

QUÍMICA VERDE: A EVOLUÇÃO DE UM CONCEITO

Eduardo F. Sousa-Aguiar^a, João M. A. R. de Almeida^b, Pedro N. Romano^{b,*}, Rodrigo P. Fernandes^b e Yuri Carvalho^b

^aCENPES/Petrobras, Cidade Universitária, 21949-900 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

^bTecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21941-901 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Recebido em 06/03/2014; aceito em 15/05/2014; publicado na web em 22/07/2014

GREEN CHEMISTRY: THE EVOLUTION OF A CONCEPT. The topic “Green Chemistry” has gained great importance over recent years, being quoted in an increasing number of publications. This fact shows how concern over developing “greener” processes has played a prominent role in the scientific community. In this context, the scope of this work encompasses an analysis of the evolution of the theme since its conception to the present. This analysis elucidates how bibliographic output on “Green Chemistry” is distributed worldwide. Moreover, the main journals on the subject were listed and ranked, according to impact factor.

Keywords: green chemistry; sustainable chemistry; clean chemistry; sustainability.

INTRODUÇÃO

Química verde ou química para o desenvolvimento sustentável é um campo emergente que tem como objetivo final desenvolver as ações científicas e/ou processos industriais ecologicamente corretos.¹

O movimento relacionado com o desenvolvimento da Química Verde começou no início dos anos 1990, principalmente nos Estados Unidos, Inglaterra e Itália, com a introdução de novos conceitos e valores para as diversas atividades fundamentais da química, bem como para os diversos setores da atividade industrial e econômica correlatos.¹

Em 1987, divulgou-se o documento *Our Common Future* ou, como é mais conhecido, Relatório Brundtland. O relatório foi elaborado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento e introduziu o conceito de desenvolvimento sustentável como aquele que “satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”.²

A Química Verde tem por objetivo a viabilização de processos e produtos de maneira a evitar ou minimizar o impacto negativo causado ao homem e ao meio-ambiente. Os avanços na área visam a aumentar a segurança dos processos e também resolver questões mundiais como a mudança climática, produção de energia, disponibilidade de recursos hídricos, produção de alimentos e a emissão de substâncias tóxicas ao meio-ambiente.³

O progresso na Química Verde tem sido alcançado em diversas linhas de pesquisa, como na catálise,⁴ formulação de solventes menos nocivos ao ambiente e desenvolvimento de processos que utilizam matérias-primas renováveis.^{3,5} Além das linhas mais tradicionais, existem ainda diversos estudos relacionados a novas áreas da química, como, por exemplo, a sonoquímica, que busca aumentar rendimentos e reduzir gastos com insumos através do uso de ultrassom.⁶

Atualmente, o conceito de verde, ou sustentável, é, na opinião de diversos governantes e pesquisadores, essencial para alcançar metas sociais, ambientais e até mesmo econômicas. Por esse motivo, foram criados programas e centros de pesquisa focados no desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis em todo o mundo.³ Principalmente na última década, o número de centros de pesquisa em química verde se multiplicou, disciplinas de química e engenharia verde foram

criadas em diversas universidades, e até mesmo cursos de graduação voltados integralmente para a área foram abertos.⁷

Segundo Clark,⁸ a busca por tecnologias mais limpas é acompanhada pelo surgimento de novos desafios. Entretanto, esses desafios abrem portas para oportunidades de novas descobertas em química. Além disso, com o conceito de química verde, surge a oportunidade de recuperar a imagem, muito manchada, da indústria química.

Segundo Seidl *et al.*,⁹ existem três grandes categorias nas quais se encaixam os produtos e processos da Química Verde: o uso da matéria-prima renovável (biomassa) ou reciclada; aumento da eficiência energética, que significa consumir menos energia para produzir a mesma ou maior quantidade de produto; e a eliminação de substâncias persistentes, bioacumulativas e tóxicas. Poliakoff *et al.*¹⁰ citam diversos exemplos de aplicações dentro dessas categorias que já estão sendo exploradas na indústria química. Por exemplo, o uso de CO₂ como reagente,¹¹ o que reduz o consumo de petróleo e as emissões do gás na atmosfera e a redução no uso de solventes orgânicos, promovendo reações que utilizam apenas os reagentes e catalisadores. Além disso, pode-se destacar também o uso de enzimas em substituição a catalisadores químicos, demandando menos energia para os processos.

No cenário atual há uma grande taxa de geração de bibliografia na área de Química Verde. Portanto, o objetivo geral desse trabalho é fornecer uma análise dessa produção de acordo com a qualidade e um mapeamento do desenvolvimento do conceito ao redor do mundo. Esses resultados são extremamente úteis para auxiliar a busca daqueles que estão para iniciar um trabalho, ou que desejem se aprofundar no tema.

O índice de impacto e a qualidade das revistas

O índice de impacto de um periódico é uma métrica utilizada para refletir o número médio de citações que uma publicação do mesmo recebe. Como o número de citações está intimamente relacionado à importância de uma publicação, o índice de impacto é frequentemente utilizado para classificar os periódicos quanto à sua qualidade.

Qualis da Capes

Qualis é o conjunto de procedimentos utilizados pela Capes para estratificação da qualidade da produção intelectual dos programas de

*e-mail: pedronromano@gmail.com

pós-graduação. A classificação de periódicos é realizada pelas áreas de avaliação e passa por processo anual de atualização. Esses veículos são enquadrados em estratos indicativos da qualidade - A1 (o mais elevado), A2, B1, B2, B3, B4, B5 e C (com peso zero). Um mesmo periódico pode receber diferentes avaliações dependendo da área em que está classificado. O *Web Qualis* é o aplicativo que permite a classificação e consulta ao Qualis das áreas, bem como a divulgação dos critérios utilizados para a classificação de periódicos.¹²

METODOLOGIA

A primeira etapa da pesquisa foi procurar por resultados utilizando diferentes palavras-chave como: “*green chemistry*”, “*sustainable chemistry*” e “*clean chemistry*”. Para isso, foi utilizada como ferramenta de busca a base de dados *Web of Science*,¹³ na qual foi obtido o número de artigos publicados para cada palavra-chave e para todos os anos desde o primeiro ano de citação de cada uma. Com essa informação foi possível construir um gráfico mostrando a evolução do número de publicações para cada palavra-chave ao longo dos anos e, de posse desses dados, escolher o termo que melhor se refere ao tema.

Partindo-se da palavra-chave selecionada no método anterior, foram classificados os periódicos que contém o maior número de artigos publicados que citam o tema “Química Verde”. Esses periódicos foram classificados não só pelo número de artigos, mas também pelo seu índice de impacto. Além disso, as revistas também foram catalogadas segundo seu conceito no Qualis da Capes para as áreas de Engenharias II e Química.¹²

Com a intenção de analisar as contribuições de cada país, uma nova busca foi feita utilizando o termo “*green chemistry*”, filtrando por país de origem. A pesquisa restringiu-se apenas aos países com mais de 20 artigos publicados no tema em todo o horizonte temporal (1990-2013). Com isso foi possível identificar os países que mais publicam, mas sem levar em consideração o impacto dessas publicações. Portanto, para permitir uma análise mais aprofundada com relação à distribuição mundial dos artigos que citam “*green chemistry*”, gerou-se uma série de relatórios de citações utilizando a ferramenta do *Web of Science*,¹³ que permite calcular a quantidade de citações para uma dada busca. De posse desses dados, foi possível calcular uma média de citações por artigo para cada país, ou seja, um “índice de impacto” para o país.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Busca por palavra-chave

Após a realização de uma busca na plataforma *Web of Science*¹³ por diferentes palavras-chave, foi possível analisar a evolução na utilização de cada uma destas e verificar qual o termo mais empregado quando se trata de trabalhos relacionados à química verde.

A) “*Green chemistry*”

Na Figura 1 encontra-se um gráfico demonstrando a evolução, ao longo do tempo, do número de publicações fazendo uso da palavra-chave “*green chemistry*”.

É possível observar que o primeiro artigo utilizando o termo “*green chemistry*” foi publicado no ano de 1990. Até o ano de 1998, o número de artigos manteve-se praticamente constante, apresentando um aumento pouco significativo. A partir desse ano, houve um aumento exponencial desse número, quase atingindo a marca de 800 artigos no ano de 2013. Posto isso, é possível afirmar que a palavra-chave “*green chemistry*” tornou-se uma referência em trabalhos relacionados a Química Verde, como, a princípio, era de se esperar.

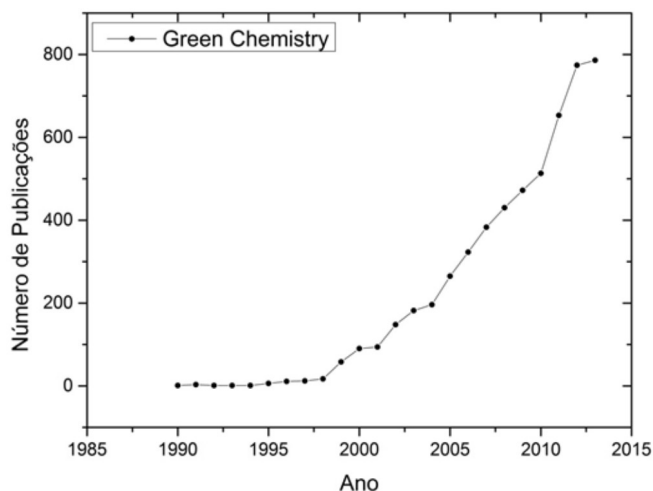


Figura 1. Evolução das publicações utilizando como palavra-chave “*green chemistry*”

B) “*Sustainable chemistry*”

Na Figura 2 encontra-se um gráfico demonstrando a evolução, ao longo do tempo, do número de publicações fazendo uso da palavra-chave “*sustainable chemistry*”.

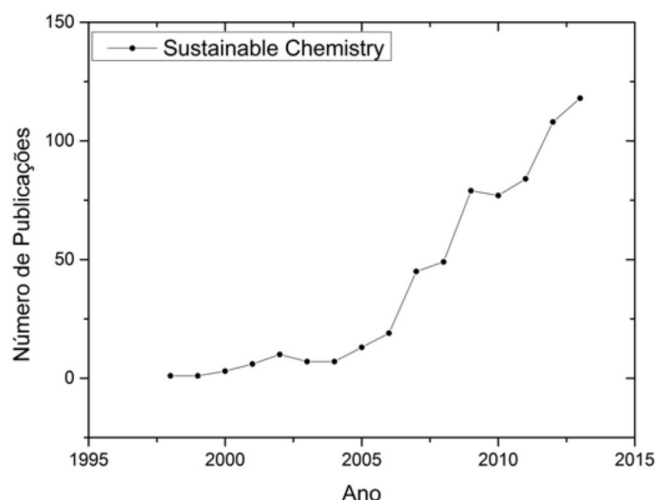


Figura 2. Evolução das publicações utilizando como palavra-chave “*sustainable chemistry*”

Diferentemente do item anterior, o termo “*sustainable chemistry*” foi utilizado pioneiramente no ano de 1998. Porém, a palavra-chave também se tornou uma referência em trabalhos de Química Verde apresentando um crescimento marcante nos anos decorrentes. No ano de 2013, existiam cerca de 120 publicações fazendo uso do conceito.

C) “*Clean chemistry*”

Na Figura 3 encontra-se um gráfico demonstrando a evolução, ao longo do tempo, do número de publicações fazendo uso da palavra-chave “*clean chemistry*”.

A expressão “*clean chemistry*” foi trazida à tona pela primeira vez em 1991 com a publicação de um artigo na revista *Chemistry & Industry*. Entretanto, diferentemente dos termos anteriores, a palavra-chave em questão não teve uma utilização consistente, tendo seu uso oscilado em poucos artigos durante os anos. Em 2013, nenhum artigo fez uso do termo, mostrando que o mesmo não conseguiu se difundir e se firmar como uma possível palavra-chave para os trabalhos de Química Verde.

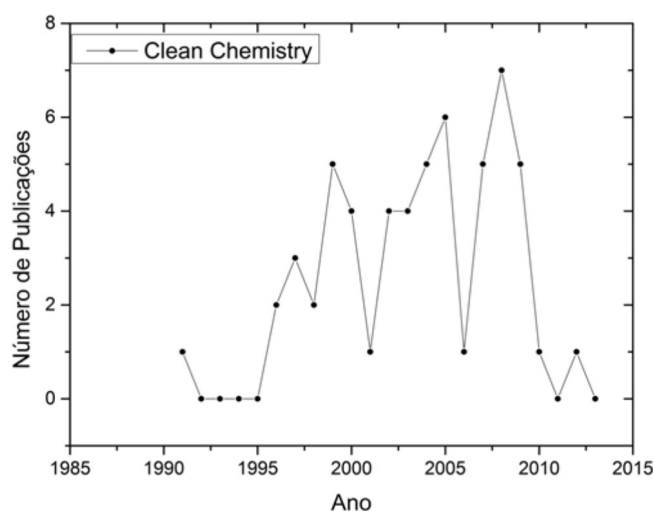


Figura 3. Evolução das publicações utilizando como palavra-chave "clean chemistry"

Revistas que mais publicam em Química Verde

Uma vez que se observou que o termo "green chemistry" é o mais utilizado como palavra-chave em publicações nessa linha, construiu-se a Tabela 1 que mostra o ranking de periódicos que mais publicam em Química Verde fazendo uso do mesmo.

A partir da análise da Tabela 1, é possível observar que nas primeiras posições encontram-se os periódicos *Green Chemistry*, *Tetrahedron Letters* e *Advanced Synthesis & Catalysis*. Vale ressaltar que a revista *Química Nova* encontra-se em 17º lugar com cerca de 50 publicações na linha de pesquisa, sendo o periódico brasileiro mais bem colocado.

A Figura 4 mostra um gráfico com o índice de impacto dos periódicos que mais publicam no tema Química Verde. Os resultados mostram que a maioria desses periódicos apresenta um índice de impacto maior que 2. Além disso, é importante observar que há mais de seis periódicos na lista que possuem índice de impacto maior que 5, mostrando que nesse conjunto aparecem revistas altamente respeitadas com alto número de citações como a *Angewandte Chemie*.

"Índice de impacto" dos países

De forma a avaliar a distribuição do número de publicações pelos diferentes países e identificar os maiores difusores de conhecimento na área de química verde, construiu-se a Tabela 2 com o objetivo de medir a participação de cada país na divulgação do conhecimento dessa área. Como métrica para essa participação utilizou-se o que definimos como o "índice de impacto" por país, que consiste na divisão entre o número de citações referentes aos artigos produzidos no país pelo número total de artigos publicados no país. A tabela foi construída com os 30 primeiros países no quesito "índice de impacto".

Ao analisar a Tabela 2, pode-se observar que a Holanda lidera com uma média de 39 citações por artigo publicado, seguida do Reino Unido e Japão. Apesar de países como Estados Unidos, China e Índia liderarem o ranking do número de publicações, a tabela mostra que os artigos publicados por esses países não são tão referenciados quando comparados com os de outros países que publicam menos, mas possuem uma média alta de citações por artigo. Como exemplo, a Dinamarca apresenta um número muito baixo de publicações, com apenas 20, mas se destaca com uma média de aproximadamente 22 citações por artigo, o que lhe garante a quarta posição no ranking do "índice de impacto".

Tabela 1. Ranking de periódicos que mais publicam em Química Verde

Posição	Periódico	País de Origem	Nº de Artigos
1º	Abstracts of Papers of the American Chemical Society	EUA	444
2º	Green Chemistry	UK	313
3º	Tetrahedron Letters	UK	168
4º	Advanced Synthesis & Catalysis	Alemanha	118
5º	Synlett	Alemanha	108
6º	Chemistry - A European Journal	-	101
7º	Angewandte Chemie - International Edition	Alemanha	100
8º	Journal of Chemical Education	EUA	92
9º	European Journal of Organic Chemistry	-	90
10º	Pure and Applied Chemistry	-	90
11º	Chemsuschem	Alemanha	84
12º	Synthetic Communications	UK	76
13º	Tetrahedron	UK	74
14º	Chemical & Engineering News	USA	73
15º	Synthesis - Stuttgart	Alemanha	55
16º	Green Chemistry Letters and Reviews	UK	50
17º	Química Nova	Brasil	49
18º	Journal of Molecular Catalysis A - Chemical	Holanda	44
19º	ACS Symposium Series	EUA	42
20º	Chinese Journal of Organic Chemistry	China	42
21º	Catalysis Today	Holanda	39
22º	Current Organic Chemistry	EUA	36
23º	Catalysis Letters	Alemanha	35
24º	Environmental Science & Technology	EUA	35
25º	Chimica Oggi - Chemistry Today	Itália	34
26º	Chinese Journal of Chemistry	China	34
27º	Applied Catalysis A - General	Holanda	33
28º	Monatshefte fur Chemie	Alemanha	33
29º	Chemcatchem	Alemanha	32
30º	Organic Process Research & Development	EUA	32
31º	Comptes Rendus Chimie	França	30
32º	RSC Advances	UK	30

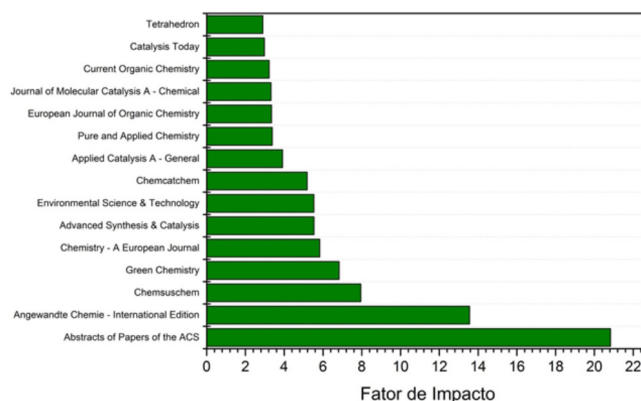


Figura 4. Índice de impacto dos periódicos que mais publicam no tema Química Verde

No caso do Brasil, sua posição não é muito prejudicada quando a classificação é feita por número de publicações, colocando-o em 17º no ranking. Porém, quando o critério utilizado é o "índice de impacto", sua posição cai para 26º.

Tabela 2. Ranking do “índice de impacto” por país

País	Artigos	Índice de Impacto
Holanda	84	39,11
UK	246	34,54
Japão	305	29,43
Suécia	43	26,09
Dinamarca	20	21,75
Alemanha	258	21,53
Suíça	71	21,48
Áustria	43	21,21
Eslovênia	30	20,93
Hungria	31	20,13
EUA	1297	17,85
França	280	17,53
Itália	219	17,17
Austrália	71	16,99
Polônia	80	16,18
Canadá	157	15,10
Portugal	73	14,56
China	661	12,90
Espanha	225	12,86
Arábia Saudita	39	11,59
Grécia	37	11,32
Bélgica	46	11,24
Taiwan	31	10,81
México	43	10,72
Tailândia	27	9,85
Brasil	195	9,49
Índia	512	9,40
Coreia do Sul	57	9,14
África do Sul	24	8,00
Rússia	47	7,74

Classificação dos periódicos de acordo com o Qualis da CAPES

Dentre os periódicos mais atuantes listados no item anterior, realizou-se uma pesquisa utilizando o Qualis da CAPES¹² a fim de avaliar a qualidade das revistas mais importantes na área de Química Verde. A Tabela 3 mostra a classificação das mesmas junto a CAPES.

Como é possível observar na Tabela 3, a maior parte das revistas está classificada como revistas A1, tanto na área de Engenharias II quanto na área de Química, classificação esta que representa a maior pontuação possível junto à CAPES. Da listagem total, somente um periódico, em cada área, apresenta conceito C, a menor pontuação do Qualis. A Figura 5 apresenta um gráfico mostrando a distribuição dos conceitos Qualis para os principais periódicos atuantes na área de Química Verde.

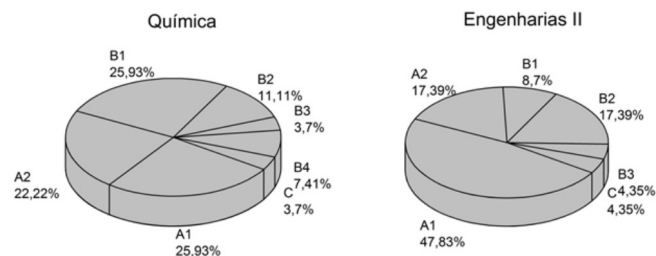
Analisando a Figura 5, percebe-se que, na área de Engenharias II, mais de 50% das revistas apresenta classificação A, enquanto somente 8% apresentam classificação C. No que tange a área da Química, o percentual de revistas A encontra-se abaixo dos 50%, porém ainda assim próximo desse valor. Cerca de 75% dos periódicos, nessa mesma área, estão classificados com os três maiores índices do Qualis (A1,A2,B1). Tais informações mostram que os periódicos relacionados à área de Química Verde são de qualidade reconhecida.

CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho mostram claramente que o tema

Tabela 3. Classificação dos periódicos pelo Qualis da CAPES

Periódico	Qualis – CAPES (Engenharias II)	Qualis – CAPES (Química)
Abstracts of Papers of the Amer Chem Society	-	C
Angewandte Chemie - International Edition	A1	A1
Chemsuschem	A1	A1
Green chemistry	A1	A1
Chemistry - A European Journal	A1	A1
Advanced Synthesis & Catalysis	A1	A1
Environmental Science & Technology	A1	A1
Chemcatchem	A1	A1
Applied Catalysis A - General	A1	A2
Pure and Applied Chemistry	B1	B1
European Journal of Organic Chemistry	A2	A2
Journal of Molecular Catalysis A - Chemical	A1	B1
Current Organic Chemistry	-	A2
Catalysis Today	A1	A2
Tetrahedon	A2	A2
Organic Process Research & Development	A2	B1
Synlett	C	B1
RSC Advances	B3	B1
Tetrahedon Letters	A2	B1
Catalysis Letters	A1	B1
Comptes Rendus Chimie	B1	B2
Monatshefte fur chemie	-	B2
Green Chemistry Letters and Reviews	-	B4
Synthetic Communications	B2	B3
Química Nova	B2	B2
Chinese Journal of chemistry	-	B4
Journal of chemical Education	B2	A2
Chimica Oggi - Chemistry Today	B2	-

**Figura 5.** Distribuição dos conceitos Qualis para os principais periódicos atuantes em Química Verde

Química Verde vem ganhando destaque na comunidade científica ao longo dos últimos anos. Isso fica evidente quando se analisa o crescimento expressivo do número de artigos ligados ao tema no período entre 1990 e 2013. Além disso, é possível observar que periódicos científicos com fatores de impacto maiores que 15, como a *Science*, publicam artigos relacionados ao assunto, também é importante ressaltar que existem periódicos dedicados a Química Verde como a *Green Chemistry* que apresentem um alto fator de impacto.

Com relação à distribuição geográfica da produção em Química Verde, fica evidente a liderança de países como os EUA e a Inglaterra. Analisando a origem dos periódicos de maior impacto na área é

possível notar que Alemanha, Reino Unido e EUA são os principais países de origem dos mesmos. Tais países também apresentam índices de impacto elevados, o que demonstra a grande participação dos mesmos na área de Química Verde. Quanto ao Brasil, é possível notar que, apesar de já existir um número de artigos considerável tratando sobre o assunto, a produção brasileira é pequena e pouco citada se comparada à do Reino Unido, por exemplo. Por esse motivo é importante incentivar que mais pesquisadores se dediquem ao tema e desenvolvam pesquisa de alto nível, publicando seus trabalhos em periódicos com bom fator de impacto. Nesse contexto, é necessário ressaltar que o *Web Qualis* da CAPES¹² é uma boa ferramenta para se consultar antes de se submeter um trabalho na área, já que de maneira geral as revistas bem classificadas no Qualis são periódicos com um bom fator de impacto, representando um conveniente meio de divulgação para o trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPQ pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; *Química Verde no Brasil 2010-2030*, CGEE: Brasília, 2010 (ISBN 978-85-60755-31-8).
2. Brundtland, H. G.; *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*, United Nations: Oxford, 1987.
3. Anastas, P. T.; Kirchof, M. M.; *Acc. Chem. Res.* **2002**, *35*, 686.
4. Sheldon, R. A.; *Chem. Commun.* **2008**, *29*, 3352.
5. Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T.; *J. Polym. Environ.* **2002**, *10*, 19.
6. Cintas, P.; Luche, J-L.; *Green Chem.* **1999**, *1*, 115.
7. Anastas, P.; Eghbali, N.; *Chem. Soc. Rev.* **2010**, *39*, 301.
8. Clark, J. H.; *Green Chem.* **1999**, *1*, 1.
9. Seidl, P. R.; Borschiver, S.; Freire, E.; Mota, C. J. A.; *Rev. Bras. Eng. Quim.* **2011**, *27*, 13.
10. Poliakoff, M.; Fitzpatrick, J. M.; Farren, T. R.; Anastas, P. T.; *Science* **2002**, *297*, 807.
11. Zonetti, P. C.; Letichevsky, S.; Gaspar, A. B.; Sousa-Aguiar, E. F.; Appel, L. G.; *Appl. Catal., A* **2014**, *475*, 48.
12. <http://www.qualis.capes.gov.br>, acessada em Janeiro 2014.
13. <http://www.webofknowledge.com>, acessada em Janeiro 2014.