

Adubação Foliar

*Fundamentos Científicos e
Técnicas de Campo*

Adubação Foliar

Fundamentos Científicos e Técnicas de Campo

Victoria Fernández
Thomas Sotiropoulos
Patrick Brown

Tradução do original em inglês
Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices,
publicado pela International Fertilizer Industry Association,

por Arnaldo Antonio Rodella

Engenheiro Agrônomo, ESALQ, USP
Mestre e Doutor em Química, UNICAMP
Pós-Doutorado, Soil Science Department, Wisconsin University, EUA
Livre-Docente, ESALQ, USP
Professor Associado do Deptº de Ciências Exatas, ESALQ, USP



São Paulo, SP

2015

Revisão: Fernanda Latanze Mendes Rodrigues
Diagramação: Silvia Regina Stipp
Layout: Claudine Aholou-Putz
Imagens: Hélène Ginét
Fotos da capa: Maçã (Bigstock), Trigo (123RF), Pistache, Melão (iStockphoto)



Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal
Av. Paulista, 726 – Ed. Palácio 5ª Avenida, Cj 1307 - Bela Vista
Cep: 01310-910 – São Paulo – SP
Tel: (11) 3251-4559 / 3251-4563 / 3263-0321
Fax: +33 1 53 93 05 45/ 47
E-mail: abisolo@abisolo.com.br
Website: www.abisolo.com.br

Tiragem: 1ª edição – 2015 – 2.000 exemplares

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Fernández, Victoria

Adução foliar: fundamentos científicos e técnicas de campo / Victoria Fernández,
Thomas Sotiropoulos e Patrick Brown. -- São Paulo : Abisolo, 2015. --
150 p. : il.

Tradução do original em inglês: Foliar Fertilization: scientific principles and
field practices, por Arnaldo Antonio Rodella.
ISBN: 978-85-69084-00-6

1. Adução foliar I. Título II. Sotiropoulos, T. III Brown, P. IV. Rodella, A.A., trad.

CDD 631.8
F363a

*É proibida a reprodução total ou parcial, por quaisquer meios,
sem a autorização por escrito do autor e da editora*

IMPRESSO NO BRASIL
PRINTED IN BRAZIL

Apresentação

A Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal – ABISOLO foi fundada em 2003 com o objetivo de congregiar as Empresas de Fertilizantes Especiais, compostos de fertilizantes foliares, orgânicos, organominerais, minerais, biofertilizantes, condicionadores de solo e substratos para plantas, ou outras empresas da cadeia produtiva que se enquadram na categoria de associado setorial. Além de representar o setor empresarial, no qual atua defendendo seus interesses, promovendo sua integração com órgãos governamentais e entidades representativas da indústria e da sociedade, atua na difusão de conhecimento, novas tecnologias e marcos regulatórios, contribuindo de maneira efetiva para a sustentabilidade na agricultura nacional.

Com um quadro associativo contendo mais de 80 empresas de tecnologias em nutrição vegetal, a ABISOLO se consolida como uma entidade que representa o setor com forte atuação no mercado de especialidades, dentre eles o de fertilizantes para aplicação foliar, tornando-se uma referência nacional e internacional na compreensão dos conceitos técnicos e científicos que norteiam sua utilização. Neste sentido, a ABISOLO apoia a publicação no Brasil do livro intitulado *Adubação Foliar: Fundamentos Científicos e Técnicas de Campo* visando apresentar resultados de pesquisas, ensaios e observações de campo que demonstram a evolução das técnicas de formulação e aplicação dos fertilizantes foliares.

Este livro é importante para a evolução do conhecimento em adubação foliar, pois contempla fundamentos que permitem o entendimento do manejo agrônomo desta modalidade de aplicação dos nutrientes, possibilitando relacionar as propriedades físico-químicas das formulações com fatores ambientais, fisiológicos e biológicos que contribuem para maior resposta a esta adubação. Além disso, com esta publicação a ABISOLO disponibiliza informações que servem de base para tornar a fertilização foliar uma ferramenta cada vez mais utilizada na busca pelo aumento de produtividade das culturas.

Para atender às exigências de um mercado crescente e rentável que se moderniza constantemente, a ABISOLO oferece aos seus associados um Programa Interlaboratorial com elevado padrão de excelência, para avaliação dos fertilizantes foliares, sendo uma referência para o setor e órgãos de regulamentação. Desta forma, a ABISOLO incorpora a força e a representatividade deste importante segmento de fertilizantes foliares que está relacionado ao desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira.

São Paulo, 15 de Abril de 2015

Clorivaldo Roberto Leveiro
Presidente da ABISOLO

Sumário

Sobre o livro	9
Sobre os autores	9
Agradecimentos	11
Lista de abreviações, acrônimos e símbolos	11
1. Introdução e escopo	13
1.1. Uma breve história da adubação foliar	13
2. Mecanismos de penetração na planta	15
2.1. Papel da estrutura e da morfologia da planta	18
2.1.1. Cutículas e suas estruturas epidérmicas especializadas	18
2.1.2. Efeito da topografia: micro e nano estrutura da superfície da planta	22
2.2. Vias e mecanismos de penetração	23
2.2.1. Permeabilidade cuticular	23
2.3. Conclusões	28
3. Propriedades físico-químicas das soluções de pulverização e seu impacto na penetração	30
3.1. Fatores determinantes na retenção, molhamento, espalhamento e taxa de penetração foliar	31
3.1.1. Concentração	31
3.1.2. Solubilidade	31
3.1.3. Massa molar	32
3.1.4. Carga elétrica	32
3.1.5. pH da solução	33
3.1.6. Ponto de deliquescência	33
3.2. Ambiente	34
3.3. Formulações e adjuvantes	35
3.3.1. Compostos minerais aplicados em pulverizações foliares	35
3.3.2. Aditivos de formulação: adjuvantes	37
3.4. Conclusões	44
4. Fatores ambientais, fisiológicos e biológicos que afetam a resposta das plantas à adubação foliar	46
4.1. Introdução	46
4.2. Idade, superfície, ontogênese e homogeneidade da folha e desenvolvimento do dossel	48

4.3. Espécies de plantas e variedades	54
4.4. Efeito do ambiente sobre a eficácia dos nutrientes aplicados via foliar	57
4.4.1. Luz	58
4.4.2. Temperatura	60
4.4.3. Umidade	61
4.5. Resumo dos efeitos do ambiente na resposta das plantas à adubação foliar	64
4.6. Mobilidade e transporte de nutrientes	65
4.7. Conclusões	75
5. Anos de prática – o aprendizado obtido no campo	77
5.1. Tecnologia de aplicação por pulverização	77
5.2. Formulações foliares e tecnologia de aplicação	79
5.3. Justificativa biológica para o uso de fertilizantes foliares	79
5.3.1. Papel da fenologia da cultura e do ambiente na resposta da planta	80
5.3.2. Influência do ambiente na eficácia das aplicações foliares durante a primavera	81
5.3.3. Eficácia das aplicações foliares para florescimento e formação de grãos nas grandes culturas	87
5.3.4. Adubação foliar durante os picos de demanda de nutrientes	89
5.3.5. Aplicações de pós-colheita e final de estação	93
5.3.6. Fertilização foliar e qualidade da colheita	93
5.4. Impacto do estado nutricional da planta sobre a eficácia dos fertilizantes foliares	94
5.5. Fontes e formulação de nutrientes para pulverização foliar	97
5.6. Toxicidade	101
5.7. Conclusões	106
6. Considerações regulatórias e ambientais	108
6.1. Normas regulatórias	108
6.2. Considerações sobre qualidade ambiental e alimentar	109
6.3. Conclusões	111
7. Perspectivas da adubação foliar	113
7.1. Conclusões	115
8. Referências	119

Sobre o livro

A adubação foliar é uma estratégia de nutrição de culturas amplamente utilizada e de importância crescente no mundo todo. Usados com sabedoria, os fertilizantes foliares podem ser mais amigáveis ambientalmente e melhor orientados para o objetivo do que a fertilização do solo, embora as respostas das plantas à aplicação foliar de nutrientes sejam variáveis e muitos de seus princípios continuem a ser mal compreendidos.

O objetivo deste livro é fornecer informações e esclarecimentos atualizados sobre as bases científicas e as respostas à fertilização foliar com referência aos determinantes ambientais, fisiológicos e físico-químicos. São discutidas informações extraídas da pesquisa, ensaios e observações de campo, bem como a evolução das técnicas de formulação e aplicação.

Sobre os autores

Victoria Fernández

Forest Genetics and Ecophysiology Research Group, School of Forest Engineering, Technical University of Madrid (Universidad Politécnica de Madrid), Madrid, Espanha.

Victoria Fernández ocupa o cargo de pesquisadora na Universidade Técnica de Madrid, Espanha. Recebeu o grau de Bacharel em Ciências em Horticultura pela University College, em Dublin, Irlanda, e Ph.D. na Humboldt University de Berlim, Alemanha. Por mais de 12 anos, Dra. Fernández tem implementado abordagens de pesquisa básica e aplicada à adubação foliar como um meio para melhorar a eficácia da aplicação foliar e tem publicado vários artigos revisados por pares sobre este tema. Atualmente, dedica-se à análise das propriedades físico-químicas da superfície das plantas sob os pontos de vista ecofisiológico e agrônomico e também sobre suas interações com os agroquímicos aplicados via foliar.

Thomas Sotiropoulos

Ministry of Rural Development and Food, Greek Agricultural Organization 'Demeter', Pomology Institute, Naoussa, Grécia.

Thomas Sotiropoulos obteve os graus de Bacharel em Ciências em Agricultura pela Aristotle University of Thessaloniki, Grécia, em 1993, Mestre em Melhoramento de Plantas e Fisiologia Vegetal, em 1996, e Ph.D. pela mesma Universidade, em 1999. Dr. Sotiropoulos é atualmente Pesquisador Associado na organização agrícola grega “Demeter”, Pomology Institute, Naoussa. Seus principais interesses incluem pesquisa aplicada e fundamental referente à adubação, bem como criação e avaliação de cultivares, principalmente em fruteiras de clima temperado. Participa de vários projetos de pesquisa em âmbito nacional e europeu. Publicou vários artigos revisados por especialistas sobre os temas citados. Também atuou como professor em tempo parcial na School of Agriculture of the Aristotle University of Thessaloniki e no Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki.

Patrick Brown

Professor, Department of Plant Sciences, University of California, Davis, California, EUA.

Patrick Brown recebeu o grau Bacharel em Ciências (Hons) em agronomia e bioquímica na University of Adelaide, Austrália, em 1984, e o Ph.D. em agronomia e desenvolvimento agrícola internacional pela Cornell University, EUA, em 1988. Atualmente, Dr. Brown é professor de Nutrição de Plantas do Departamento de Ciências Vegetais da University of California, em Davis. Sua pesquisa enfoca o papel dos micronutrientes no crescimento e desenvolvimento das plantas e abrange desde pesquisa em biologia fundamental até aplicação em campo e extensão. Dr. Brown é autor de 150 artigos científicos e de livros e capítulos de livros, com contribuições significativas na área da fisiologia do boro, papel do níquel na biologia vegetal e mecanismos de transporte de elementos minerais nas plantas. A pesquisa atual centra-se na otimização do uso de nutrientes na cultura de frutíferas e desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão para produtores. Dr. Brown atuou como Diretor de Programas Internacionais na Universidade da Califórnia, Davis, e como Presidente do International Plant Nutrition Colloquium, bem como frequentemente atua como consultor em organizações governamentais, industriais e de produtores agrícolas.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos diversos colegas da academia e da indústria de fertilizantes que responderam às suas frequentes indagações e pedidos de informações. Os autores são especialmente gratos aos agricultores e consultores que foram importantes em sua formação e que em última análise demonstraram o que funciona, o que não funciona e o que não faz sentido. Ainda há muito a se aprender!

Lista de abreviações, acrônimos e símbolos

APT	adaptação ao progresso técnico (<i>como usado no livro</i>)
B	boro
$B(OH)_3$ or H_3BO_3	ácido bórico
Ca^{2+}	íon cálcio
$CaCl_2$	cloreto de cálcio
$Ca(H_2PO_4)_2$	fosfato de cálcio
$Ca(NO_3)_2$	nitrato de cálcio
CE	Comissão Européia
Cu	cobre
DAFP	dias após o florescimento pleno
EDDHA	ácido etilenodiamino-di(2-hidroxi5-sulfofenil)acético
EDDS	ácido etilenodiamino-disuccínico
EDTA	ácido etilenodiamino-tetraacético
EUA	Estados Unidos da América
Fe	ferro
$FeCl_3$	cloreto férrico
$Fe(NO_3)_3$	nitrato férrico
HEDTA	ácido hidroxietilenodiaminatriacetato-triacético
H_3PO_4	ácido fosfórico
IDHA	ácido iminodissuccínico
K	potássio
$kg\ ha^{-1}$	quilograma por hectare
KCl	cloreto de potássio, também conhecido como muriato de potássio (MOP)
K_2CO_3	carbonato de potássio
KH_2PO_4	fosfato monopotássico
K_2HPO_4	fosfato dipotássico
KM	metalosato de potássio

KNO_3	nitrato de potássio
K_2SO_4	sulfato de potássio
KTS	tiosulfato de potássio
lbs acre ⁻¹	libras por acre
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	magnésio
mg kg ⁻¹	miligrama por quilograma
mg L ⁻¹	miligrama por litro
MgCl_2	cloreto de magnésio
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	nitrato de magnésio
MgSO_4	sulfato de magnésio
MKP	fosfato de monopotássio
mM	milimol
Mn	manganês
mN m ⁻¹	milinewton por metro
MnSO_4	sulfato de manganês
Mo	molibdênio
N	nitrogênio
N. do T.	nota do tradutor
Na	sódio
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	bórax
$\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$	octoborato de sódio
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	dihidrogênio fosfato de amônio
$(\text{NH}_4)_5\text{P}_3\text{O}_{10}$	tripolifosfato de amônio
Ni	níquel
nm	nanômetro
P	fósforo
³² P	radioisótopo de fósforo
PD	ponto de deliquescência
PHP	polihidroxifenilcarboxilato
PO_4^{-3}	fosfato
$\text{PO}(\text{NH}_2)_3$	triamida fosfórica
Q10	coeficiente de temperatura
Rb	rubídio
S	enxofre
$\mu\text{g cm}^{-2}$	micrograma por centímetro quadrado
μL	microlitro
μM	micromolar
UE	União Européia
UV	ultravioleta
Zn	zinco
ZnSO_4	sulfato de zinco
°	grau
°C	grau Celsius

1. Introdução e escopo

A adubação foliar é uma ferramenta importante para a gestão sustentável e produtiva das culturas. No entanto, a compreensão atual dos fatores que influenciam a eficácia final das aplicações foliares permanece incompleta. Este livro oferece uma análise integrada dos princípios físico-químicos e biológicos que influenciam a absorção e a utilização de nutrientes aplicados via foliar e faz uma revisão dos resultados experimentais disponíveis, de laboratório e de campo, para fornecer pistas sobre os fatores que determinam a eficácia da aplicação foliar. Avanços nesta área exigirão uma compreensão dos princípios físicos, químicos, biológicos e ambientais que regulam a absorção e a utilização dos nutrientes foliares aplicados. O objetivo deste livro é descrever em detalhes o estado atual do conhecimento sobre os mecanismos de absorção por órgãos das plantas (folhas e frutos) de soluções de nutrientes aplicadas em superfície e descrever os fatores e as interações ambientais e biológicas que são fundamentais para a compreensão desses processos. Informações empíricas obtidas em ensaios de adubação foliar e práticas de campo serão mescladas com princípios biológicos, físicos e químicos para obter maior compreensão desta tecnologia, bem como de seu potencial, imperfeições e incógnitas. Os autores também se dedicaram a ilustrar os desafios que esta tecnologia enfrenta e a pesquisa e o desenvolvimento necessários para o seu avanço. O objetivo deste livro é fornecer ao leitor esse entendimento.

1.1. Uma breve história da adubação foliar

A capacidade das folhas em absorver água e nutrientes foi reconhecida há cerca de três séculos (Fernández; Eichert, 2009). A aplicação de soluções nutritivas às folhas como meio alternativo para fertilizar plantas, como videira, foi conduzida no início do século 19 (Gris, 1843). Em sequência, trabalhos de pesquisa tentaram caracterizar a natureza química e física da cutícula foliar, a fisiologia celular e a estrutura das folhas, bem como focalizar os mecanismos potenciais de penetração foliar. Com o advento primeiramente da marcação por fluorescência, e depois da radiomarcação, na primeira metade do século 20, tornou-se possível desenvolver métodos mais precisos para pesquisar os mecanismos de penetração cuticular e translocação do nutriente dentro da planta, que ocorrem após a aplicação foliar de soluções nutritivas (Fernandez; Eichert, 2009; Fernandez et al., 2009; Kannan, 2010).

O papel dos estômatos no processo da absorção foliar foi tema de interesse desde o início do século 20. No entanto, em 1972, foi postulado que a água pura não poderia se infiltrar espontaneamente nos estômatos, a menos que um agente tensoativo aplicado junto com a solução reduzisse a tensão superficial para menos de 30 mN m^{-1} (Schönherr; Bukovac, 1972). Como consequência, a maior parte das pesquisas foi realizada posteriormente

em membranas cuticulares isoladas da superfície foliar adaxial (superior) de espécies nas quais era possível realizar procedimentos de isolamento enzimático, como, por exemplo, folhas de álamo ou pereira. Assim, verificou-se que as cutículas são permeáveis à água e a íons, bem como a compostos polares (Kerstiens, 2010). Além disso, sugeriu-se a ocorrência de duas vias de penetração distintas na cutícula, uma para substâncias hidrofílicas e outra para lipofílicas (Schönherr, 2006; Schreiber; Schönherr, 2009).

A proposição de que os estômatos também contribuiriam para a penetração foliar foi reavaliada por Eichert e colaboradores no final da década de 1990 e validada posteriormente (Eichert et al., 1998; Eichert; Burkhardt, 2001; Eichert; Goldbach, 2008; Fernandez; Eichert, 2009). Atualmente, a relevância quantitativa deste percurso e a contribuição de outras estruturas superficiais, como as lenticelas, para a absorção de soluções via foliar permanece obscura.

Desde o primeiro uso registrado, no início do século 19 (Gris, 1843), a adubação foliar foi objeto de considerável volume de pesquisas, em ambiente controlado e em campo, e amplamente adotada como prática rotineira para muitas culturas. Dentre as justificativas para o uso de fertilizantes foliares destacam-se:

- Condições de solo que limitam a disponibilidade de nutrientes a ele aplicados;
- Condições em que podem ocorrer altas perdas de nutrientes aplicados ao solo;
- Quando na fase de crescimento, a demanda interna da planta e as condições do ambiente interagem para limitar o suprimento de nutrientes a órgãos essenciais da planta.

Em cada uma destas condições, a decisão de aplicar fertilizantes foliares é determinada pela magnitude do risco financeiro associada à incapacidade de corrigir a deficiência de um nutriente e à provável eficácia da adubação foliar.

Além disso, a fertilização foliar é, teoricamente, mais amigável ao ambiente, de resposta mais imediata e mais direcionada ao objetivo do que a fertilização via solo, pois os nutrientes podem ser fornecidos aos tecidos vegetais durante as fases críticas do crescimento da planta. No entanto, enquanto a necessidade de corrigir uma deficiência pode ser bem definida, a determinação da eficácia da fertilização foliar pode ser muito mais incerta.