

CRITÉRIOS PARA RENOVAÇÃO OU MANUTENÇÃO DE SOLUÇÃO NUTRITIVA EM CULTIVO HIDROPÔNICO

MARIA DO CARMO LANA BRACCINI
ALESSANDRO DE LUCCA E. BRACCINI
HERMINIA EMILIA PRIETO MARTINEZ

BRACCINI, M. DO C. L.; BRACCINI, A. DE L. E.; MARTINEZ, H. E. P. Critérios para renovação ou manutenção de solução nutritiva em cultivo hidropônico. *Semina: Ci. Agr.*, Londrina, v. 20, n. 1, p. 48-58, mar. 1999.

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma revisão detalhada sobre os principais critérios a serem considerados na renovação ou manutenção de soluções nutritivas em cultivo hidropônico comercial. As informações fornecidas permitem a sua aplicação na avaliação da concentração de soluções nutritivas utilizadas no cultivo de diversas espécies de interesse agrícola e comercial, abordando aspectos referentes à manutenção do pH da solução, bem como ao monitoramento da solução nutritiva com base em diversos critérios, tais como depleção máxima, condutividade elétrica, curvas de absorção de nutrientes, influxo de íons, variação da radiação solar, além do monitoramento de soluções para sistema recirculante (NFT) e para aplicação em trabalhos de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: cultivo hidropônico, concentração de nutrientes, solução nutritiva.

1. INTRODUÇÃO

A concentração da solução nutritiva varia com o desenvolvimento da planta. A amplitude de variação depende da relação entre o crescimento e o volume da solução utilizado. Além disso, estas variações causam diferenças quantitativas e qualitativas dos elementos disponíveis para absorção. Por isso, a manutenção de um meio favorável ao desenvolvimento das plantas, não envolve somente a escolha da solução apropriada, mas também, um monitoramento contínuo, para determinação da necessidade da adição de sais, ajuste de pH ou substituição de toda solução (Maansson, 1984; Martinez, 1997).

Em uma solução nutritiva adequada, os nutrientes devem estar presentes na mesma proporção na qual são absorvidos pela cultura, principalmente em sistema circulante. Se a composição da solução nutritiva é compatível com a absorção pela cultura, então a taxa entre o que permanece na solução deveria ser mais ou menos constante. Entretanto, a absorção total de íons pode variar em função do estágio de crescimento e das condições climáticas.

Portanto, é necessário obter um rigoroso controle da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva e do pH. Medidas de pH e CE podem ser realizados pelos próprios agricultores com a ajuda de instrumentos portáteis. A regulação do pH é possível com adição de ácido, hidróxidos ou pela relação amônio/nitrato.

A composição da solução nutritiva recirculante é mantida pelo ajustamento do nível de água, concentração de nutrientes e pH. Mantendo o nível constante de água

no sistema a depleção de nutrientes na solução é correlacionada com decréscimo da condutividade elétrica (CE), desta forma a CE pode monitorar o nível de nutrientes.

2. MANUTENÇÃO DO pH

Um dos fatores mais importantes em hidroponia é manter a devida acidez ou alcalinidade. Uma vez que as soluções nutritivas não tem capacidade tampão, o pH deve ser ajustado diariamente para uma faixa de pH adequada. Cada espécie tem uma faixa de pH dentro da qual cresce melhor. Geralmente, para a maioria das plantas, o pH deve estar entre 5,0 e 6,5. A importância do pH está em manter na solução todos os elementos disponíveis às plantas. Se o pH sobe acima de 6,5 começariam a precipitar certos elementos como o cálcio, fósforo, ferro e manganês, deixando então de estarem disponíveis para a planta (Zieslin, 1994).

O valor de pH 4,0 é usualmente aceito como o mais baixo tolerado pelas plantas em cultivo hidropônico. O crescimento das raízes é retardado podendo ocorrer injúrias em pH abaixo de 4,0. Sob tais condições altos níveis de Ca são requeridos para crescimento satisfatório.

Altas concentrações de hidrogênio pode afetar a permeabilidade das membranas das células de raízes e permitir a liberação de íons das raízes (Yan et al., 1992). Assim como pH elevado pode também ter efeito direto sobre as funções de membrana e sobre a exsudação de composto fenólicos como observado por Zieslin (1994). Portanto, segundo Zieslin (1994) é possível que o pH do ambiente radicular possa ter um

¹ Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua Pernambuco, 1777. CEP 85960-000 Marechal Cândido Rondon, Paraná Brasil.

² Departamento de Agranomia da Universidade Estadual de Maringá. Av. Colombo, 5790. CEP 87020-900 Maringá, Paraná, Brasil. Bolsista do CNPq. e-mail: albraccini@uol.com.br

³ Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. CEP 36571-000 Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Bolsista do CNPq.

papel importante na produção na nutrição pela regulação de exsudatos fenólicos das raízes, os quais podem atuar como agente de quelatação de vários íons e sobre a permeabilidade das membranas de células de raízes.

O controle do pH pode ser feito com papel indicador, soluções indicadoras ou com potenciômetro.

Papel Indicador

Mergulhar a tira de papel indicador na solução a ser testada. Após 20 segundos remover e observar a cor. Comparar esta cor com aquela imprimida no catálogo. O papel indicador embora simples e rápido, é menos preciso do que as soluções indicadoras.

Soluções Indicadoras

Para encontrar o valor de pH da solução retira-se uma amostra de 10 mL e adiciona-se 10 gotas de solução indicadora. Agitar e ler o valor de pH correspondente na tabela de cores. O uso de soluções com indicador universal determina valores de pH de 4,0 a 10,5 com variação de 0,5 unidades.

Determinação Potenciométrica do pH

A maioria dos instrumentos tem dois eletrodos. O eletrodo de hidrogênio e o eletrodo de referência, o qual mergulhado na solução pode dar valores de pH

com variação de 0,01 unidade de pH. A correção é feita com adição de HCl ou NaOH 0,1 N.

Martinez (1997) apresenta um modo prático de se fazer a correção do pH com base em amostras de volume conhecido, processo que é muito utilizado na pesquisa com cultivo hidropônico. A correção do pH deve ser feita após completar o volume da solução com água desionizada.

A absorção diferencial de cátions e ânions permitem mudanças substanciais no pH da solução. Raízes das plantas podem liberar H⁺ se cátions são absorvidos mais rapidamente do que ânions, e o oposto acontece, raízes podem liberar HCO₃⁻ ou OH⁻ se ânions são absorvidos mais rapidamente do que cátions. Devido a grande quantidade requerida em relação a outros nutrientes, a forma na qual o nitrogênio é suprido exerce grande influência sobre a direção de mudanças do pH. Portanto, a absorção de N na forma aniônica (NO₃⁻) geralmente permite aumentar o pH do meio, enquanto que a absorção da forma catiônica (NH₄⁺) permite decréscimo do pH. Willumsem (1984) constatou que para tomate e alface é possível controlar o pH da solução recirculante pelo ajustamento da relação NH₄⁺/NO₃⁻.

Ruiz (1997) propõe o uso de soluções nutritivas específicas para cada cultura (Tabela 1) obtidas com a utilização de apenas quatro sais, que segundo o autor, apresentam condições de esgotamento equilibrado de macronutrientes, associadas a uma baixa força iônica. Além disso, seriam mais tamponadas, característica favorecida pela relação NO₃⁻/NH₄⁺ que é de 7/1 e pela presença de H₂PO₄⁻.

Tabela 1. Concentrações de macronutrientes e força iônica (I) das soluções nutritivas específicas para culturas de interesse agrônômico.

CULTURA	NOME CIENTÍFICO	KNO ₃	MgSO ₄	Ca(NO ₃) ₂	NH ₄ H ₂ PO ₄	I
Arroz	<i>Oryza sativa</i>	1,00	0,26	1,11	0,46	5,60
Cevada	<i>Hordeum vulgare</i>	1,00	0,19	1,86	0,68	7,74
Feijão	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,00	0,10	0,85	0,39	4,22
Jiló	<i>Solanum gilo</i>	1,00	0,10	0,61	0,32	3,45
Milho	<i>Zea mays</i>	1,00	0,12	0,66	0,33	3,68
Pimentão	<i>Capsicum annum</i>	1,00	0,13	0,55	0,30	3,37
Soja	<i>Glycine max</i>	1,00	0,13	1,78	0,65	7,25
Sorgo	<i>Sorghum vulgare</i>	1,00	0,12	0,79	0,37	4,06
Tomate	<i>Lycopersicum esculentum</i>	1,00	0,11	0,39	0,26	3,05
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	1,00	0,18	2,16	0,76	8,52
Triticale	<i>X. triticosecale</i>	1,00	0,15	1,78	0,65	7,35

Fonte: Ruiz (1997).

As soluções foram obtidas a partir de experimentos utilizando a solução de Clark e diferentes espécies. Utilizando os valores dos teores de macronutrientes no tecido vegetal, foram calculadas as relações molares entre: N/K, P/K, Ca/K, Mg/K e S/K e estes valores foram incrementados de 20% para transformar o K no nutriente limitante da solução. Assim, a necessidade de troca da solução nutritiva seria indicada pela concentração de K.

Por causa da influência do pH sobre vários aspectos da nutrição mineral, várias técnicas tem sido desenvolvidas para minimizar as oscilações do pH da solução. Tais técnicas incluem: amostragem manual seguida de análise e ajustamento do pH, utilização de substâncias químicas para tamponar o pH, monitoramento e correção do pH com uso do computador.

Webb (1993) apresenta um sistema controlado por computador capaz de manter o pH com variação de 0,1 unidade de pH. O sistema pode monitorar, registrar e manter o pH de sete soluções diferentes ao mesmo tempo. De acordo com o autor a maioria dos componentes são disponíveis comercialmente com exceção do software, que foi desenvolvido pelo autor.

A utilização de agentes de tamponamento da solução nutritiva seriam de grande utilidade tanto para a pesquisa quanto para agricultores, em função da menor necessidade de corrigir o pH diariamente.

Segundo Bugbee & Salisbury (1985) sais de carbonato podem temporariamente atenuar decréscimo no pH mas fornece pouca proteção contra aumento do pH e podem alterar a absorção de nutrientes. As resinas de troca são mais efetivas mas de acordo com Bugbee & Salisbury (1985) podem retirar magnésio e manganês da solução. Estes autores testaram MES (2(N-morpholino) ethanesulfonic acid) nas concentrações de 1 e 10 mM em feijão, milho, alface, tomate e trigo. MES mostrou-se biologicamente inerte e não interagiu significativamente com outros íons da solução. O pH foi estabilizado com a concentração de 1 mM de MES.

Para manter o pH constante, em solução contendo Al, Konzak et al. (1976) utilizaram biftalato de potássio ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$) na concentração de 8 mM, para selecionar genótipos de diversas espécies quanto à tolerância ao Al, pelo método do papel-solução.

De acordo com Fukuyama et al. (1995) a utilização do mineral zeolito adicionado na solução nutritiva, pode proporcionar aumento da capacidade de tamponamento contra mudanças no pH e nas concentrações de cátion. Pelo fato deste mineral possuir capacidade de troca e ser utilizado junto com cátions como Ca-zeolito, pode evitar desordens nutricionais, como deficiência de cálcio ou excesso de cobre.

Fukuyama et al. (1994) citado por Fukuyama et al. (1995) utilizaram zeolito em mistura com meio de cultura de tecido e verificaram que a capacidade de tamponamento do pH aumentaram significativamente contra ambos, alcalinização e acidificação do meio. Os autores sugerem a utilização em cultivo hidropônico de Ca-zeolito como agente de tamponamento do pH e de nutrientes.

Com o objetivo de avaliar a eficiência de carbonato de cálcio e de fosfato de araxá, no tamponamento do pH da solução nutritiva, Oliveira et al. (1997) avaliaram o efeito de diferentes doses adicionadas à solução de Steiner, sobre a variação do pH e composição nutricional de alface, durante o período experimental de 40 dias.

As doses de CaCO_3 (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 g/L) de fosfato de araxá (8,88; 17,75; 26,75 e 35,3) foram adicionadas no início e após a troca da solução nutritiva, que foi realizada no 21º dia.

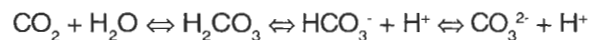
Na presença de CaCO_3 observou-se aumento do pH que variou de 7,2 no 2º dia para 7,8 no 13º dia. Após a troca da solução continuou a subir com tendência de estabilização em torno de 7,5 para as diferentes doses.

O fosfato de araxá não manteve o pH o qual decresceu atingindo valores mínimos de 3,7 a 4,3. Somente após o 32º dia começou a subir atingindo o pH 5,0 no 36º dia. De acordo com os autores a pequena solubilidade do fosfato de araxá, não conseguiu evitar o decréscimo do pH da solução. Somente quando a acidez da solução foi suficiente para começar a dissolver o fosfato é que observou-se aumento do pH. Portanto, em função da baixa solubilidade dos fosfatos naturais, os mesmos não seriam adequados para efeito de tamponamento do pH das soluções nutritivas.

A adição de 1g/L de CaCO_3 de acordo com Wilson & Reisenauer (1963) citado por Asher & Edwards (1983) foi capaz de manter o pH entre 6,5 e 7,0. KNYPL (1976) também, citado por Asher & Edwards (1983) compararam o uso de CaCO_3 e CAHPO_4 como agentes tamponantes em meio de cultura e constataram que CaCO_3 foi bem superior que CAHPO_4 para controlar o pH.

Ben-yaakov & Ben-asher (1982) apresentaram um sistema de monitoramento da solução nutritiva capaz de medir quatro parâmetros: pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e temperatura. Uma característica do sistema é a auto calibração do oxigênio dissolvido e utilização de quatro eletrodos para medir a CE. A injeção de oxigênio é função da temperatura do ar. Mudanças no pH da solução estão relacionadas com alterações na concentração de CO_2 (Ben-yaakov & Ben-asher, 1982). O aumento do pH de 4,5 para 5,2 durante algumas horas do dia decresce a solubilidade do CO_2 na água. Quando a temperatura aumenta de 23°C para 28°C, a solubilidade de CO_2 em água decresce 14%.

A reação com íons carbonato e bicarbonato é a seguinte:



Esta reação é direcionada para esquerda quando o pH é ácido. Quando a concentração de CO_2 é reduzida como resultado do aumento da temperatura, mais íons hidrogênio são consumidos da solução para formar $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. A redução de 0,0257 mmol/L de H^+ é equivalente a perda de 1,13 mg/L de CO_2 . Mudanças na temperatura da água podem ser utilizadas para avaliar mudanças na concentração de CO_2 .

3. MANUTENÇÃO E RENOVAÇÃO DAS SOLUÇÕES NUTRITIVAS

Monitoramento da Solução Nutritiva com Base na Produção de Biomassa Seca

Com a curva de crescimento da espécie estudada a escolha do intervalo de troca (IT) é facilitada, pois sabe-se que a absorção é proporcional a taxa de crescimento relativo (TCR).

Exemplo:

Supondo que as concentrações adequadas para uma espécie em determinada fase de crescimento sejam: 0,3% P; 4,0% Ca e 2,0 % K. Considerando que uma planta esteja sendo cultivada em vaso de 5 litros de solução de Clark com TCR de 0,4 mg MS/mg.dia, é possível calcular o intervalo de troca.

Solução de Clark	Volume (mL/L)
Ca(NO ₃) ₂ M	2,53
KNO ₃ M	1,30
KCL M	0,50
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 23 mM	1,50

Está sendo adicionado em mmoles/L:

Ca ⁺⁺	K ⁺	P-H ₂ PO ₄ ⁻	N-NO ₃ ⁻
2,5300	1,3	0,069	5,06
0,0345	0,5		1,30
2,5345	1,8	0,069	6,36

O conteúdo de cada nutriente por vaso (5 L) em mg/vaso:

Ca ⁺⁺	K ⁺	P-H ₂ PO ₄ ⁻	N-NO ₃ ⁻
12,5	9,0	0,345	31,8
× 40	× 39	× 31	× 14
512	351	10,69	445,2

Conhecendo-se o teor desses nutrientes na biomassa seca, é possível calcular quantos miligramas de biomassa podem ser produzidos com 5 L de solução:

100 mg MS - 0,3 mg P → 10,69/0,3 × 100 = 3.563 mg MS

100 mg MS - 2,0 mg K → 351/2,0 × 100 = 17.550 mg MS

100 mg MS - 4,0 mg K → 512/4,0 × 100 = 12.800 mg MS

Desta forma, sabe-se que o P é o nutriente mais limitante. Conhecendo-se a TCR, pode-se calcular em quantos dias essa biomassa seca seria produzida:

$$TCR = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1}$$

em que:

P2	=	massa final (mg)
P1	=	massa inicial (mg)
t2 - t1	=	intervalo de troca (dias)
TCR(t2 - t1)	=	ln P2 - ln P1
0,4 × IT	=	ln (10 + 3563) - ln (10)
IT	=	14,69 dias

Para obter uma margem de segurança o intervalo de troca deveria ser realizada a cada 12 dias.

Monitoramento da Solução Nutritiva com Base na Depleção Máxima

Pode-se monitorar um elemento de fácil análise e de alta exigência pelas plantas, como o K. Para isto retira-se uma alíquota de 5 mL que é analisada por fotometria de chama, comparando-se a concentração atual com aquela adicionada no início. Estabelece-se anteriormente qual a percentagem de depleção máxima admitida, em pesquisa normalmente utiliza-se 30%. Desta forma, considera-se que todos os nutrientes tenham a mesma depleção. Ou pode-se monitorar aquele nutriente cuja concentração na solução é baixa em relação a outras formulações, por exemplo, o P quando se utiliza a solução de Clark, ele é o elemento indicado.

Em pesquisa, geralmente, quando a solução atinge o nível de depleção pré determinado ou a intervalo de troca calculado esta é totalmente substituída. A readição é mais usada para cultivos comerciais, ou em sistema circulantes, em que todos ou quase todos os nutrientes podem ser monitorados.

O intervalo de troca (IT) também pode ser calculado segundo Asher & Edwards (1983) pela seguinte equação:

$$IT = \frac{D}{100} \cdot \frac{V}{R} \cdot \frac{C}{U}$$

em que:

D = depleção máxima admitida (%);

R = massa fresca de raiz/vaso ou planta (g);

U = taxa de absorção por unidade de massa de raiz na concentração C (μmol.g⁻¹.h⁻¹ na biomassa fresca);

V = volume da solução/vaso ou planta (L);

C = concentração inicial de um íon na solução (μmol/L).

Asher & Edwards (1983) citam valores de depleção máxima de apenas 5 ou 10% taxas (V/R) de 0,1; 0,5 e 2,5 (L/g).

Em alguns trabalhos de pesquisa a troca da solução é definida de acordo com a taxa de crescimento da espécie. Para plantas jovens ou com baixa taxa de crescimento, troca-se a cada 15 dias. Para plantas que possuem alta taxa de crescimento: troca-se a cada 7 dias. Plantas como milho que apresentam taxa de crescimento muito alta: troca-se com 4 dias. As trocas são trabalhosas, e intervalos menores que 4 dias dificultam a manutenção do experimento.

Em cultivos comerciais utiliza-se a correlação entre condutividade elétrica (CE) e concentração para readição de nutrientes. Na faixa de concentrações usadas normalmente, a condutividade elétrica varia entre 2 e 4 mS/cm.

Para uma dada formulação, a CE é proporcional ao conteúdo total de sais, no entanto, sais diferentes apresentam condutividades elétricas diferentes, de forma que cada formulação apresenta uma função linear relacionando CE e quantidade total de sais dissolvidos. Uma vez obtida essa função, mede-se a CE, periodicamente, e quando atingir o limite inferior pré estabelecido, efetua-se a troca ou readição.

O valor mínimo de CE permitido pode ser obtido da seguinte forma: após preparar a solução nutritiva que possua, por exemplo, 1300 mg/L de concentração total de nutrientes é avaliada a CE e posteriormente dilui-se a solução nutritiva em 1/2 e 1/4 de força e avalia-se a CE. A troca da solução é efetuada quando a CE é reduzida em 30% (1400 mMhos/cm) (Figura 1).

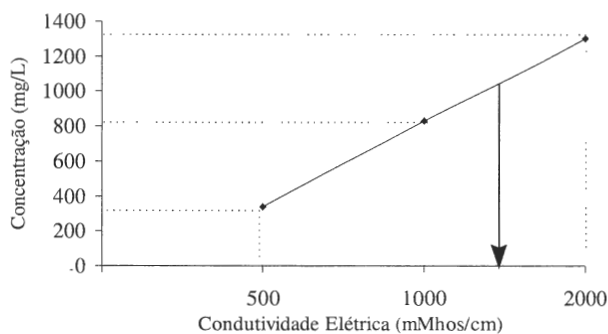


Figura 1. Concentração da solução nutritiva em função da condutividade elétrica.

Pode haver, entretanto, absorção diferencial entre os nutrientes e por isso a readição não é recomendada por períodos maiores que dois a três meses, quando deve ser efetuada a troca. A troca impede o acúmulo de certos íons não absorvidos na mesma proporção que os demais, que poderiam interagir negativamente na absorção ou causar toxidez. O problema é mais sério para os micronutrientes, porque para estes o limite entre carência e toxidez é mais estreito.

Monitoramento da Solução Nutritiva com Base na Condutividade Elétrica e Curvas de Absorção de Nutrientes

De acordo com Resh (1987) de uma forma geral, não se deve utilizar a solução nutritiva por um período maior do que dois ou três meses sem efetuar-se a troca completa da solução. No caso em que não se efetua análises semanais, a utilização da solução nunca deve ser maior do que duas ou três semanas.

Resh (1987) apresenta uma forma de ajuste de soluções nutritivas com base na condutividade elétrica, a qual é monitorada diariamente e comparada com um gráfico da demanda nutricional. O princípio se baseia nas relações entre sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade elétrica (CE), concentração de cada elemento (mg/L) e idade de crescimento das plantas.

São retiradas amostras semanais da solução nutritiva e analisadas as concentrações de N, P, K, Ca, Mg e S. Na Figura 2 é apresentado um exemplo para cultura do alface, em que foram coletadas amostras da solução uma vez por semana correspondendo aos dias 0, 7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias para a primeira solução e após a troca da solução nos dias 42, 49, 56, 63, 70, 77 e 84 dias.

A partir de 21 dias, com o crescimento das folhas, a demanda nutricional aumenta, e o resultado é uma diminuição dos elementos na solução (Figura 2).

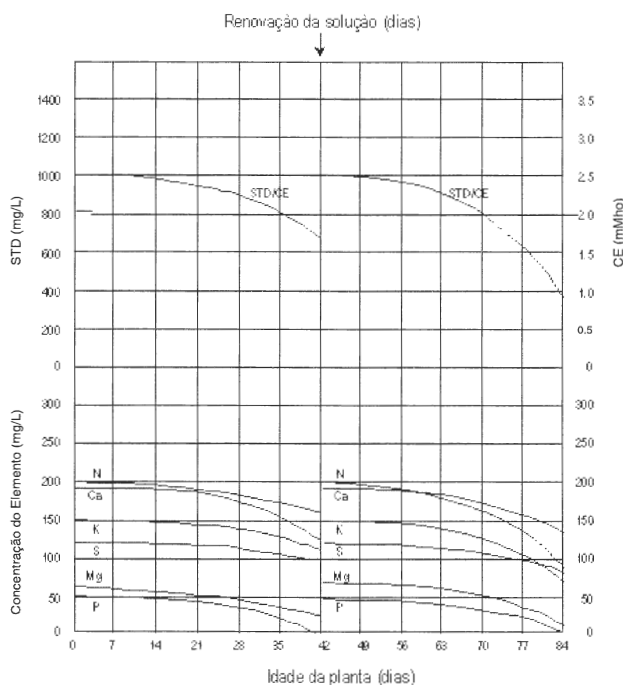


Figura 2. Relação teórica entre os macronutrientes, sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva em função da idade das plantas. Fonte: Resh (1987).

Em função da diferença na exigência nutricional nas diversas etapas do crescimento, o grau de diminuição será distinto para cada elemento, por exemplo, o abaixamento na curva de absorção é maior para N do que para K e P.

As curvas de absorção são utilizadas para determinar quanto e quando se deve adicionar os fertilizantes cujos elementos são rapidamente absorvidos, antes que uma deficiência cause um estresse nas plantas e uma perda significativa na produtividade.

Segundo os trabalhos de Steiner (1980), os sais podem ser adicionados à solução durante o cultivo, utilizando a condutividade elétrica como medida do status da solução. Entretanto, essas adições de íons deveriam ser o mais próximo possível da mesma relação em que são utilizados pelas plantas.

Por exemplo, como se observa na Figura 2, se a CE medida no dia 77 se encontra em 1,5 mMhos, ao longo desse ponto, se lê abaixo os níveis de cada elemento. O ponto de intersecção para P é 20 mg/L. N fórmula original a concentração de P é de 50 mg/L, isto implica que deveria ser adicionado 30 mg/L, que corresponderia a 3,95 kg de KH_2PO_4 , de forma semelhante se faz para os demais elementos.

Utilizando a CE para ajustar a solução nutritiva semanalmente, ao invés de trocá-la a cada duas ou três semanas, poderia estender sua vida útil ao menos seis semanas. Deste modo se obtém uma economia substancial em fertilizantes, água e mão de obra.

Monitoramento com Adições Constantes de Solução Nutritiva

A concentração total de nutrientes em uma solução nutritiva deve estar entre 1000 e 1500 mg/L, de forma que a pressão osmótica propicie absorção pelas raízes. Em geral, valores menores (1,5 a 2,5 dS/cm) são preferidos para pepino, enquanto que valores maiores (2,5 a 3,5 dS/cm) são melhores para tomate (Resh, 1987).

Em alguns casos é possível adicionar uma parte da formulação entre uma e outra troca, porém isto é apenas uma aproximação, e pode-se cometer um grave erro ao produzir concentrações excessivas nas soluções de alguns nutrientes que as plantas absorvem somente pequenas quantidades.

Faria et al. (1997) estudaram as combinações das soluções de Steiner com concentrações iniciais de 25 e 50% e soluções de reposição com 25, 50, 75 e 100% de concentrações da solução nutritiva. A variação da condutividade elétrica em função da reposição da solução nutritiva nas concentrações de 25 e 50% foi decrescente ao longo do tempo. Estas concentrações da solução de reposição não conseguiram repor os nutrientes na proporção em que foram absorvidos pelas plantas em crescimento. Por outro lado, a solução de reposição de 100% provocou aumento em taxas crescentes da CE. Observou-se, que a concentração da solução de reposição de 75% foi a que provocou as

menores oscilações da CE ao longo do tempo, sendo a mais indicada para estudos subsequentes.

A utilização da solução de Steiner combinando-se a concentração de 50% no início, com solução de reposição, a cada dois dias, na concentração de 75%, mostrou-se metodologia viável para o cultivo hidropônico de alface, evitando-se que a troca da solução nutritiva nas unidades experimentais seja realizada periodicamente, contribuindo para economia de nutrientes, análises de monitoramento da depleção e mão de obra.

Willumsem (1984) estudou os efeitos da variação na composição química da solução recirculante para cultivo de alface. A condutividade elétrica e o volume de cada solução foi medido e diariamente ajustado pela adição de água desionizada e adição suplementar da solução estoque. Os nutrientes da solução suplementar foram adicionados proporcionalmente de acordo com a expectativa de absorção baseado nas análises das plantas.

Foi observado que o suprimento de N-NH_4^+ foi um dos principais fatores controlando o pH da solução recirculante. O pH foi mantido entre 4 e 5 quando 10% do N foi suprido como NH_4^+ e 90% como NO_3^- . O consumo de N-NH_4^+ correspondeu a 12 -15% do total de N consumido.

Baseado em resultados de consumo de nutrientes da solução nutritiva e absorção de nutrientes pelas plantas de alface o autor apresenta sugestão de composição da solução nutritiva de reposição para duas situações: quando o pH é controlado pela relação $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ e quando o pH é controlado por HNO_3 e H_3PO_4 .

Monitoramento da Solução Nutritiva com Base no Influxo de Íons

É necessário fornecer a solução nutritiva de acordo com a necessidade nutricional sem provocar alta salinização do substrato, considerando que o requerimento nutricional varia de acordo com o estágio de crescimento. Como a taxa média de influxo de nutrientes está relacionada com a concentração desses nutrientes na biomassa seca, a taxa de nutrientes para manutenção na solução pode ser calculada a partir de dados de análise de plantas.

O monitoramento do status nutricional com base em análise de tecido das plantas é um processo trabalhoso e demorado não sendo capaz de acompanhar o rápido crescimento das plantas. A análise da seiva de caule e de folhas descrita por Smith (1988) tem sido considerado um método bem apropriado para diagnose de deficiência nutricional fornecendo informações para ajustamento do programa de fertilização.

Este critério foi adotado por Nukaya et al. (1995) para monitorar o status nutricional em plantas de melão crescidas em substrato com lã de rocha. As amostras de seiva foram coletadas a cada semana em pecíolos do 25º nó durante o período experimental de 84 dias.

Esta metodologia foi adequada para monitorar as concentrações de NO_3^- , P e K, entretanto, não foi apropriada para estimar o status nutricional de Ca e Mg em plantas de melão.

Monitoramento da Solução Nutritiva com Base na Adição Programada de Nutrientes

Com esta metodologia, descrita por Asher & Blamey (1987), o suprimento de cada nutriente é dividido entre uma série de adições dos nutrientes, cuja frequência e quantidade é determinada pela curva de crescimento. As adições necessitam ser pequenas o suficiente e freqüentes para prevenir o estresse. Com o rápido crescimento das plantas as adições podem ser requeridas de forma mais freqüente, como a cada dois dias, em outros casos aplicações menos freqüentes podem ser satisfatórias.

O requerimento do nutriente em cada intervalo de crescimento é obtido pelo produto de biomassa seca, obtida a partir da curva de crescimento, e a concentração média de cada elemento para produzir aquela quantidade de biomassa seca.

Foi desenvolvido por Asher & Blamey (1987) um programa de computador chamado NUTRADD para calcular diariamente o incremento de biomassa seca a partir de dados de biomassa seca de plântulas, número de plântulas/vaso e a expectativa da forma da curva de crescimento. Dada a estimativa de concentração ótima de nutrientes no tecido, é calculada a demanda diária de cada nutriente, massa de cada sal ou volume de solução estoque a ser utilizado.

Esta metodologia de adição programada de nutrientes tem sido utilizada pelos autores com os seguintes propósitos:

- produzir sintomas de desordens nutricionais (deficiência e toxidez);
- estabelecer concentrações críticas de nutrientes;
- estudar os efeitos de estresse prolongado de nutrientes;
- fornecimento de quantidades adequadas de P em experimentos com toxidez de Al, para evitar problemas de precipitação de AlPO_4 .

Segundo os autores esta forma de suprimento de nutrientes tem sido utilizada a mais de 16 anos incluindo diferentes espécies. A vantagem da adição programada de nutrientes, seria o baixo custo e melhor controle do status nutricional das plantas, uma vez que, pequenas adições de todos os nutrientes são feitas, inclusive do elemento teste, permitindo o fornecimento constante de nutrientes de acordo com a demanda nutricional.

Lee et al. (1981) citado por Asher & Edwards (1983) utilizaram esta técnica para controlar o status de nitrogênio em plantas de gengibre (Figura 3a) e para controlar o status de boro em plantas de mandioca (Figura 3b).

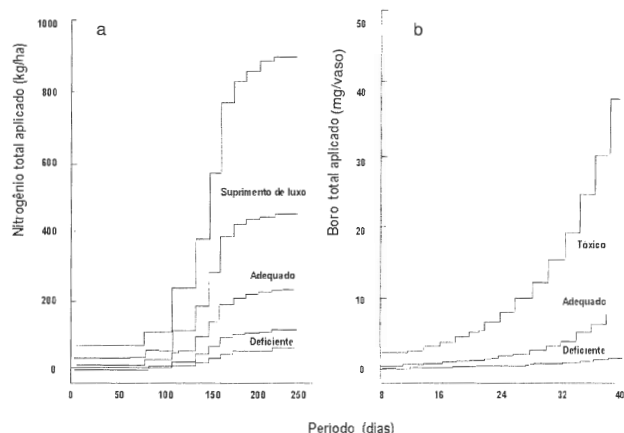


Figura 3. Adição programada de nutrientes, (a) nitrogênio em plantas de gengibre, (b) boro em plantas de mandioca. Fonte: Asher & Edwards (1983).

Monitoramento de Íons Individuais da Solução Nutritiva

Água e nutrientes são adicionados na solução para repor perdas por transpiração e nutrientes absorvidos pelas plantas. Uma desvantagem deste método é que a condutividade total não fornece informações sobre as concentrações de íons individuais tais como: NO_3^- , K^+ , H_2PO_4^- , Ca_2^+ e Mg_2^+ .

O controle de íons individuais é obtido pela análise química da solução nutritiva a cada duas ou três semanas. Entretanto, a concentração de nutrientes na solução pode ser modificada em função da hora do dia, estágio de crescimento e temperatura da solução (Bailey et al., 1988). Além disso, o fornecimento de íons como sódio e cloreto pela água pode contribuir para aumentar a condutividade elétrica e a concentração de íons essenciais pode diminuir se a condutividade for mantida num valor fixo. Bailey et al. (1988) propõem uma forma de monitoramento individual de íons utilizando eletrodo seletivo de íons para: NO_3^- , K^+ , Ca_2^+ , Na^+ , Cl^- e pH. Este sistema foi avaliado durante duas estações de crescimento de tomate. Observou-se boa repetibilidade das medidas com variação de 10 mg/L ou 0,05 unidade de pH, dentro da mesma amostra. A diferença entre análise realizada no laboratório e obtida pelos eletrodos foi de 0,4 unidade para pH, 10% para NO_3^- e 20% para K^+ . O tempo de vida útil dos eletrodos para pH, Na^+ , K^+ e Ca_2^+ foi de 4, 2 e menos de um mês, respectivamente, o que passa a ser um aspecto menos atrativo para maiores aplicações.

Monitoramento Automático da Solução Nutritiva para Sistema Recirculante

Em alguns países como Holanda, existe a necessidade de mudar de sistemas abertos para

sistemas fechados, em função da melhor compatibilidade ambiental além do uso mais eficiente de água e nutrientes. Por sistema fechado entende-se como reciclagem da solução drenada, após a percolação da solução através do substrato para fornecimento de nutrientes para as plantas. Em muitos casos, os nutrientes são supridos em excesso para prevenir fatores de limitação nutricional para as plantas. A solução drenada constitui cerca de 20 a 40% dos fertilizantes aplicados, a qual é usualmente não reciclada, sendo liberada no solo, ou escoada para os rios (Morard, 1997). A destruição desses efluentes tem dois tipos de efeitos indesejáveis:

- corresponde a uma perda, estimada para a cultura de tomate de 2800 m³ de água e 2,5 toneladas de sais e 1700 kg/ha/ano de nitrato (Morard, 1997);
- o custo do input requerido para a cultura é aumentado e por conseguinte a solução nutritiva não utilizada, neste caso para cultura do tomate em lâ de rocha, representa perda de 4,30/m²/ano de franco francês.

Uma tentativa para controlar a destruição dos efluentes poderia ser o uso de reciclagem da solução nutritiva. Toda a solução após suprir as necessidades das plantas, é recuperada e armazenada como apresentada na Figura 4. Esta solução é reajustada com nutrientes e redistribuída para as plantas. Este sistema pode operar na ausência de substrato (Nutrient Film Technique, NFT) ou na presença de substrato, como lâ de rocha. Embora essas técnicas sejam simples e fáceis de manejo, elas são pouco utilizadas. Em adição ao risco de doenças, a principal razão, do ponto de vista nutricional, é a dificuldade encontrada no correto reajustamento da solução circulante. Os métodos atualmente utilizados para controlar a composição da água drenada são baseados diretamente em medidas de pH e condutividade elétrica (CE). A CE somente fornece informação sobre a concentração total de íons, e não sobre o conteúdo de cada nutriente.

No sistema apresentado na Figura 4, a solução nutritiva reciclada tem sua composição monitorada determinada diretamente com eletrodos específicos. Os resultados das análises químicas são enviados para um microcomputador, o qual pode calcular o requerimento adicional, primeiro considerando o forma do íon, e depois a forma do sal. Outro programa de computador controla a operação da bomba volumétrica em relação a concentração de cada sal que pode ser liberado na solução circulante para satisfazer o requerimento atual da planta. Outro grande interesse do sistema é a possibilidade de mudar facilmente e rapidamente a composição da solução nutritiva. A modificação do conteúdo de cada macronutriente pode ser obtido diretamente por um comando do teclado. Deste modo é possível ajustar o conteúdo de nutriente em relação a diferentes parâmetros da cultura: espécie, condições de temperatura e estágio de desenvolvimento.

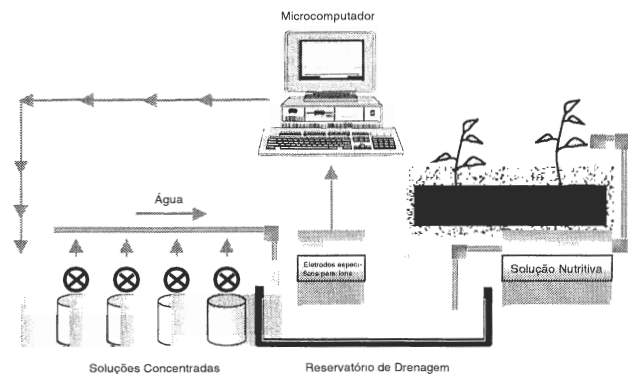


Figura 4. Sistema de regulação automática para recirculação da solução nutritiva em cultivos hidropônicos. Fonte: Morard (1997).

As concentrações de nitrato, potássio e cálcio foram simultaneamente determinados. A comparação dos dados obtidos com métodos espectrofotométricos mostrou que as concentrações de nitrato e potássio foram subestimados em torno de 10% quando foi utilizado eletrodos seletivos de íons. De acordo com Morard (1997) a reprodutibilidade dos dados foi satisfatória. As dificuldades encontradas com o uso direto de eletrodos seletivos de íons foram: necessidade de repetidas calibrações e inadaptação de contínua imersão na solução nutritiva, em função da desnaturação da membrana de alguns eletrodos (K⁺) e deposição de sais na ponta dos eletrodos.

Monitoramento da Condutividade Elétrica da Solução Nutritiva Recirculante

O sucesso do cultivo utilizando a recirculação da solução nutritiva é conseguido se as relações entre nutrientes são mantidas em igual proporção do influxo líquido pelas plantas e capacidade de manter o balanço entre cátions e ânions e consequentemente o controle do pH.

Bohme(1997) comparou sistema aberto e fechado de circulação da solução nutritiva sobre a produção de pepino. Não houve diferença na produção de pepino do sistema fechado comparado com o sistema aberto. Constataram que no sistema fechado foi necessária menor quantidade de água e nutrientes, principalmente de potássio. Observaram também, alta concentração de cálcio, sódio, cloreto e sulfato na água drenada. O contínuo uso de soluções drenadas pode permitir concentrações desses íons que podem causar danos às plantas ou ter efeitos adversos sobre a qualidade do fruto. Isto poderia ser minimizado pelo ajuste mais eficiente da quantidade de solução necessária às plantas.

Para produção de morango, na Austrália, utilizando o sistema circulante, a solução em sido manejada de duas formas. Na primeira, água e nutrientes removidos pela cultura ou perdidos por evaporação são adicionados a cada dia para manter constante a condutividade

elétrica e a solução nutritiva é trocada a cada 6 - 8 semanas. Na segunda, nenhum ajustamento diário é feito e a troca é realizada quando a solução nutritiva atinge certa depleção.

Sarooshi & Cresswell (1994) avaliaram o efeito do ajustamento e troca da solução nutritiva sobre a produção, qualidade e status nutricional de plantas de morango. Avaliaram também o efeito da condutividade elétrica sobre a produção e qualidade dos frutos.

Os tratamentos para avaliar o efeito de ajustamento e troca da solução foram:

- T1 - solução nutritiva ajustada diariamente em mistura com a solução básica para atingir a CE de 2 dS/m, pH 6,0 e trocada a cada 8 semanas (prática comum dos agricultores);
- T2 - troca da solução a cada 8 semanas, sem ajuste de pH, CE e perda de água;
- T3 - como no T1 mas reduzindo a relação K:N de 1,7:1,0 para 1,4:1,0;
- T4 - sem ajuste diário e 1/3 da solução renovada a cada 2 semanas com solução nova.

Comparados com a prática adotada pelos agricultores (T1), essas estratégias de manejo não ofereceram vantagens sobre a produção, número de frutos, oBrix, ácido cítrico ou sabor do fruto.

A redução da relação K:N de 1,7:1,0 para 1,4:1,0 não teve efeito sobre a produção mas teve efeito significativo sobre tamanho e melhorou o aroma do fruto.

Para estudar o efeito da CE, foram propostos 5 combinações incluindo o T1:

- T5 - CE de 3 dS/m antes da frutificação e 2 dS/m até a colheita;
- T6 - CE de 2 dS/m antes da frutificação e 3 dS/m até a colheita;
- T7 - CE de 4 dS/m antes da frutificação e 2 dS/m até a colheita;
- T8 - CE de 2 dS/m antes da frutificação e 4 dS/m até a colheita.

Alteração da CE ao longo do ciclo influenciou a qualidade dos frutos. Entretanto os resultados foram complexos sendo que o T1 foi superior aos outros em termos de maximização de todos os aspectos de qualidade do fruto.

Monitoramento da Solução Nutritiva com Base na Radiação Solar

A concentração da solução nutritiva em cultivo hidropônico tem grande influência sobre o crescimento, a produção e a qualidade das plantas. De acordo com Roh & Lee (1996) a concentração da solução pode ser alterada de acordo com o estágio de desenvolvimento

da planta e fatores climáticos. Esses autores relataram que a concentração da solução bem como a quantidade de irrigação pode variar de acordo com a radiação solar. Resultados semelhantes também foram obtidos por Brun et al. (1993) testando diferentes formas de manejo da solução para cultivo de rosas em lâ de rocha. Estes autores verificaram que variações na radiação solar e na umidade relativa tiveram grande influência na CE da solução drenada.

Desta forma, se a concentração da solução nutritiva for controlada diariamente de acordo com a variação de radiação solar, as plantas podem crescer em condições nutricionais mais adequadas a cada dia.

Quando a radiação solar aumenta, a perda de água por evaporação é alta, e a concentração da solução nutritiva é reduzida. Roh & Lee (1996) desenvolveram um sistema de irrigação monitorado por computador, o qual pode controlar a concentração da solução nutritiva com base na radiação solar diária e estágio de desenvolvimento de plantas de melão.

A medida da radiação solar durante uma hora na parte da manhã, detectada por um sensor (LI - 200 SA), localizado do lado de fora da casa de vegetação, é enviada para um computador.

Os autores apresentam dados de correlação entre a radiação solar medida durante uma hora na parte da manhã e a radiação solar diária, sugerindo que a radiação solar diária pode ser predita pela avaliação desta apenas durante uma hora na parte da manhã. O horário a ser escolhido para esta avaliação é variável de acordo com os meses do ano.

A variação da concentração de nutrientes na solução em função da radiação solar foi de 2,3 mS/cm quando a radiação solar era menor que 8,35 MJ/m² e 1,7 mS/cm quando a radiação solar foi maior que 18,85 MJ/m².

Monitoramento Automático da Solução Nutritiva para Aplicação em Pesquisa

Claassens & Walt (1997) avaliou o uso de um sistema automático para fornecimento de solução nutritiva com aplicação em pesquisa. O princípio básico deste sistema é ser capaz de preparar automaticamente várias soluções nutritivas para trabalhos de pesquisa em nutrição de planta. Isto é feito pela diluição da solução estoque em uma taxa específica como é usualmente feito manualmente. Todas as diluições e abastecimento são controladas por um controlador lógico programável (CLP) apresentado na Figura 5.

A diluição da solução estoque é feita pelo dosador, o qual tem um dispositivo mecânico que abastece o fluxo de água com a solução estoque. Dependendo do tipo de solução requerida o dosador pode conectar apenas aquelas soluções requeridas, enchendo um reservatório com uma solução nutritiva específica.

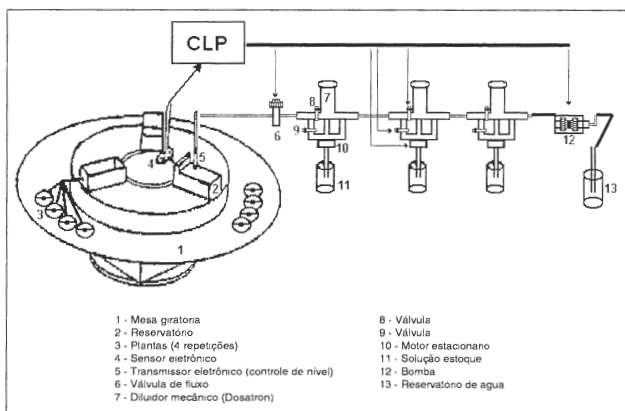


Figura 5. Esquema ilustrativo do fluxo do sistema em um controlador lógico programável (CLP). Fonte: Claassens & Walt (1997).

O controle do dosador é feita pelo CLP. Os vasos são colocados numa mesa giratória e os reservatórios para suprimento da solução nutritiva para os diferentes tratamentos são colocados num nível superior para garantir que a solução nutritiva possa fluir para os vasos por gravidade. Cada saída do reservatório para as diferentes repetições é controlada por um regulador de fluxo, semelhante aquele utilizado em hospitais para controlar o fluxo intravenoso de nutrientes para o paciente. O excesso da solução é recolhido num reservatório e descartado.

Cada depósito após estar cheio, pela ação de um controlador de nível, emite um sinal o qual é recebido por um sensor e enviado ao CLP. O CLP pode então ativar um motor elétrico o qual faz girar a mesa. Ao mesmo tempo pode ler o número do depósito cheio e enviar esta informação ao CLP o qual pode ativar o dosador de acordo com a solução requerida. Tão logo que o dosador faz as leituras as válvulas são abertas ou fechadas como desejado e é ativado o motor para o

bombeamento da água que passa pela linha principal diluindo as soluções estoques. Para evitar contaminação com a solução anterior os primeiros litros de solução são descartados, antes de encher o depósito. Esta operação é também controlada pelo CLP. Quando este depósito está cheio o controlador de nível ativa um sinal para parar o bombeamento de água, restaurando a rotatividade da mesa até outro depósito que necessita ser enchido.

De acordo com Claassens & Walt (1997) é possível o fornecimento de uma grande variedade de soluções (tratamentos) para as plantas, com precisão suficiente para a maioria dos trabalhos de pesquisa pelo uso de vários dosadores em série, os quais podem ser controlados por um CLP.

4. CONCLUSÃO

Por meio da presente revisão foi possível obter as seguintes conclusões:

- é necessário realizar um rigoroso controle da condutividade elétrica e do pH da solução nutritiva, para o monitoramento adequado do sistema recirculante;
- dentre as várias formas de monitoramento da concentração da solução nutritiva, a escolha de uma delas permite uma economia substancial de nutrientes, água e mão de obra;
- diversas formas de monitoramento da solução nutritiva são conhecidas, sendo algumas delas mais práticas, para uso freqüente por parte de produtores, enquanto que outras mais sofisticadas são preferencialmente utilizadas em trabalhos de pesquisa.

BRACCINI, M. DO C. L.; BRACCINI, A. DE L. E.; MARTINEZ, H. E. P. Replace or maintenance criterion of nutrient solution in commercial hidroponics. *Semina: Ci. Agr.*, Londrina, v. 20, n. 1, p. 48-58, mar. 1999.

ABSTRACT: This work presents provide information about the most common aspects to consider in the replace or maintenance of nutrient solution in commercial hidroponics. The information allow the evaluation of the concentration of nutrient solution used in hidroponics of several agricultural and commercial species, taking into consideration aspects which refer to the maintenance of solution pH and the monitoring of nutrient solution considering several criterion like maximum nutrient depletion, electrical conductivity, nutrient absorption curves, ions influx, solar radiation and also the monitoring of nutrient solution for NFT system and their use in research studies.

KEY WORDS: commercial hidroponics, nutrient concentration, nutrient solution.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHER, C.J.; BLAMEY, F.P. Experimental control of plant nutrient status using programmed nutrient addition. *Journal of Plant Nutrition*, v.10, p.1371-1380, 1987.
- ASHER, C.J.; EDWARDS, D.G. Modern solution culture techniques. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. (Ed.). *Inorganic plant nutrition*. New York: Spriger-Verlag, 1983. p.94-119.
- BAILEY, B.J.; HAGGETT, B.G.D.; HUNTER, A.; ALBERT, W.J.; SVANBERG, L.R. Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *J. agric. Engng. Res.*, v.40, p.129-142, 1988.
- BEN-YAAKOV, S.; BEN-ASHER, J. System design and analysis of a continuous monitoring of the environment in nutrient solution culture. *Journal of Plant Nutrition*, v.5, p.45-55, 1982.
- BÖHME, M. Influence of closed systems on the development of cucumber. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE, 9, 1996, Jersey. *Proceedings...* Wageningen: ISOSC, 1997. p.75-87.
- BUGBEE, B.G.; SALISBURY, F.B. An evaluation of MES (2 (N-morpholino) ethanesulfonic acid) and Amberlite IRC-50 as pH buffers for nutrient solution studies. *Journal of Plant Nutrition*, v.8, p.567-583, 1985.
- BRUN, R.; PARIS, B.; HAMMELIN, I. Fertigation management of rose plants grown in greenhouse on rockwool. *Adv. Hort. Sci.*, v.7, p.145-148, 1993.
- CLAASSENS, A.S.; WALT, R. van der An automated system to supply differential nutrient solutions for research purposes; technical and test data. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE, 9., 1996, Jersey. *Proceedings...* Wageningen: ISOSC, 1997. p.129-136.
- FARIA, J.C.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; FONTES, P.C.R. Cultivo de alface sem troca da solução nutritiva, em função da combinação de diferentes concentrações iniciais e de reposição. *Revista Ceres*, 1997. (no prelo).
- FUKUYAMA, T.; NONAMI, H.; KATAYAMA, K.; HASHIMOTO, Y. Improvement of hydroponic culture medium by adding calcium-zeolite. *Acta Horticulturae*, v.396, p.115-122, 1995.
- KONZAK, C.F.; POLLE, E.; KITTRICK, J.A. Screening several crops for aluminium tolerance. In: WRIGHT, M.J.; FERRARI, A.S. (Ed.). *Proceedings of workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils*. Ithaca: Cornell Univ. Press, 1976. p.311-327.
- MAANSSON, L. P S - Analysis - a way to register the nutrient uptake in soilless culture. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE, 6., 1984, Lunteren. *Proceedings...* Wageningen: ISOSC, 1984. p.339-346.
- MARTINEZ, H.E.P. *O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa*. Viçosa: UFV, 1997. 37p. (Cadernos didáticos, 1).
- MORARD, P. Possible use of ion selective electrodes for nutrient solutions in recirculated systems. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE, 9., 1996, Jersey. *Proceedings...* Wageningen: ISOSC, 1997. p.291-298.
- NUKAYA, A.; JANG, H.; UI, N.; GOTO, K.; OHKAWA, K. Changes of mineral concentrations in plant sap during the growth period of muskmelons grown in rockwool. *Acta Horticulturae*, v.396, p.167-172, 1995.
- OLIVEIRA, F.H.T.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; FONTES, P.C.R. Tamponamento de pH da solução nutritiva cultivada com alface, pelo uso de CaCO₃ e de fosfato de araxá. *Revista Ceres*, 1997. (no prelo).
- RUIZ, H.A. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. *Revista Ceres*, v.44, 1997. (no prelo).
- RESH, H.M. *Cultivos Hidropônicos - Nuevas Técnicas de Producción*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1987. 318p.
- ROH, M.Y.; LEE, Y.B. Predictive control of concentration of nutrient solution according to integrated solar radiation during one hour in the morning. *Acta Horticulturae*, v.440, p.256-261, 1996.
- SAROOSHI, R.A.; CRESSWELL, G.C. Effects of hydroponic solution composition, electrical conductivity and plant spacing on yield and quality of strawberries. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.34, p.529-535, 1994.
- SMITH, D.L. Plant sap analysis as a monitoring technique for tomatoes in rockwool. *Acta Horticulturae*, v.221, p.403-411, 1988.
- STEINER, A.A. The selective capacity of plant for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE, 5., 1980, Lunteren. *Proceedings...* Wageningen: ISOSC, 1980. p.83-96.
- YAN, F.; SCHUBERT, S.; MENGEL, K. Effect of low root medium pH on net proton release, root respiration, and root growth of corn (*Zea mays* L.) and broad bean (*Vicia faba* L.). *Plant Physiology*, v.99, p.415-421, 1992.
- WEEB, M.J. A multichannel pH controller for solution culture systems. In: BARROW, N.J. (Ed.). *Plant nutrition - from genetic engineering to field practice*. Wageningen: Kluwer Academic Publishers, 1993. p.743-746.
- WILLUMSEN, J. Nutritional requirements of lettuce in water culture. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOILLESS CULTURE, 6., 1984, Lunteren. *Proceedings...* Wageningen: ISOSC, 1984. p.777-791.
- ZIESLIN, N. Effect of pH in the root environment on leakage from plant roots. *Acta Horticulturae*, v.361, p.282-289, 1994.