

## 2

# Química Analítica Verde e sustentabilidade nas instituições de ensino e pesquisa

Considera-se de fundamental importância a reflexão crítica sobre a contribuição das instituições de ensino e pesquisa no uso das metodologias de Química Analítica. Nesse sentido, devem ser avaliados os riscos inerentes de alguns tipos de amostras, o uso elevado de reagentes e solventes químicos, o alto consumo de energia associado à automação, além dos resíduos e emissões poluentes resultantes dos vários passos dos processos analíticos. Trata-se do compromisso ético de desenvolver e oferecer metodologias analíticas verdes, como parte da avaliação dos custos ambientais e de segurança das práticas e procedimentos de Química Analítica atualmente adotados.

Neste capítulo, conceitua-se e discute-se a importância da Química Analítica no contexto do paradigma ecológico da Química, com especial atenção para a sustentabilidade das instituições de ensino e pesquisa. A partir das bases conceituais, apresentam-se os princípios da ‘Química Verde’ diretamente associados à ‘Química Analítica Verde’, ressaltando-se a necessidade de se implementar ferramentas de avaliação do ‘perfil verde’ dos métodos analíticos praticados por essas instituições à luz desses princípios. Na sequência, descrevem-se, de forma sintética, as principais estratégias da ‘Química Analítica Verde’ que poderão contribuir para a preservação ambiental e para a segurança dos pesquisadores e analistas químicos, em geral, e das instituições de ensino e pesquisa, em particular.

### 2.1.

#### A Química Analítica no contexto do paradigma ecológico da Química

Para muitos estudantes e para o público em geral, a maioria das idéias sobre a Química baseiam-se na capacidade dos princípios e das práticas químicas em criar novos materiais. A Química tem uma grande participação nos dias atuais com os inúmeros produtos fundamentais à humanidade. A sua presença pode ser destacada desde diversos combustíveis aos mais complexos medicamentos. Porém, a indústria

química também gera inúmeros inconvenientes como a formação de subprodutos tóxicos e a contaminação do ambiente e do próprio homem expostos a esses xenobióticos.

A má consciência de químicos e consumidores sobre os efeitos colaterais dos produtos químicos gerou nos pesquisadores uma nova visão dos problemas da Química chamada de "Paradigma ecológico", que visa colocar o conhecimento químico dentro da perspectiva do equilíbrio ambiental. Esta nova perspectiva, concebe uma química sustentável desde a síntese às aplicações, incluindo a avaliação dos métodos analíticos, a fim de evitar efeitos adversos. Isso é especialmente importante para a comunidade analítica que, dia após dia, usa grandes quantidades de reagentes e solventes para realizar análises de amostras nos mais diversos campos da Química.

Nos anos 1990, houve uma má consciência generalizada sobre os efeitos deletérios da química e dos efeitos colaterais dos métodos analíticos, que foi evidenciada no uso de reagentes e solventes tóxicos e a geração de resíduos perigosos. Esse foi o ponto de partida de esforços pioneiros para tornar os métodos analíticos “verdes”, através da minimização de riscos para os operadores por meio de procedimentos automatizados e sistemas fechados. Os resultados foram iniciativas como, o desenvolvimento de métodos analíticos “ambientalmente amigáveis” ou “métodos limpos”, propostos em 1994 (Guardia e Garrigues, 2011).

Nesse período, surgiu o conceito de “Química Responsável, Química Sustentável, ou Química Verde” (Anastas e Eghbali, 2010) e a convergência ética entre a Química e a preservação ambiental emergiu do movimento da Química Verde, sob a liderança de Paul Anastas, embora Cathcart tenha sido o primeiro a usar o termo “Química Verde” (Guardia e Garrigues, 2011) e o primeiro a utilizá-lo no título de um artigo científico (Linthorst, 2010).

O conceito de Química Verde também faz referência a dois outros conceitos - produção limpa e inovação verde, que já são consideravelmente difundidos em aplicações industriais de países com indústria química bem desenvolvida e que apresentam controle rigoroso na emissão de poluentes. Fundamentam-se na idéia de que processos químicos que causem danos ao meio ambiente devam ser substituídos por processos menos poluentes ou totalmente não poluentes. (Carioca et al., 2010).

De acordo com Namiesnik (2001), a introdução do conceito de Química Verde está intimamente relacionada com a difusão dos princípios de desenvolvimento sustentável e a alta tendência de visibilidade para sua implantação. Sobre o assunto, Carioca et al. (2010) ressaltam que a palavra “verde” é sinônimo de limpo e que a Química é o centro da questão ambiental; da sustentabilidade ambiental, social e econômica. Química Verde, portanto, representa a união dessas idéias, que representam o futuro almejado.

De fato, a filosofia da Química Verde pode agora ser considerada como o centro da Química Ecológica e, nesse contexto, a Química Analítica constitui uma ferramenta para determinar a qualidade do ar, da água e do solo e é também indispensável para fornecer os dados necessários para desenvolvimento de modelos para a decomposição de moléculas sintéticas tóxicas, a fim de reforçar a necessidade de conhecimentos sobre as substâncias químicas para estimação dos riscos ambientais da produção, transporte e utilização de produtos químicos.

Por outro lado, atividades analíticas podem também contribuir para danos ao ecossistema através da utilização de reagentes tóxicos e da geração de resíduos. As oportunidades oferecidas por essa disciplina devem, portanto, ser complementadas por uma série de compromissos com a preservação do meio ambiente, pelas atividades sociais dirigidas à população em geral, e especialmente pelas atividades acadêmicas das Instituições de Ensino e Pesquisa, a fim de demonstrar os benefícios da Química Analítica Verde.

O conceito de Química Verde tem tido grande impacto pelo fato de ultrapassar as pesquisas laboratoriais e atingir a indústria, a educação, o meio ambiente e o público em geral (Anastas e Eghbali, 2010).

A crescente demanda social por métodos analíticos e pela necessidade de metodologias rápidas, exatas, precisas, seletivas e sensíveis, também nos obriga considerar o uso de reagentes que sejam inócuos, ou pelo menos, menos tóxicos do que os anteriormente utilizados; reduzir drasticamente a quantidade de amostras, reagentes e solventes empregados; e minimizar, descontaminar e neutralizar os resíduos gerados. Por essas razões, uma Química Analítica segura e sustentável deve ser claramente estabelecida a partir do ponto de vista da aplicação prática.

A Figura 2.1 mostra a evolução esquemática dos principais objetivos da Química Analítica antes e depois do surgimento do paradigma ecológico, segundo Guardia e Garrigues (2011).



Figura 2.1 – Evolução da Química Analítica: período de transição e Química ecológica  
Fonte: Guardia e Garrigues, 2011.

Como pode ser observado na Figura 2.1, a busca por um equilíbrio entre o homem e a biosfera tem ampliado o interesse dos cientistas e analistas para além do foco principal das metodologias analíticas, conscientizando-os sobre os efeitos adversos potenciais de suas práticas. No entanto, Guardia e Garrigues (2011) afirmam que, em uma perspectiva mais ampla, uma ‘boa’ Química Analítica Verde deve se voltar para novos desafios, sem renunciar melhorias nos aspectos básicos dos métodos analíticos. Nessa perspectiva, os autores apontam para a necessidade de se encontrar um equilíbrio entre a qualidade dos métodos empregados e seu caráter ambientalmente responsável e seguro. Ilustram o esquema com exemplos de substituição de reagentes tóxicos por inócuos; de redução do tamanho da amostra; de racionalização do consumo de reagentes e solventes; e da manutenção ou melhoria da precisão, sensibilidade e seletividade dos métodos disponíveis. Caso contrário, a capacidade da Química Analítica em fornecer dados valiosos sobre a evolução, estabilidade e danos dos ecossistemas poderia ficar comprometida.

## 2.2.

### **Compromisso ético com a segurança do analista e com o meio ambiente**

A prevenção de riscos ambientais e a segurança dos analistas constituem princípios filosóficos, que se refletem no compromisso das organizações em geral, e em particular das instituições de ensino e pesquisa, de desenvolver métodos e procedimentos de Química Analítica cada vez mais ‘verdes’. A preservação da qualidade do ar, água e terra significa pensar nas gerações futuras. Evitar o uso de substâncias reagentes perigosas é a melhor maneira de garantir a segurança dos analistas e de seu ambiente de trabalho. Esses dois aspectos são complementares e resumem a sustentabilidade da Química Analítica Verde.

Tempos atrás, as razões para a utilização de métodos mais verdes eram baseadas nas vantagens oferecidas pela automação e miniaturização, a fim de reduzir os custos das análises e também aumentar a produtividade do laboratório. Essas foram as principais razões da implantação de métodos de injeção sequencial de análises ou multicomutação, ou do desenvolvimento de técnicas de preparação de amostras livres de solventes, técnicas como extração e microextração em fase sólida. No entanto, é claro que esses métodos analíticos têm um novo significado, quando considerados no contexto da Química Analítica Verde. Na verdade, a ausência de custos adicionais na implantação de metodologias verdes é um dos aspectos mais atraentes, uma vez que oferece uma oportunidade única de ser socialmente justa sem ser onerosa (Guardia e Garrigues, 2011).

Quando se pensa sobre as principais estratégias da Química Analítica Verde para evitar efeitos colaterais ao meio ambiente, observa-se que existe forte correlação entre os benefícios ao meio ambiente e ao analista que opera os equipamentos e procedimentos analíticos, devido à redução do consumo de reagentes e da amostra, através da automação, da miniaturização e detoxificação *on-line* de resíduos. A Figura 2.2 representa esquematicamente as principais estratégias da Química Analítica Verde, conforme conceituação de Guardia e Garrigues (2010).

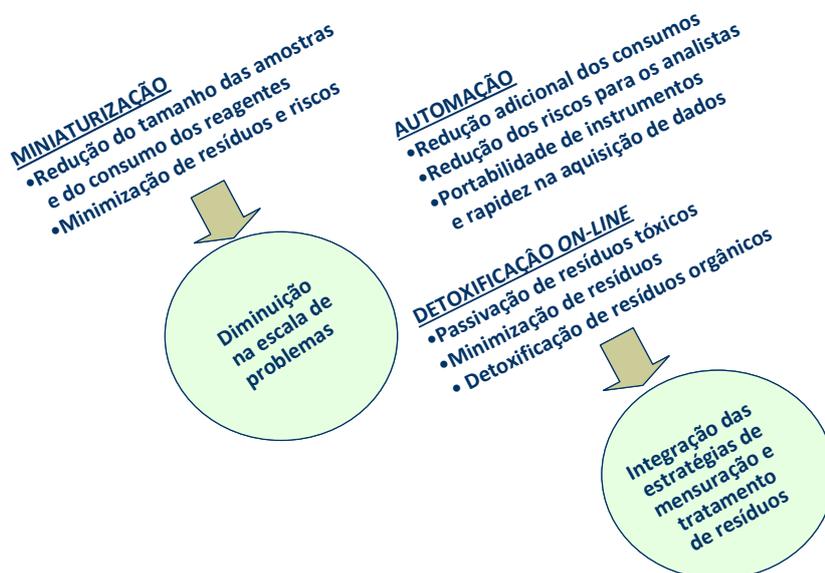


Figura 2.2 – Principais estratégias da Química Analítica Verde

Fonte: Guardia e Garrigues, 2011.

Excelentes resultados referem-se à redução de custos pelo uso reduzido do consumo de reagentes e ao aumento da produtividade do laboratório. Contudo, o aspecto mais importante que as estratégias de Química Analítica Verde podem oferecer é a abertura de uma nova perspectiva para o campo da Química, evidenciando-se o importante papel que ela exerce na prevenção e correção da poluição ambiental, combatendo-se o senso comum de que a Química é a principal fonte dos danos ambientais (Guardia e Garrigues, 2011).

Essa perspectiva mais ampla pode ser altamente benéfica para estimular novos desenvolvimentos em Química na chamada Economia Verde (Unep, 2011). Por essa razão, deve haver forte interesse, especialmente por parte das instituições de ensino e pesquisa, que metodologias de Química Analítica Verde sejam desenvolvidas, implementadas e difundidas.

Em termos operacionais, reveste-se de fundamental importância uma avaliação profunda dos métodos analíticos alternativos (mais ‘verdes’), identificando-se vantagens atuais e futuras da substituição dos métodos que vem sendo praticados. O uso da ferramenta da matriz *SWOT* (sigla em inglês do acrônimo *Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats*) fornece uma imagem clara para a comparação entre dois procedimentos alternativos. Essa ferramenta,

bastante conhecida na área de gestão e estratégia de organizações, consiste de uma avaliação dos pontos fortes e fracos de uma proposta de um novo método analítico ou uma mudança de condições operacionais. Segundo Guardia e Garrigues (2011), é possível avaliar as oportunidades e benefícios oferecidos pela proposta do método alternativo, bem como suas ameaças ou condições adversas para a implantação. A ferramenta *SWOT* fornece, portanto, uma comparação objetiva entre alternativas sugeridas, com um olhar no presente e no futuro.

Muitos esforços têm sido empregados para incorporar a análise estratégica na escolha e proposição de novos métodos de Química Analítica na perspectiva aqui abordada. Além da ferramenta *SWOT*, vêm sendo utilizados outros procedimentos para caracterização de métodos ‘verdes’, como a geração de pictogramas que buscam traduzir de forma gráfica seus efeitos negativos para o meio ambiente, bem como o alinhamento aos princípios da Química Verde aplicáveis em cada caso. Dentre essas ferramentas, destacam-se para fins da presente dissertação o *National Environmental Methods Index (NEMI)*; a matriz *SWOT* e pictogramas complementares baseados em critérios distintos dos adotados pelo *NEMI*. Essas ferramentas serão abordadas em detalhe no capítulo 4, pela sua importância para a fase de pesquisa de campo.

Além da avaliação de parâmetros verdes dos métodos de Química Analítica, salienta-se ainda a importância da divulgação para a conscientização dos usuários dos métodos sobre o novo papel da Química Analítica – ambientalmente responsável e operacionalmente segura. A título de ilustração, alguns esforços têm sido notados através de iniciativas de publicações totalmente dedicadas à Química Verde, como a revista *Green Chemistry* publicada pela Royal Society of Chemistry, no Reino Unido; e as publicações *Green Chemistry Letters and Reviews*, divulgadas desde 2007, por Taylor & Francis, também no Reino Unido. Além desses dois exemplos, muitas seções de revistas e jornais científicos têm focalizado questões das metodologias verdes, como ocorreu em 2008 com a revista “*Trends in Analytical Chemistry*”, editada pela Elsevier.

Mais recentemente, foram publicados três importantes livros sobre Química Analítica Verde. O primeiro, intitulado “*Green Analytical Chemistry*”, de autoria de Mihkel Koel e Mihkel Kaljurand e editado pela Royal Society of Chemistry Publishing em 2010. O segundo livro, sob o título “*Challenges in Green Analytical*

*Chemistry*”, foi organizado por Miguel de la Guardia e Salvador Garrigues e publicado pela Royal Society of Chemistry Publishing, em 2011. O terceiro, que foi recém-lançado em 2012, é o “*Handbook of Green Analytical Chemistry*”, que reúne capítulos de diversos autores, sob a coordenação de Miguel de la Guardia e Salvador Armenta.

### **2.3. Princípios da Química Verde e suas relações com a Química Analítica Verde**

Um dos objetivos mais importantes da Química Verde é buscar o desenvolvimento de métodos químicos mais seguros e que preservem o meio ambiente (Anastas e Eghbali, 2010). Essa busca pelo desenvolvimento de uma ‘química sustentável’ não é feita de forma acidental, inclui inovação, planejamento e concepção sistemática.

Pela importância crescente do tema na última década, instituições como a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC); *Organisation for Co-Operation and Development* (OECD) e a *Environmental Protection Agency* (EPA), dos EUA, mobilizaram-se e formaram um consenso sobre doze princípios que devem balizar o desenvolvimento da Química Verde (Carioca et al., 2010). São eles:

1. prevenção: é melhor prevenir a formação de resíduos do que tratar áreas poluídas;
2. eficiência atômica: os métodos sintéticos devem ser desenvolvidos para incorporar o máximo possível do número de átomos dos reagentes do produto final;
3. síntese segura: métodos sintéticos devem ser desenvolvidos de maneira que utilizem e gerem substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e o ambiente;
4. desenvolvimento de produtos seguros: deve-se buscar o desenvolvimento de produtos químicos que após o uso desejado não causem danos ao meio ambiente;
5. uso de solventes e substâncias auxiliares seguras: a utilização de substâncias auxiliares como solventes, agentes de separação, etc. deve ser evitado ao máximo, porém quando suas utilizações forem inevitáveis, as mesmas devem ser inócuas ou facilmente reutilizáveis;

6. busca pela eficiência energética: os impactos ambientais e econômicos causados pela geração de energia utilizada em um processo químico devem ser minimizados. Métodos que ocorram à pressão e temperatura ambientes necessitam ser desenvolvidos;
7. uso de matérias primas renováveis: o uso de biomassa como matéria prima deve ser priorizado no desenvolvimento de novas tecnologias e processos;
8. evitar a formação de derivados: processos que envolvem intermediários com grupos bloqueadores, proteção/desproteção, ou qualquer modificação temporária da molécula por processos físicos ou químicos devem ser evitados pois estes passos requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos;
9. catálise: o uso de catalisadores, tão seletivos quanto possível, deve ser adotado em substituição aos reagentes estequiométricos;
10. produtos degradáveis: os produtos químicos precisam ser desenvolvidos para a biocompatibilidade. Após serem utilizados não devem permanecer no ambiente, degradando-se em produtos inócuos;
11. análise em tempo real para prevenir a poluição: deve ser viabilizado o monitoramento e controle, em tempo real, durante o processo. A possibilidade de formação de substâncias tóxicas deve ser detectada antes de serem geradas;
12. química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes: a escolha das substâncias, bem como a sua utilização em um processo químico, devem procurar a minimização do risco de acidentes, como vazamentos, incêndios e explosões.

Os doze princípios da Química Verde abordam questões importantes para cientistas e engenheiros utilizarem no desenvolvimento de novos materiais, métodos e produtos. Esses princípios têm provado ser a fonte de soluções inovadoras para uma ampla gama de problemas no campo da Química e, em particular, na Química Analítica. Constituem as “regras do projeto” para orientar os químicos analíticos a atingirem a meta intencional da sustentabilidade no campo da Química Analítica (Keith et al., 2007). No entanto, segundo esses autores, dentre os doze princípios, apenas cinco se aplicam à Química Analítica Verde. São eles: prevenção (princípio 1); uso de solventes e substâncias auxiliares seguras (princípio 5); busca pela eficiência energética (princípio 6); evitar a formação de derivados (princípio 8); química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes (princípio 12).

Complementando a visão de Keith et al. (2007), Namiesnik (2001) ressalta que esforços adicionais devem ser feitos para adaptar os princípios da Química Verde para o campo da Química Analítica. O autor identificou quatro caminhos possíveis:

- eliminação ou redução de solventes e reagentes;
- redução de emissões;
- eliminação de reagentes tóxicos;
- redução do consumo de energia.

Essa proposta, no entanto, já foi ampliada por outros pesquisadores (Guardia e Garrigues, 2011) para seis estratégias básicas:

- análise de amostras não tratadas o mais diretamente possível;
- utilização de tratamentos alternativos (menos poluentes) de amostras;
- miniaturização e automação dos métodos;
- detoxificação *on-line* de resíduos;
- busca por reagentes alternativos;
- redução do consumo de energia.

Pela sua importância para a presente dissertação, dedica-se a próxima seção a esse tema.

#### **2.4. Principais estratégias para implantação da Química Analítica Verde**

Simplificação, seleção de reagentes, maximização das informações sobre a amostra, minimização do consumo de reagentes e detoxificação de resíduos são algumas das principais estratégias para implantação da Química Analítica Verde, no sentido de garantir a segurança dos analistas e de seu ambiente de trabalho e evitar danos ao meio ambiente. Essas estratégias podem ser operacionalizadas pela adoção de metodologias analíticas já existentes ou pela criação de novas.

A Figura 2.3 mostra de forma didática as estratégias que podem ser implementadas em um laboratório de Química Analítica, tendo em vista os objetivos e propósitos da Química Analítica Verde, conforme Guardia e Garrigues (2011).

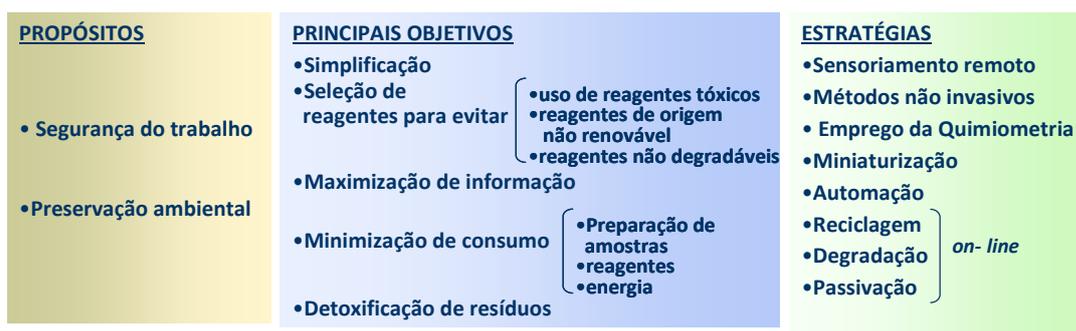


Figura 2.3 – Alinhamento das estratégias aos propósitos e objetivos da Química Analítica Verde

Fonte: Guardia e Garrigues, 2011.

Os objetivos da simplificação, ou seja, a redução de passos na execução de um processo analítico é uma consequência óbvia dos princípios básicos da Química Verde. A simplificação pode ser exemplificada pela utilização de sensoriamento remoto de parâmetros analíticos, sempre que possível, e de determinações não invasivas, ou pelo menos *on-line*. Tais métodos, além de minimizarem os riscos para o operador, fornecem informações diretamente do sistema a ser avaliado, sem qualquer consumo de reagentes, utilização de solventes ou tratamento de amostras, evitando assim, os efeitos colaterais dos métodos tradicionais de análise, que sempre requerem dissolução prévia da amostra e criam problemas de amostragem, transporte e estoques dessas amostras.

A seleção de reagentes não é específica da Química Analítica Verde e evita a utilização de reagentes tóxicos ou perigosos, tanto pela segurança do operador, como por razões ambientais, além de assegurar a escolha de produtos químicos obtidos a partir de fontes renováveis. Um fator chave é escolher os produtos facilmente degradáveis para utilização em procedimentos analíticos, a fim de facilitar a descontaminação de resíduos.

A miniaturização de amostras, de reagentes e de consumo de energia é um dos grandes objetivos da Química Analítica verde, pois além de aumentar a segurança, reduz os custos e fornece métodos adequados para utilização de microamostras, sempre que for necessário. O uso de amostras miniaturizadas e a automação de todas as etapas do processo de análise são estratégias complementares na Química Analítica moderna. Além disso, novos desenvolvimentos de processos com baixo consumo de energia, como ultrassons,

técnicas pressurizadas e procedimentos de microondas assistidas, são de interesse para o métodos analíticos verdes em termos de consumo de energia, e também porque aceleram a produtividade do laboratório.

Certamente, a automação é a melhor estratégia disponível para métodos analíticos verdes, em parte por causa da redução do consumo, maior frequência de amostragem e, por outro lado, porque a automação é a melhor maneira de integrar todos os passos de um método, incluindo a detoxificação *on-line* dos resíduos.

Guardia e Garrigues (2011) destacam que a inclusão da reciclagem, degradação ou, pelo menos, tratamento de resíduos no final de qualquer medição analítica é a melhor maneira de evitar riscos ambientais e garantir procedimentos inócuos, mesmo que em certas situações os componentes da amostra a ser determinada ou os reagentes utilizados sejam perigosos ou tóxicos.

A incorporação de estratégias de reciclagem, tais como precipitação ou destilação, e de abordagens baseadas em processos biológicos, fotoquímicos, térmicos ou oxidação, pode assegurar que a mineralização completa de reagentes orgânicos ocorra sem reduzir a frequência de amostragem. Por outro lado, em relação aos resíduos analíticos que contenham metais ou outros resíduos não degradáveis, a utilização de estratégias de passivação *on-line* (baseadas na adsorção química ou coprecipitação) podem reduzir a escala de resíduos analíticos de quilogramas para gramas e minimizam os riscos de contaminação através da modificação da natureza química dos poluentes não degradáveis.

A Quimiometria é a melhor maneira de maximizar as informações sobre os métodos a partir das amostras. Ela é uma das melhores ferramentas da Química Analítica nos dias atuais, porque oferece os recursos para reduzir a necessidade de calibrações externas e procedimentos específicos para determinar cada uma das propriedades ou componentes de uma amostra. A Quimiometria pode, portanto, ser considerada como uma estratégia verde básica, que pode ser empregada para melhorar métodos não invasivos, a fim de se obter informações precisas a partir de sinais diretos. Isso evita uma grande quantidade de reagentes e consumo elevado de energia e de trabalho.

A Figura 2.4 resume de forma didática as estratégias da Química Analítica Verde, os benefícios para os analistas e para o meio ambiente e os custos decorrentes da substituição dos métodos praticados por métodos analíticos verdes.



Figura 2.4 – Benefícios e custos da implantação das estratégias da Química Analítica Verde

Fonte: Guardia e Garrigues, 2011.

Os componentes básicos, como *software*, e equipamentos com a finalidade de automatizar medições, juntamente com os métodos miniaturizados para preparação de amostras, representam custos adicionais incorridos por um laboratório de Química Analítica, que tenha a intenção de tornar os métodos de sua rotina ‘mais verdes’. Alguns elementos, como sofisticados métodos miniaturizados para preparação de amostras, são relativamente caros. De qualquer forma, estes custos extras podem ser compensados pela redução do uso de materiais de consumo.

Segundo Guardia e Garrigues (2011), a relação custo/benefício da implantação de métodos ‘verdes’ de Química Analítica tem se mostrado bastante favorável. A adaptação para o novo paradigma descrito na seção 2.1 tem trazido grandes benefícios para as instituições ambiental e socialmente responsáveis, tanto do ponto de vista financeiro, quanto do ponto de vista de imagem e credibilidade (ativos intangíveis).

De fato, a importância da implantação das metodologias analíticas ‘verdes’ não está relacionada apenas com os resultados financeiros compensadores da redução de custos de tratamentos, menor consumo de reagentes e de energia, mas sobretudo com o compromisso ético das organizações atuantes na área de Química Analítica com a segurança dos analistas e do seu ambiente de trabalho e com a preservação do meio ambiente, na perspectiva das gerações futuras.

## 2.5.

### **O papel das instituições de ensino e pesquisa no desenvolvimento da Química Analítica Verde**

Não obstante a presença dos temas ‘responsabilidade social’ e ‘sustentabilidade ambiental’ no debate acadêmico e nas grades curriculares, ainda são poucos os casos em que se observa na prática sua incorporação de forma orgânica no dia-a-dia das instituições de ensino e pesquisa (Santos, 2009).

No entanto, de acordo com Tauchen e Brandli (2006), a consciência em torno da sustentabilidade (amplo senso) tem envolvido diferentes camadas e setores da sociedade em nível mundial, incluindo as instituições de ensino e pesquisa. Para esses autores, as universidades e instituições de C&T (ICT) necessitam praticar aquilo que ensinam.

Desde o início da década de 90, inúmeras iniciativas de conscientização marcaram o ambiente acadêmico, destacando-se declarações que tinham como objetivo não só definir uma instituição de ensino e pesquisa sustentável, como também promover a incorporação da sustentabilidade em suas atividades e operações. Ressalta-se a Declaração de Talloires, de outubro de 1990, que constituiu o primeiro comunicado oficial estabelecido pelos líderes de universidades. Visava estabelecer um compromisso para se atingir a sustentabilidade no ensino superior. A título de ilustração, citam-se ainda outros referenciais normativos dessa natureza, como as Declarações de Halifax (1991), de Kyoto (1993), de Swansea (1993) e de Haga (2000, 2002).

Em geral, associam-se ao dia-a-dia das universidades e ICT consumos elevados de energia, de água e substâncias químicas, bem como a produção de grandes quantidades de resíduos sólidos e até perigosos, como a maioria dos resíduos químicos. Essas instituições são também grandes geradoras de efluentes líquidos, geralmente constituídos por elevadas cargas orgânicas e substâncias químicas, provenientes dos laboratórios (Lopes et al., 2005, *apud* Dea Jr. et al., 2010). Lopes et al. incluem ainda questões de mobilidade de e para os campi universitários, que acarretam impactos no nível de ruídos, no tráfego rodoviário e na poluição atmosférica das comunidades em que estão localizados (Lopes et al., 2005).

Nesse contexto, na opinião de diversos autores, as universidades e ICT encontram-se em posição privilegiada para melhorar o comportamento ambiental, pois, se por um lado são geradoras de problemas ambientais, por outro lado dispõem do conhecimento e competências necessárias para abordar esses mesmos problemas (Graedel, 2001; 2002; Shriberg, 2002; Fouto, 2002; Tauchen e Brandli, 2006; Madeira, 2008 e Santos, 2009).

Na perspectiva da contribuição das instituições de ensino e pesquisa para o desenvolvimento da Química Analítica Verde, destacam-se duas vertentes:

- a primeira, refere-se à questão educacional no ensino da Química e em disciplinas multidisciplinares relacionadas ao desenvolvimento sustentável e à responsabilidade dessas instituições na formação dos futuros tomadores de decisão, como “promotoras do conhecimento”;
- a segunda refere-se à implantação de métodos analíticos mais ‘verdes’, servindo de modelos e exemplos de boas práticas para outras instituições congêneres que ainda não se encontram despertadas para as questões socioambientais.

Com relação à primeira vertente, há poucos estudos voltados à formação de profissionais da área de Química que se ocupem da discussão do paradoxo presente no discurso da Química Verde, quando a noção de prevenção de poluição significa, muitas vezes, apenas a promoção de alternativas menos perigosas de se realizar as mesmas coisas, principalmente aquelas de caráter tecnocientífico industriais. Ou seja, o discurso da “Química Ambientalmente Correta” parece trazer ainda um resquício da crença de que, se houver o desenvolvimento de novas rotas sintéticas ou compostos químicos inócuos ou menos perigosos ao ser humano e ao ambiente, surgiriam oportunidades de pelo menos minimizar ou mitigar os riscos existentes. Tal convicção parece não ser mais possível, pois a sociedade atual tornou-se uma sociedade de risco repleta de imponderações, de riscos não evidentes, individuais e globais, distribuídos de maneira desigual entre todos os seres humanos do planeta (Beck, 1992, *apud* Correia e Zuin, 2009).

No Brasil, apesar da urgência da incorporação dos princípios da Química Verde na formação inicial e continuada de profissionais da Química pelas mais diversas instituições (setores acadêmicos e industriais, sociedades científicas, agências de regulamentação, organizações governamentais e não governamentais),

a sua inserção ocorre basicamente por meio de eventos no País, em particular cursos de curta duração, restringindo-se à apresentação de alguns conteúdos ou tópicos de maior apelo (Corio e Cássio, 2008).

Os avanços obtidos em termos da inserção da dimensão ambiental no campo da educação têm se mostrado um grande desafio para o conjunto das instituições de ensino e pesquisa do País. Nas palavras de Zuin e colaboradores (2009), “dado que a ambientalização curricular pode ser definida como um processo complexo de formação de profissionais que se comprometam continuamente com o estabelecimento das melhores relações possíveis entre sociedade e natureza, contemplando valores e princípios éticos universalmente reconhecidos, o desafio de sua inserção não se esgota nos espaços curriculares tradicionais (vulgo disciplinares), mas demanda a totalidade das práticas e políticas acadêmicas de ensino, pesquisa, extensão e gestão, ou seja, os pilares sobre os quais se estrutura a nossa idéia contemporânea de universidade” (Zuin et al., 2009, p. 23).

Quanto à segunda vertente - implantação de métodos analíticos mais ‘verdes’, as universidades e ICT reúnem com êxito o conhecimento local e global, criando sinergias com elevado potencial de desenvolvimento de novas soluções de Química Analítica em redes de pesquisa cooperativas (Owens; Halfacre-Hitchcock, 2006).

Em síntese, o desenvolvimento sustentável é o grande desafio das universidades no século XXI. Dentro de um amplo espectro de desafios e oportunidades, as estratégias utilizadas pelas universidades e ICT no campo da Química Analítica Verde poderão abranger desde a definição de princípios e referenciais normativos até a implantação de práticas e procedimentos sustentáveis, como as abordadas anteriormente na seção 2.4.

Pelo levantamento realizado na base de dados Web of Science, na fase exploratória da presente pesquisa, acredita-se que as instituições de ensino e pesquisa na área de Química Analítica Verde encontram-se bem posicionadas para avaliar os métodos analíticos segundo uma visão crítica e para dirigir ações públicas nessa área. São elas que ensinam os futuros decisores, que lhes promovem a informação, as ferramentas e as competências essenciais para um bem comum numa visão de longo prazo.

## 2.6. Considerações finais sobre o capítulo

Buscou-se demonstrar a importância da Química Analítica no contexto do paradigma ecológico da Química, com especial atenção para a sustentabilidade das instituições de ensino e pesquisa. Juntamente com as bases conceituais, apresentaram-se os princípios da ‘Química Verde’ diretamente associados à ‘Química Analítica Verde’, ressaltando-se a necessidade de se implantar ferramentas de avaliação do ‘perfil verde’ dos métodos analíticos praticados por essas instituições à luz dos princípios aplicáveis.

Essa visão contribuirá de forma decisiva para o enquadramento e seleção adequada das ferramentas de avaliação de métodos e práticas de Química Analítica. Nesse sentido, especial atenção deve ser dada às seguintes ferramentas: (i) pictograma *NEMI*, baseado em quatro critérios definidos *pelo Green Chemistry Institute*, dos EUA; (ii) pictogramas complementares, focalizando outros critérios, além daqueles do pictograma *NEMI*; e (iii) matriz *SWOT* para avaliação estratégica de métodos analíticos, conjugando a visão atual (pontos fortes e fracos do método) à visão futura (ameaças e oportunidades).

As principais estratégias da ‘Química Analítica Verde’ foram aqui apresentadas de forma resumida, mas serão detalhadas no próximo capítulo pela sua importância para a fase propositiva da pesquisa. Particularmente, para a formulação de proposições de substituição ou revisão das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio por alternativas ‘mais verdes’. Esse tema será, portanto, retomado segundo uma visão prática no capítulo 5. Finalmente, ressaltou-se o papel das instituições de ensino e pesquisa no desenvolvimento e disseminação de boas práticas de ‘Química Analítica Verde’, tendo em vista a influência que essas instituições exercem sobre a sociedade, contribuindo para a educação de indivíduos formadores de opinião e futuros gestores no paradigma ecológico da Química.