



A evolução do método sísmico usando análise bibliométrica

Frank Cenci Bulhões, Luiz Alberto Santos, Petrobras

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A partir da cienciometria busca-se compreender a evolução das publicações sobre o método sísmico através de uma análise bibliométrica, bem como a evolução dos tipos de levantamento e técnicas de imageamento sísmico. Para isso, foram analisados metadados extraídos de artigos da base Scopus e publicados até dezembro de 2021. Os resultados demonstram o crescimento exponencial das publicações a partir do final do século XX até o início do XXI bem como possibilita entender os padrões de avanços nas pesquisas e evolução das técnicas e tecnologias, podendo contribuir para futuros trabalhos na compreensão da evolução geocientífica.

Introdução

A cienciometria ou cientometria é um ramo da ciência da informação e da sociologia das ciências que procura estudar aspectos quantitativos e da produção científica, seja como uma disciplina ou como uma atividade econômica (Macias-Chapula, 1998), o que permite uma maior compreensão de sua estrutura, evolução e conexões (Gregolin, 2005). O termo foi proposto por Nalimov e Mulchenko (1969) e um dos principais pensadores a desenvolver a questão da cienciometria foi Price (1963; 1965).

Os resultados científicos, de modo geral, são comumente divulgados através de produções científicas e aplicações tecnológicas (Zitt, 2008). Produções científicas se dão por meio de diversos veículos de comunicações no meio acadêmico, tais como: resumos, resumos expandidos, relatórios técnicos, artigos científicos, livros etc. Além disso, podem ser encontrados discussões técnicas e produções científicas em fóruns de discussão. Aplicações com potencial tecnológico (produtos, processos) podem ser patenteadas a fim de garantir ao seu titular a proteção e exclusividade de seu produto ou processo (Ruas, 2014).

As principais ferramentas da cienciometria são derivadas da bibliometria, através de medidas relacionadas à publicação de trabalhos científicos. Esse método tem sido amplamente empregado na avaliação da qualidade de periódicos, instituições e cientistas por meio de revisão sistemática. Os artigos considerados adequados para uma

revisão sistemática são aquelas que apresentam evidências científicas (Faustino *et al.*, 2020).

Casos de aplicação de análises bibliométricas são aplicadas em diversos campos do conhecimento como na engenharia de segurança e de mineração (Faustino *et al.*, 2020), astronomia (Biglia e Butler, 2005) entre outros. Alguns exemplos de bases de dados que armazenam, indexam e analisam produções científicas são: *Web of Science*, *Scielo*, *Scopus*, *Google Scholar*, *PubMed* etc.

Os indicadores para análise cienciométrica são: quantidade de trabalhos, citações, coautorias, mapeamento de países, campos científicos entre outros. A quantidade de trabalhos produzidos por um pesquisador, instituição ou publicadas por um grupo editorial é uma medida da produtividade do agente científico. A quantidade de citações, total de vezes que um trabalho foi mencionado em outros trabalhos é uma medida da relevância do trabalho. O número de coautorias, quantidade de trabalhos realizados em colaboração com outros pesquisadores ou instituições é uma medida da inserção do cientista ou da instituição no ambiente científico. Além disso, o mapeamento de países e campos científicos permite a identificação do ranqueamento de diferentes países em relação à cooperação científica global. Outros indicadores são: patentes, premiações, bolsas, número de orientações acadêmicas, citações em mídias tradicionais.

De acordo com Macias-Chapula (1998), os principais objetivos da cienciometria são: o crescimento quantitativo da produção científica, desenvolvimento de um campo de conhecimento, relacionamento entre produção científica e tecnológica, obsolescência de paradigmas científicos, rede de comunicação entre pesquisadores, relacionamento entre desenvolvimento científico e crescimento econômico etc.

As principais aplicações das técnicas cienciométricas são identificação de tendências e crescimento do conhecimento em diferentes áreas, investigar cobertura de uma publicação a partir de um núcleo e de fontes secundárias, identificação dos atores de diferentes áreas, estudar a utilidade do serviço para divulgação seletiva da informação, prever tendências em publicações, estudar a dispersão e obsolescência de literatura científica, suporte ao processo de indexação, classificação e geração automática de resumos, análise da produtividade de editores, autores individuais, organizações e países entre outras.

Esse estudo tem como objetivo avaliar a evolução do método sísmico usando a análise bibliométrica.

Metodologia/ Problema Investigado

O método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) é uma ferramenta para revisão sistemática e de meta análise que segue um protocolo de revisão bibliométrica que contém um conjunto mínimo de itens baseado em evidências para relato em revisões sistemáticas e metanálises (Moher *et al.*, 2009; Faustino *et al.*, 2020). O método PRISMA consiste em um checklist de 27 itens e um fluxograma de 4 fases (Moher *et al.*, 2009). A primeira parte apresenta o diagrama de fluxo PRISMA, algumas estatísticas dos artigos e os critérios de elegibilidade. A segunda apresenta a seleção dos artigos obtidos por meios dos critérios utilizados pela metodologia PRISMA. O presente estudo visa por meio da análise bibliométrica avaliar estatísticas, mostrar a evolução e o desenvolvimento das técnicas do método sísmico ao longo dos anos, quais pesquisadores publicam/contribuem sobre o tema e como são distribuídas essas publicações pelos países.

A base de dados Scopus foi utilizada como fonte de dados por ser a maior base de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, contendo mais de 55 milhões de registros, mais de 22.000 títulos de mais de 5.000 editores em todo o mundo, abrangendo as áreas de ciências, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes e humanidades. Além disso, a base Scopus contém ferramentas bibliométricas para análise e visualização de pesquisas (CAPES, 2016).

A revisão sistemática considerou as publicações realizadas até dezembro de 2021. Foram analisados/avaliados trabalhos: variação da quantidade de publicações por ano; quantidade de publicações por países (pesquisadores vinculados aos países); autores que mais publicam sobre o assunto.

Os critérios de elegibilidade para realização da busca consideraram as expressões no título, resumo e palavras-chave. Após essa etapa, foram considerados os artigos com maior número de citações, excluindo os demais. As *queries* (campos de consulta no banco de dados) utilizadas foram:

- *((TITLE-ABS-KEY (seismic) AND PUBYEAR < 2022)*
- *((TITLE-ABS-KEY (seismic AND refraction) AND PUBYEAR < 2022)*
- *((TITLE-ABS-KEY (seismic AND reflection) AND PUBYEAR < 2022)*
- *((TITLE-ABS-KEY (seismic) AND TITLE-ABS-KEY (inversion)) AND PUBYEAR < 2022)*
- *((TITLE-ABS-KEY (seismic) AND TITLE-ABS-KEY (imaging)) AND PUBYEAR < 2022)*
- *((TITLE-ABS-KEY (seismic) AND TITLE-ABS-KEY (migration)) AND PUBYEAR < 2022)*

- *((TITLE-ABS-KEY (seismic) AND TITLE-ABS-KEY (tomography) OR TITLE-ABS-KEY (tomographic)) AND PUBYEAR < 2022)*
- *((TITLE-ABS-KEY (seismic) AND TITLE-ABS-KEY(FWI) OR TITLE-ABS-KEY (full waveform inversion) OR TITLE-ABS-KEY(full wave form inversion)) AND PUBYEAR < 2022)*

Resultados

A revisão sistemática encontrou 321.408 artigos para o termo em inglês “*seismic*”. Entre os critérios de elegibilidade estão os termos acrescidos na busca com o operador lógico “AND” nas etapas seguintes. Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma do PRISMA com as etapas do processo de escolha dos artigos. O (*) na Figura 1 indica os quantitativos selecionados para elegibilidade e os valores estão discriminados para cada query pesquisada e estão representados no Quadro 1.

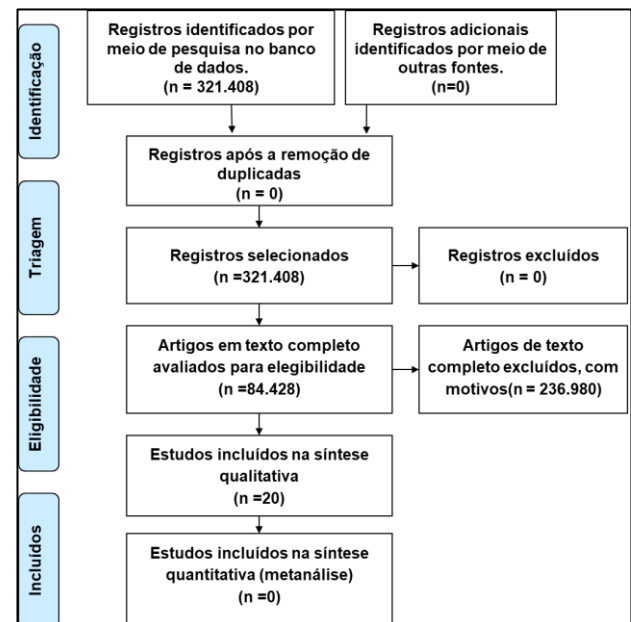


Figura 1: Fluxograma PRISMA Fonte: Adaptado de Moher *et al.* (2009) apud Faustino *et al.* (2020).

Quadro 1: Quantitativo de publicações por termo pesquisado.

Termo pesquisado	Quantidade de publicações
"seismic"	321.408
"seismic" AND "refraction"	7.647
"seismic" AND "reflection"	31.455
"seismic" AND "imaging"	19.242
"seismic" AND "tomography"	14.542
"seismic" AND "inversion"	30.639
"seismic" AND "migration"	16.365
"seismic" AND "FWI"	3.640

No gráfico da Figura 2 é mostrado a distribuição dos percentuais de tipos de documentos das publicações indexadas no Scopus. Foi identificado que os artigos representam 68%, artigos de conferências 28% e os demais (capítulos de livro, livros, editoriais etc.) 4%.

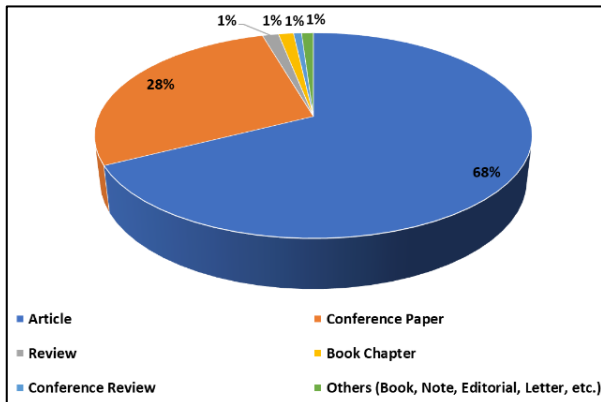


Figura 2: Distribuição percentual dos tipos de publicações.

Na Figura 3 observa-se a evolução da quantidade de publicações com o termo “seismic” ao longo dos anos. A primeira publicação existente nessa base é do ano de 1889. Na metade da década de 1960 começa a ocorrer um grande aumento de trabalhos. Entre 1965 e 2000 há um crescimento médio de 135 publicações por ano. A partir de 2000 essa taxa de crescimento médio é de 789 publicações por ano.

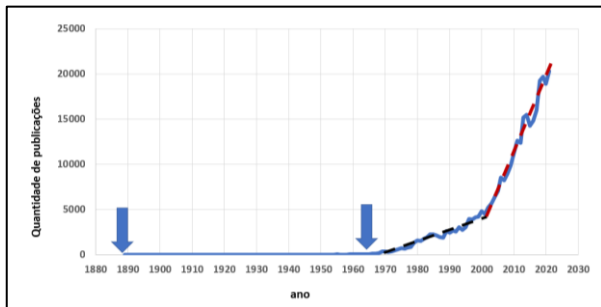


Figura 3: Quantidade de publicações com a palavra “seismic” ao longo dos anos.

Desde o início do século XX, na geofísica de exploração de hidrocarbonetos, os métodos sísmicos são os mais utilizados. Entre o final do século XX e início do XXI ocorreu um grande avanço no setor de óleo e gás com a utilização em larga escala de dados de levantamentos sísmicos 3-D. O aumento das capacidades computacionais gerou avanços que aceleraram o processamento de dados sísmicos em profundidade (Woodward *et al.*, 2008). Estudos realizados por Woodward *et al.* (2008) mostram que a partir da década de 1990 ocorreram avanços dos métodos numéricos na resolução dos modelos, tais como a incorporação dos efeitos anisotrópicos e ao maior emprego de inversões guiadas pelo dado que inversões governadas por interpretações e modelos (Santos, 2012). Esses avanços

só foram possíveis com o aumento do poder computacional, tanto em processamento como em capacidade de armazenamento (memória) de dados (Santos, 2012).

Na Figura 4 é apresentado o mapa com a distribuição por países. Entre os países que mais publicaram sobre a temática “seismic” estão Estados Unidos com 75.048 trabalhos (18,7%), China 70.931 (17,7%), Itália 20.826 (5,2%), Japão 18.075 (4,5%) e Reino Unido 17.948 (4,5%). O Brasil encontra-se na posição 23ª, 2.735 (0,7%).

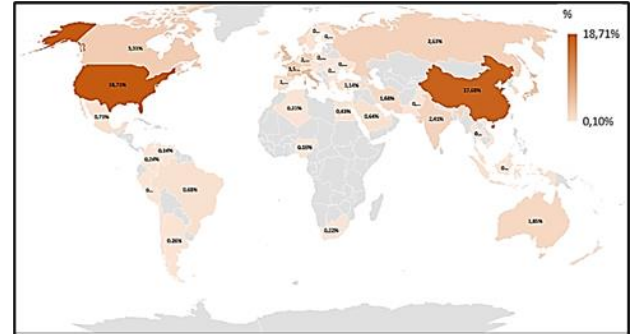


Figura 4: Mapa com a distribuição do quantitativo de publicações por país para o termo “seismic”.

Na Figura 5 é representada a distribuição das áreas de publicação para o termo “seismic”, destacando-se na área de Ciências da Terra e Planetária (45%) e Engenharia (24%).

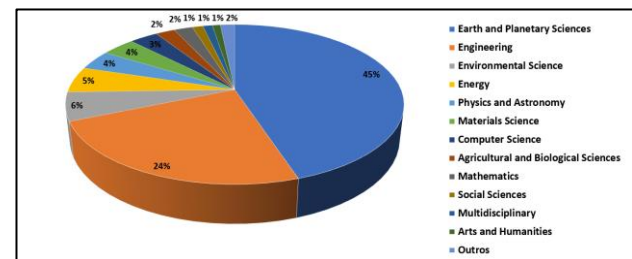


Figura 5: Áreas de publicação sob o tema “seismic”.

No Quadro 2 é apresentados autores que mais publicaram sobre o tema “seismic”, destacando-se os nomes de Marfurt nas temáticas de atributos sísmicos e Fomel na temática de inversão, tomografia e imageamento sísmico.

Quadro 2: Quantidade de publicações por autor para o termo “seismic”.

Nome do autor	Qde de publicações
Marfurt, K.J.	430
Fomel, S.	368
Zhao, D.	312
Alkhalifah, T.	308
Sen, M. K.	303

Na Figura 6 são exibidos os gráficos referentes aos termos “seismic refraction” e “seismic reflection” na análise bibliométrica na base Scopus, o número de publicações referentes à sísmica de reflexão equivale a

aproximadamente 80% enquanto de refração é em torno de 20%. A partir dos anos 1980 as publicações e estudos sobre sismica de reflexão tornaram-se predominantes em relação aos de sismica de refração. Esses resultados são corroborados pelo trabalho de Dobecki e Romig (1985) onde se observou que os levantamentos e estudos em sismica de reflexão substituiriam os de refração como o método predominante para estudos de engenharia de águas subterrâneas.

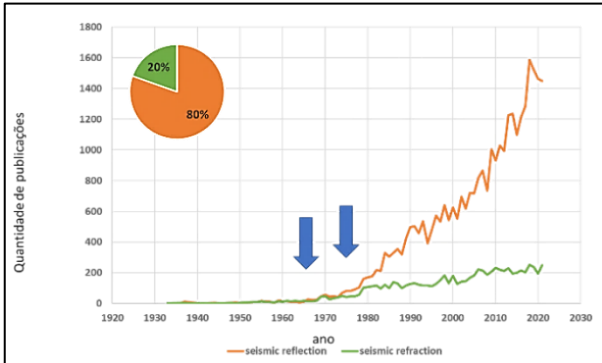


Figura 6: Quantidade de trabalhos referentes às sísmicas de reflexão (laranja) e refração (verde) em relação aos anos.

Na Figura 7 é apresentada a evolução do número de trabalhos que continham os termos “seismic inversion”, “seismic imaging”, “seismic tomography”, “seismic migration” e “seismic FWI”.

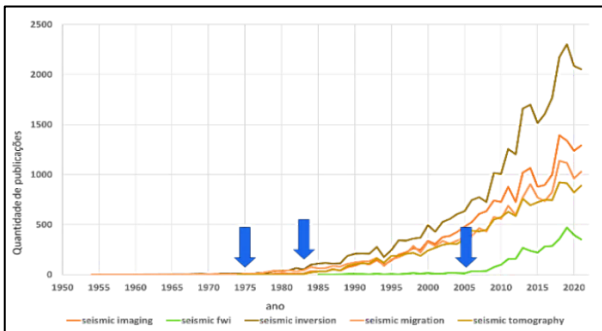


Figura 7: Evolução do quantitativo de publicações em relação ao ano para os termos “seismic imaging”, “seismic inversion”, “seismic migration”, “seismic tomography” e “seismic FWI”.

Os primeiros trabalhos, segundo a base Scopus, são nos anos de 1954 para migração sísmica, 1955, imageamento sísmico, 1959 para inversão sísmica, 1974 para tomografia sísmica e 1985 para FWI.

No aspecto dos países que mais publicam sobre as temáticas migração, imageamento, inversão, tomografia e FWI na sismica estão listados na Quadro 3. O Brasil é o 16º país que mais tem publicações.

No Quadro 4 é exibida a relação das 20 publicações com maior quantidade de publicações para a pesquisa usando o termo “seismic”. Nessa relação destacam-se quatro, entre os quais estão os trabalhos de Thomsen (1986)

sobre anisotropia, Tarantola (1984) e Virieux & Operto (2009) sobre inversão e *full waveform inversion* e o livro de Telford, Geldart & Sheriff (1990) referência na literatura geofísica.

Quadro 3: Quantidade de publicações dos termos pesquisados por país do instituto de pesquisa.

	<i>imaging</i>	<i>inversion</i>	<i>migration</i>	<i>tomography</i>	FWI
Estados Unidos	6708	8496	4908	4623	1102
China	3921	7354	4093	2588	644
Reino Unido	1580	2100	1216	1099	284
França	1268	2173	933	1418	448
Alemanha	849	1353	748	1074	184
Canadá	1029	1481	770	638	213
Itália	517	1396	517	1004	70
Japão	501	1186	442	959	61
Noruega	714	1035	679	359	139
Países Baixos	644	946	546	436	178
Austrália	577	794	385	682	79
Federação Russa	348	803	455	637	85
Arábia Saudita	432	616	354	259	236
Suíça	261	489	138	444	105
Índia	278	642	210	267	35
Brasil	317	447	336	168	53
Espanha	230	404	169	336	28
Coréia do Sul	117	343	142	142	121
Taiwan	125	288	134	238	18
Irã	114	392	114	127	20

Discussão e Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um levantamento bibliométrico sobre o método sísmico contendo os termos “seismic”, “seismic reflection”, “seismic refraction”, “seismic migration”, “seismic imaging”, “seismic tomography”, “seismic inversion”, “seismic FWI” desenvolvido a partir da análise dos metadados de 321.408 artigos sobre o tema, os quais foram publicados entre 1889 até 2021 em periódicos indexados à base de dados Scopus.

Os resultados obtidos mostraram que a produção científica sobre os métodos sísmicos contendo os termos supracitados, tem crescido exponencialmente devido ao grande avanço no final do século XX e início do XXI no setor de óleo e gás com a utilização em larga escala de dados de levantamentos sísmicos 3-D. O aumento das capacidades computacionais gera avanços que

aceleraram o processamento de dados sísmicos, e aplicação de novas técnicas de inversão e imageamento sísmico.

Averiguou-se, que as instituições dos Estados Unidos e China estão na vanguarda na produção científica sobre os temas citados. O Brasil encontra-se entre os 20 países que mais publicam sobre os temas mencionados.

Apurou-se também que aproximadamente 70% dos trabalhos nas áreas de Ciências da Terra e Planetária e Engenharia tiveram Marfurt e Fomel como os autores que mais se destacaram. Entre os trabalhos mais citados estão os de Thomsen (1986), Tarantola (1984), Virieux & Operto (2009) e Telford, Geldart & Sheriff (1990).

Cabe destacar que os resultados obtidos nesta pesquisa não podem ser generalizados, já que foram obtidos a partir de uma amostra de artigos do Scopus, a qual pode não conter todos os artigos publicados sobre os termos pesquisados. Mesmo assim, entende-se que o objetivo de compreender a evolução da produção científica em métodos sísmicos foi identificado e suas tendências são compreendidas.

Por fim, espera-se que este trabalho possa encorajar o desenvolvimento de novas pesquisas sobre a aplicação da análise bibliométrica para a área de geociências, de tal forma a contribuir para o avanço do conhecimento e compreensão da evolução geocientífica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras por permitir a publicação deste trabalho. Frank Cenci Bulhões agradece ao gerente Francisco Aquino e Leonardo Matriciano pelo apoio na publicação da obra e agradeço a Bruna Faustino pelo apoio e companheirismo.

Referências

Biglia, B. e Butler, L. A. 2005. Bibliometric Analysis of Astronomical Sciences. Publications Research Evaluation and Policy Project Research School of Social Sciences The Australian National University.

CAPES. 2016. Scopus Guia de referência rápida.

Disponível em:

https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/Scopus_Guia%20de%20refer%C3%Aancia%20r%C3%A1pida_10.08.2016.pdf. Consultado em 04-jun-2022.

Dobecki, T.L. e Romig, P.R. Geotechnical and groundwater geophysics: *Geophysics*, v. 50, n. 12, p. 2621-2636. 1985.

Faustino, B. C. R.; Santos, L. F. M.; Costa, D. M. B., Esteves, V. P. P.; Morgado, C. R.V. 2020. Health, Safety, Environmental and Socio-Technical Aspects of Mining: a systematic review. In: International Symposium on

Occupational Safety and Hygiene: Proceedings Book of the SHO2020.

Gregolin, J. A. R. 2005. Análise da Produção Científica a partir de Indicadores Bibliométricos (PDF). FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Consultado em 10 de maio de 2022.

Macias-Chapula, C. A. 1998. O papel da informetria e da cienciométrica e sua perspectiva nacional e internacional. *Ciência da Informação*. 27 (2): nd-nd. ISSN 1518-8353. doi:10.1590/s0100-19651998000200005

Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6(7): e1000097. doi:10.1371/journal.pmed100009

Nalimov, V.V., Mulchenko, B.M., 1969. *Scientometrics*, Nauka, Moscow.

Price, D. S. 1963. A calculus of science. *International Science and Technology*, [s. l.], v. 15, p. 37-43, Mar. 1963.

Price, D. S. 1965. Networks of scientific papers: the pattern of bibliographic references indicates the nature of the scientific research front. *Science*, [s. l.], v. 149, n. 3683, p. 510-515, Jul. 1965.

Ruas, T. L.; Pereira, L. 2014. Como construir indicadores de Ciência, Tecnologia e Inovação usando Web of Science, Derwent World Patent Index, Bibexcel e Pajek?». *Perspectivas em Ciência da Informação*. 19 (3): 52–81. ISSN 1413-9936. doi:10.1590/1981-5344/1678. Consultado em 10 de maio de 2022.

Santos, L. A. 2012. Inversão tomográfica sequencial para o campo de velocidades sísmicas baseada em difrações e critérios geológicos. 2012. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

SCOPUS. Estatística das publicações referentes às sísmicas. Disponível em <https://www.scopus.com/sources>. Consultado em 24-mai-2022.

Woodward, M.; Nichols, D.; Zdraveva, O.; Whitfield, P. e Johns, T. 2008. A decade of tomography. *Geophysics*, v. 73, n. 5, p. VE5–VE11, 2008. ISSN 0016-8033. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10- .1190/1.2969907](http://dx.doi.org/10.1190/1.2969907)>.

Zitt, M; Bassecouard, E. 2008. Challenges for scientometric indicators: data demining, knowledge-flow measurements and diversity issues. *Ethics in Science and Environmental Politics*. 8: 49–60. ISSN 1863-5415. doi:10.3354/esepp00092

Quadro 4: Relação das 20 publicações indexadas no Scopus mais citadas a partir da pesquisa do termo "seismic".

Ano Publicação	Título da publicação	Autores	Título do Journal	Citações
1995	The composition of the Earth	McDonough W.F., Sun S.-s.	Chemical Geology	9860
1987	Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic	Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R.	Science	5659
1994	New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement	Wells D.L., Coppersmith K.J.	Bulletin - Seismological Society of America	5356
2000	Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen	Yin A., Harrison T.M.	Annual Review of Earth and Planetary Sciences	4452
1969	High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis	Capon J.	Proceedings of the IEEE	4311
1986	Weak elastic anisotropy.	Thomsen L.	Geophysics	4136
1995	The composition of the continental crust	Hans Wedepohl K.	Geochimica et Cosmochimica Acta	3993
1970	Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes	BRUNE JN	J Geophys Res	3432
1990	Current plate motions	DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.	Geophysical Journal International	2971
1984	INVERSION OF SEISMIC REFLECTION DATA IN THE ACOUSTIC APPROXIMATION.	Tarantola Albert	Geophysics	2956
2002	Incremental dynamic analysis	Vamvatsikos D., Allin Cornell C.	Earthquake Engineering and Structural Dynamics	2905
2001	Oblique stepwise rise and growth of the tibet plateau	Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y.	Science	2894
2010	Earthquake shakes Twitter users: Real-time event detection by social sensors	Sakaki T., Okazaki M., Matsuo Y.	Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web, WWW '10	2840
1995	Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective	Rudnick R.L., Fountain D.M.	Reviews of Geophysics	2654
1991	Traveltimes for global earthquake location and phase identification	Kennett B.L.N., Engdahl E.R.	Geophysical Journal International	2616
1979	A moment magnitude scale	Hanks T.C., Kanamori H.	Journal of Geophysical Research B: Solid Earth	2547
2009	An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics	Virieux J., Operto S.	Geophysics	2440
1988	Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change	Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R.	Sea-level changes: an integrated approach	2373
2003	A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities	Bruneau M., Chang S.E., Eguchi R.T., Lee G.C., O'Rourke T.D., Reinhorn A.M., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W.A., Von Winterfeldt D.	Earthquake Spectra	2364
1990	Applied geophysics. 2nd edition	Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E.	Applied geophysics. 2nd edition	2348