar a difusão facilitada de exemplos de redesenho e práticas eficientes de produção em circuito fechado (Bracquené, Dewulf, & Duflou, 2020).

Proposição 5: A construção de indicadores de economia circular no nível macro deve ser orientada a políticas e contexto socioeconômico de países emergentes e em desenvolvimento.

Os indicadores e métricas desenvolvidas para avaliação do nível macro da economia circular se concentram em economias desenvolvidas e blocos econômicos de países desenvolvidos. Esses indicadores não são alinhados para mensuração da economia circular em contextos de nações menos desenvolvidas (Mattos & Albuquerque, 2018). Considerando que a proposição de indicadores auxilia na obtenção de parâmetros para o aprimoramento de práticas associadas à economia circular, o fornecimento de ferramentas de avaliação próprias para economia emergentes ou em desenvolvimento facilitaria a implementação de políticas de estímulo à transição para a economia circular. Os indicadores adaptados para este contexto devem considerar as especificações e peculiaridades de cenários socioeconômicos menos estáveis quanto a fatores políticos, econômicos e institucionais (Cezarino et al., 2019).

Proposição 6: Os estudos sobre o desempenho de práticas circulares devem considerar os fluxos de materiais e produtos entre países e zonas econômicas.

O trânsito de produtos e materiais entre países e zonas econômicas nem sempre é considerado quando analisado o ciclo de vida dos produtos e os fluxos de materiais no contexto da economia circular. As parcerias comerciais entre empresas com sede em outras regiões implicam na extensão geográfica da cadeia de suprimentos e na alteração da lógica em que os ciclos podem ser fechados (Julianelli et al., 2020). O estudo sobre a logística e capacidade de obtenção de desempenho circular considerando essas especificidades deve ser considerado em futuras métricas.

8. Considerações finais e limitações da pesquisa

Esta pesquisa teve como objetivo analisar as especificidades dos indicadores de economia circular quanto a aspectos de natureza analítica, alcance e amplitude das métricas e níveis de inovação associados à economia circular. A revisão fornece orientação quanto ao desenvolvimento de indicadores para o campo a partir da lógica pela qual os artigos foram construídos. A análise foi desenvolvida a partir de 125 publicações revisadas por pares, coletadas em 10 bases acadêmicas diferentes. Os resultados são apresentados com base na extração da lógica conforme diferentes aspectos de abordagem, que resultaram na caracterização dos principais aspectos de cada indicador.

A principal contribuição deste artigo é o fornecimento de uma revisão dos indicadores, métricas e ferramentas orientadas para a economia circular que contribuem potencialmente para o aprimoramento e consolidação das diversas pesquisas no campo. A presente pesquisa avança ao reunir e atualizar os direcionamentos que a temática assume, além das revisões já publicadas. São indicadas fragilidades, potencialidades e critérios que devem ser utilizados para aprimorar a validade e confiabilidade das pesquisas, próprios de estudos quantitativos e de mensuração de fenômenos. Vários aspectos relacionados a áreas da economia circular e suas manifestações são sub exploradas, como no caso do setor de serviços, ampliação das métricas para toda a extensão de um produto ou material, tratamento e recuperação de resíduos de produção, avaliação de atividades em parques industriais, entre outros.

A contribuição teórica consiste em avançar na análise sobre as especificidades de indicadores para a economia circular e fornecer subsídios para aprimoramento das futuras métricas. Dada a alta dinamicidade e constantes avanços que a economia circular empreende em curtos períodos de tempo, as métricas devem ser constantemente atualizadas para acompanhar a transição. A revisão fornece um variado portfólio de informações em diferentes categorias que pode ajudar na definição de caminhos assertivos para estudos futuros. A contribuição prática é de sinalizar oportunidades para empresas, universidades e governo quanto às possibilidades que podem ser exploradas e estimuladas para desenvolvimento do conhecimento e prática sobre o campo. As métricas a nível micro dão suporte à proposição de aprimoramento nos fluxos de produtos e materiais para a otimização na tomada de decisão na transição para a economia circular e melhoria dos processos já implementados. A nível meso,

a mensuração do desempenho na interação entre empresas, simbiose industrial e parques industriais pode favorecer a formação de arranjos mais eficientes nos quais o aproveitamento dos recursos seja otimizado. A nível macro, o conhecimento dos indicadores facilita a avaliação das políticas e sua pertinência para o alcance dos princípios da economia circular. As decisões a nível de país, província ou cidade moldam os rumos amplos da transição para a circularidade e para a viabilização do alcance do desenvolvimento sustentável.

As limitações do estudo se resumem a aspectos relacionados a conteúdo e método. As limitações quanto ao conteúdo relacionam-se a identificação limitada de conteúdo a ser revisado. Muito embora a busca tenha sido operada em várias bases de dados, com retorno de um quantitativo expressivo de artigos se comparada a outras revisões do tema, as possibilidades se limitam pela fonte de dados e impossibilidade de revisão mais ampla. O tema ainda não é consolidado e isso afeta a linearidade dos resultados revisados. Quanto ao método, a análise e codificação em revisões sistemáticas, envolve a capacidade de exploração e cognição dos autores. Os resultados estão limitados face a essa condição. A ausência de sub-categorias e sub-códigos para aprofundar a análise também limita o estudo quanto ao exaurimento da extração das informações. Além dos caminhos já listados, recomenda-se que pesquisas futuras avancem quanto a análise de sub-categorias a partir das dimensões e recomendações listadas.

Referências

- Almeida, S. T., Borsato, M., & Ugaya, C. M. L. (2017). Application of exergy-based approach for implementing design for reuse: The case of microwave oven. *Journal of Cleaner Production*, 168, 876-892. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.034
- Aydiushchenko, A., & Zajac, P. (2019). Circular Economy Indicators as a Supporting Tool for European Regional Development Policies. *Sustainability*, 11(11), 3025. doi:10.3390/su11113025
- Bocken, N. M., Ritala, P., & Huotari, P. (2017). The circular economy: exploring the introduction of the concept among S&P 500 firms. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 487-490. doi: 10.1111/jiec.12605
- Bonisoli, L., Galdeano-Gómez, E., Piedra-Muñoz, L. (2018). Deconstructing criteria and assessment tools to build agri-sustainability indicators and support farmers' decision-making process. *Journal of Cleaner Production*, 182, 1080-1094, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.055.
- Bracquené, E., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2020). Measuring the performance of more circular complex product supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104608. doi:10.1016/j.resconrec.2019.104608
- Briassoulis, D., Pikasi, A., & Hiskakis, M. (2020). Recirculation potential of post-consumer /industrial bio-based plastics through mechanical recycling - Techno-economic sustainability criteria and indicators. *Polymer Degradation and Stability*, 109217. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2020.109217
- Buonocore, E., Paletto, A., Russo, G. F., & Franzese, P. P. (2019). Indicators of environmental performance to assess wood-based bioenergy production: A case study in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 221, 242-248. doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.272
- Busch, J., Dawson, D., & Roelich, K. (2017). Closing the low-carbon material loop using a dynamic whole system approach. *Journal of Cleaner Production*, 149, 751-761. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.166
- Cainelli, G., D'Amato, A., & Mazzanti, M. (2020). Resource efficient eco-innovations for a circular economy: Evidence from EU firms. *Research Policy*, 49(1), 103827. doi: 10.1016/j.respol.2019.103827
- Cayzer, S., Griffiths, P., & Beghetto, V. (2017). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(4-5), 289-298. doi:10.1080/19397038.2017.1333543
- Cesarino, L. O., Liboni, L. B., Stefanelli, N. O., Oliveira, B. G., & Stocco, L. C. (2019). Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. *Management Decision*. Ahead-of-print. doi: 10.1108/MD-10-2018-1084
- Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carreón, J. R., & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy - A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104498. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104498
- Coscieme, L., Mortensen, L. F., Anderson, S., Ward, J., Donohue, I., & Sutton, P. C. (2019). Going beyond Gross Domestic Product as an indicator to bring coherence to the Sustainable Development Goals. *Journal of Cleaner Production*, 119232. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119232
- Cristóbal, J., Castellani, V., Manfredi, S., & Sala, S. (2018). Prioritizing and optimizing sustainable measures for food waste prevention and management. *Waste Management*, 72, 3-16. doi:10.1016/j.wasman.2017.11.007
- Di Maio, F., & Rem, P. C. (2015). A robust indicator for promoting circular economy through recycling. *Journal of Environmental Protection*, 6(10), 1095.

- Di Maio, F., Rem, P. C., Baldé, K., & Polder, M. (2017). Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 163–171. doi:10.1016/j.resconrec.2017.02.009
- El Bassiti, L. (2018). Multi-dimensional view of innovation performance from knowledge dynamics to maturity matrix. *Management Dynamics in the Knowledge Economy*, 6(1), 67-85. doi: 10.25019/MDKE/6.1.04
- Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741-2751. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.196
- Fellner, J., & Lederer, J. (2020). Recycling rate–The only practical metric for a circular economy?. *Waste Management*, 113, 319-320. doi: 10.1016/j.wasman.2020.06.013
- Franklin-Johnson, E., Figge, F., & Canning, L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*, 133, 589–598. doi:10.1016/j.jclepro.2016.05.023
- García-Barragán, J. F., Eyckmans, J., & Rousseau, S. (2019). Defining and Measuring the Circular Economy: A Mathematical Approach. *Ecological Economics*, 157, 369–372. doi:10.1016/j.ecolecon.2018.12.003
- García-Bernabeu, A., Hilario-Caballero, A., Pla-Santamaria, D., & Salas-Molina, F. (2020). A Process Oriented MCDM Approach to Construct a Circular Economy Composite Index. *Sustainability*, 12(2), 618. doi:10.3390/su12020618
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. C. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344–357. doi:10.1016/j.omega.2015.05.015
- Gong, Y., Putnam, E., You, W., & Zhao, C. (2019). Investigation into circular economy of plastics: The case of the UK fast moving consumer goods industry. *Journal of Cleaner Production*, 118941. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118941
- Gravagnuolo, A., Angrisano, M., & Fusco Girard, L. (2019). Circular Economy Strategies in Eight Historic Port Cities: Criteria and Indicators Towards a Circular City Assessment Framework. *Sustainability*, 11(13), 3512. doi:10.3390/su11133512
- Griffiths, P., & Cayzer, S. (2016). Design of Indicators for Measuring Product Performance in the Circular Economy. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 307–321. doi:10.1007/978-3-319-32098-4_27
- Guldmann, E., & Huulgaard, R. D. (2020). Barriers to circular business model innovation: A multiple-case study. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118160. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118160
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 765–777. doi:10.1111/jiec.12244
- Hanumante, N. C., Shastri, Y., & Hoadley, A. (2019). Assessment of circular economy for global sustainability using an integrated model. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104460. doi:10.1016/j.resconrec.2019.104460
- Haupt, M., & Hellweg, S. (2019). Measuring the Environmental Sustainability of a Circular Economy. *Environmental and Sustainability Indicators*, 100005. doi:10.1016/j.indic.2019.100005
- Howard, M., Hopkinson, P., & Miemczyk, J. (2018). The regenerative supply chain: a framework for developing circular economy indicators. *International Journal of Production Research*, 1–19. doi:10.1080/00207543.2018.1524166
- Husgafvel, R., Linkosalmi, L., Hughes, M., Kanerva, J., & Dahl, O. (2018). Forest sector circular economy development in Finland: A regional study on sustainability driven competitive advantage and an assessment of the potential for cascading recovered solid wood. *Journal of Cleaner Production*, 181, 483–497. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.176
- Huysman, S., De Schaepe meester, J., Ragaert, K., Dewulf, J., & De Meester, S. (2017). Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 46–54. doi:10.1016/j.resconrec.2017.01.013
- Julianelli, V., Caiado, R. G. G., Scavarda, L. F., & Cruz, S. P. D. M. F. (2020). Interplay between reverse logistics and circular economy: critical success factors-based taxonomy and framework. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104784. doi: 10.1108/IJOA-04-2020-2120
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy–From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, conservation and recycling*, 135, 190-201. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034
- Kravchenko, M., Pigosso, D. C., & McAloone, T. C. (2020). A Procedure to Support Systematic Selection of Leading Indicators for Sustainability Performance Measurement of Circular Economy Initiatives. *Sustainability*, 12(3), 951. doi: 10.3390/su12030951
- Kristensen, H. S., & Mosgaard, M. A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy–moving away from the three dimensions of sustainability?. *Journal of Cleaner Production*, 243, 118531. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118531

- Linder, M., Sarasini, S., & van Loon, P. (2017). A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 545–558. doi:10.1111/jiec.12552
- Lonca, G., Muggéo, R., Imbeault-Tétreault, H., Bernard, S., & Margni, M. (2018). Does material circularity rhyme with environmental efficiency? Case studies on used tires. *Journal of Cleaner Production*, 183, 424–435. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.108
- Mattos, C. A., & De Albuquerque, T. L. M. (2018). Enabling factors and strategies for the transition toward a circular economy (CE). *Sustainability*, 10(12), 4628. doi: 10.3390/su10124628
- Mavi, N. K., & Mavi, R. K. (2019). Energy and environmental efficiency of OECD countries in the context of the circular economy: Common weight analysis for malmquist productivity index. *Journal of Environmental Management*, 247, 651–661. doi:10.1016/j.jenvman.2019.06.069
- Mesa, J., Esparragoza, I., & Maury, H. (2018). Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1429–1442. doi:10.1016/j.jclepro.2018.06.131
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., ... Stewart, L. A. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4(1). doi:10.1186/2046-4053-4-1
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., Van Acker, K., ... & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure?. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 452–461. doi :10.1016/j.resconrec.2019.03.045
- Padin, C., Ferro, C., Wagner, B., Valera, J. C. S., Høgevold, N. M., & Svensson, G. (2016). Validating a triple bottom line construct and reasons for implementing sustainable business practices in companies and their business networks. *Corporate Governance: The International Journal of Business in Society*, 16(5), 849–865. doi:10.1108/cg-12-2015-0163
- Parchomenko, A., Nelen, D., Gillabel, J., & Rechberger, H. (2019). Measuring the circular economy-A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. *Journal of Cleaner Production*, 210, 200–216. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.357
- Park, J. Y., & Chertow, M. R. (2014). Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *Journal of Environmental Management*, 137, 45–53. doi:10.1016/j.jenvman.2013.11.053
- Primc, K., Kalar, B., Slabe-Erker, R., Dominko, M., & Ogorevc, M. (2020). Circular economy configuration indicators in organizational life cycle theory. *Ecological Indicators*, 116, 106532.
- Saidani, M., Kendall, A., Yannou, B., Leroy, Y., & Cluzel, F. (2019). Closing the loop on platinum from catalytic converters: Contributions from material flow analysis and circularity indicators. *Journal of Industrial Ecology*. doi:10.1111/jiec.12852
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014
- Schilkowski, C., Shukla, M., & Choudhary, S. (2019). Quantifying the circularity of regional industrial waste across multi-channel enterprises. *Annals of Operations Research*. doi:10.1007/s10479-019-03168-4
- Silvestri, F., Spigarelli, F., & Tassinari, M. (2020). Regional development of Circular Economy in the European Union: a multidimensional analysis. *Journal of Cleaner Production*, 120218. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120218
- Smol, M., Kulczycka, J., & Avdiushchenko, A. (2017). Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(3), 669–678. doi:10.1007/s10098-016-1323-8
- Sverko Grdic, Z., Krstinic Nizic, M., & Rudan, E. (2020). Circular Economy Concept in the Context of Economic Development in EU Countries. *Sustainability*, 12(7), 3060. doi:10.3390/su12073060
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. doi:10.1111/1467-8551.00375
- Türkeli, S., Kemp, R., Huang, B., Bleischwitz, R., McDowall, W., 2018. Circular economy scientific knowledge in the European Union and China: a bibliometric, network and survey analysis (2006e2016). *J. Clean. Prod.* 197, 1244e1261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.118>.
- Veleva, V., Bodkin, G., & Todorova, S. (2017). The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s “zero waste” journey. *Journal of Cleaner Production*, 154, 517–529. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.177
- Völker, T., Kovacic, Z., & Strand, R. (2020). Indicator development as a site of collective imagination? The case of European Commission policies on the circular economy. *Culture and Organization*, 1–18. doi:10.1080/14759551.2019.1699092
- Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2006). Comparing aggregating methods for constructing the composite environmental index: An objective measure. *Ecological Economics*, 59(3), 305–311. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.10.018