

Fernando Cerrato Marques

Aplicação da ferramenta cientométrica VOSviewer à produção bibliográfica relativa ao material rGO/g-C₃N₄: Histórico e tendências atuais

Versão Original

Monografia apresentada ao Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Eduardo Bessa Azevedo

São Carlos/SP
2021

RESUMO

MARQUES, Fernando Cerrato. Aplicação da ferramenta cientométrica VOSviewer à produção bibliográfica relativa ao material rGO/g-C₃N₄: histórico e tendências atuais. 2021. Monografia (Bacharelado em Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

O objetivo do presente trabalho foi fazer análises cientométricas na literatura disponível na base de dados *Web of Science* referente ao material rGO/g-C₃N₄ e suas aplicações, por meio do *software* cientométrico *VOSviewer*, identificando assim informações relevantes nas áreas pesquisadas. Os dados utilizados continham título, autores, ano de publicação, organização, *abstract* e palavras-chave. Inicialmente, foram filtrados 126 artigos, seus dados foram analisados e normalizados, retirando-se ambiguidades, erros de digitação, repetições e sinônimos, por meio da criação de um arquivo *Thesaurus*. De posse dos dados normalizados, os dados foram introduzidos no *VOSviewer*, o qual criou conjuntos de mapas de visualização de 4 tipos diferentes: *Network Visualization*, *Overlay Visualization*, *Item Density* e *Cluster Density*. Foram analisados 30 mapas de coautoria, citação, cocitação, coocorrência e acoplamento bibliográfico, para as unidades de análise país, autor, organização e palavras-chave de autor. Foi analisada também uma nuvem de palavras contendo os principais termos constantes nos trabalhos estudados. Foi observada uma tendência de aumento do número de trabalhos na área, mais especificamente em processos fotocatalíticos por meio de luz solar natural, degradação de poluentes emergentes, produção de combustíveis limpos (H₂), sensores eletroquímicos e baterias de alto desempenho. Muitas vezes, a grande força atribuída ao *link* entre *clusters* deveu-se majoritariamente à um único artigo, tendo este se tornado uma referência na área. Artigos pioneiros tenderam a ser citados mais frequentemente, como esperado. Autores da mesma organização tenderam a ser coautores entre si, citar uns aos outros, possuir referências (acoplamentos bibliográficos) em comum e, de forma menos intensa, colaborar com organizações do mesmo país. A organização *Chinese Academy of Science* é, mundialmente, a mais importante. Semelhantemente, identificou-se a preponderância de artigos provenientes da China, de autores chineses (autoria e coautoria), sendo citados e cocitados, com grande acoplamento bibliográfico.

Palavras-chave: Cientometria. VOSviewer. rGO. g-C₃N₄.

ABSTRACT

MARQUES, Fernando Cerrato. Application of the VOSviewer scientometric tool to the bibliographic production related to the rGO/g-C₃N₄ material: history and current trends. 2021. Monografia (Bacharelado em Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

The goal of this work was to perform scientometric analyses in the literature available at the Web of Science research engine regarding the rGO/g-C₃N₄ material, by using the scientometric software VOSviewer, to identify relevant information regarding the researched knowledges. The used data contained title, authors, year of publication, group of publication, abstract, and keywords. First, 126 papers were filtered, their data were analyzed and normalized, suppressing ambiguities, typing errors, repetitions, and synonyms, by the use of a Thesaurus file. Once normalized, the data were introduced into VOSviewer, which created four sets of different maps: Network Visualization, Overlay Visualization, Item Density e Cluster Density. 30 maps of co-authorship, co-occurrence, bibliographic coupling, and co-citation, for the units of analysis country, author, organization, and author's keywords were analyzed. Also, a word cloud was created containing the papers' most often keywords. It was observed an increase trend in the number of papers in the study area, mainly related to photocatalytic processes using solar natural light, emerging pollutants degradation, clean fuel production (H₂), electrochemical sensors, and high-performance batteries. Quite often, the great force assigned to a link between clusters is due to a single paper, which turned into a reference one in the field. Pioneer articles tended to be cited more often, as expected. Authors belonging to the same organization tended to have co-authorships among them, to cite each other, to have references in common (bibliographic coupling) and, less intensely, to collaborate with organizations belonging to the same country. The Chinese Academy of Science is the most important organization worldwide. Similarly, it was identified a great predominance of papers from China, of Chinese authors (authorship and co-authorship), being cited and co-cited, with great bibliographic couplings.

Keywords: Scientometrics. VOSviewer. rGO. g-C₃N₄.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medidas de similaridade	5
Figura 2 – Tipos de mapas do VOSviewer: (a) Network visualization, (b) Overlay visualization, (c) Item density e (d) Density visualization (continua).....	8
Figura 3 – Grafite, óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido	17
Figura 4 – Captura da tela da base de dados Web of Science com os critérios de busca preenchidos.....	20
Figura 5 – Relação entre número de artigos e anos de publicação.....	24
Figura 6 – Nuvem de palavras contendo os termos presentes nas palavras-chave de autor.....	25
Figura 7 – Mapa de Network Visualization: Citação vs. Países.....	26
Figura 8 – Mapa de Density Visualization: Citação vs. Países	27
Figura 9 – Mapa de Network Visualization: Citação vs. Autores	28
Figura 10 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Citação vs. Autores	29
Figura 11 – Mapa de Network Visualization: Citação vs. Organizações	31
Figura 12 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Citação vs. Organizações	32
Figura 13 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Autores	33
Figura 14 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Autores	34
Figura 15 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Organizações	35
Figura 16 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Organizações	36
Figura 17 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Organizações	37
Figura 18 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Países	38
Figura 19 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Países	39
Figura 20 – Mapa de Network Visualization: Coocorrência vs. Palavra-chave de Autor.....	41
Figura 21 – Mapa de Network Visualization: Acoplamento bibliográfico vs. Organização ...	42
Figura 22 – Mapa de Network Visualization: Acoplamento bibliográfico vs. Autores	43
Figura 23 – Mapa de Network Visualization Acoplamento bibliográfico vs. Países.....	44
Figura 24 – Mapa de Overlay Visualization: Citação vs. Países.....	46
Figura 25 – Mapa de Overlay Visualization: Citação vs. Autores	47
Figura 26 – Detalhe do mapa de Overlay Visualization: Citação vs. Autores	48
Figura 27 – Mapa de Network Visualization: Citação vs. Organizações	49
Figura 28 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Citação vs. Organizações	50
Figura 29 – Mapa de Overlay Visualization: Coautoria vs. Autores.....	51
Figura 30 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Autores	52
Figura 31 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Organizações	53
Figura 32 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Organizações	54
Figura 33 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Organizações	55
Figura 34 – Mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Países	56
Figura 35 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Coautoria vs. Países	57
Figura 36 – Detalhe do mapa de Network Visualization: Acoplamento bibliográfico vs. Autores	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Softwares mais comuns	6
Tabela 2 – Tipos de análise e suas respectivas unidades de análise.....	22

LISTA DE SIGLAS

CB – Banda de condução (do inglês, *Conduction Band*)

VB – Banda de valência (do inglês, *Valence Band*)

POA – Processos Oxidativos Avançados

VOS – Visualização de Similaridades (do inglês, *Visualization Of Similarities*)

HOMO – Orbital ocupado de maior energia (do inglês, *Highest Occupied Molecular Orbital*)

LUMO – Orbital desocupado de menor energia (do inglês, *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*)

GO – Óxido de grafeno (do inglês, *Graphene Oxide*)

rGO – Óxido de grafeno reduzido (do inglês, *Reduced Graphene Oxide*)

g-C₃N₄ – Nitreto de carbono grafítico

IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada (do inglês, *International Union of Pure and Applied Chemistry*)

ESG – Do inglês, *Environmental Social and Governance*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Cientometria e Áreas Correlatas.....	3
2.1.1 Introdução	3
2.1.2 Ferramentas e Métodos de Análise Cientométrica	3
2.1.3 VOSviewer como Ferramenta Cientométrica.....	7
2.1.4 Resumo das Operações Matemáticas Realizadas pelo VOSviewer	11
2.2 Fotocatálise e fotocalisadores.....	14
2.3 Materiais à base de carbono: nitreto de carbono grafítico e derivados do grafite	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Coleta de dados.....	20
3.2 Normalização prévia dos dados antes da análise.....	20
3.3 Ferramentas acessórias	21
3.4 Configuração prévia dos parâmetros dos mapas	22
3.5 Configurações dos mapas gerados pelo VOSviewer.....	23
4. RESULTADOS	24
4.1 Ferramenta <i>Analyze Results</i> disponível no Web of Science.....	24
4.2 Nuvens de palavras	25
4.3 Análise dos Mapas <i>Network Visualization</i>	26
4.3.1 Mapas de Citação <i>vs.</i> Países	26
4.3.2 Mapas de Citação <i>vs.</i> Autores	28
4.3.3 Mapas de Citação <i>vs.</i> Organizações	30
4.3.4 Mapas de Coautoria <i>vs.</i> Autores	32
4.3.5 Mapas de Coautoria <i>vs.</i> Organizações	35
4.3.6 Mapas de Coautoria <i>vs.</i> Países.....	38
4.3.7 Mapas de Coocorrência <i>vs.</i> Palavras-chave de Autor.....	40
4.3.8 Mapas de Acoplamento bibliográfico <i>vs.</i> Organizações	41
4.3.9 Mapas de Acoplamento bibliográfico <i>vs.</i> Autores	42
4.3.10 Mapas de Acoplamento bibliográfico <i>vs.</i> Países	44
4.4 Análise dos Mapas de <i>Overlay Visualization</i>	45
4.4.1 Mapas de Citação.....	45

4.4.2 Mapas de Coautoria	50
4.4.3 Mapas de Acoplamento bibliográfico	57
5. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A água é um componente essencial para a manutenção da vida na biosfera terrestre. Sem ela, diversas atividades antrópicas, como a produção de alimentos e bens de consumo, não seriam possíveis. Sendo assim, ela se torna fundamental para a dinâmica ecológica, bem como para a manutenção de nossa forma de viver em sociedade (UNESCO, 2017). O tratamento de corpos hídricos visando sua descontaminação tem atraído muita atenção de muitos pesquisadores. Dentre as tecnologias de tratamento, os Processos Oxidativos Avançados (POA) vêm recebendo especial atenção, devido à sua eficiência, versatilidade de configurações, reduzido tempo operacional e grande abrangência de classes de compostos capazes de serem degradados. Os POAs se baseiam na geração *in situ* de radicais livres que oxidam e degradam moléculas de poluentes e/ou contaminantes (FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG, 2014).

Dentre os POAs destaca-se a fotocatálise heterogênea, na qual um material semicondutor, ao ser irradiado, promove elétrons da banda de valência (VB, do inglês *valence band*) para a banda de condução (CB, do inglês *conduction band*). A CB apresenta então um potencial químico redutor e a VB um potencial oxidante. Dessa forma, em meio aquoso, CB e VB podem se envolver em reações nas quais radicais livres são formados pelas reações redox da água e dos poluentes tratados, promovendo a degradação via radicalar das moléculas de interesse (FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG, 2014).

Na última década, instituições de pesquisa, organizações e grandes conglomerados empresariais vem se preocupando cada vez mais em aplicar práticas que maximizem sua imagem perante a sociedade. Essa tendência, denominada ESG (do inglês, *Environmental, Social and Governance*) pode ser definida como a avaliação de uma organização, quanto aos aspectos ambiental, social e de governança interna, levando em conta seus impactos na sociedade. Assim, um laboratório que, por exemplo, se preocupe com a contaminação de cursos d'água, descarte adequado de seus reagentes e solventes, e com o impacto social na comunidade em que se situa, segue os princípios ESG (GARCIA, A. SANCHES; MENDES, WESLEY; ORSATO, LENATO, 2017).

O presente estudo foca na comparação de trabalhos envolvendo os compostos rGO/g-C₃N₄ por meio de uma ferramenta computacional cientométrica. Tais ferramentas são cada vez mais empregadas em trabalhos científicos, especialmente na elucidação das conexões entre

diferentes publicações, muitas vezes de áreas distintas. Tais conexões seriam de difícil percepção sem o uso de mapas que as conectem e explicitem. Escolheu-se o *software* gratuito VOSviewer, por (a) possuir uma interface gráfica robusta, intuitiva, (b) apresentar documentação abundante, elucidando o seu funcionamento, (c) ser compatível com a Web of Science e (d) ter baixa demanda computacional, além de ser um projeto *freeware*.

Há diversas especialidades dentro da Ciência de Análise de Dados: bibliometria, informetria, webometria, altmetria, cientometria etc. (MINGERS; LEYDESDORFF, 2015; SILVA; BIANCHI, 2001). Essa última foi o tipo empregado no presente trabalho. Ela é definida como a área de estudo que mensura e quantifica o progresso científico, baseado em indicadores bibliométricos, tratando-se de uma área de estudo estratégica no auxílio da tomada de decisões de alocação de recursos, tanto financeiros, quanto pessoais (MEHO; YANG, 2007).

A partir de mapas gerados pelo VOSviewer e de conhecimentos prévios da área estudada, é possível então identificar tendências históricas, se há lacunas nas áreas de estudo e quais instituições, autores e áreas do conhecimento são dedicados a cada tipo de estudo. Essas informações são relevantes para que pesquisadores tenham clareza sobre o andamento da pesquisa em uma determinada área.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cientometria e Áreas Correlatas

2.1.1 Introdução

A cientometria é a área de estudo que mensura e quantifica o progresso científico, baseada em indicadores bibliométricos (citações, fatores de impacto de periódicos e artigos etc.). Ela possui grande potencial de aplicação na elucidação de lacunas e tendências na pesquisa científica, gerando o interesse de órgãos de fomento ao implementarem diferentes ferramentas de apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico (SILVA; BIANCHI, 2001).

Algumas outras áreas são correlatas à cientometria, entre elas têm destaque a bibliometria e a informetria. Ambas são baseadas no emprego de métricas quantitativas e métodos estatísticos na análise de publicações, mas no caso da primeira, se limita especificamente a livros e outras mídias de comunicação; no caso da segunda, levam-se em conta todos os tipos de informações, independentemente da forma ou da origem. Quando a informetria é aplicada especificamente a páginas de internet, costuma-se referir-se a ela como webometria (MINGERS; LEYDESDORFF, 2015).

Outra área de estudo geralmente associada à cientometria é a altmetria, definida como o estudo do uso de medidas de impacto acadêmico com base na atividade em ambientes online. Muitas vezes é chamada de cientometria 2.0, emprega medidas de visualizações, downloads, “curtidas” e reações em blogs e redes sociais como o Twitter (MINGERS; LEYDESDORFF, 2015).

2.1.2 Ferramentas e Métodos de Análise Cientométrica

A análise cientométrica baseia-se em indicadores, tais como: citações, cocitações, co-autorias e acoplamentos bibliográficos. A citação é definida como o modelo padronizado de se referir ao trabalho que é fonte de uma dada informação, ao passo que a cocitação ocorre quando um trabalho cita simultaneamente outros dois trabalhos distintos (coocorrência de citação).

A coautoria ocorre quando dois ou mais autores têm créditos sobre uma mesma publicação. O acoplamento bibliográfico ocorre quando dois trabalhos apresentam uma ou mais referências comuns (VAN ECK; WALTMAN, 2010; MINGERS; LEYDESDORFF, 2015). Esses indicadores são empregados como parâmetros qualitativos e/ou quantitativos nas análises cíntométricas, contudo, desenvolver metodologias e ferramentas que sejam robustas para analisar as mais diversas áreas do conhecimento é desafiador.

Análises baseadas em citações e cocitações podem ser inconclusivas quando a área de estudo não é caracterizada por referenciar adequadamente os trabalhos utilizados, dificultando a elucidação do seu real impacto, algo mais presente, por exemplo, em análises Webométricas. Na área das Ciências Exatas esse efeito não costuma ser tão relevante.

Um pesquisador pode publicar um número diminuto de publicações, porém, esta pequena quantidade publicada pode ser considerada fundamental para a área estudada, possuindo enorme impacto. Por outro lado, grandes grupos de pesquisa podem possuir vasto número de publicações, com vasto número de cocitações, sem refletir em grande impacto na área estudada. Assim, os analistas de dados sempre tiveram grandes desafios em propor modelos que permitam análises conclusivas. Métodos matemáticos que gerem representações gráficas são, em geral, instrumentos úteis para o entendimento dos dados (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

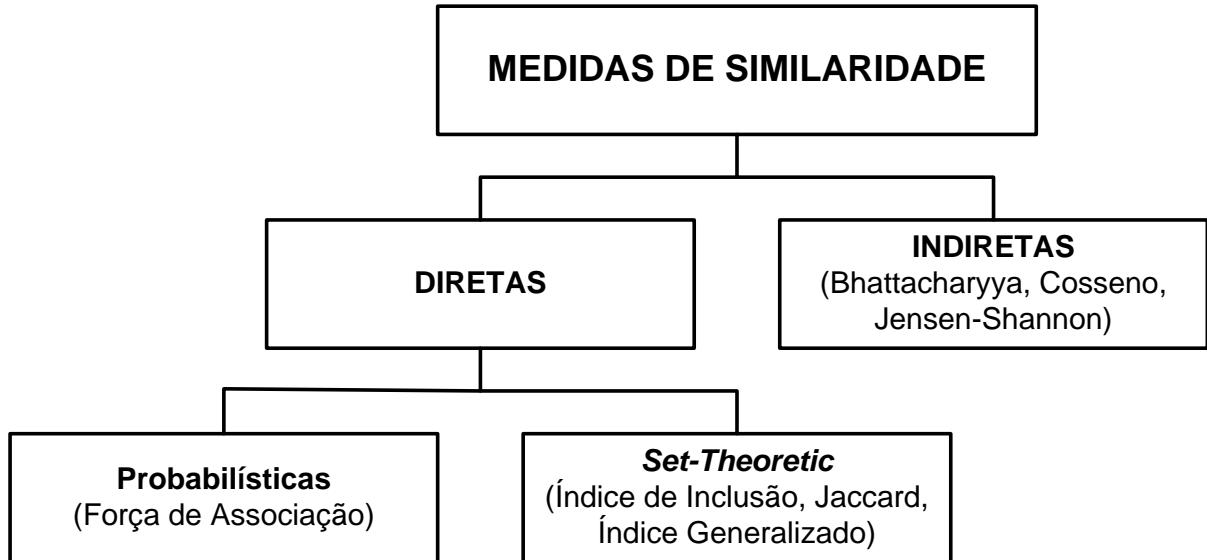
Define-se mineração de dados como a exploração automatizada de dados, textuais ou numéricos, com o objetivo de identificar padrões e/ou anomalias em um determinado banco de dados, sendo seu tipo mais usual a análise de coocorrências, essa sendo definida como a mensuração de pares de dados pertencentes à um conjunto de dados (BUZYDLOWSKY, 2015).

No presente trabalho, definem-se objetos como todos os itens coletados por meio da *Web of Science* que compõem o banco de dados alvo da mensuração e comparação efetuada pelo software VOSviewer. A normalização dos objetos que compõem o banco de dados (título, autor, organização, país e palavras-chave) consiste na retirada de possíveis redundâncias, repetições e erros de digitação. Assim, diferentes ortografias, abreviações e variações de sobrenomes podem ser corrigidas e/ou ignoradas. Garante-se, dessa forma, que a base de dados utilizada na formação dos mapas não introduzirá erros, incongruências e duplicidades aos objetos, aumentando-se a precisão e integridade dos dados. Além disso, melhora-se a interpretação dos resultados e a integração entre softwares que utilizem a mesma linguagem da base de dados. Apesar de não existir um consenso quanto à técnica mais adequada para normalizar os dados,

há consenso sobre sua necessidade, antes que qualquer medida de similaridade possa efetivamente ser feita (VAN ECK; WALTMAN, 2021; MORAL-MUÑOZ et al., 2020). Tal normalização é facilitada através da criação de um arquivo *Thesaurus*, discutido na seção 3.2.

O perfil de coocorrência de um objeto é um vetor que contém o número de coocorrências entre este objeto e os demais existentes. Nas medidas de similaridade indiretas, esse vetor de similaridades entre objetos é obtido comparando-os por meio de perfis de coocorrência; nas diretas, obtém-se tal vetor comparando-se o número de coocorrências dos objetos e ajustando esse número pelo total de ocorrências ou coocorrências de cada objeto. Pode-se dizer então que, ao se empregar um método de similaridade direta, o propósito é normalizar e corrigir possíveis diferenças, associando um peso a cada objeto. O VOSviewer emprega medidas de similaridade diretas, probabilísticas, mais especificamente a técnica VOS. Sendo assim, as demais medidas mostradas na Figura 1 não pertencem ao escopo do presente trabalho e não serão discutidas (VAN ECK; WALTMAN, 2009).

Figura 1 – Medidas de similaridade



Fonte: Adaptado de van Eck e Waltman (2009).

Devido ao aprimoramento do *hardware* e das linguagens de programação nas últimas décadas, diversos *softwares* voltados à análise bibliométrica foram sendo desenvolvidos. Os primeiros possuíam limitações, devido ao baixo poder computacional do *hardware* disponível

na época. Hoje em dia, pode-se escolher entre diversos *softwares*, alguns *open source*, outros com proprietários: Bibexcel, Biblioshiny, BiblioMaps, CiteSpace, CitNetExplorer, SciMAT, Sci² Tool e VOSviewer (MORAL-MUÑHOZ et al., 2020).

Na Tabela 1, podem-se visualizar tais *softwares*, com suas respectivas versões e desenvolvedores. Cada *software* emprega estratégias diferentes, muitas vezes com objetivos diferentes. Eles apresentam modelos e metodologias próprias (Figura 1).

Tabela 1 – *Softwares* mais comuns

<i>Software</i>	Versão	Desenvolvedor	Fonte
Bibexcel	2017	Universidade de Umeå (Suécia)	Bankar e Ravindra (2019)
Biblioshiny	2019	Universidade de Nápoles Frederico II (Itália)	Aria e Cuccurullo (2017)
BiblioMaps	2018	Universidade de Lyon (França)	Universidade de Lyon (2021)
CiteSpace	2019	Universidade de Drexel (EUA)	Chen, Ibekwe-Sanjuan e Hou (2010)
CitNetExplorer	2014	Universidade de Leiden (Holanda)	van Eck e Waltman (2014)
SciMAT	2016	Universidade de Granada (Espanha)	Cobo et al. (2012)
Sci ² Tool	2018	<i>Cyberinfrastructure for Network Science (CNS) Center</i> (EUA)	Börner e Polley (2014)
VOSviewer	2019	Universidade de Leiden (Holanda)	van Eck e Waltman (2021)

Fonte: Adaptado de Moral-Muñoz et al. (2020).

A técnica de associação de forças consiste em um tratamento matemático feito nos objetos a serem analisados (cocitação, citação, palavra-chave, acoplamento bibliográfico etc.). Eles são espacialmente distribuídos em um sistema de coordenadas e conectados por *links* que representam uma relação entre os objetos. A cada *link* é atribuído uma força (um peso), representada por um valor inteiro e positivo. Quanto maior este valor, maior a força do *link*. A força de um *link* pode representar, por exemplo, o número de referências comuns citadas entre dois artigos. Os objetos e *links* juntos, formam uma rede. Objetos podem por sua vez serem agrupados em *clusters* (aglomerados ou agrupamentos). Dessa forma, os métodos gráficos de expressão de dados tornam-se possíveis, e os diferentes algoritmos desenvolvidos ao longo do tempo tendem a melhorar a legibilidade dos dados. (VAN ECK; WALTMAN, 2009).

No tocante às bases das quais os dados para análises cientométricas podem ser extraídos, existem um grande número delas disponíveis para as diversas áreas da pesquisa científica, algumas muito específicas, outras mais abrangentes. Podem-se citar como exemplos: PubMed (30 milhões de itens catalogados, focado em publicações na área da medicina), ERIC (1,3 milhão, ciências da educação), IEE Xplore (5 milhões, engenharias e ciências computacionais), DOAJ (4,3 milhões, artigos *open source*), Scopus, ScienceDirect e Web of Science (1,4, 16 e 1,4 bilhões de itens catalogados, respectivamente, altamente abrangentes nas diversas áreas da ciência) (PAPERPILE, 2021).

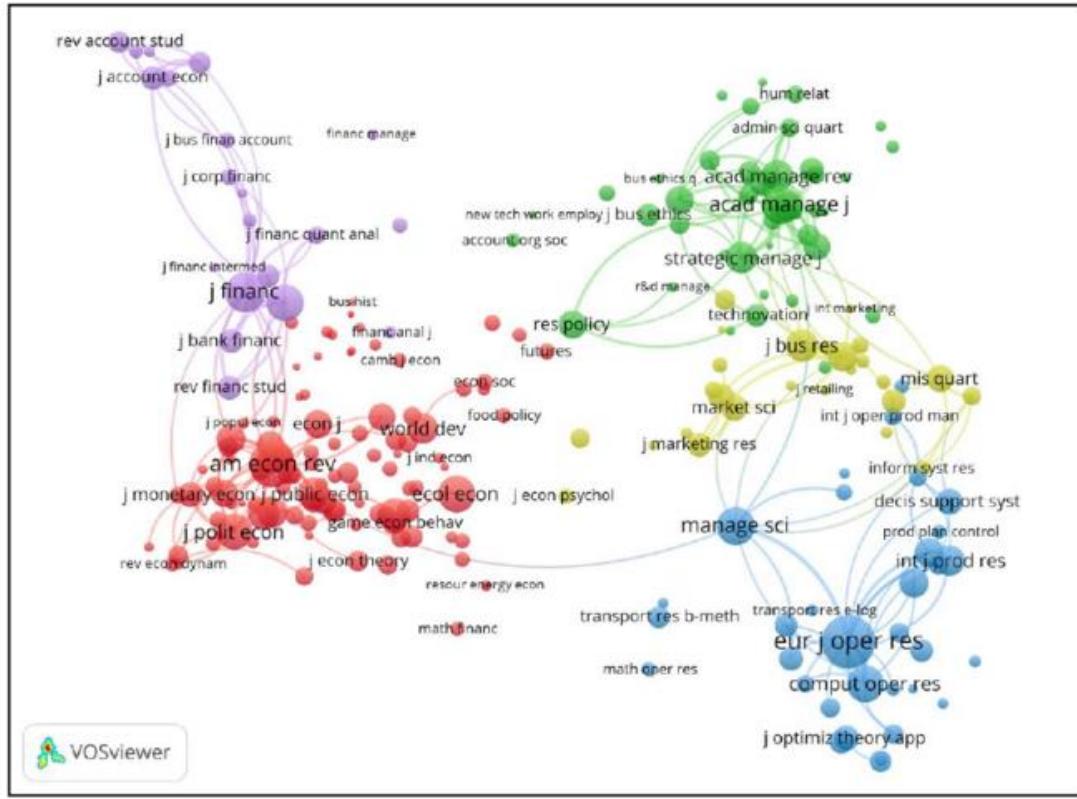
Neste trabalho, empregou-se o VOSviewer como *software* de análise pela simplicidade operacional do mesmo, a compatibilidade com a base Web of Science e o fato de ser *freeware*, livre de custos adicionais.

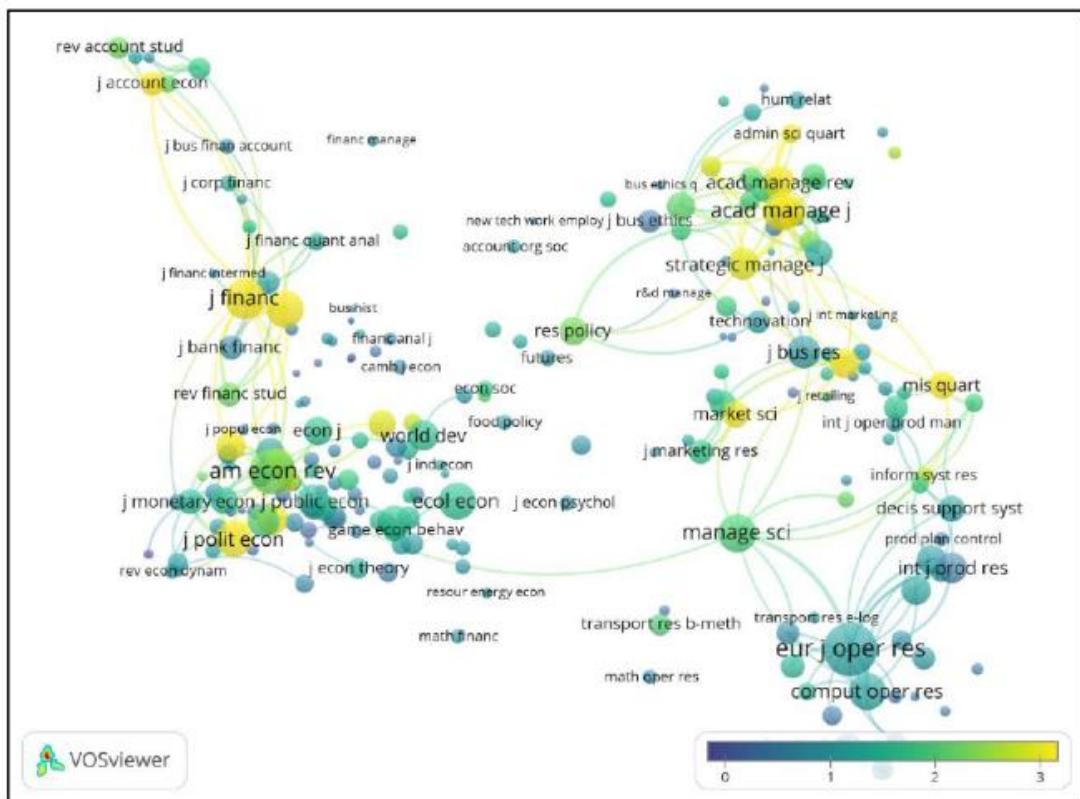
2.1.3 VOSviewer como Ferramenta Cientométrica

O VOSviewer é um *software que* usa medidas probabilísticas de similaridade para confeccionar seus mapas de visualização, atribuindo forças de associação aos objetos-alvo do estudo. A técnica de medida de similaridades empregada nesse caso é a VOS (visualização de similaridades, do inglês *visualization of similarities*). Trata-se de uma medida de similaridade direta, uma vez que compara o número de coocorrências dos objetos e ajusta esse número pelo total de ocorrências ou coocorrências de cada objeto. Os mapas usam distâncias euclidianas (distâncias com valores diretamente proporcionais ao módulo do vetor que separa os objetos) e, quanto maior a similaridade, mais próximos os elementos estão dispostos em um gráfico. Mapas baseados apenas em distâncias tendem a ser pouco intuitivos, poluídos visualmente, com objetos aglutinados de forma a não ser possível uma rápida interpretação da relação entre seus objetos. Tais problemas são minimizados pelo método VOS, uma vez que este não depende exclusivamente de distâncias para classificar os objetos, empregando também a diferenciação por tamanho do ícone que representa o *cluster*, cores diferentes para *clusters* diferentes e *links* de espessuras diferentes representando pesos diferentes atribuídos a esses *links* (VAN ECK; WALTMAN, 2014).

O VOSviewer apresenta as suas análises na forma de quatro gráficos possíveis (*Network visualization*, *Overlay visualization*, *Item density* e *Density visualization*), conforme mostrado na Figura 2.

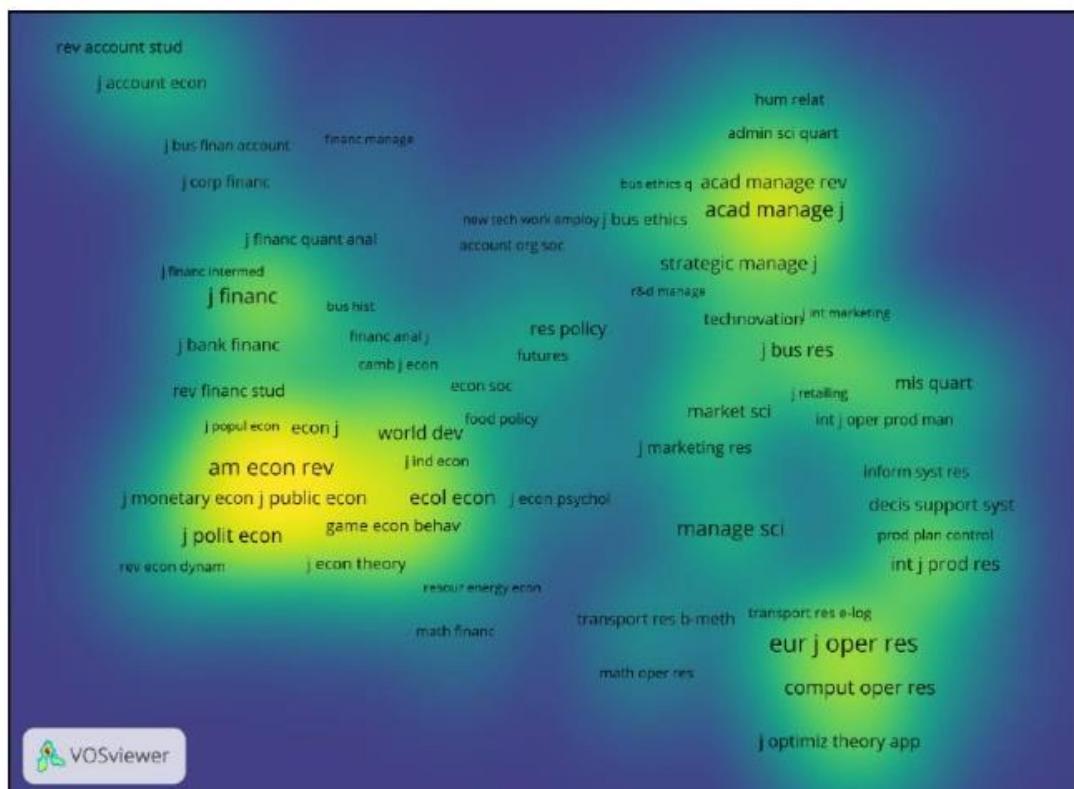
Figura 2 – Tipos de mapas do VOSviewer: (a) *Network visualization*, (b) *Overlay visualization*, (c) *Item density* e (d) *Density visualization* (continua)



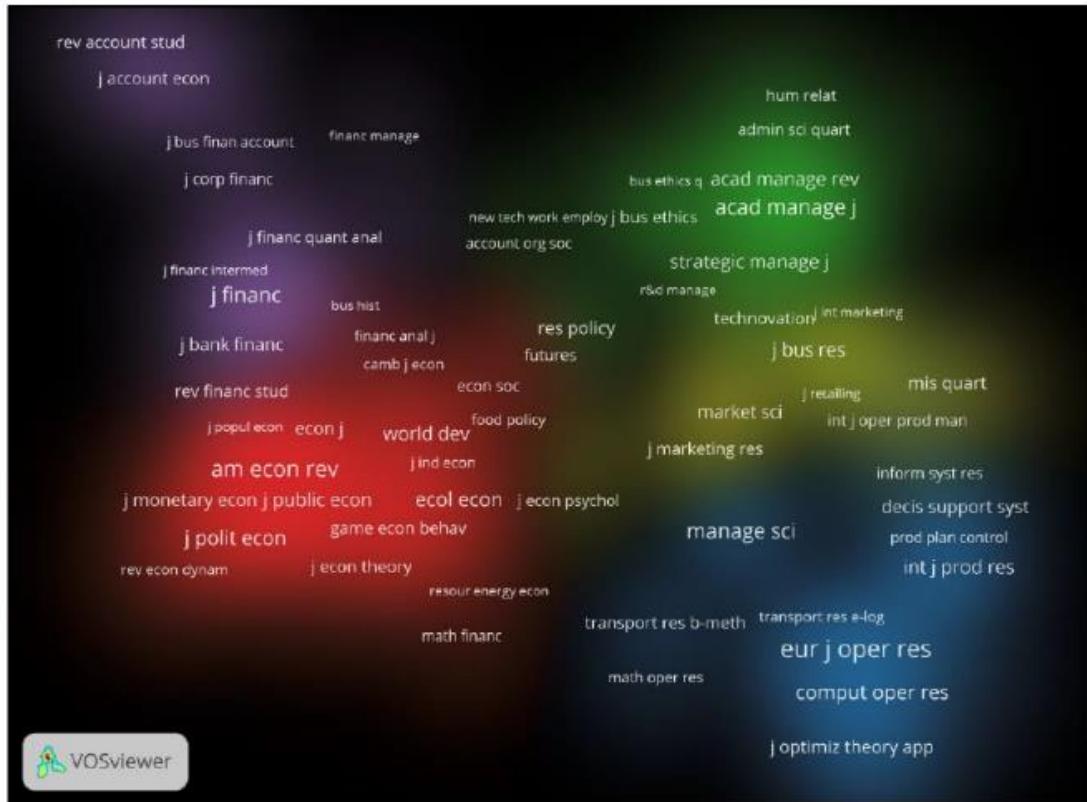


(b)

Figura 2 – Tipos de mapas do VOSviewer: (a) *Network visualization*, (b) *Overlay visualization*, (c) *Item density* e (d) *Density visualization* (conclusão)



(c)



(d)

Fonte: Adaptado de van Eck e Waltman (2021).

Nos mapas de *Network Visualization*, os objetos são representados por ícones circulares e por uma legenda. O tamanho do ícone é diretamente proporcional ao peso do objeto representado por ele (por exemplo, número de ocorrências). Já a cor do objeto é determinada pelo *cluster* ao qual este pertence. A alocação de um objeto em um *cluster* específico depende de sua similaridade calculada pelo método VOS: objetos com maior similaridade estarão em um mesmo *cluster*; objetos com menor similaridade estarão em *clusters* vizinhos; e objetos com pouca ou nenhuma similaridade estarão em *clusters* distantes, muitas vezes sem linhas os unindo. Essas linhas, por sua vez, representam *links*. A espessura destas linhas é diretamente proporcional à relação entre os objetos ligados por elas. Na Figura 2a, podem-se visualizar 5 *clusters*. Notam-se também linhas ligando os objetos pertencentes a *clusters* diferentes, com espessuras diferentes (quanto mais espessa a linha, maior a similaridade ou força que liga os objetos).

Mapas de *Overlay Visualization* (Figura 2b) seguem a mesma lógica do anterior, porém as cores não representam mais os *clusters*. A atribuição de cores é feita por um *score*. Se os objetos não possuem um *score* e não há regras de colorização definidas manualmente pelo usuário, a opção *Overlay visualization* não estará disponível. Os valores de *score* são atribuídos

em uma escala, por exemplo, de 0 a 3, como pode ser visto na legenda no canto inferior direito da Figura 2b, que analisa o fator de impacto de artigos.

Nos mapas de *Density visualization* (Figura 2c), existem duas variáveis disponíveis (*Item Density* e *Cluster Density*). Estas variáveis podem ser ajustadas nas opções disponíveis no *software*. A cada ponto do gráfico é atribuída uma cor, proporcional ao número de objetos na vizinhança do ponto e ao peso destes objetos, não importando a qual *cluster* estes objetos pertencem. Quanto mais objetos na vizinhança (mais densamente populada a vizinhança), mais perto da cor atribuída a região estará. Na Figura 2c, quanto mais densa a região, mais amarela ela será; quanto menos densa, mais roxa.

O mapa de *Cluster density* (Figura 2d), baseia-se em criar um mapa de cores de acordo com a densidade de cada *cluster*, individualmente. Assim, cada *cluster* possui uma cor diferente, e quanto mais denso ele for, maior a densidade da cor atribuída à respectiva região. Comparando-se a Figura 2c com a Figura 2d, nota-se a semelhança nas densidades visualizadas, porém na Figura 2d, consegue-se diferenciar as fronteiras entre os *clusters*, que possuem cores diferentes (VAN ECK; WALTMAN, 2021).

Quando um mapa é criado a partir de uma base de dados composta por dados bibliográficos, deve-se efetuar uma harmonização em seu texto-base. Deve-se ressaltar que, como qualquer ferramenta computacional, o VOSviewer fornece resultados com qualidade compatível com os dados a ele fornecidos. Em outras palavras, uma base de dados de baixa qualidade fornecerá resultados de baixa qualidade.

2.1.4 Resumo das Operações Matemáticas Realizadas pelo VOSviewer

Define-se \mathbf{O} como a matriz ocorrência de ordem $m \times n$. As colunas de \mathbf{O} correspondem aos objetos sendo analisados. Existem n objetos, denotados por $(1, \dots, n)$. Esses objetos podem ser, por exemplo, autores, países e palavras-chave. As linhas de \mathbf{O} representam o número de objetos m em que a análise de coocorrências é baseada. Assume-se também que a matriz \mathbf{O} é binária, ou seja, qualquer elemento de \mathbf{O} possui valor 0 ou 1. O elemento o_{ki} (representado na k -ésima linha e i -ésima coluna da matriz \mathbf{O}) será 1 se o objeto ocorrer no documento correspondente à k -ésima linha de \mathbf{O} , e será 0 se o objeto não ocorrer na k -ésima linha de \mathbf{O} .

Define-se \mathbf{C} como a matriz de coocorrências dos objetos $1, \dots, n$, sendo simétrica e não negativa de ordem $n \times n$. Define-se c_{ij} como o elemento na linha i e coluna j . c_{ij} com $i \neq j$ será, portanto, o número de coocorrências dos objetos i e j . Para $i=j$, c_{ij} será o número de ocorrências do objeto i . Portanto, para todo i e j , vale a Equação 1.

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^m o_{ki} o_{kj} \quad (1)$$

O VOSviewer utiliza o método de associação de força (do inglês, *association strength*), um método probabilístico direto (como pode ser visto na Figura 1). Portanto, neste trabalho foca-se neste tipo de método de similaridade. S_i denota o número total de ocorrências ou coocorrências do objeto i . Para o número total de ocorrências de i , a Equação 2 se faz verdadeira, e para o número total de coocorrências de i , a Equação 3 se faz verdadeira.

$$S_i = c_{ii} = \sum_{k=1}^m o_{ki} \quad (2)$$

$$S_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ij} \quad (3)$$

Ambas as equações são utilizadas em pesquisas cientométricas, porém a Equação 2 é mais popular. Medidas de similaridade direta são definidas como uma função de $S(c_{ij}, s_i, s_j)$, e seguem 3 propriedades (VAN ECK; WALTMAN, 2009).

- a) Suas funções estão contidas no domínio $D_s = \{S(c_{ij}, s_i, s_j)\} \in \mathbb{R}^3 \mid 0 \leq c_{ij} \leq \min(s_i, s_j)$
com $s_i, s_j > 0\}$
- b) O domínio de $S(c_{ij}, s_i, s_j)$ é um subgrupo de \mathbb{R}
- c) $S(c_{ij}, s_i, s_j)$ é simétrica em s_i e s_j

O *VOSviewer* constrói mapas compostos por *clusters* por meio de três passos: i) a matriz de similaridades é calculada baseada na matriz de coocorrências; ii) um mapa é construído aplicando-se a técnica VOS à matriz de similaridades; e iii) o mapa gerado é transladado, rotacionado e refletido.

A técnica VOS exige uma matriz de similaridade, obtida pela normalização de uma matriz de coocorrências, por meio da correção da diferença entre o número total de ocorrências ou coocorrências dos objetos que compõem a matriz. Para tal é empregada técnica de associação de força (conhecida também como índice de proximidade ou índice de afinidade probabilística, do inglês, *proximity index* e *probabilistic affinity index*, respectivamente). Dessa forma, a similaridade s_{ij} entre os objetos i e j pode ser calculada pela Equação 4.

$$s_{ij} = \frac{c_{ij}}{w_i w_j} \quad (4)$$

Onde c_{ij} denota o número de coocorrências entre os objetos i e j , w_i e w_j denotam respectivamente o número total de coocorrências entre i e j , ou o número total de ocorrências de i e j (dependendo dos objetos sendo analisados). Desta forma, s_{ij} será proporcional à razão entre c_{ij} e $w_i w_j$, assumindo-se que a ocorrência de i e j sejam estatisticamente independentes.

Uma vez que a matriz de similaridade foi aplicada, e calculou-se a associação de forças, pode-se aplicar a técnica VOS: Seja n o número total de objetos a serem mapeados. A técnica VOS constrói um mapa de tal maneira que os objetos $1, \dots, n$ são alocados garantindo-se que a distância entre quaisquer pares i e j refletirão sua similaridade s_{ij} , da maneira mais acurada possível. O objetivo da técnica VOS é minimizar a soma ponderada do quadrado das distâncias euclidianas entre todos os pares de objetos. Para evitar mapas triviais onde todos os objetos tenham a mesma localização, a distância média entre dois objetos deve ser igual a 1. A função matemática a ser minimizada é dada pela equação 5.

$$V(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n) = \sum_{i < j} s_{ij} \cdot \| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \|^2 \quad (5)$$

Onde o vetor $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2})$ denota a localização do objeto i em um mapa bidimensional. A minimização da função-objetivo é obtida aplicando-se a Equação 6.

$$\frac{2}{n(n-1)} \sum_{1 < j} \| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \| = 1 \quad (6)$$

A solução numérica que minimiza a Equação 5 em relação à Equação 6, passa por dois passos. Primeiramente, o problema restrito é convertido à um problema não restrito, que é resolvido por meio de um algoritmo de majoração. Tal algoritmo empregado pelo *VOSviewer* é uma variante do algoritmo SMACOF (do inglês, *Scaling by Majorizing a Complicated Function*). Uma explicação mais detalhada do processo pelo qual o *VOSviewer* aloca cada objeto em seu respectivo *cluster* pode ser encontrada nos trabalhos de Borg (2011) e van Eck e Waltman (2010). Em linhas gerais, o que o algoritmo faz é, a partir dos tratamentos matemáticos descritos, agrupar *clusters*, baseado na força atribuída a cada *link* e na distância entre os objetos. No método VOS, os *clusters* serão separados uns dos outros pelas forças desses *links*.

Finalmente, buscando uma maior legibilidade dos mapas, são aplicadas as operações de translação, rotação e reflexão. A otimização descrita nas Equações 5 e 6 só possuirá uma solução global única, após aplicadas as devidas translações, rotações e reflexões.

A solução é rotacionada de forma a maximizar a variância da dimensão horizontal. Tal transformação é denominada análise de componentes principais. A reflexão é obtida definindo-se que se a mediana de x_{i1}, \dots, x_{n1} for maior que zero, a solução é refletida no eixo vertical; se for maior que zero, a solução é refletida no eixo horizontal. Tais transformações têm por objetivo espalhar os objetos de um mapa, de forma a garantir que não estejam aglutinados, permitindo uma melhor visualização e a consequente interpretação pelo usuário. Os tratamentos aqui descritos são bastante robustos e reproduzíveis (VAN ECK; WALTMAN, 2009, 2010).

2.2 Fotocatálise e fotocalisadores

De modo geral, a fotocatálise pode ser descrita como um processo catalítico ativado por luz, no qual radicais livres são gerados por meio de excitação, proveniente de fótons com energia adequada (discreta) e suficiente. Os processos fotocatalíticos são divididos em homogêneos e heterogêneos (DOBSON; BURGESS, 2007).

Nos sistemas homogêneos, os reagentes e catalisadores envolvidos no processo existem na mesma fase. Como exemplo, pode-se citar o processo foto-Fenton ($\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$) (WU; CHANG, 2006). Nos sistemas heterogêneos, os reagentes e catalisadores estão em fases diferentes, ou seja, dois estados de agregação distintos e com uma interface definida.

Como exemplo, pode-se citar a fotocatálise envolvendo filmes de óxidos metálicos semicondutores (separação de cargas menor que um isolante). Baseia-se na interação entre fótons em quantidades discretas, e de comprimento de onda específicos, para promover elétrons presentes no orbital ocupado de maior energia (HOMO, do inglês *Highest Occupied Molecular Orbital*) ao orbital desocupado de menor energia (LUMO, do inglês *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Desta forma, cria-se uma banda de valência eletronicamente deficiente (com lacunas) e uma banda de condução com elétrons acumulados. Os photocatalisadores mais comuns empregam o dióxido de titânio (TiO_2), pois possui baixa taxa de recombinação entre lacunas e elétrons e lacunas de alto poder oxidante (*band gap* de 3,2 eV). Como desvantagem do alto valor de *band gap*, o TiO_2 só é excitado por radiação ultravioleta, sendo o principal motivo dos esforços no desenvolvimento de alternativas, tais como preparo de heteroestruturas, heterojunções e esquemas-Z de materiais (SILVA et al., 2017; ZAREI; OJANI, 2017; AHMED; HAIDER, 2018; MOURÃO et al., 2009).

Quando semicondutores diferentes são postos em contato, gerando uma interface definida, são formadas as heterojunções. Essas estruturas possuem bandas de energia ocupando níveis diferentes, sendo opostas às homojunções. Seu comportamento pode ser atribuído majoritariamente ao alinhamento dos níveis de Fermi na interface. As interfaces entre semicondutores podem ser divididas em três classes: *Straddling gap* (tipo I), *Staggered gap* (tipo II) e *broken gap* (tipo III). Em geral, os semicondutores com propriedades catalíticas apresentam estruturas do tipo II e, portanto, os tipos I e III não fazem parte do escopo do presente trabalho, e não serão discutidos (GEIM; GRIGORIEVA, 2013; LOW et al., 2017).

As heterojunções do tipo II são definidas como aquelas nas quais o estado energético de menor valor para as lacunas se encontra em um dos lados da junção, enquanto o estado energético de menor valor para os elétrons, se encontram do lado oposto à junção. Uma típica heterojunção do tipo II, envolve 2 semicondutores, denominados A e B. Tanto a banda de valência quanto a banda de condução de A são maiores que as de B. Sendo assim, os elétrons gerados por irradiação luminosa em A, migrarão para B, devido ao alinhamento das bandas. Da mesma forma, as lacunas geradas em B, serão transferidas para A. As heterojunções vêm sendo exploradas no desenvolvimento de aparelhos para o armazenamento de energia, células combustíveis e na degradação de poluentes (GEIM; GRIGORIEVA, 2013; LOW et al., 2017).

As heteroestruturas semicondutoras são definidas como aquelas nas quais a composição química muda no espaço (não é homogênea), ou seja, uma sobreposição de semicondutores diferentes, com diferentes *band gaps*. São empregadas na confecção dos mais recentes e avançados semicondutores, com uso prático, por exemplo, em fontes óticas de alta performance e detectores ópticos, empregando-se soluções sólidas de GaSb e InAs, por exemplo. A maioria contém mais de uma heterojunção e devem, portanto, serem descritas como heteroestruturas (FRENSLEY, 1994).

Por fim, define-se esquema-Z como uma associação de semicondutores em que a transferência de cargas entre banda de condução e valência ocorrem por meio de uma espécie intermediária (esquema-Z indireto), ou um semicondutor transfere carga da sua banda de valência para a de condução do outro material (esquema-Z direto). Grande atenção vem sendo dada para essa abordagem na literatura (SILVA et al., 2017; ZAREI; OJANI, 2017; AHMED; HAIDER, 2018).

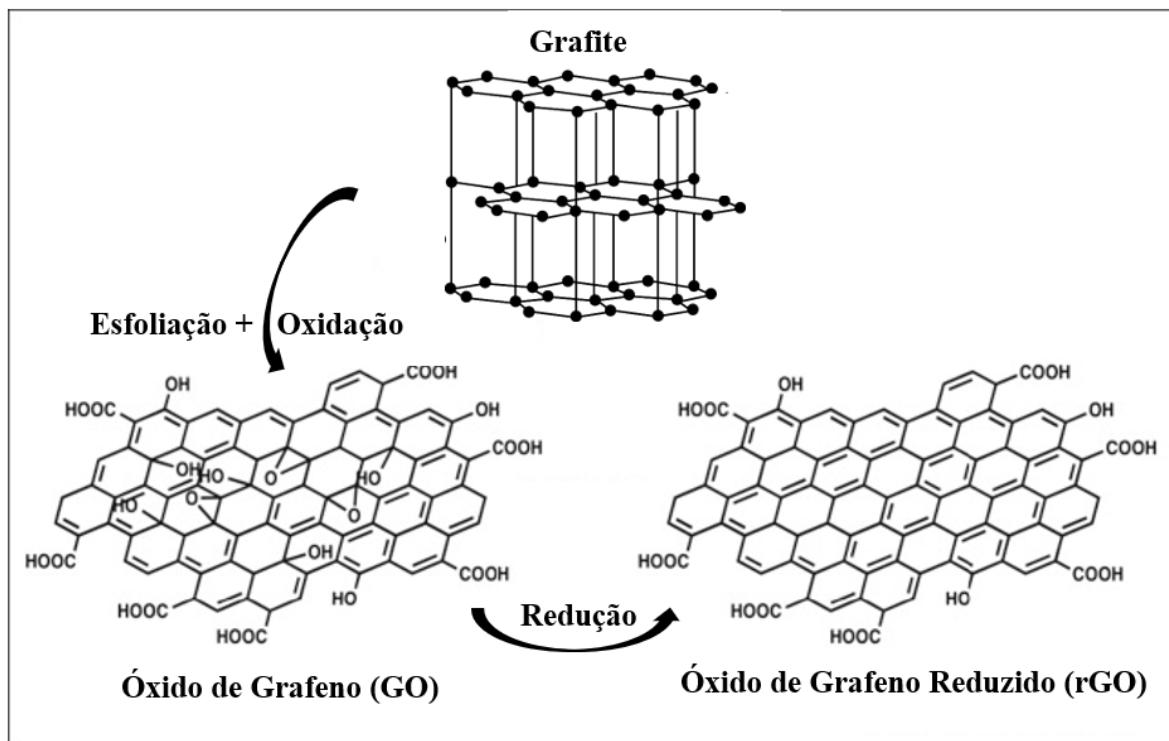
2.3 Materiais à base de carbono: nitreto de carbono grafítico e derivados do grafite

Dados os problemas associados ao uso de semicondutores metálicos para aplicação em fotocatálise (contaminação secundária do efluente por íons metálicos, demanda de radiação ultravioleta, custo etc.) tem-se buscado o desenvolvimento de materiais à base de carbono (MENG; ZHANG, 2018). Dentre os materiais que se podem destacar nessa categoria, estão os derivados do grafeno, o grafite e o nitreto de carbono grafítico.

O grafite (Figura 3) é um dos materiais à base de carbono mais conhecidos nas ciências dos materiais e é precursor do grafeno. A definição de grafeno é dada pela IUPAC como uma folha aromática única de carbono, de extensão virtualmente infinita (FITZER et al., 1995). Ele pode adicionar resistência mecânica e térmica a compósitos, sendo especialmente empregado na área da optoeletrônica. No entanto, não é o material mais adequado para ser usado em fotocatálise heterogênea, por absorver apenas 2,3% da radiação ultravioleta que nele incide (KRISHNA et al., 2015).

O óxido de grafeno (GO, Figura 3), é derivado do grafite e possui estrutura lamelar com grupos funcionais oxigenados. Duas rotas sintéticas são majoritariamente utilizadas para se obter esse material: a) rotas baseadas nos percloratos e, mais recentemente, b) rotas baseadas no permanganato de potássio. Essa última é mais segura e rápida, além de produzir materiais com propriedades mais próximas aos semicondutores metálicos, gerando materiais com um grande número de defeitos de rede. Todas as rotas empregam mecanismos similares, que consistem em inserir grupos como epóxi, hidroxila, carboxila e carbonila na estrutura do grafite, rompendo as interações de van der Waals que mantinham as lamelas aglomeradas. A presença desses grupos funcionais introduz forte caráter hidrofílico, facilitando sua reação em meio líquido (HUMMERS JUNIOR; OFFEMAN, 1958; SHAH et al., 2015). Resumindo, o GrO é um material produzido pela oxidação do grafite, levando ao aumento do espaçamento entre camadas e à funcionalização dos seus planos basais (PAPAGEORGIOU; KINLOCH; YOUNG, 2015).

Figura 3 – Grafite, óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido



Fonte: Adaptado de McCoy et al. (2019).

Descreve-se o óxido de grafeno reduzido (rGO) como a forma reduzida do GO, obtida por métodos térmicos ou químicos, com o objetivo de reduzir seu teor de oxigênio por meio da remoção de grupos funcionais oxidados, como pode ser visto na Figura 3. O rGO difere do

grafeno pelo alto número de defeitos de rede, dando origem à separação de cargas (diferentemente do grafeno, que é mais condutor) (DIKIN et al., 2007; OJHA; ANJANEYULU; GAN-GULI, 2014).

Por sua vez, o nitreto de carbono grafítico ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) é descrito como um material sólido, amarelo, de estrutura lamelar bidimensional e polimérica, de anéis derivados de unidades de *s*-triazina de grande extensão, não metálico, com potencial de oxidação de + 2,7 eV. Sendo assim, fornece condições ideais para ser usado em semicondutores nanoeletrônicos. Sua estrutura eletrônica pode ser modulada de forma controlada, por dopagem ou funcionalização química. É descrito como um material de baixo custo, estável térmica e quimicamente, com grande área superficial específica (WANG; WANG; ANTONIETTI, 2012; GHALKHANI et al., 2021). A rota sintética mais usual consiste na pirólise de precursores como a ureia e a melanina. Seu uso é vantajoso, uma vez que não é metálico, suporta copolimerizações e é fotoativado na região do visível. Vem sendo amplamente estudado para a formação de heteroestruturas tipo II. A atividade fotocatalítica, quando em seu estado puro, é menor que a de outros semicondutores, sendo necessária a combinação com outros materiais para melhorar a eficiência do processo. Uma estratégia comum é a sua associação com o óxido de zinco (ZnO). A associação de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ com óxidos metálicos gera compostos com uma separação de cargas aquém da ideal. No entanto, podem operar na faixa do visível, sendo esta uma grande vantagem. Sua associação com outros compostos grafíticos despertou um grande interesse na comunidade científica, destacando-se, por exemplo, o emprego do GO e do rGO.

As possíveis aplicações do composto rGO/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ têm despertado grande interesse, com destaque para a área de fotocatalisadores não metálicos, especificamente com aplicação de irradiação de luz visível, em detrimento de trabalhos com óxidos metálicos acoplados a rGO, mais comuns no passado (UPADHYAY; SOIN; ROY, 2014). A síntese de rGO/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ pode ser obtida por meio de diversos métodos, porém dois subgrupos são de emprego mais usual: métodos térmicos (a redução do GO a rGO se dá simultaneamente à condensação de um precursor do $\text{g-C}_3\text{N}_4$) e métodos de via úmida (onde GO ou rGO se acoplam ao $\text{g-C}_3\text{N}_4$ formado anteriormente por meio de tratamento ultrassônico, refluxo ou hidrotermal). A redução do GO se dá por um agente redutor. A estratégia por via úmida é a mais usual, pois oferecer maior controle dos parâmetros reacionais e gera materiais mais homogêneos, os quais transferem cargas de forma mais eficiente (DING et al., 2011; PAPAGEORGIOU; KINLOCH; YOUNG, 2015).

Nas rotas térmicas, a melanina é o precursor mais comum, seguido pela ureia. Tais rotas sintéticas apresentam uma menor reprodutibilidade que a úmida, em virtude das diferenças nos perfis de aquecimento de diferentes fornos, dificultando o controle da deposição uniforme de rGO sobre o material, resultando em baixa homogeneidade do produto formado (DING et al., 2011; PAPAGEORGIOU; KINLOCH; YOUNG, 2015). Alguns trabalhos buscam elucidar o papel do grau de oxigenação do rGO na separação de cargas do rGO/g-C₃N₄ e compreender os mecanismos envolvidos na formação de heteroestruturas, por meio de modelagem computacional (TENG et al., 2017; XU et. al., 2015). São relatados trabalhos onde rGO/g-C₃N₄ não é o único agente oxidante, estando presentes também o ozônio, visando degradar o ácido oxálico, alcançando remoções completas com 25 min de reação (YIN et al., 2016).

O compósito rGO/g-C₃N₄ tem sido empregado também como alternativa na modificação de outros semicondutores e suas respectivas propriedades fotovoltaicas. Alguns trabalhos apresentam junções ternárias com esse compósito, sendo uma estratégia popular na construção de esquemas-Z, atuantes sob radiação no espectro visível, possuindo grande poder oxidante (WANG et al., 2015; HUANG et al., 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

Todos os artigos que compõem o banco de dados empregado no presente estudo foram coletados em 02/09/2021, no banco de dados *online* que agrupa trabalhos de diferentes áreas da ciência, denominado *Web of Science (Clarivate)*. Os critérios de busca são mostrados na Figura 4. O resultado dessa busca retornou 126 artigos em diversas áreas, países, grupos de pesquisa e autores.

Figura 4 – Captura da tela da base de dados *Web of Science* com os critérios de busca preenchidos

Pesquisar em: Coleção principal da Web of Science ▾ Edições: All ▾

DOCUMENTOS	AUTORES	REFERÊNCIAS CITADAS	
Título	rGO	X	
⊖ And ▾	Título	g-c3n4	X
⊖ Or ▾	Palavras-chave de autor	rGO	X
⊖ And ▾	Palavras-chave de autor	g-c3n4	X
+ Adicionar linha		+ Adicionar intervalo de datas	Pesquisa avançada
		X Limpar	Pesquisar

Fonte: Autoria própria.

3.2 Normalização prévia dos dados antes da análise

No presente estudo, aplicou-se a ferramenta cientométrica VOSviewer à produção bibliográfica relativa ao material rGO/g-C₃N₄. Para que isto fosse possível, fez-se necessário gerar um relatório (*Search*¹) contendo os 126 artigos, em um formato específico. A base de dados *Web of Science* possui a opção de exportar tal relatório (opção *full record and cited references*), obrigatoriamente no formato *plain text file*. Qualquer outro formato selecionado não fornece todos os dados requeridos pelo VOSviewer, gerando mapas incompletos.

¹ <https://www.dropbox.com/s/5z1simy076b86ls/Search%20WOS.txt?dl=0>

O banco de dados bruto então gerado no *VOSviewer* pode conter diversas inconsistências, fazendo com que uma mesma informação escrita de formas diferentes seja interpretada como informações diferentes. Por exemplo, ‘nitreto de carbono grafítico’ e ‘g-C₃N₄’ seriam interpretados como informações diferentes, embora as formas por extenso e abreviada refiram-se ao mesmo composto. O mesmo aconteceria com autores descritos de formas diferentes, que na verdade tratam-se da mesma pessoa (por exemplo, ‘SILVA’ e ‘DA SILVA’). Especialmente, coocorrências dos termos ‘rGO’ e ‘g-C₃N₄’ (e todos os seus sinônimos) foram substituídos pelo composto binário ‘rGO/g-C₃N₄’.

O *VOSviewer* possui uma ferramenta que permite, de forma automática, a realização de exclusões e substituições no banco de dados gerado a partir do relatório da *Web of Science*. Para tanto, basta que o usuário forneça ao programa um arquivo de texto (*Thesaurus*²) contendo as chaves, ou seja, os padrões de exclusão e de substituição que devem ser seguidos. O quanto eficaz é esse refinamento do banco de dados brutos depende da interpretação do usuário, sendo sua experiência na área imprescindível para a eliminação do maior número possível de inconsistências e, por consequência, a realização de análises de melhor qualidade.

3.3 Ferramentas acessórias

Na *Web of Science*, após obterem-se os resultados da busca efetuada, pode-se selecionar uma opção denominada *Analyze Results*. Essa opção fornece gráficos de barras ou mapas onde podem ser visualizados diversos parâmetros, tais como: ano de publicação, tipos de documento, categoria, autor, afiliação, título, editora, agências fomentadoras etc.

A criação de nuvens de palavras também pode ser útil na visualização dos principais termos que ocorrem nos trabalhos selecionados. A ferramenta online *Word Cloud Art Creator* foi empregada para gerar tal nuvem. Em sua página principal (<https://wordart.com/>), seleciona-se a opção *create*. Em seguida, seleciona-se a opção *import*, na qual uma lista em formato *.txt ou *.csv, contendo os termos a serem mapeados deve ser fornecida. É possível então selecionar opções gráficas, como figuras de contorno, cor de fundo, cor das palavras e fonte do texto. Na nuvem então criada, o tamanho da palavra é diretamente proporcional ao número de vezes que

² <https://www.dropbox.com/s/7wm057nhm1krhib/Thesaurus%20VOS.txt?dl=0>

esta foi citada nos trabalhos. Apenas termos contidos nas palavras-chave de autor foram mapeados.

3.4 Configuração prévia dos parâmetros dos mapas

Uma vez normalizados os bancos de dados, iniciou-se o processo de confecção dos mapas propriamente ditos. Os primeiros passos foram sempre os mesmos para todos os mapas: 1) no menu *File*, selecionou-se *Create*; 2) em *Choose type of data* selecionou-se *Create a map based on bibliographic data*; 3) clica-se em *Next*; 4) em *Select files* selecionou-se a aba *Web of Science* e importou-se o arquivo contendo o resultado da busca efetuada; 5) clica-se em *Next*; 6) o tipo de análise (*Type of analysis*) e a unidade de análise (*Unit of analysis*) foram selecionados em *Choose type of analysis and counting method*, entre as diversas opções mostradas na Tabela 2. Para qualquer unidade de análise selecionada, a opção “ignorar unidade de análise com número maior que 25”, foi sempre selecionada, e, quando disponível, nunca se selecionou reduzir primeiro nome de autor às suas iniciais. Na janela Itens não conectados (do inglês *Unconnected Items*) sempre se selecionou a opção não. O grande número de linhas ligando *clusters* diferentes pode gerar equívocos, e visando mitigar esse efeito, para todos os mapas criados, na aba de configuração à direita denominada *lines*, na opção *Size variation*, ajustou-se ao máximo essa opção. Dessa forma, o peso atribuído às linhas fica mais evidente, facilitando sua interpretação.

Tabela 2 – Tipos de análise e suas respectivas unidades de análise

Tipo de análise	Unidade de análise
Coautoria	Autor, organização e países
Coocorrência	Todas as palavras chave, palavras chave de autor e <i>KeyWords Plus</i>
Citação	Documentos, fontes, autores, organizações e países
Acoplamento bibliográfico	Documentos, fontes, autores, organizações e países
Cocitação	Referencias citadas, fontes citadas e autores citados

Fonte: Autoria própria

3.5 Configurações dos mapas gerados pelo VOSviewer

Os mapas de citação, coautoria ou acoplamento bibliográfico (tipos de análise) e país, autor ou instituição (unidades de análise) foram assim configurados: (a) número máximo de autores por documento = 25; (b) número mínimo de documentos de um país = 2; (c) número mínimo de citações de um país = 0. O número de objetos que satisfizeram aos requisitos em comparação com o total deles no banco de dados foi, independentemente do tipo de análise: país (11/20), autor (52/667) e acoplamento bibliográfico (35/169). Especificamente nos mapas de citação, selecionou-se a opção *Weights* como *Citations*.³³

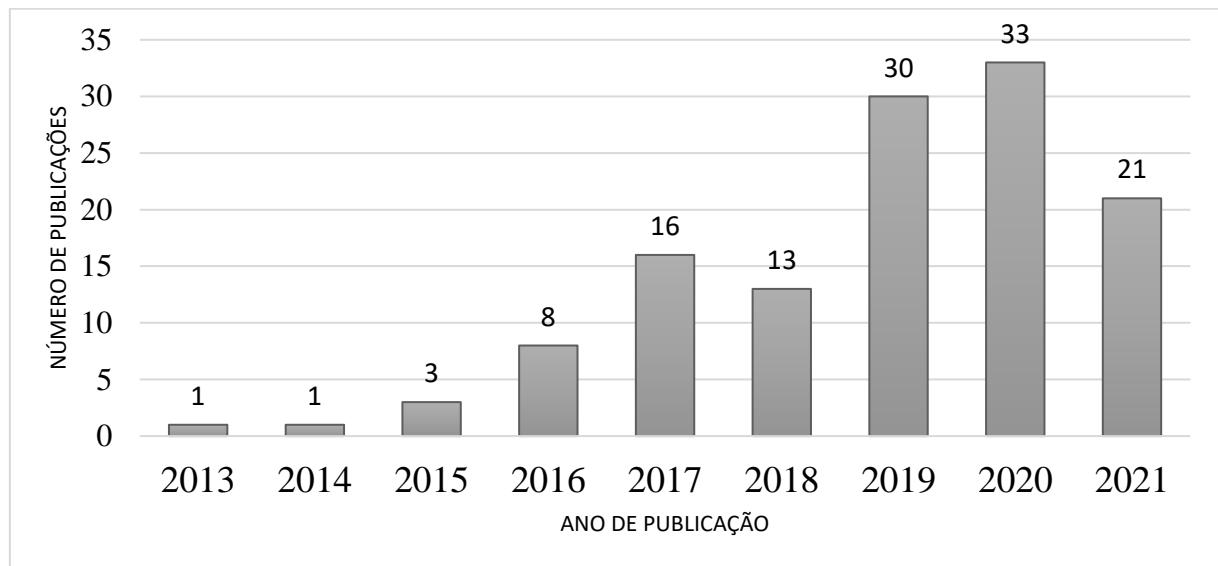
Para os mapas com o tipo de análise coocorrência e unidade de análise palavras-chave de autor, o número mínimo de coocorrências de uma palavra-chave de autor foi configurado como 2. Assim, das 145 palavras-chave de autor que compõem o banco de dados, 44 atenderam tais requisitos. Ajustou-se a opção *Size variation* para 0,70 com a finalidade de ressaltar o efeito do tamanho dos ícones que representam as palavras-chave de autor.

4. RESULTADOS

4.1 Ferramenta *Analyze Results* disponível no Web of Science

Por meio da ferramenta *Analyze Results* descrita na seção 3.3, obteve-se o gráfico temporal de produção dos artigos selecionados, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Relação entre número de artigos e anos de publicação



Fonte: Autoria própria.

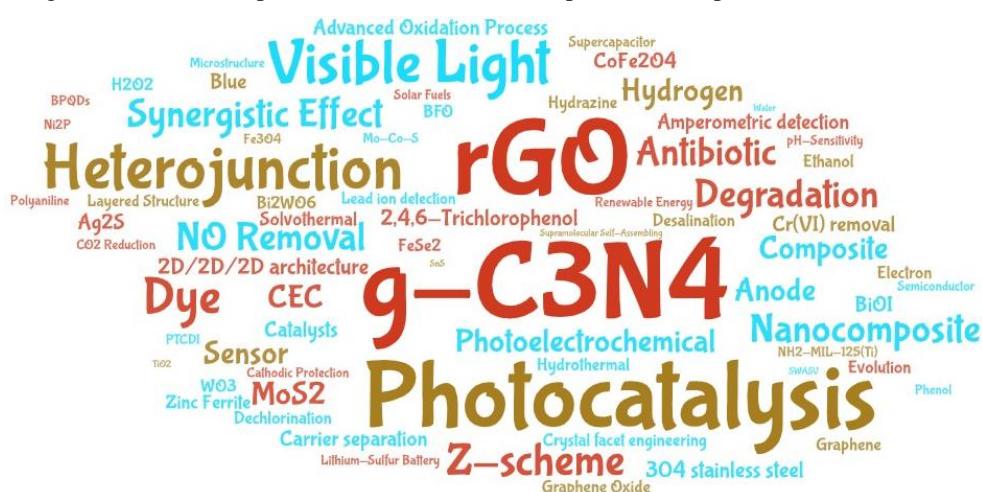
De acordo com a Figura 5, pode-se notar que o número de publicações vem crescendo ao longo dos anos (com exceção do ano de 2018), mostrando o aumento de interesse no estudo dos compósitos baseados em rGO/g-C₃N₄ e suas aplicações. A queda no número de publicações em 2021 não reflete a realidade, uma vez que o banco de dados foi gerado faltando quatro meses para o término do ano de 2021, e existe um atraso entre a submissão de um trabalho, sua efetiva aceitação e posterior publicação pelas editoras. Sendo assim, espera-se a continuidade do aumento do número de trabalhos publicados em 2021.

4.2 Nuvens de palavras

A Figura 6 representa a nuvem de palavras descrita na seção 3.3. Nota-se que os termos de maior tamanho são rGO e g-C₃N₄, efeito já esperado, pois são os compostos estudados nos trabalhos selecionados e, portanto, apareceram em todos os trabalhos. A presença dos termos de tamanhos intermediários pode ser explicada assim: *Visible Light* e *Photocatalysis*, remetem aos estudos envolvendo processos photocatalisados, e ocupam maior área pois são temas recorrentes; *Z-scheme*, *Heterojunction* e *Nanocomposite* descrevem os atributos empregados nas principais linhas de pesquisa, também bastante recorrentes; *Degradation*, *Antibiotic* e *Dye* remetem aos trabalhos de remoção e degradação de poluentes. Os termos de menor tamanho podem ser assim explicados: *Ethanol* refere-se aos trabalhos envolvendo reforma do etanol; *Supercapacitor* refere-se aos trabalhos envolvendo o desenvolvimento de capacitores de grande capacidade; *304 stainless steel* refere-se ao uso desse material como suporte; *Lead ion detection*, *Amperometric detection* e *Anode* remetem aos artigos que tratam do desenvolvimento de sensores, sendo temas menos comuns.

Nas áreas que empregam os compostos rGO e g-C₃N₄, nota-se a predominância de estudos photocatalíticos, com especial atenção à processos envolvendo luz visível, confirmando a tendência do abandono dos trabalhos com óxidos metálicos acoplados à rGO (UPADHYAY; SOIN; ROY, 2014). Alguns dos objetivos mais comuns nas pesquisas, são a degradação de poluentes, desenvolvimento de baterias de alto rendimento, reforma de etanol, desenvolvimento de sensores e produção de hidrogênio.

Figura 6 – Nuvem de palavras contendo os termos presentes nas palavras-chave de autor



Fonte: Autoria própria.

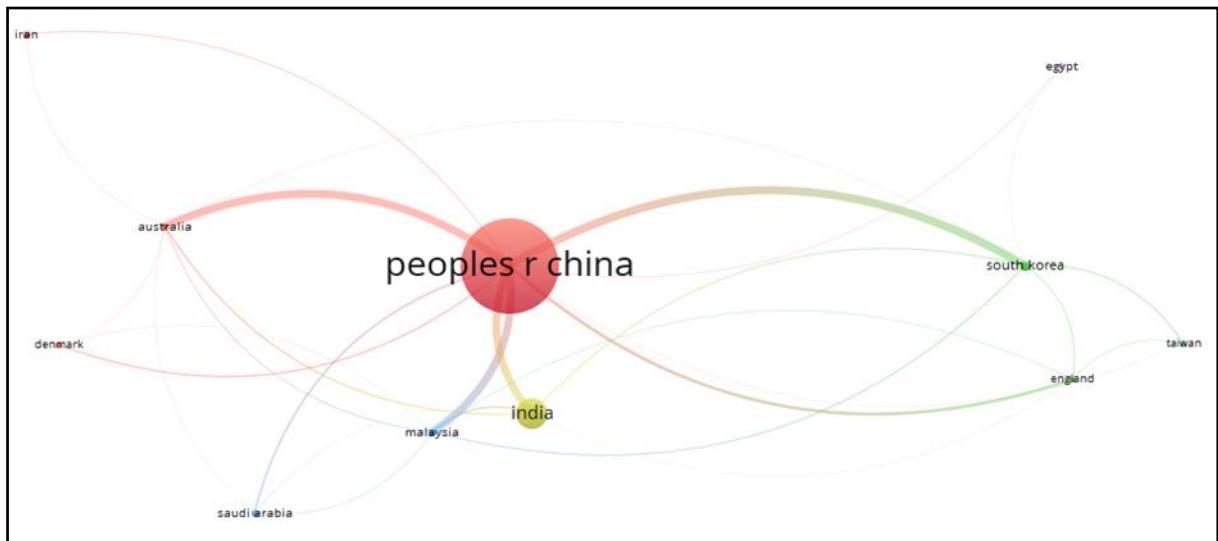
4.3 Análise dos Mapas *Network Visualization*

4.3.1 Mapas de Citação vs. Países

Nota-se ao se analisar o mapa de *Network Visualization*, Figura 7, que China e Austrália pertencentes ao mesmo *cluster* (vermelho), possuem uma linha de ligação espessa, evidenciando um maior número de citações entre estes países comparando-se, por exemplo, com a linha fina que liga a Austrália à Dinamarca, apesar de também pertencerem ao mesmo *cluster*. Isso mostra que existem mais citações entre China e Austrália, sendo a pesquisa de ambos os países mais alinhada, se comparada com Austrália e Dinamarca.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado entre a China e a Coreia do Sul, e entre a China e a Índia, ligados por linhas espessas, evidenciando grande número de citações entre esses países. Por sua vez, o Irã está ligado apenas à China por uma linha menos espessa e estes dois países estão distantes um do outro. Isso mostra que há baixa correlação entre as linhas de pesquisa desses países.

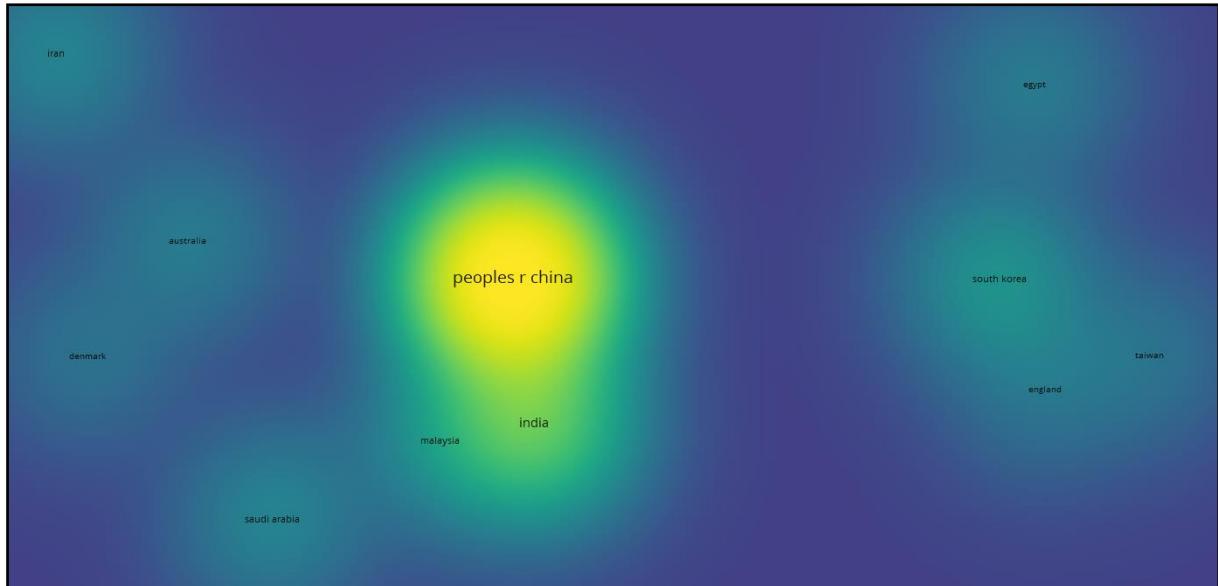
Figura 7 – Mapa de *Network Visualization*: Citação vs. Países



Fonte: Autoria própria.

Explica-se a proximidade entre China e Austrália por um artigo australiano (LI et al., 2013) escrito por chineses. Até a data de aquisição do banco de dados do presente trabalho, esse artigo havia sido citado 475 vezes, se tornando, aparentemente, uma referência importante na área de nanocompósitos aplicados à fotocatálise. O Egito possui 3 artigos e apenas um deles é relevante (MENG et al., 2019), citado 37 vezes, com 10 autores chineses e um egípcio, o que explica sua relação com a China. Em contrapartida, a Índia possui 21 artigos, dentre eles 4 com citações relevantes (75, 72, 65 e 47 citações). É interessante notar-se que sua relação com a China não se dá pela simples presença de autores chineses, já que eles não são de autores chineses. A correlação entre China e Egito se dá pela proximidade dos temas abordados nos artigos. A China possui um papel central, citando e sendo citada majoritariamente por Austrália, Coreia do Sul, Índia e Malásia. Os demais países possuem peso secundário quanto ao critério citação. Analisando-se o mapa de *Density Visualization*, percebe-se claramente que a vasta maioria dos artigos estão contidos no *cluster* China, seguido pela Índia (Figura 8).

Figura 8 – Mapa de *Density Visualization*: Citação vs. Países

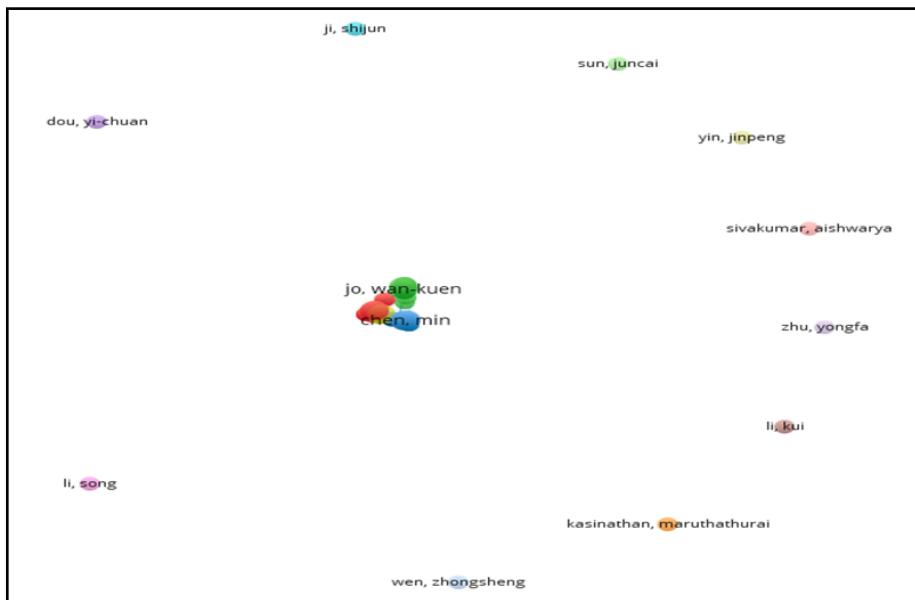


Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Mapas de Citação vs. Autores

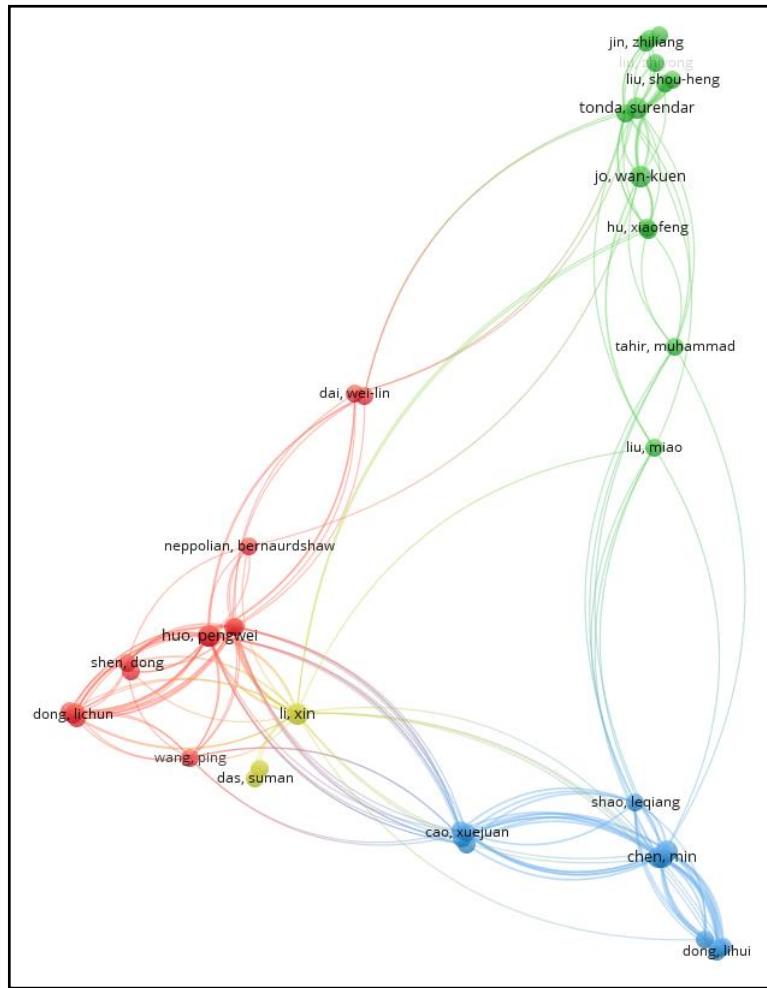
Nota-se a formação de 10 grupamentos-satélite, isolados na periferia do mapa de *Network Visualization* (Figura 9), evidenciando um baixo número de citações recebidas por esses autores. O centro do mapa *Network Visualization* (Figura 10) contém quatro *clusters* que possuem correlação e maior relevância.

Figura 9 – Mapa de *Network Visualization*: Citação vs. Autores



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Detalhe do mapa de *Network Visualization*: Citação vs. Autores



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o autor Xin Li, contido no *cluster* amarelo, é ponte entre os *clusters* vermelho e azul, devido majoritariamente ao artigo (WU et al., 2017) que possui 277 citações, mostrando grande relevância nas áreas dos autores. As ligações entre os *clusters* vermelho e verde, dependem dos autores Wei-Lin Dai e Jing Ding. Esse último não é visualizável na Figura 10, pois encontra-se encoberto pelo primeiro. Estão com praticamente a mesma posição no mapa, indicando que ambos apresentam o mesmo nível de citações em relação aos demais *clusters*. Wei-Lin Dai e Jing Ding são coautores em dois artigos, um deles possuindo 76 citações (WANG et al., 2015). Esse artigo é o responsável majoritário pela relação entre os autores e o *cluster* verde.

Eles propuseram um mecanismo para a degradação do corante Rodamina B, por meio do photocatalisador ternário CeO₂/C₃N₄/N-rGO. Diferentemente de mecanismos anteriores que envolviam Ag₂O₃, TiO₂, CdS etc. e necessitavam de radiação ultravioleta, o catalisador ternário

proposto conseguiu bons rendimentos com incidência de luz visível. Destacaram-se também por propor um mecanismo detalhado da reação fotocatalítica, descrevendo as espécies radicais envolvidas. É um dos artigos pioneiros no tema, uma vez que apenas 3 artigos foram publicados em 2015.

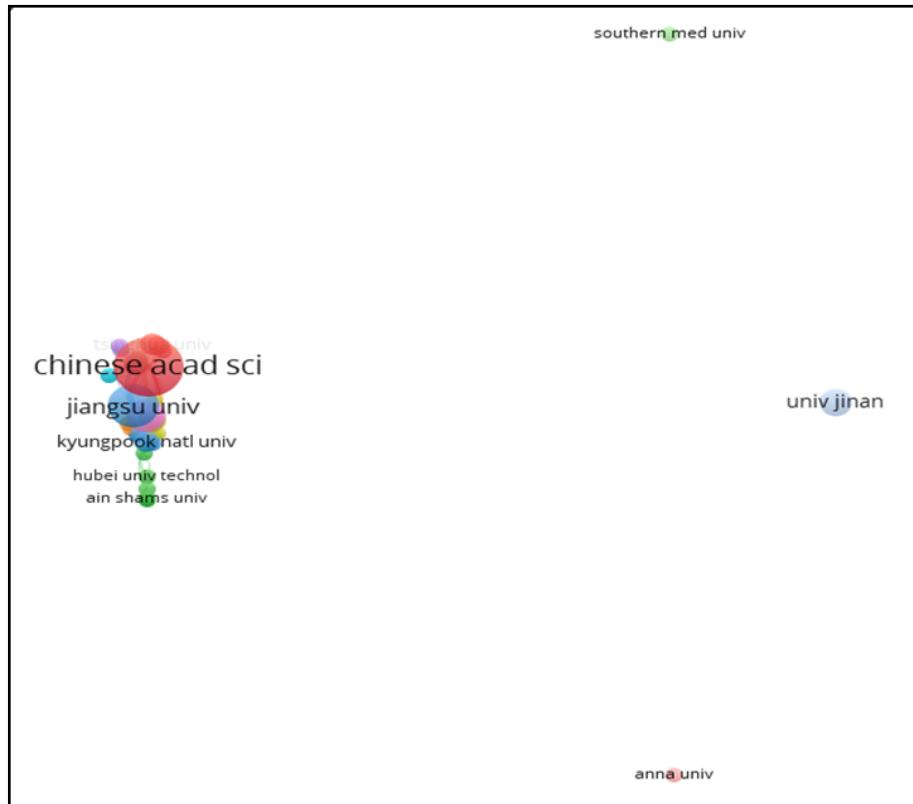
Da mesma forma, os *clusters* pertencentes ao grupo azul, dos autores Xuejuan Cao, Mei Deng, Xiaoyu Yang e Boming Tang (esses últimos três situados atrás de Xuejuan Cao, no mapa) são responsáveis pela conexão com o *cluster* vermelho. Os quatro autores são coautores de dois artigos, um sem muita relevância com apenas 6 citações, e outro com relevância intermédia, com 13 citações.

4.3.3 Mapas de Citação vs. Organizações

Na Figura 11, notam-se 3 grupamentos-satélite isolados na periferia do mapa (*Anna University, Jinan University e Southern Medical University*), sem relações de citação uns com os outros. À direita do mapa de *Network Visualization*, estão presentes 9 *clusters* (Figura 12).

A *Jiangsu University* (no *cluster* azul) é representada por um ícone de grande área relativa e está ligada à *Chinese Academy of Science* (*cluster* vermelho), também representado por ícone de grande área. Essa última é a organização mais importante em termos de artigos com maior número de citações, possuindo um artigo de relevância na área de nanocompósitos photocatalisadores (LI et al., 2013) com 475 citações.

Figura 11 – Mapa de *Network Visualization*: Citação vs. Organizações

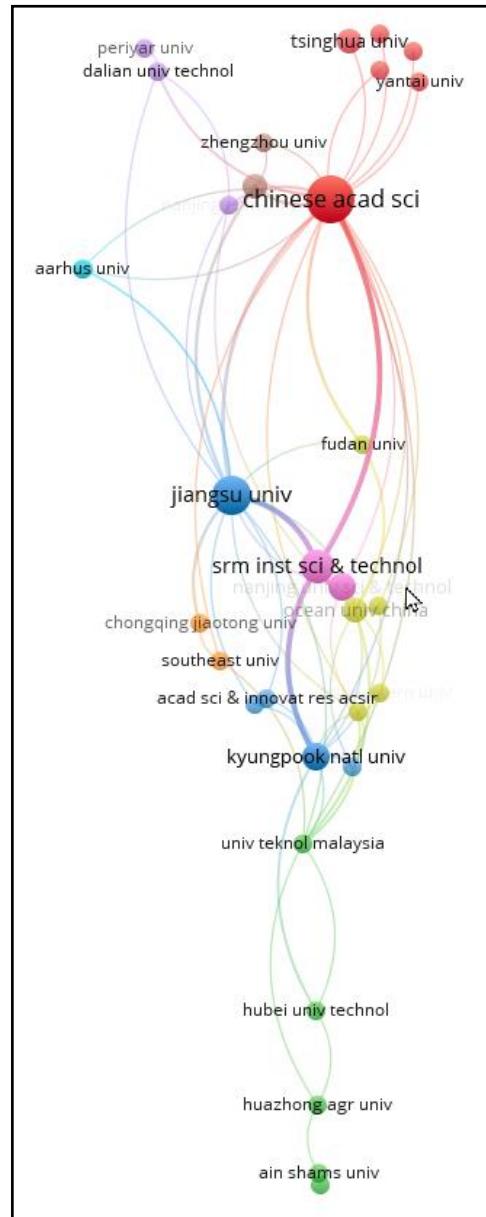


Fonte: Autoria própria.

Esse artigo se destaca pela proposição de uma rota sintética puramente térmica, de fácil execução, variando somente a razão das concentrações entre rGO e g-C₃N₄. O trabalho também demonstrou aplicações nas áreas de conversão fotovoltaica para a produção de energia elétrica e células a combustível, ambas áreas de grande interesse comercial. É feito também a degradação de rodamina B e 4-nitrofenol com luz visível, sendo o artigo mais antigo publicado sobre essas aplicações do compósito. O material obtido mostrou uma grande capacidade oxidativa, alta taxa de transporte eletrônico (devido à formação de pequenos *band gaps*) e uma elevada condutividade elétrica. Esse artigo é de grande peso, contribuindo sozinho com aproximadamente 68% das citações da organização.

A *Dalian University of Technology* tem uma ligação de espessura moderada com a *Chinese Academy of Science* e uma ligação mais fraca com a *Jiangsu University*, devido ao artigo de Lu et al. (2019) na área de fotocatálise com esquema-Z, possuindo 85 citações. Tal trabalho, provavelmente tem destaque dado a qualidade de suas caracterizações, bastante detalhadas, e pelo fato de ter conseguido determinar as espécies responsáveis pela degradação da ciprofloxacina.

Figura 12 – Detalhe do mapa de *Network Visualization: Citação vs. Organizações*



Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Mapas de Coautoria vs. Autores

A Figura 13 apresenta a formação de 20 *clusters*, seis deles com apenas um autor (por exemplo, Ping Wang e Yongfa Zhu) sem ligações entre eles. Isso mostra a ausência de coautoria nos trabalhos destes pesquisadores e sua irrelevância quanto a este critério.

Figura 13 – Mapa de *Network Visualization*: Coautoria vs. Autores



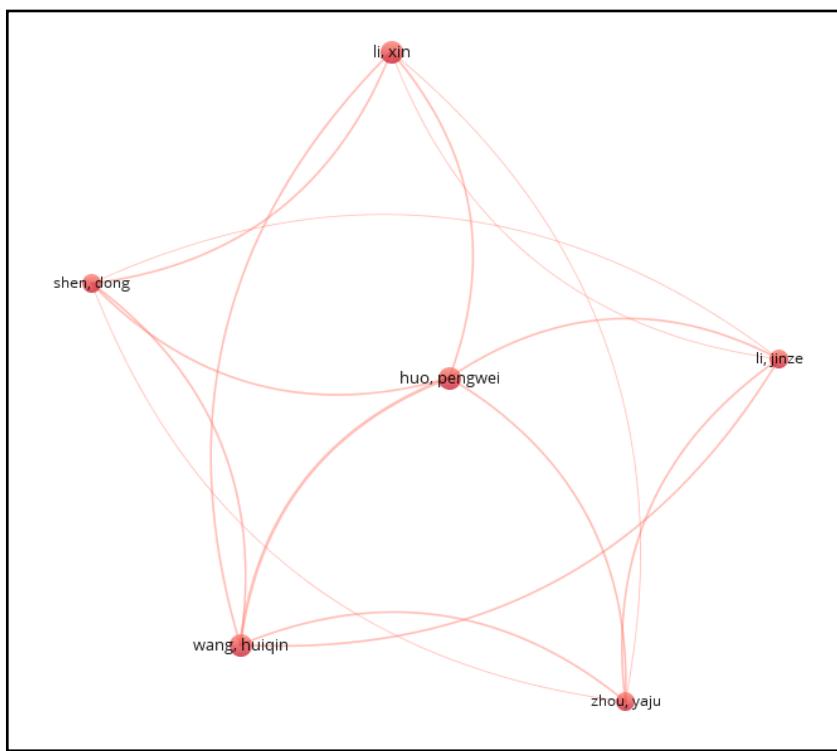
Fonte: Autoria própria.

Existem outros seis agrupamentos contendo dois coautores (por exemplo, o *cluster* azul, contendo os pesquisadores Maruthathurai Kasinathan e Aishwarya Sivakumar). O *cluster* mais relevante, de cor vermelha, pode ser visto ampliado na Figura 14, com 6 pesquisadores (Pengwei Huo, Jinze Li, Xin Li, Dong Shen, Huiqin Wang e Yaju Zhou) que publicaram 5 trabalhos, um deles altamente citado, 245 vezes, em que o azul de metileno é degradado com luz UV. Os autores conseguiram mostrar a formação de um esquema-Z a partir de experimentos de fotoluminescência e que o rGO era capaz de mediar a transferência de cargas, aumentando a taxa reacional em aproximadamente três vezes em relação a heteroestrutura g-C₃N₄/TiO₂ (WU et al., 2017).

Outro trabalho altamente citado (238 vezes) dos mesmos autores (WU et al. 2016) refere-se à fabricação de um fotocalisador de g-C₃N₄/rGO/Bi₂WO₆ ativo sob luz visível e empregado para degradação de 2,4,6-triclorofenol, sendo que de acordo com os autores, essa degradação foi eficiente para a desalogação do poluente, promovida pela CB do g-C₃N₄ nesse compósito.

Cada um dos autores cita seus outros 5 colegas como coautores de forma sistemática ao longo dos 5 trabalhos. Isso explica porque o VOSviewer dá grande peso ao agrupamento, colocando-o em posição central no mapa gerado. Todos os pesquisadores são chineses, da mesma organização (*Jiangsu University*). Cinco autores chineses (Shijun Ji, Song Li, Jucai Sun, Zhongsheng Wen e Jinpeng Yin), pertencentes à mesma organização (Dalian Maritime University), compõem o cluster verde e também citam uns aos outros como coautores de forma sistemática. Nesse *cluster*, todos os autores possuem apenas duas publicações no banco de dados, uma com 45 citações e outra com apenas uma.

Figura 14 – Mapa de *Network Visualization*: Coautoria vs. Autores



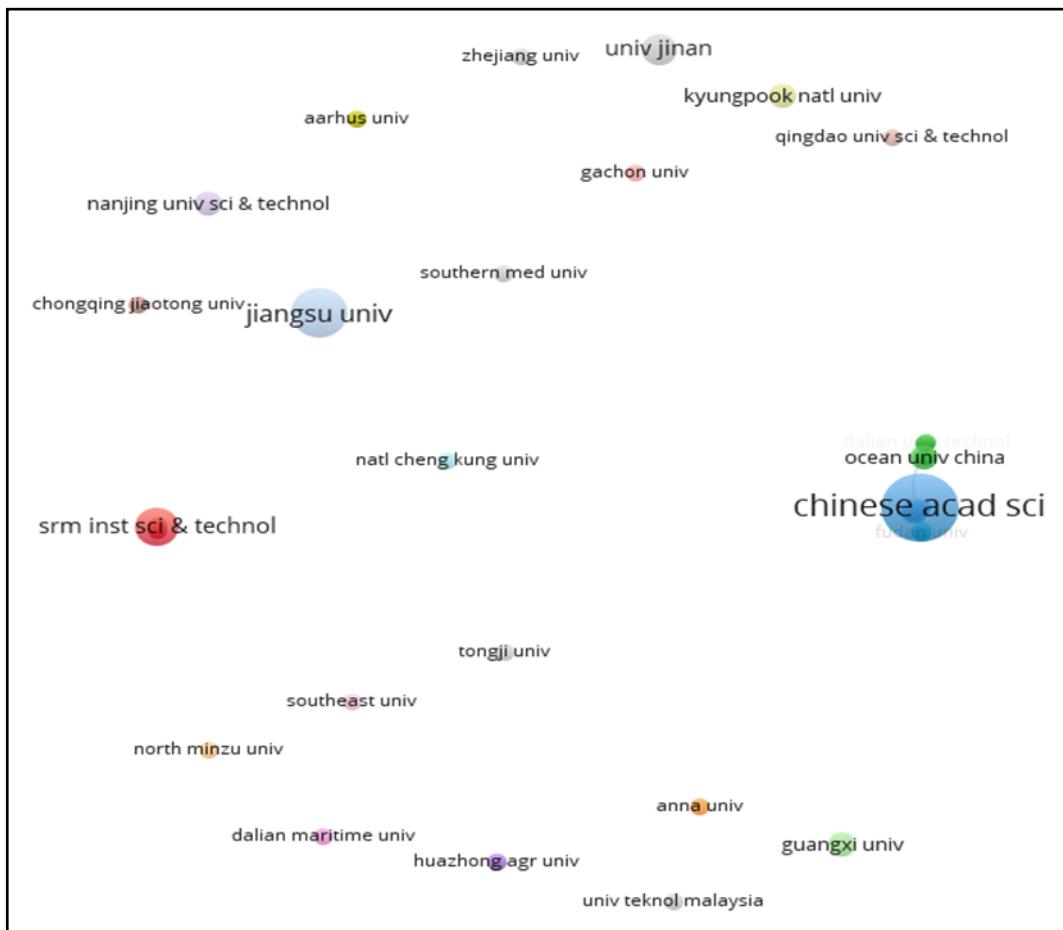
Fonte: Autoria própria.

O critério coautoria gerará sempre *clusters* isolados, apenas entre coautores, não sendo possível existirem linhas ligando diferentes *clusters* de coautores, sendo essa uma característica intrínseca.

4.3.5 Mapas de Coautoria vs. Organizações

Conforme apresentado na Figura 15, 23 *clusters* foram gerados, 17 destes com uma única organização, sem linhas ligando-os entre si. Portanto, são de baixa relevância para os critérios utilizados. Nota-se uma tendência na cooperação preferencial entre pesquisadores das mesmas organizações (evidenciado pelo grande número de organizações representadas por *clusters* isolados) seguido da coautoria entre organizações do mesmo país e por último, coautorias entre países diferentes. O mapa possui outros três *clusters* com duas organizações e dois com quatro. À direita do mapa, estão os *clusters* verde, azul e azul claro, que podem ser vistos na Figura 16.

Figura 15 – Mapa de *Network Visualization*: Coautoria vs. Organizações

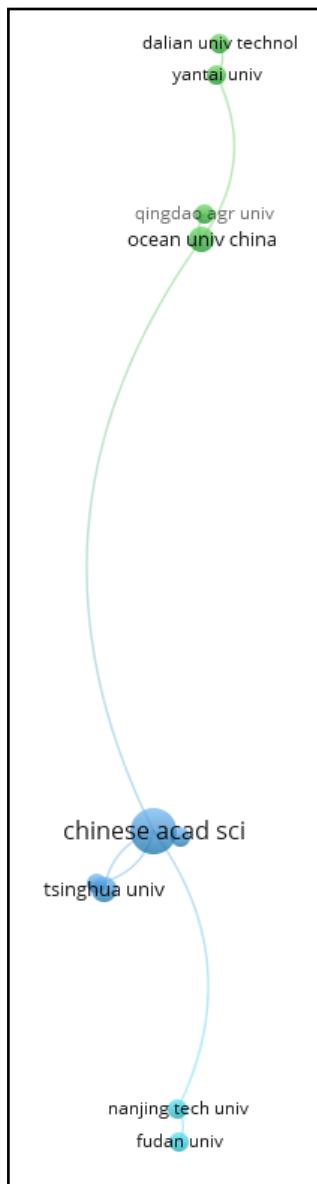


Fonte: Autoria própria.

Todos os *clusters* são compostos por organizações chinesas, com ligações entre si. O *cluster* verde, composto pelas organizações *Dalian University of Technology*, *Ocean University of China* e *Chinese Academy of Sciences*.

University of China, Qingdao Agricultural University e Yantai University, possui coautoria entre seus pesquisadores de forma linear, diferentemente do tipo de coautoria apresentada na Figura 13 (onde os autores de um mesmo *cluster* cooperavam todos entre si). Por exemplo, trabalhos produzidos na *Dalian University of Technology* possuem coautorias apenas com a *Yantai University*, que por sua vez possui uma linha única ligando-a à *Ocean University of China*. O *cluster* azul composto pelas organizações *Chinese Academy of Science*, *Northeastern University*, *Zhengzhou University* e *Tsinghua University* é o mais importante, ligando o *cluster* verde ao azul claro, composto pelas organizações *Nanjing Tech University* e *Fudan University*.

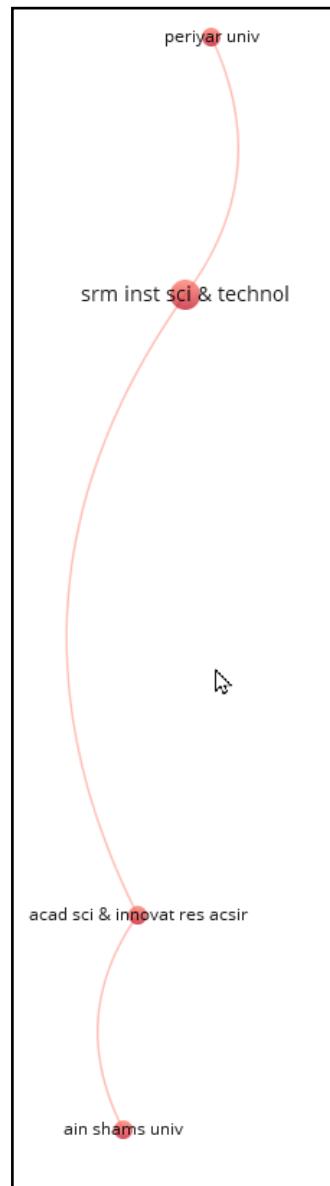
Figura 16 – Detalhe do mapa de *Network Visualization: Coautoria vs. Organizações*



Fonte: Autoria própria.

A mesma linearidade na coautoria pode ser vista na Figura 17 que representa o *cluster* à direita, vermelho, contendo as organizações *Periyar University*, *SRM Institute of Science & Technology AcSIR* e *Ain Shams University* (todas indianas, exceto a última, de nacionalidade egípcia).

Figura 17 – Detalhe do mapa de *Network Visualization: Coautoria vs. Organizações*

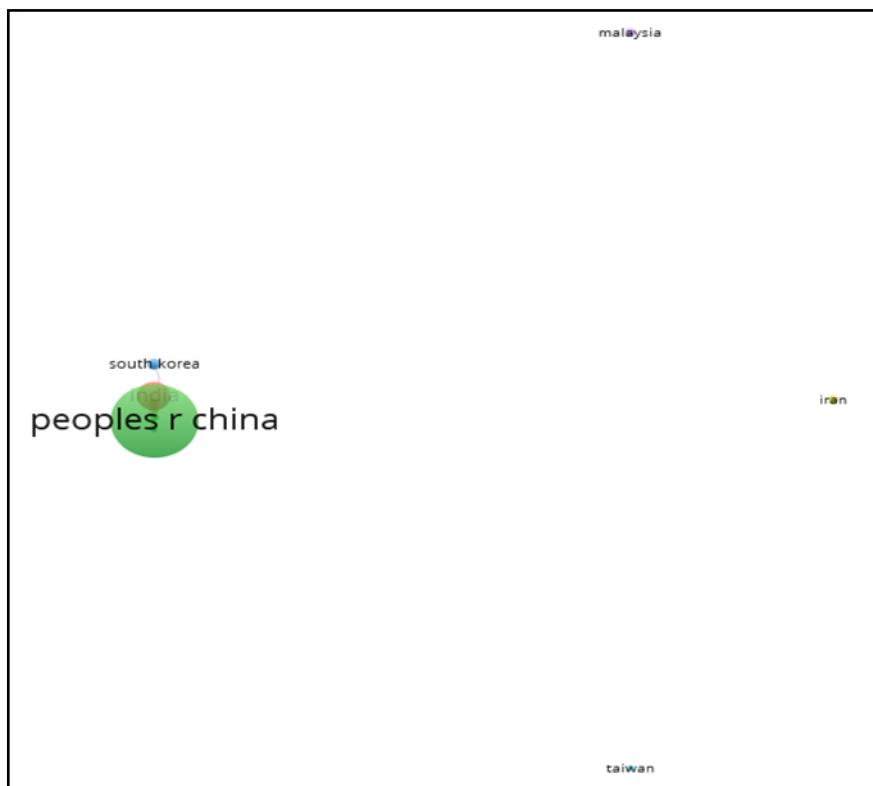


Fonte: Autoria própria.

4.3.6 Mapas de Coautoria vs. Países

Foram gerados seis *clusters* (dois encobertos pelo verde), estando Malásia, Irã e Taiwan isolados espacialmente como *clusters* satélites, sem ligação com seus vizinhos, e, portanto, de baixa relevância em relação aos critérios empregados (Figura 19). Os *clusters* à esquerda, azul (Coreia do Sul e Inglaterra), vermelho (Índia, Arábia Saudita e Egito) e verde (Austrália, China e Dinamarca) são os mais relevantes, pois são os únicos com linhas mostrando coautorias entre instituições (Figura 20).

Figura 18 – Mapa de *Network Visualization*: Coautoria vs. Países

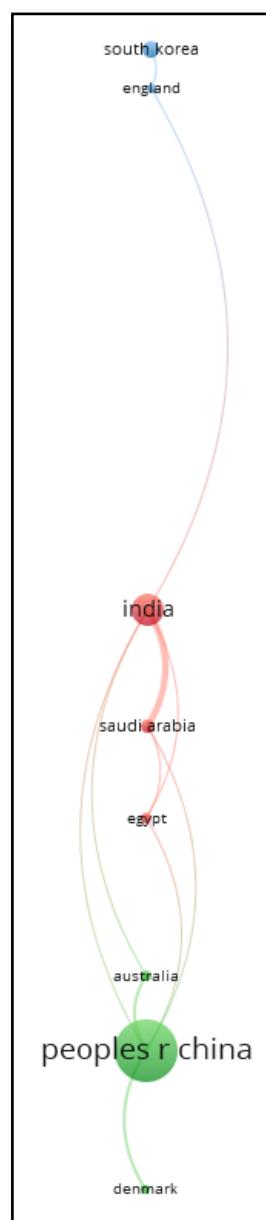


Fonte: Autoria própria.

A Coreia do Sul possui um único artigo com 141 citações, em coautoria com a Inglaterra (JO et al., 2018). Esse artigo trata da síntese de um composto ternário ($\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{rGO/g-C}_3\text{N}_4$) com o objetivo de reduzir fotocataliticamente CO_2 à CO e CH_4 para a produção de combustíveis (assunto extremamente valorizado recentemente, segundo políticas de *Environmental Social and Governance*, ESG), com seletividade recorde de 94%, devido à formação de uma grande

interface entre os constituintes do composto ternário, garantindo transferências de carga rápidas. O composto apresentou também excelente reciclagem, sem mostrar perdas óbvias no rendimento após diversos reúcos. Esse artigo faz o link para o cluster vermelho, onde a Índia possui o maior número de artigos publicados (dois fazendo ligação com a China e a Austrália (*cluster* verde) e linha espessa representando 4 coautoriais entre os pesquisadores indianos e sauditas, sendo um dos pesquisadores de nacionalidade brasileira (Renato Cataluna Veses) no artigo de Kumar et al. (2017).

Figura 19 – Detalhe do mapa de *Network Visualization: Coautoria vs. Países*



Fonte: Autoria própria.

Esse artigo trata da fotodegradação de antibióticos em meio aquoso e fotorredução de CO₂, por meio do composto ternário Carvão/g-C₃N₄/rGO. O trabalho se destaca pela caracterização extremamente detalhada, a determinação da rota de degradação do antibiótico ciprofloxacina e seus respectivos produtos de degradação, bem como determina as espécies radicais envolvidas na degradação. Além disso, o artigo segue tendências ESG, faz uso de luz visível e carvão, em detrimento de reagentes contendo metais tóxicos, o que vem sendo altamente valorizado e, portanto, citado. A presença de H₂O₂, O₂ e O₃ aumentam consideravelmente a atividade photocatalítica, uma vez que facilitam a formação de radicais.

Analizando-se a tendência observada em todos os mapas criados até agora, a China possui a maior relevância, devido ao maior número de artigos publicados, o que é evidenciado pelo tamanho do ícone verde que a representa, e por possuir 5 linhas (5 coautorias) ligando-a à Dinamarca, Austrália, Egito, Arábia Saudita e Índia.

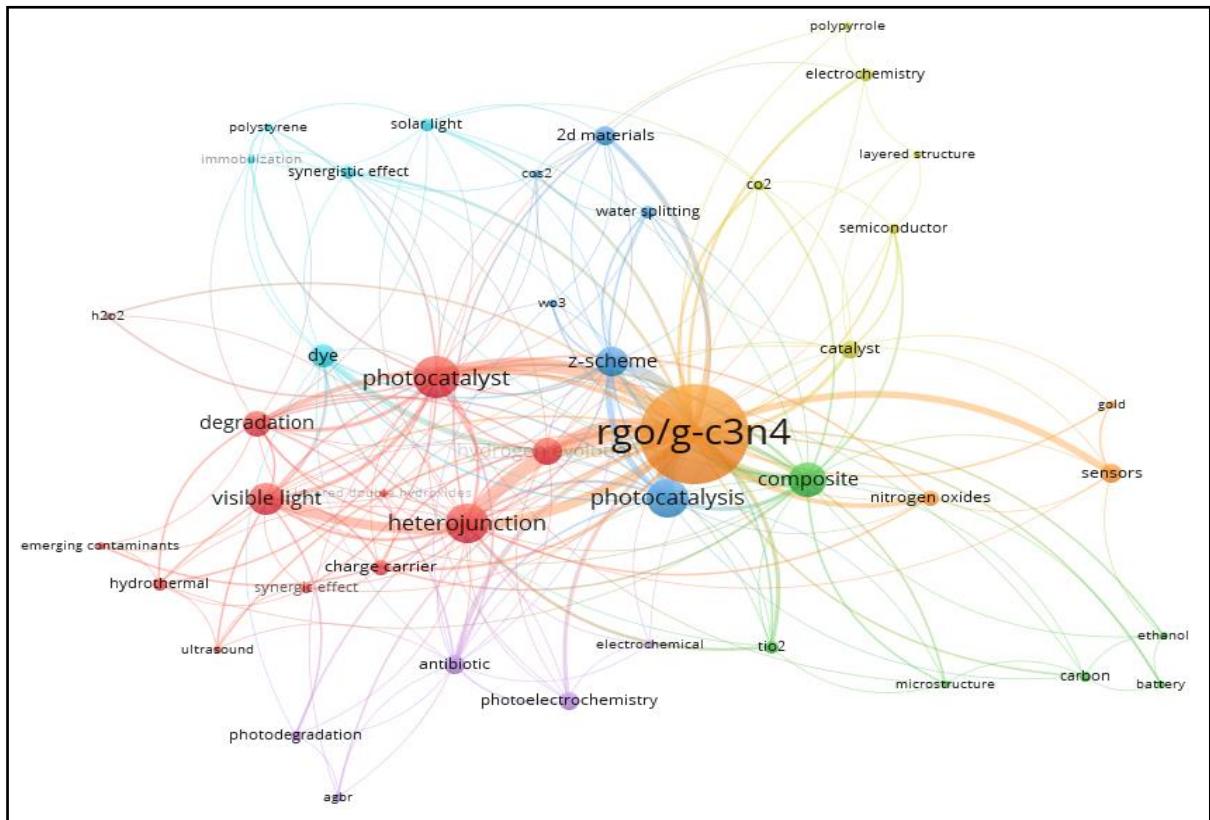
4.3.7 Mapas de Coocorrência vs. Palavras-chave de Autor

A Figura 21 mostra que a palavra-chave rGO/g-C₃N₄ é a mais expressiva, apresentando o maior ícone, o maior número de ligações e localiza-se na posição central. Sua grande importância já era esperada, por se tratar do composto-alvo dos artigos analisados, sendo citado em todos os trabalhos que compõem o banco de dados. As linhas mais espessas ligam rGO/g-C₃N₄ a *Photocatalyst*, *Photocatalysis*, *Heterojunction*, *Visible light*, *Z-Scheme*, *Composite*, *Sensors*, *Degradation* e *Dye*. Essas palavras representam os temas dos principais trabalhos estudados.

Observa-se que nenhum artigo trata de um só tema, tão pouco empregam uma só tecnologia, havendo sobreposição, por exemplo, dos temas *Photocatalysis* + *Heterojunction*, no artigo de Ong et al. (2015) com 489 citações, uma referência na área. Os temas *Degradation* + *Photocatalysis* + *Z-Scheme* se sobrepõem no artigo de Wu et al. (2017) com 244 citações, outra referência na área. As palavras-chave *Dye*, *Photodegradation*, *Antibiotic*, *Emerging contaminants* e *Degradation* remetem à degradação de moléculas orgânicas (antibióticos e corantes em sua maioria) por meio de processos oxidativos avançados empregando-se o rGO/g-C₃N₄. O artigo de Lu et al. (2019), com 85 citações, é um bom exemplo de sobreposição dos temas *Z-Scheme*, *Photocatalysis*, *Degradation* e *Antibiotic*.

Temas menos usuais tendem a estar na periferia do mapa, possuir ícones pequenos e ligações finas. Como exemplos, podem-se citar as palavras-chave *Battery* e *Ethanol*, as quais remetem ao desenvolvimento de novas baterias, como no artigo de Wang et al. (2019).

Figura 20 – Mapa de *Network Visualization*: Coocorrência vs. Palavra-chave de Autor



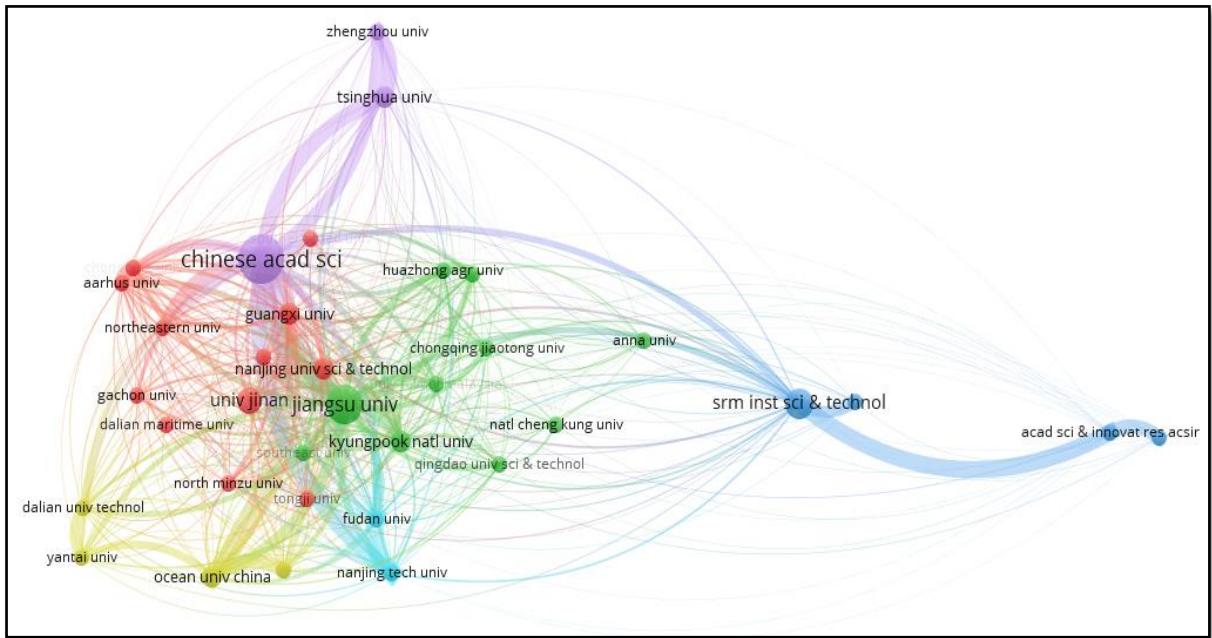
Fonte: Autoria própria.

4.3.8 Mapas de Acoplamento bibliográfico vs. Organizações

As organizações *Chinese Academy of Sciences* e *Jiangsu University* ocuparam posição central (principalmente a *Jiangsu University*), possuem linha de ligação entre elas extremamente espessa, porém não visualizável no mapa estático (indicando grande acoplamento bibliográfico, ou seja, possuem muitas referências em comum) e estão relativamente próximas espacialmente (Figura 21). A *Chinese Academy of Sciences* possui também linhas espessas com a *Tsinghua University* e a *Zhengzhou University*, e, apesar de estarem afastadas entre si, no mapa, também possuem grandes acoplamentos bibliográficos. O mesmo pode ser dito para *Nanjing University*, no extremo inferior do mapa. Interessante notar que a *SRM Institute of*

Science and Technology possui uma linha espessa apenas com a *Academy of Science and Innovation, AcSIR*, estando as duas isoladas espacialmente no extremo direito do mapa. Ambas são muito relevantes, não pela espessura de suas ligações, mas pela quantidade e pluralidade de linhas, ligando-as a inúmeras organizações, tanto periféricas quanto centrais no mapa, mostrando grande diversidade em seus acoplamentos bibliográficos. O mesmo pode ser dito do *cluster* que contém as instituições *Chongqing University, Northeastern University* e *Aarhus University*, as quais estão mais próximas ao centro, ocupando posição à esquerda do mapa. Elas também possuem inúmeras linhas ligando-as a inúmeras organizações, destacando-se a linha espessa entre a *Chinese Academy of Sciences* e a *Northeastern University*. Mais uma vez, a *Chinese Academy of Sciences* mostrou-se a principal organização.

Figura 21 – Mapa de *Network Visualization*: Acoplamento bibliográfico vs. Organização



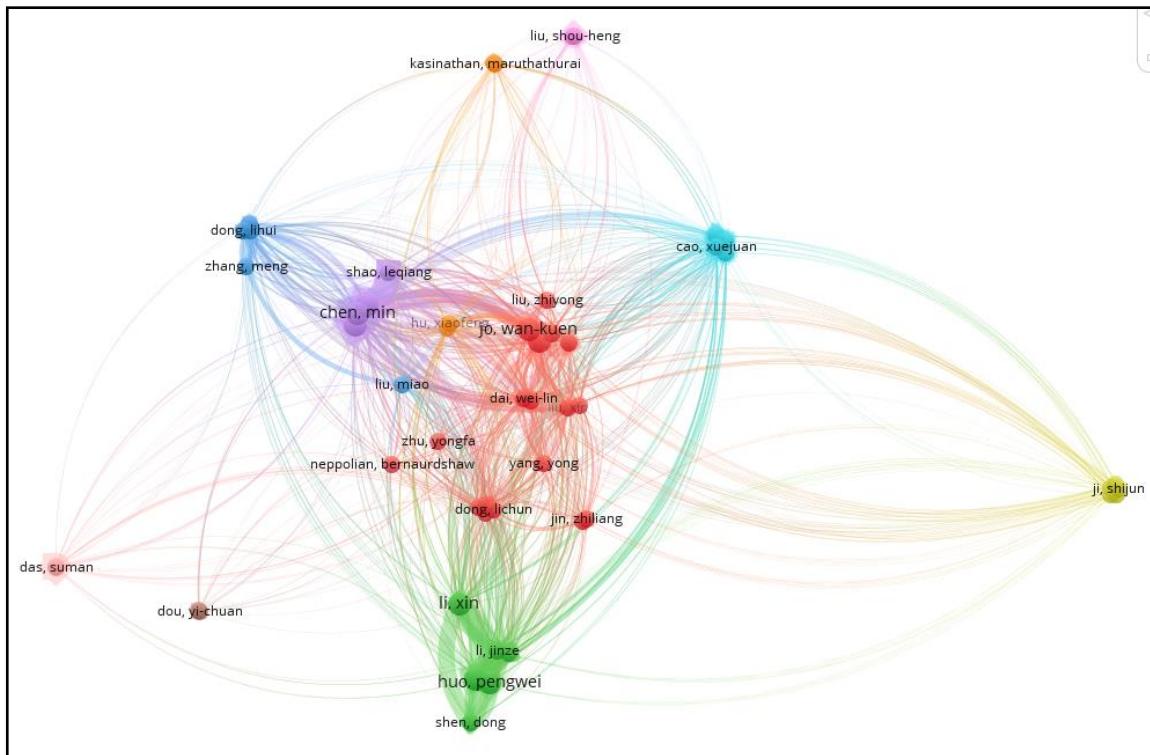
Fonte: Autoria própria.

4.3.9 Mapas de Acoplamento bibliográfico vs. Autores

Na Figura 22, notam-se linhas espessas ligando os autores *Min Chen, Peng Xiao, Leqiang Shao* e *Deli Jiang*, todos pertencentes ao *cluster* roxo e muito próximos uns aos outros. Isso indica um grande número de referências em comum entre tais autores, além de uma grande

similaridade entre as referências, pois os autores pertencerem à mesma organização (*Jiangsu University*) e dividem a autoria de três artigos.

Figura 22 – Mapa de *Network Visualization*: Acoplamento bibliográfico vs. Autores



Fonte: Autoria própria

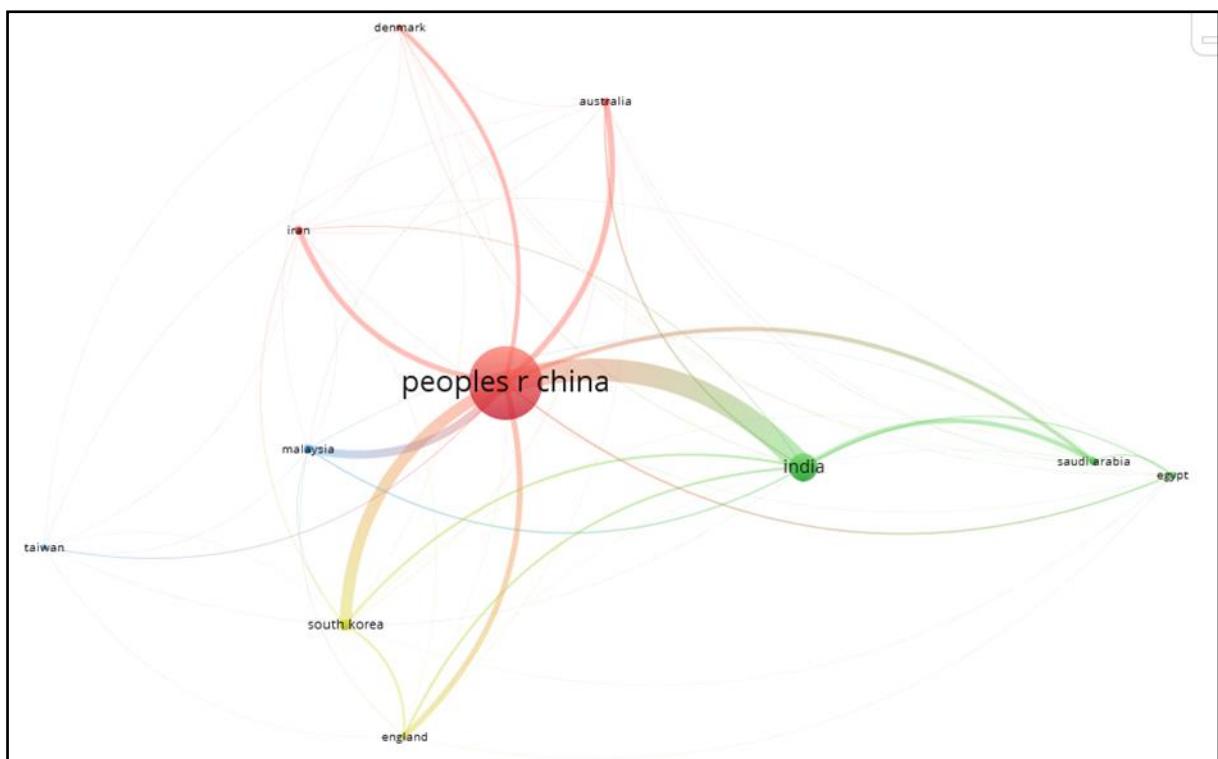
O *cluster* verde, posicionado abaixo do mapa, também possui um grande acoplamento bibliográfico entre os seus integrantes: *Xim Li, Jinze Li, Yaju Zhou, Pengwei Huo, Huiqin Wang e Dong Shen*. O artigo de Wu et al. (2017) é mais uma vez uma referência na área, representando aqui a peça central que acopla bibliograficamente os autores mencionados. O *cluster* verde, além do forte acoplamento entre seus autores, também possui ligações com quase todos os outros *clusters* do mapa, mostrando o grande alcance de seus trabalhos entre as diversas organizações estudadas. Nota-se um único *cluster* com um só autor (*Yl-Chuan Dou*) que não possui acoplamento bibliográfico com o *cluster* verde. *Yl-Chuan Dou* possui apenas dois trabalhos publicados, com 9 e 2 citações. Apesar disso, é acoplado com os *clusters* vermelho e roxo e possui acoplamento único com o autor *Xuejuan Cao* do *cluster* azul claro (oculto pelos itens sobrepostos). Os autores do *cluster* amarelo (*Song Li, Shijun Ji, Jucai Sun, Zhangsheng Wen e Jinpeng Yun*) possuem todos ligações espessas entre eles, evidenciando muitas referências em comum nos seis artigos publicados por eles, não necessariamente em coautoria. Esses

autores possuem também linhas finas os ligando a outros quatro *clusters* (azul claro, roxo, vermelho e verde), mostrando grande acoplamento bibliográfico. Portanto, de modo geral, muitos dos autores estudados possuem diversas referências bibliográficas em comum, as conexões mais fortes observadas no mapa ocorrem entre pesquisadores do mesmo grupo, e as mais fracas entre pesquisadores de grupos diferentes.

4.3.10 Mapas de Acoplamento bibliográfico vs. Países

Na posição central da Figura 23 está a China, caracterizada pelo maior ícone (vermelho), pelo maior número de linhas e pelas linhas mais espessas. Mais uma vez, os artigos chineses ocupam lugar de destaque quanto ao número de referências em comum com outros países.

Figura 23 – Mapa de *Network Visualization* Acoplamento bibliográfico vs. Países



Fonte: Autoria própria

Em posição secundária estão os trabalhos da Índia (verde), ligados à China por uma linha muito espessa, evidenciando o grande acoplamento bibliográfico entre estes dois países; por último, aparecem a Coreia do Sul e a Malásia. O grande peso atribuído ao acoplamento entre China e Malásia é devido ao artigo de Ong et al. (2015) com 490 citações. Esse artigo se destaca por propor uma síntese por meio de uma técnica híbrida, acoplando-se a dispersão líquida ultrassônica e a automontagem eletrostática. Empregando-se irradiação com luz solar visível artificial, foi possível obter bons rendimentos de fotorredução de CO₂ na presença de vapor d'água para a produção de CH₄ (mais uma vez, a tendência ESG chama a atenção). O composto se mostrou razoavelmente estável, com baixa perda de rendimento após 3 sucessivos ciclos reacionais.

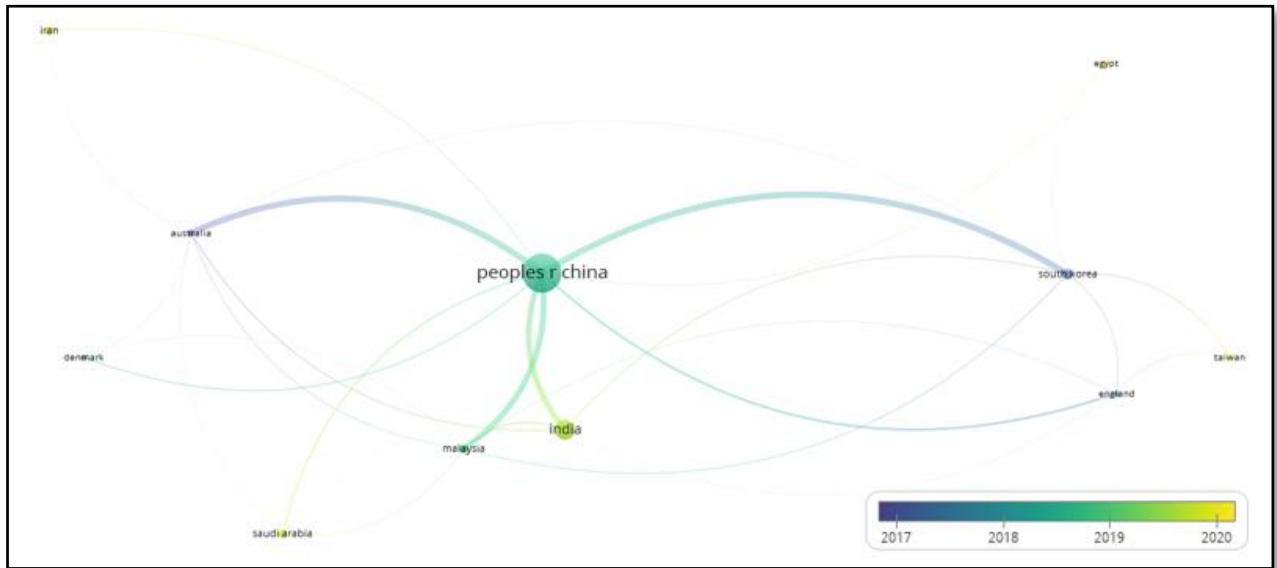
Já o artigo de Kumar et al. (2017) é o responsável pelos acoplamentos entre a Arábia Saudita, Índia e China. Interessante notar que, como já citado, este artigo possui coautoria com um pesquisador brasileiro (Renato Cataluna Veses). No entanto, devido à sua baixa relevância quanto ao número de acoplamentos bibliográficos, o Brasil ficou de fora dos países que atendem aos critérios selecionados. A linha espessa entre a China e a Coreia do sul, evidencia um número considerável de referências em comum, sendo o artigo de Jo et al. (2017) com coautoria entre pesquisadores chineses e sul-coreanos, o responsável majoritário pelo acoplamento em questão. De modo geral, os países selecionados possuem ligações bibliográficas com os demais. Isso mostra a grande abrangência entre os países pesquisadores na área de estudo do presente trabalho.

4.4 Análise dos Mapas de *Overlay Visualization*

4.4.1 Mapas de Citação

A análise do mapa de Citação vs. Países (Figura 24) mostra que as publicações na periferia do mapa (Irã, Egito, Taiwan e Arábia Saudita) são mais recentes. Austrália e China possuem trabalhos mais antigos e mais citados, por estarem centralizados no mapa (fato esperado, já que artigos mais antigos tiveram mais tempo para serem citados).

Figura 24 – Mapa de *Overlay Visualization*: Citação vs. Países

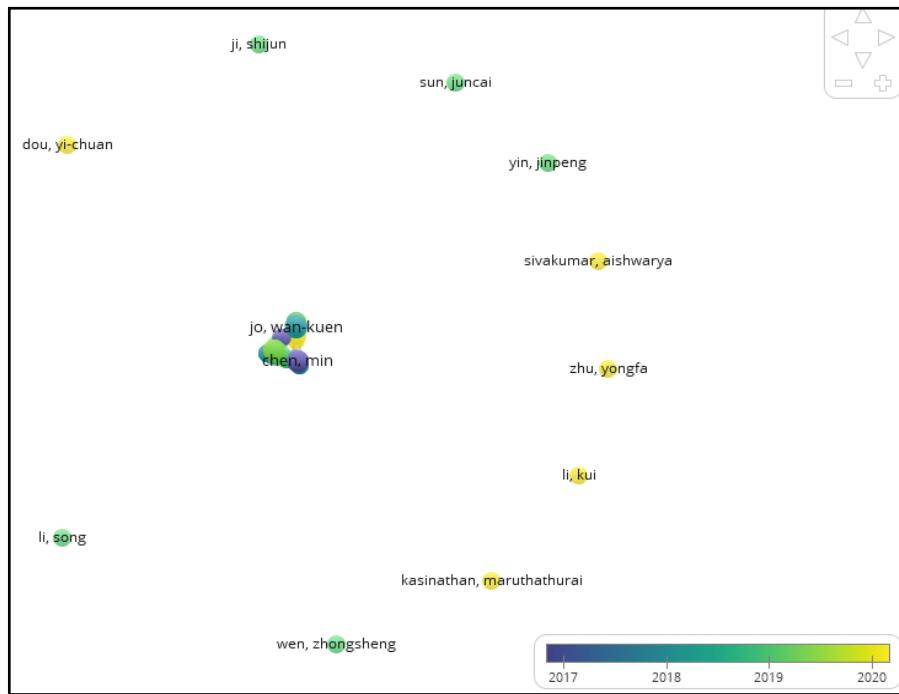


Fonte: Autoria própria.

Além disso, os autores que foram mais citados até 2017 e 2018, ou seja, os que estão na parte mais central do mapa, foram em sua maioria chineses (Figura 25), tais como: *Xuejuan Cao, Mei Deng, Xiaoyu Yang e Boming Tang*, como é visto na Figura 26. Essa informação também está de acordo com as organizações mais citadas ao longo dos anos (Figuras 27 e 28), que incluem com grande peso a *Chinese Academy of Science, Jiangsu University* e *SRM Institute of Science and Technology*.

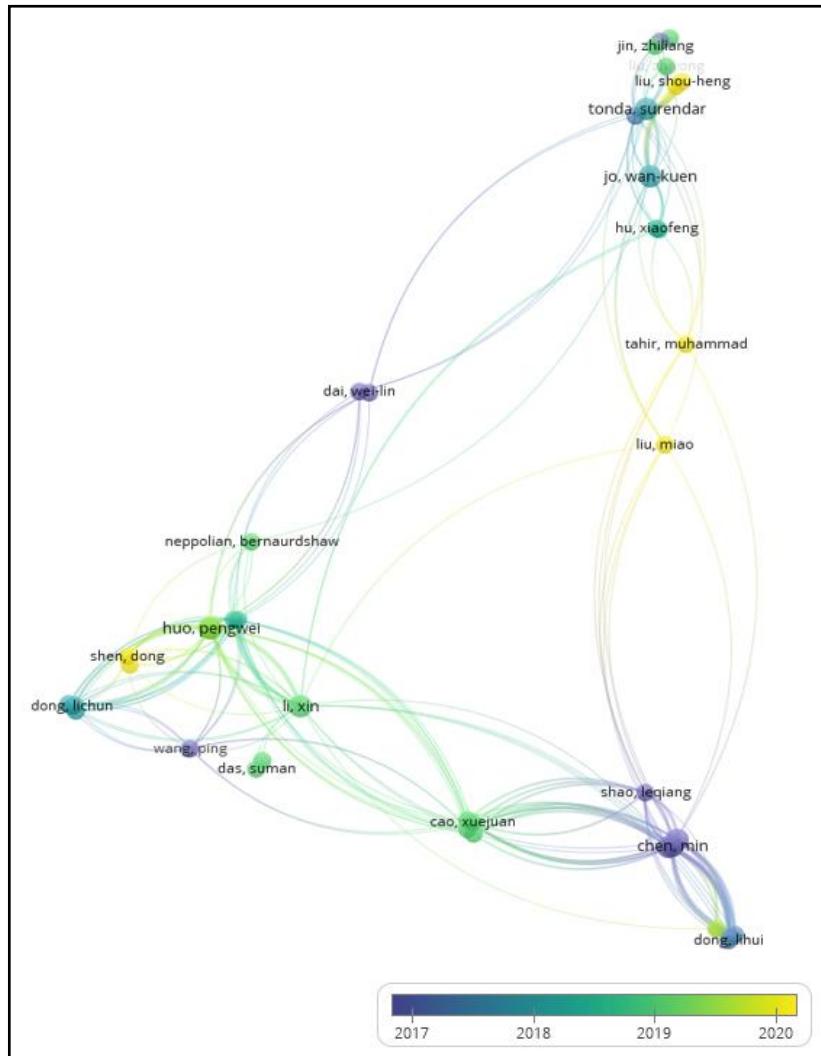
Levando-se em conta o período de 2020 e 2021, observa-se que os autores indianos começam a se destacar na autoria de artigos, tais como *Maruthathurai Kasinathan e Aishwarya Sivakumar*, além dos próprios chineses, como *Kui Li e Yongfa Zhu*. Contudo essa produção mais significativa continua sendo proveniente de organizações tais como a *Chinese Academy of Science, Jiangsu University* e *SRM Institute of Science and Technology*. Dessa forma, estabelece-se uma tendência de hegemonia chinesa nas citações dos artigos e entre os principais autores ao longo do tempo, com alguma contribuição mais recente proveniente de outros países asiáticos ou do Oriente Médio.

Figura 25 – Mapa de *Overlay Visualization*: Citação vs. Autores



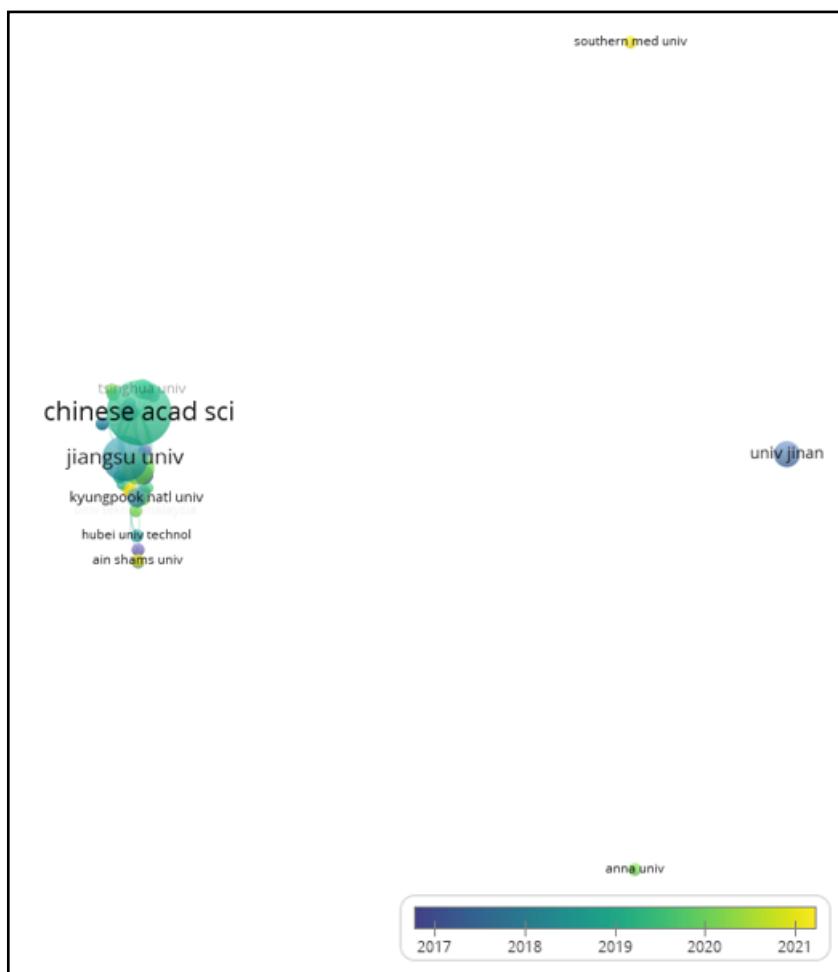
Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Detalhe do mapa de *Overlay Visualization*: Citação vs. Autores



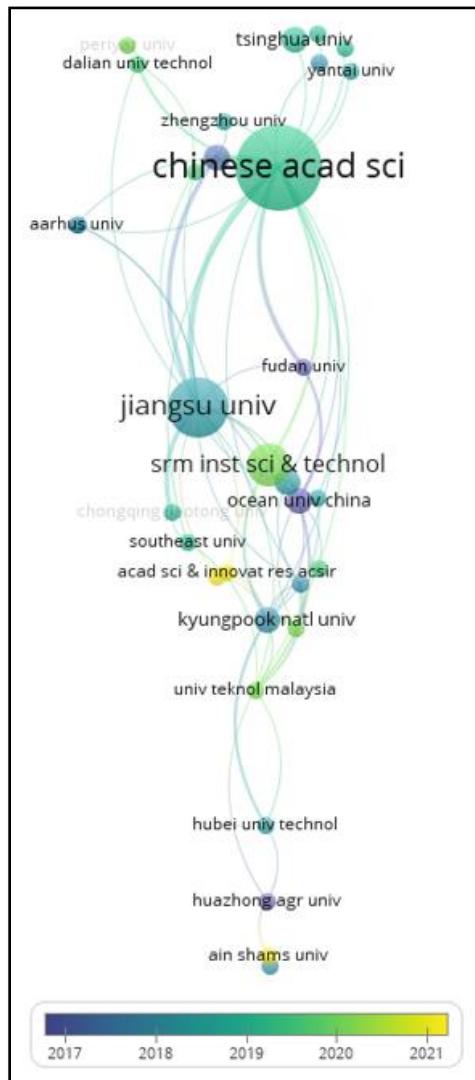
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Mapa de *Overlay Visualization*: Citação vs. Organizações



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Detalhe do mapa de *Overlay Visualization: Citação vs. Organizações*

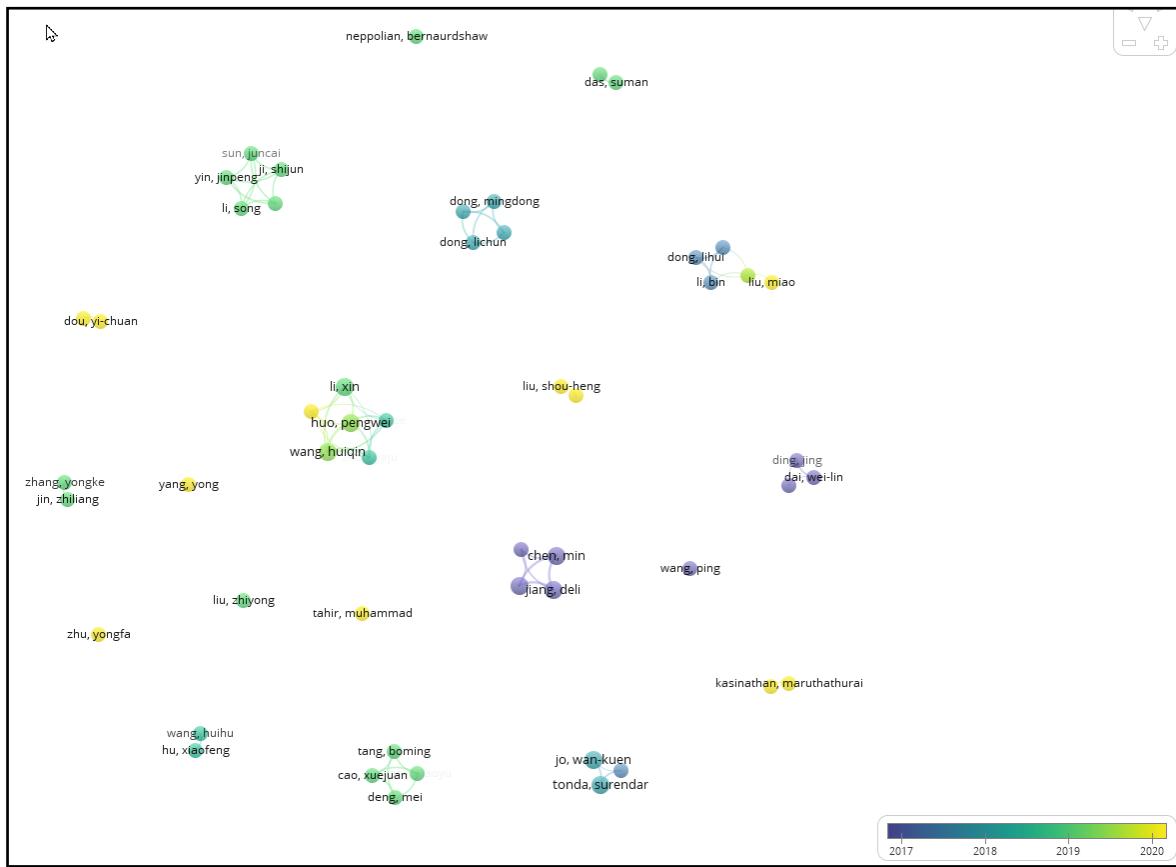


Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Mapas de Coautoria

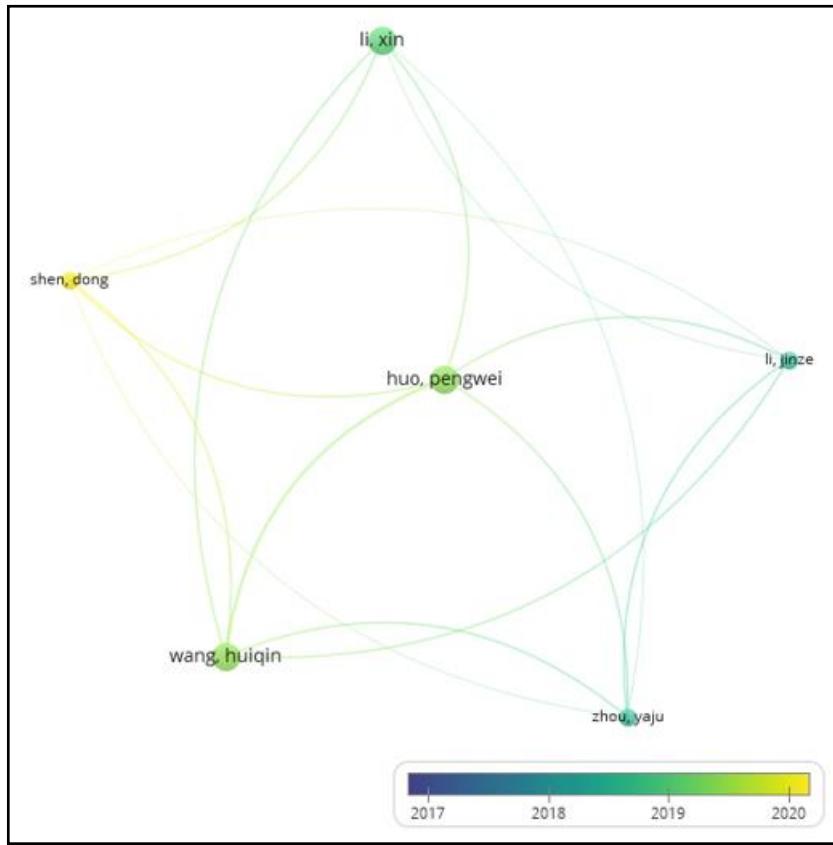
Na Figura 29 nota-se que o *cluster* com o maior número de ocorrências, composto pelos autores *Pengwei Huo, Jinze Li, Xin Li, Dong Shen, Huiqin Wang e Yaju Zhou*, possui trabalhos publicados entre 2018 e 2020 (Figura 30). Já o *cluster* composto por *Shijun Ji, Song Li, Jucai Sun, Zhongsheng Wen e Jinpeng Yin* possui seus dois únicos artigos publicados em 2019. Todos os autores anteriores são chineses, haja visto que a maior parte da literatura é proveniente da China, implicando em uma maior probabilidade de cocitações entre esses autores.

Figura 29 – Mapa de Overlay Visualization: Coautoria vs. Autores



Fonte: Autoria própria.

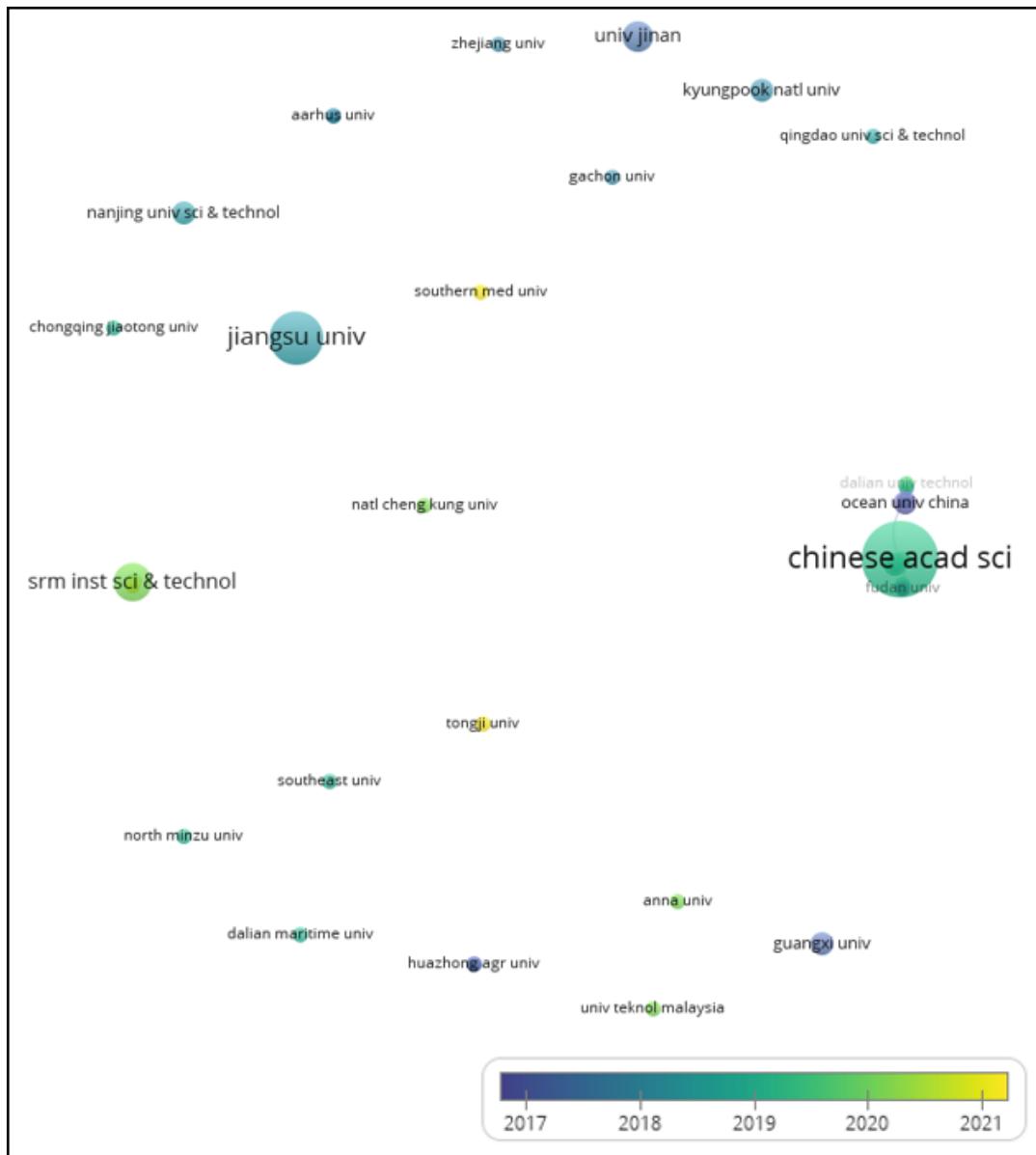
Figura 30 – Detalhe do mapa de *Overlay Visualization*: Coautoria vs. Autores



Fonte: Autoria própria.

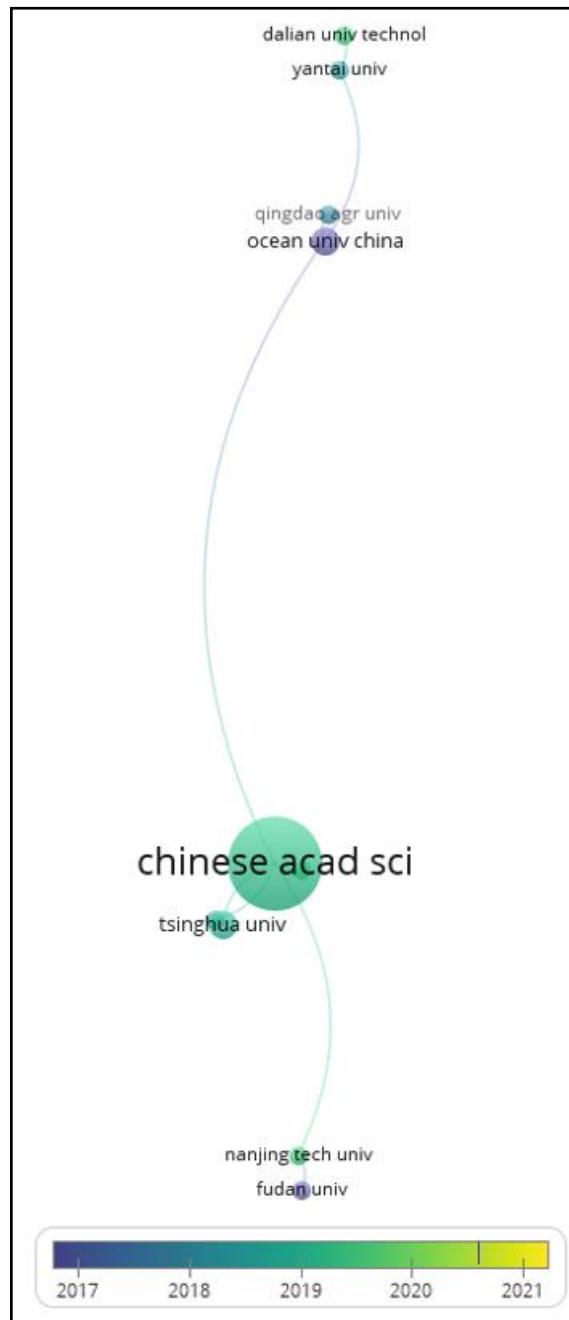
As Figuras 31-35 destacam as coautorias recentes envolvendo as organizações *Chinese Academy of Science*, *Jiangsu University* e *SRM Institute of Science and Technology*, que não estão apenas entre as mais citadas, mas também fazem parte do grupo de organizações mais presente em cocitações na literatura recente.

Figura 31 – Mapa de *Overlay Visualization*: Coautoria vs. Organizações



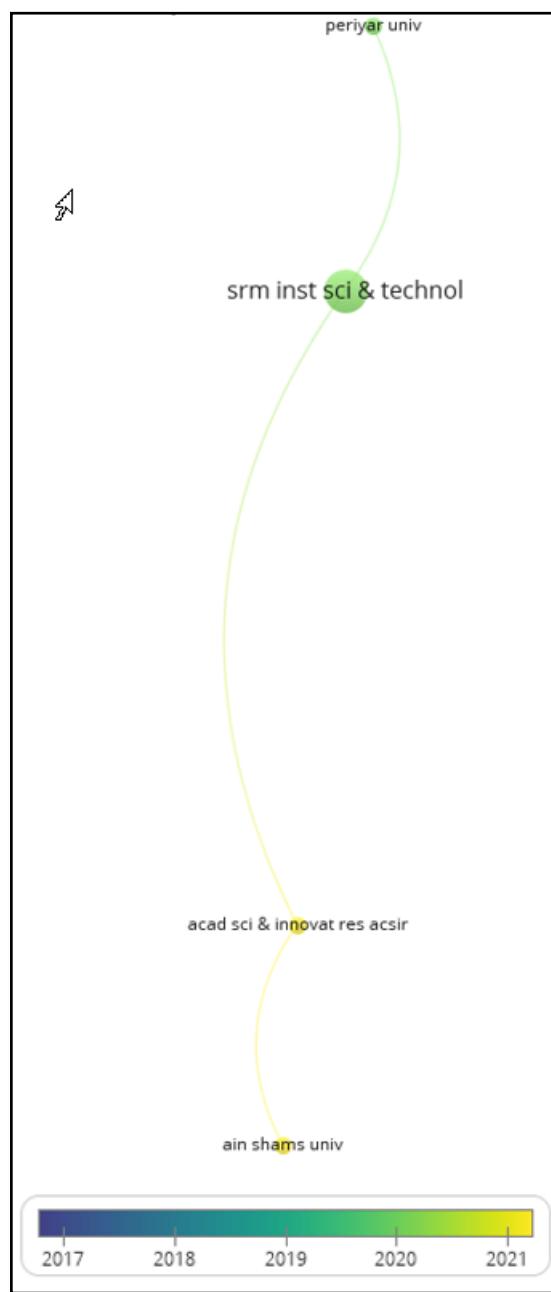
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Detalhe do mapa de *Overlay Visualization: Coautoria vs. Organizações*



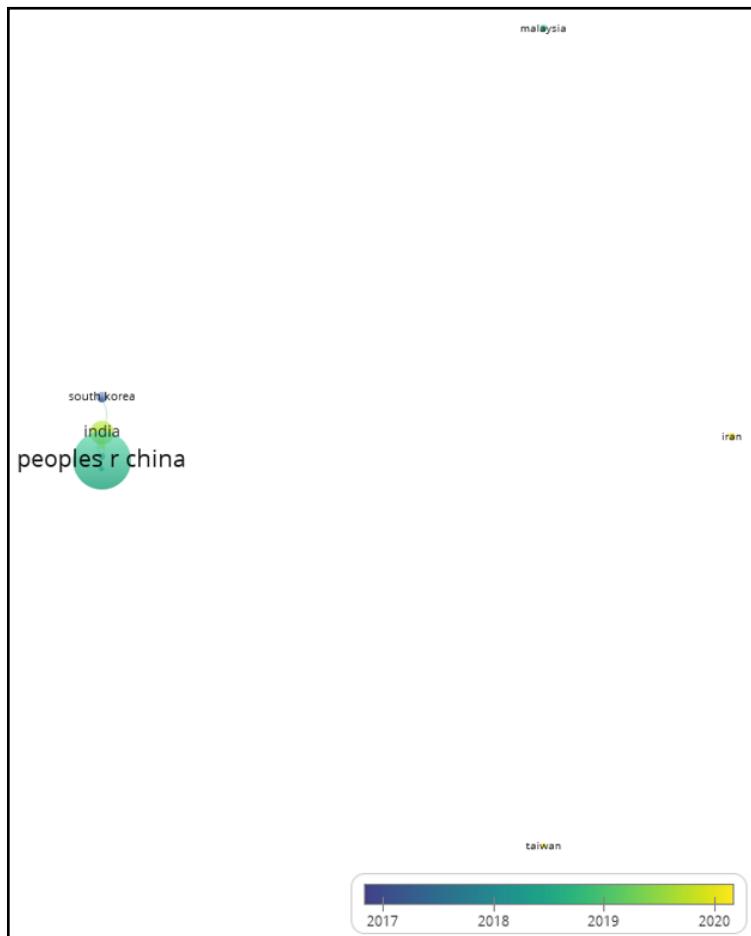
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Detalhe do mapa de *Overlay Visualization: Coautoria vs. Organizações*



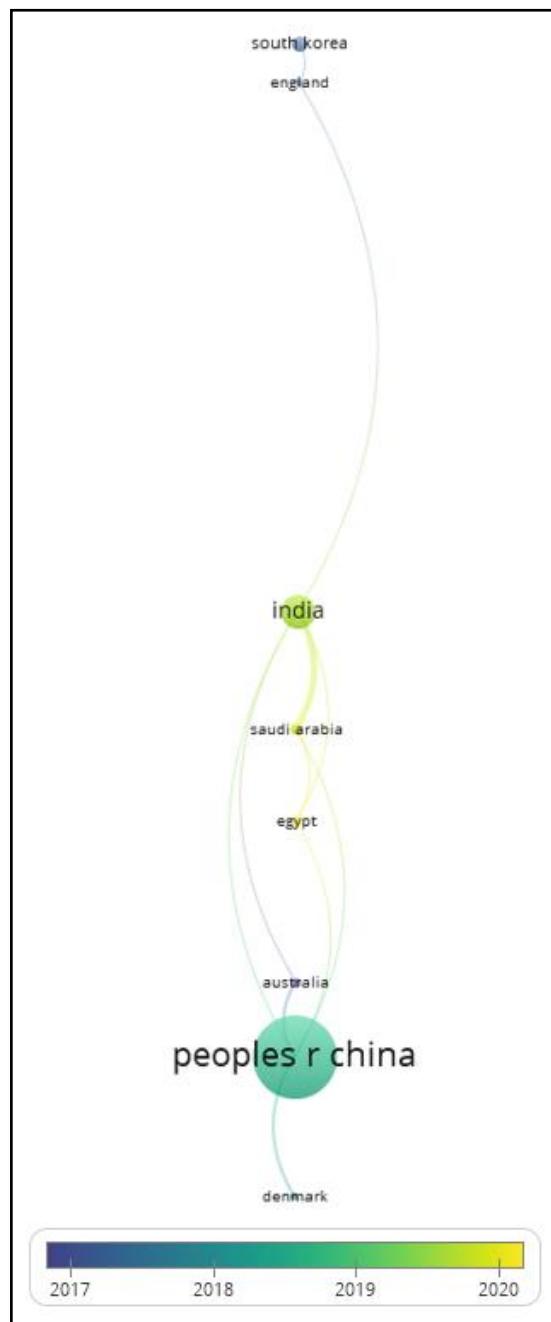
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Mapa de *Network Visualization*: Coautoria vs. Países



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Detalhe do mapa de *Overlay Visualization: Coautoria vs. Países*



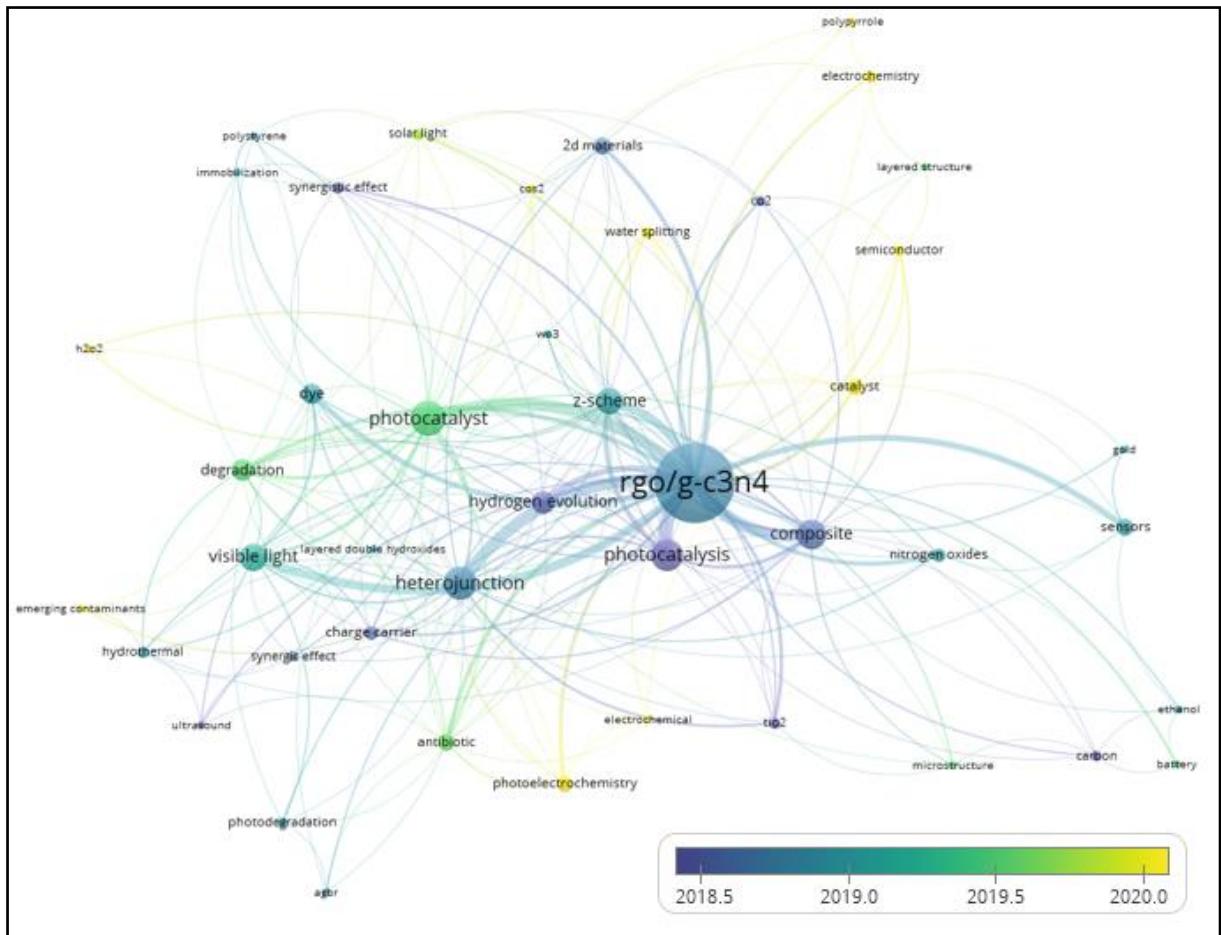
Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Mapas de Acoplamento bibliográfico

Nota-se na Figura 36 que as palavras-chave rGO/g-C₃N₄, *photocatslysis*, *ultrassound*, *composite*, *heterojunction*, *hydrogen evolution* e *sinergic effect* são citadas em artigos mais antigos, já que descrevem técnicas, termos e objetivos usuais, clássicos no desenvolvimento das

pesquisas envolvendo rGO/g-C₃N₄. Palavras-chave tendendo ao amarelo, como *battery* (desenvolvimento de baterias modernas), *emerging contaminants* (degradação de contaminantes emergentes), *water splitting* (produção de H₂ como combustível) aparecem em trabalhos mais recentes e mostram a tendência futura das pesquisas, cada vez mais voltadas ao desenvolvimento de processos limpos, segundo políticas ESG.

Figura 36 Mapa de *Overlay Visualization*: Coocorrência vs Palavras-chave de autores



Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÕES

A China é o país que mais recebe citações dentre os países que atendem aos critérios selecionados. Contudo, não cita os demais países com a mesma intensidade, tendendo a citar preferencialmente artigos chineses. Austrália, Malásia, Índia e Coreia do Sul são os países que mais citam trabalhos chineses.

Os autores com maior peso quanto às citações são chineses, (*Wan-Kuen Jo, Xi Ling, Peng Xiao e Min Chen*, respectivamente com 419, 314, 247 e 247 citações cada), seguidos de dois autores indianos (*Surendar Tonda e Santosh Kumar*, cada um com 280 e 219 citações respectivamente). O autor Xin Li se destaca por ser a ponte entre a China e a Índia, principalmente devido ao artigo de Wu et al. (2017), com 277 citações.

As organizações com os artigos mais citados são, mais uma vez, chinesas (*Chinese Academy of Science, Jiangsu University e Ocean University of China*), com exceção da organização sul-coreana *Kyungpook National University*, que também possui um número considerável de artigos citados. A *Chinese Academy of Science* é a organização mais importante em termos de artigos com maior número de citações, possuindo um artigo de altíssima relevância na área de nanocompósitos fotocatalisados (LI et al. 2013) com 475 citações. Esse artigo, sozinho, contribui com aproximadamente 68% das citações da organização.

Notou-se tendência de coautoria entre pesquisadores do mesmo país, majoritariamente entre autores pertencentes à mesma organização. Quando esta tendência é rompida, as coautorias tendem a serem estabelecidas entre as organizações do mesmo país. Pode-se notar tal efeito nas coautorias entre *Chinese Academy of Science* e *Ocean University of China*. Mais ainda, organizações pertencentes ao mesmo país tendem a utilizar referências em comum nos trabalhos produzidos por seus autores. Portanto, de modo geral, os autores estudados possuem diversas referências em comum, as mais fortes entre pesquisadores do mesmo grupo, e as mais fracas entre pesquisadores de grupos diferentes. A organização *Chinese Academy of Science* é a mais relevante em diversos dos critérios selecionados, não só na China, como no mundo.

Os autores *Min Chen, Peng Xiao, Leqiang Shao e Deli Jiang* são os que possuem maior acoplamento bibliográfico (maior número de referências comuns) entre si, seguidos de *Xim Li,*

Jinze Li, Yaju Zhou, Pengwei Huo, Huiqin Wang e Dong Shen. A China é o país com maior acoplamento bibliográfico, já que os principais autores relevantes são chineses.

Por meio da nuvem de palavras e dos mapas de palavras-chave, verifica-se que as mais comuns no estudo dos compostos rGO/g-C₃N₄ são *Photocatalyst, Photocatalysis, Heterojunction, Visible light, Z-Scheme, Composite, Sensors, Degradation e Dye*. Isso demonstra que o uso mais comum do compósito é no POA fotocatálise, notadamente com luz visível. Os objetivos principais das pesquisas são a confecção de sensores e a degradação de poluentes. Em menor escala, a produção de baterias, a reforma do etanol e a produção de hidrogênio.

É crescente, ao longo dos últimos anos, o número de artigos publicados sobre os compostos rGO e g-C₃N₄. Também parece ser crescente a adoção de práticas ESG, com aplicações na área de produção de hidrogênio, degradação de contaminantes emergentes e estudos eletró(foto)químicos.

A China mostra-se ainda o principal país a publicar sobre o compósito, com uma produção um pouco mais difusa, oriunda de Índia, Egito e Arábia Saudita. Contudo, a hegemonia chinesa prevalece nas citações, cocitações e coautoriais dos trabalhos, haja visto o grande volume de trabalhos que são oriundos desse país.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. N.; HAIDER, W. Heterogeneous photocatalysis and its potential applications in water and wastewater treatment: a review. **Nanotechnology**, v. 29, n. 34, p. 342001, 2018.
- ARIA, M; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.
- BANKAR, R. **Bibexcel tutorial**, Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333728858_BibexcelTutorial. Acesso em: 11 out. 2019.
- UNIVERSIDADE DE LYON. **Bibliotools/BiblioMaps**. Overview of the project, Disponível em: <http://www.sebastian-grauwin.com/bibliomaps/>. Acesso em: 04 set. 2021.
- BORG, I. Multidimensional Scaling, **International Encyclopedia of Statistical Science**, p. 765-935, 2011.
- BUZYDLOWSKY, J. W. Co-occurrence analysis as a framework for data mining, **Journal of Technology Research**, v. 6, 2015.
- CHEN, C.; IBEKWE-SANJUAN, F.; HOU, J. The structure and dynamics of cocitation clusters: A multiple-perspective cocitation analysis, **Journal of the Association for Information Science and Technology**, v. 61, p. 1386-1409, 2010.
- COBO, M. J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIEDMA, E.; HERRERA, F. Sci-MAT: a new science mapping analysis software tool. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 63, n. 8, p. 1609-1630, 2012.
- DIKIN, D. A.; STANKOVICH, S.; ZIMNEY, E. J.; PINER, R. D.; DOMMETT, G. H.; EVMENENKO, G.; NGUYEN, S. T.; RUOFF, R. S. Preparation and characterization of graphene oxide paper, **Nature**, v. 448, n. 7152, p. 457, 2007.
- DING, Y.; ZHANG, P.; ZHUO, Q.; REN, H.; YANG, Z.; JIANG, Y. A green approach to the synthesis of reduced graphene oxide nanosheets under UV irradiation, **Nanotechnology**, v. 22, p. 215601, 2011.
- DOBSON, RYLAN S.; BURGESS, JOANNA E. Biological treatment of precious metal refinery wastewater: A review, **Minerals Engineering**, v. 20, n. 6, p. 519-532, 2007.
- FIOREZE, M.; SANTOS, E. P.; SCHMACHTERBERG, N. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 79-91, 2014.
- GARCIA, A. SANCHES; MENDES, WESLEY; ORSATO, RENATO, Sensitive industries produce better ESG performance: Evidence from emerging markets, **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 135-147, 2017

FITZER, E.; KOCHLING, K. H.; BOEHM, H. P.; MARSH, H. Recommended terminology for the description of carbon as a solid, IUPAC Recommendations. **International Union of Pure and Applied Chemistry**, v. 67, p. 473-506, 1995.

FRENSLEY, W. R. **Heterostructure and Quantum Well Physics**, v. 24, p. 1-24, 1994.
GEIM, A. K.; GRIGORIEVA, I. V. Van der Waals heterostructures, **Nature**, v. 499, n. 7459, p. 419–425, 2013.

HUANG, M.; YU, J.; HU, Q.; SU, W.; FAN, M.; LI, B.; DONG, L. Preparation and enhanced photocatalytic activity of carbon nitride/titania (001 vs 101 facets)/reduced graphene oxide ($\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2/\text{rGO}$) hybrids under visible light. **Applied Surface Science**, v. 389, p. 1084-1093, 2016.

HUMMERS JUNIOR, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of graphitic oxide. **Journal of the American Chemical Society**, v. 80, n. 6, p. 1339, 1958.

JO, W.-K.; KUMAR, S.; ESLAVA, S.; TONDA, S. Construction of $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{rGO}/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 2D/2D/2D hybrid Z-scheme heterojunctions with large interfacial contact area for efficient charge separation and high-performance photoreduction of CO_2 and H_2O into solar fuels. **Applied Catalysis B-Environmental**, v. 239, p. 586-589, 2018.

JO, W.-K.; SELVAM, N. Z-scheme $\text{CdS}/\text{g-C}_3\text{N}_4$ composites with rGO as an electron mediator for efficient photocatalytic H_2 production and pollutant degradation, **Chemical Engineering Journal**, v. 317, p. 913-924, 2017.

KRISHNA, R.; FERNANDES, D. M.; VENKATARAMANA, E.; DIAS, C.; VENTURA, J.; FREIRE, C.; TITUS, E. Improved reduction of graphene oxide. **Materials today: proceedings**, v. 2, n. 1, p. 423-430, 2015.

KUMAR, A.; SHARMA, G.; NAUSHAD, M.; VESES, R. C.; GHFAR, A. A.; STADLER, F. J.; KHAN, M. R. Solar-driven photodegradation of 17-beta-estradiol and ciprofloxacin from waste water and CO_2 conversion using sustainable coal-char/polymeric- $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{rGO}$ metal-free nano-hybrids. **New Journal of Chemistry**, v. 41, n. 18, p. 10208-10224, 2017.

LI, Y.; HAIMIN, Z.; LIU, P.; WANG, D.; LI, Y.; ZHAO, H. Cross-linked $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{rGO}$ nano-composites with tunable band structure and enhanced visible light photocatalytic activity. **Small**, v. 9, n. 19, p. 3336-3344, 2013.

LOW, J.; JIANG, C.; CHENG, B.; WAGEH, S.; AL-GHAMDI, A. A.; YU, J. A review of direct Z-scheme photocatalysts. **Small Methods**, v. 1, n. 5, 2017.

LU, N.; WANG, P.; SU, Y.; YU, H.; LIU, N.; QUAN, X. Construction of Z-scheme $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{rGO}/\text{WO}_3$ with in situ photoreduced graphene oxide as electron mediator for efficient photocatalytic degradation of ciprofloxacin. **Chemosphere**, v. 215, p. 444-453, 2019.

MC COY, T.; TURPIN, G.; TEO, B.; TABOR, R. Graphene oxide: a surfactant or particle? **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 39, p. 98-109, 2019.

MEHO, L. I.; YANG, K. A new era in citation and bibliometric analyses: Web of Science, Scopus, and Google Scholar. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 58, p. 2105-2125, 2007.

MENG, F; CHANG, Y. L.; QIN, W. B.; YUAN, Z. Y.; ZHAO, J. P.; ZHANG, J. J.; HAN, E. C.; WANG, S. Y.; YANG, M. H.; SHEN, Y. B.; IBRAHIM, M. ZnO-reduced graphene oxide composites sensitized with graphitic carbon nitride nanosheets for ethanol sensing. **ACS Applied Nano Materials**, v. 2, n. 5, p. 2734-2742, 2019.

MENG, X.; ZHANG, Z. Two dimensional graphitic materials for photoelectrocatalysis: a short review. **Catalysis Today**, v. 315, p. 2-8, 2018.

MINGERS, J.; LEYDESDORFF, L. A Review of theory and practice in scientometrics. **European Journal of Operational Research**, v. 246, p. 1-19, 2015.

MORAL-MUÑHOZ, J. A.; HERRERA-VIEDMA, E.; SANTISTEBAN-ESPEJO, A.; COBO, M. J. Software tools for conducting bibliometric analysis in science: an up-to-date review. **Profesional de la Información**, v. 29, n. 1, 2020.

MOURÃO, H.; MENDONÇA, V. D.; MALAGUTTI, A. R.; RIBEIRO, C. Nanoestruturas em fotocatálise: uma revisão sobre estratégias de síntese de fotocatalisadores em escala nanométrica. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2181-2190, 2009.

OJHA, K.; ANJANEYULU, O.; GANGULI, A. K. Graphene-based hybrid materials: synthetic approaches and properties. **Current Science**, v. 107, p. 397-418, 2014.

ONG, W.-J.; TAN, L.-L.; CHAI, S.-P.; YONG, S.-T.; MOHAMED, A. R. Surface charge modification via protonation of graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) for electrostatic self-assembly construction of 2D/2D reduced graphene oxide (rGO)/ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ nanostructures toward enhanced photocatalytic reduction of carbon dioxide to methane. **Nano Energy**, v. 13. p. 757-770, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento de recursos hídricos 2016: água e emprego, fatos e números**. 2017. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244041por.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2021.

PAPAGEORGIOU, D.; KINLOCH, I.; YOUNG, R. Graphene/elastomer nanocomposites. **Carbon**, v. 95, p. 460-484, 2015.

SHAH, R.; KAUSAR, A.; MUHAMMAD, B.; SHAH, S. Progression from graphene and graphene oxide to high performance polymer-based nanocomposite: a review. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 54, n. 2, p. 173-183, 2015.

SILVA, G. T.; CARVALHO, K. T.; LOPES, O. F.; RIBEIRO, C. $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{Nb}_2\text{O}_5$ heterostructures tailored by sonochemical synthesis: enhanced photocatalytic performance in oxidation of emerging pollutants driven by visible radiation. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 216, p. 70-79, 2017.

SILVA, J. A.; BIANCHI, M. Scientometrics: the measurement of science. *Paidéia*, v. 11, n. 21, p. 5-10, 2001.

TENG, Z.; LV, H.; WANG, C.; XUE, H.; PANG, H.; WANG, G. Bandgap engineering of ultrathin graphene-like carbon nitride nanosheets with controllable oxygenous functionalization. *Carbon*, v. 113, p. 63-75, 2017.

PAPERPILE. Disponível em: <https://paperpile.com/g/academic-research-databases/>. Acesso em: 19 out. 2021.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. How to normalize cooccurrence data? An analysis of some well-known similarity measures. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 60, p. 1635-1651, 2009.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **Manual for VOSviewer**, version 1.6.17, 2021.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, p. 523-538, 2010.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Systematic retrieval of scientific literature based on citation relations: introducing the CitNetExplorer tool. In: **Proceedings of the First Workshop on Bibliometric-enhanced Information Retrieval, BIR 2014**, p. 13-20, 2014.

WANG, J.; MENG, Z.; YANG, W.; YAN, X.; GUO, R.; HAN, W.-Q. Facile synthesis of rGO/g-C₃N₄/CNT microspheres via an ethanol assisted spray-drying method for high-performance lithium-sulfur batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 11, n. 1, p. 819-827, 2019.

WANG, L.; DING, J.; CHAI, Y.; LIU, Q.; REN, J.; LIU, X.; DAI, W.-L. CeO₂ nanorod/g-C₃N₄/N-rGO composite: enhanced visible light-driven photocatalytic performance and the role of N-rGO as electronic transfer media. *Dalton Transactions*, v. 44, n. 24, p. 11223-11234, 2015.

WANG, Y.; WANG, X.; ANTONIETTI, M. Polymeric graphitic carbon nitride as a heterogeneous organocatalyst: from photochemistry to multipurpose catalysis to sustainable chemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 51, n. 1, p. 68-89, 2012.

WU, C.-H.; CHANG, C.-L. Decolorization of Reactive Red 2 by advanced oxidation processes: comparative studies of homogeneous and heterogeneous systems. *Journal of Hazardous Materials*, v. 128, p. 2-3, 2006.

WU, F.; LI, X.; LIU, W.; ZHANG, S. Highly enhanced photocatalytic degradation of methylene blue over the indirect all-solid-state Z-scheme g-C₃N₄-rGO-TiO₂ nanoheterojunctions. *Applied Surface Science*, v. 405, p. 60-70, 2017.

YIN, J.; LIAO, G.; ZHU, D.; LU, P.; LI, L. Photocatalytic ozonation of oxalic acid by g-C₃N₄/graphene composites under simulated solar irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 315, p. 138-144, 2016.

ZAREI, E.; OJANI, R. Fundamentals and some applications of photoelectrocatalysis and effective factors on its efficiency: a review. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 21, n. 2, p. 305-336, 2017.