



Pigmentos fotossintéticos e potencial hídrico foliar em plantas jovens de coqueiro sob estresses hídrico e salino¹

Photosynthetic pigments and leaf water potential in young plants of the coconut palm under water and salt stress

Alexandre Reuber Almeida da Silva^{2*}, Francisco Marcus Lima Bezerra³, Claudivan Feitosa de Lacerda³, Carlos Henrique Carvalho de Sousa³, Keivia Lino Chagas³

Resumo: Em regiões semiáridas, a deficiência hídrica e a salinidade do solo são os principais fatores ambientais que influenciam a capacidade de estabelecimento dos vegetais. Assim, objetivou-se com este trabalho investigar, em plantas jovens de coqueiro, os mecanismos bioquímicos associados às ações isoladas e/ou simultâneas da deficiência hídrica e da salinidade do solo. O experimento, em ambiente protegido, foi conduzido em delineamento estatístico em blocos casualizados, no arranjo de parcelas subdivididas, sendo nas parcelas aleatorizados diferentes níveis de deficiência hídrica, mediante a imposição de distintos percentuais de reposição das perdas de água por evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) (20; 40; 60; 80 e 100%), associadas às subparcelas, constituídas por quatro solos com crescentes níveis de condutividade elétrica (1,72; 6,25; 25,80 e 40,70 dS m⁻¹), oriundos do Perímetro Irrigado Morada Nova. Em condições de deficiência hídrica e de salinidade do solo, as plantas jovens de coqueiro apresentam mudanças significativas nos pigmentos fotossintéticos, com reduções nos teores totais de clorofilas (a+b), esses são indicadores dos efeitos dos estresses isolados. Os teores de carotenóides refletem o antagonismo entre os agentes estressores, deficiência hídrica e salinidade do solo. O potencial hídrico foliar é efetivamente reduzido quando a deficiência hídrica e a salinidade atuam isoladamente, isso ocorre, provavelmente, devido ao ajuste osmótico realizado pela espécie, adaptando-a à sobrevivência em condições adversas. Plantas jovens de coqueiro são mais suscetíveis às limitações de água, em detrimento aos elevados níveis de salinidade do solo, sendo a deficiência hídrica e a salinidade fatores de estresses aditivos para a espécie.

Palavras-chave: Carotenóide. Clorofila. *Cocos nucifera* L. Estado da água. Tolerância à salinização.

Abstract: In semi-arid regions, water deficiency and soil salinity are the main environmental factors that can influence a plant's ability to become established. The aim of this study therefore, was to investigate the biochemical mechanisms associated with the isolated and/or simultaneous actions of water deficiency and soil salinity in young plants of the coconut. The experiment, in a protected environment, was carried out in a design of randomised blocks, with an arrangement of subdivided lots. Differing levels of water deficiency were randomised in the lots, imposing different percentages for the replacement of water lost through the potential evapotranspiration of the crop (ET_{pc}) (20, 40, 60, 80 and 100%). The sub-lots comprised four soils at increasing levels of electrical conductivity (1.72, 6.25, 25.80 and 40.70 dS m⁻¹), from the Morada Nova Irrigated Perimeter. Under conditions of water deficiency and soil salinity, young coconut plants display significant changes in photosynthetic pigments, with reductions in the total chlorophyll content (a + b), indicators of the effects of isolated stresses. Carotenoid content reflects the antagonism between the stress factors of water deficiency and soil salinity. Leaf water potential is effectively reduced when water deficiency and salinity act in isolation, which is probably due to the osmotic adjustment made by the species, adapting it to survival under adverse conditions. Young coconut plants are more susceptible to water limitation than to high levels of soil salinity, which are considered additional stress factors for the species.

Key words: Carotenoid. Chlorophyll. *Cocos nucifera* L. Water status. Tolerance to salinisation.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 28/07/2016 e aprovado em 20/12/2016

¹Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor, defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC)

²Departamento de Ensino, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Iguatu, Iguatu, CE, Brasil, alexandre_reuber@hotmail.com, Rodovia Iguatu / Várzea Alegre, km 05, s/n, Vila Cajazeiras, Cep: 63500-000

³Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, mbezerra@ufc.br, cfeitosa@ufc.br, sousaibiapina@yahoo.com.br, kei-via@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Os fatores edafoclimáticos que exercem efeitos sob o desempenho agrônomo das espécies vegetais raramente se encontram equilibrados em condições ótimas, de modo que, durante os cultivos, as plantas estão sujeitas às ações de algum estresse abiótico, seja de forma isolada ou múltipla. Ao longo dos anos e, principalmente, na atualidade, um dos principais entraves para o setor agrícola, sobremaneira, em regiões áridas e/ou semiáridas vem sendo o processo de salinização em solos agricultáveis, constituindo um problema de abrangência social, ecológica e ambiental (SYVERTSENA; GARCIA-SANCHEZ, 2014).

Para a utilização sustentável de áreas agricultáveis que apresentam solos com excesso de sais, tanto para reabilitação do solo quanto para a produção econômica, torna-se necessário eleger e utilizar espécies vegetais tolerantes à salinidade, de modo a conhecer suas diferentes respostas e o potencial econômico, quando submetidas a tais limitações, em campo (MENDONÇA *et al.*, 2007).

Dentre as espécies vegetais de conhecida tolerância à salinidade, o coqueiro, por sua ocorrência natural em zonas costeiras, caracterizadas por apresentarem um acentuado gradiente de salinidade do solo devido à grande influência de águas oceânicas (FERREIRA NETO *et al.*, 2007), poderá apresentar características de adaptação ao excesso de sais no solo e, por conseguinte, poderá ser aproveitada como uma das espécies potenciais para a revegetação de áreas afetadas por sais no semiárido do nordeste brasileiro.

As plantas cultivadas em regiões áridas e semiáridas atravessam períodos de exposição à deficiência hídrica no solo e na atmosfera que, potencialmente, prejudicam os processos fisiológicos, bioquímicos, moleculares e morfológicos, resultando em modificações nas rotas de biossíntese dos pigmentos fotossintéticos, bem como no potencial hídrico foliar. Além disso, os efeitos dessas variações na disponibilidade de água comprometem a capacidade de estabelecimento da maioria das plantas cultivadas (SILVA *et al.*, 2012).

Estudos têm demonstrado que as respostas vegetais atribuídas aos efeitos combinados dos estresses são únicas e não podem ser definidas apenas com base nas respostas associadas aos seus respectivos efeitos isolados (MITTLER, 2006). Contudo, a literatura ainda é escassa em evidenciar o efeito conjunto da salinidade e da deficiência hídrica sob as plantas, temática relevante para o desenvolvimento de um manejo eficiente em ambientes salinos.

Na avaliação das diferentes respostas das espécies vegetais de importância agrícola aos efeitos isolados e/ou combinados da deficiência hídrica e da salinidade, estudos relacionados aos teores relativos de clorofila total e de carotenóides (CARVALHO *et al.*, 2011; SILVA JÚNIOR; SANTANA, 2013) e ao potencial hídrico foliar (BENZARTI *et al.*, 2014; FERNANDES *et al.*, 2015)

têm se mostrado bem sucedidos. Acredita-se ser possível identificar, mediante essas características, se determinada espécie vegetal apresenta tolerância e/ou capacidade de desenvolvimento em condições adversas, mediante a indução de mecanismos bioquímicos (SILVA *et al.*, 2014).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho investigar, em plantas jovens de coqueiro, os mecanismos bioquímicos associados às ações isoladas e/ou simultâneas da deficiência hídrica e da salinidade do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, do tipo casa de vegetação, entre outubro de 2013 e fevereiro de 2014, na Área Experimental da Estação Agrometeorológica, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola, no Campus Universitário do Pici, da Universidade Federal do Ceará, no município de Fortaleza (CE), nas coordenadas geográficas: 03°45' de latitude Sul; 38°33' de longitude oeste e, aproximadamente, 19 m de altitude.

Os valores médios de temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade e evaporação da água, mensurada no tanque do tipo Classe A, durante o período experimental, foram de $29,14 \pm 2,97$ °C; $68,48 \pm 12,60\%$; $0,076 \pm 0,22$ W m⁻² (comprimento de onda de 555 nm) e $5,70 \pm 0,70$ mm dia⁻¹, respectivamente, no interior da casa de vegetação.

O experimento foi conduzido em delineamento estatístico de blocos casualizados, em arranjo de parcelas subdivididas, sendo nas parcelas aleatorizados os diferentes níveis de deficiência hídrica (D), mediante a imposição de cinco distintos percentuais de reposição das perdas de água por evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}), sendo: D1 = 100% da ET_{pc}; D2 = 80% da ET_{pc}; D3 = 60% da ET_{pc}; D4 = 40% da ET_{pc} e D5 = 20% da ET_{pc}. Nas subparcelas foram aleatorizados quatro solos com crescentes níveis de salinidade (S), definidos por meio da condutividade elétrica, oriundos de quatro diferentes pontos do Perímetro Irrigado Morada Nova, localizado nos municípios de Morada Nova e Limoeiro do Norte, no estado do Ceará (5° 10' de latitude Sul; 38° 22' de longitude oeste e aproximadamente 80 m de altitude), sendo: S1 = 1,72 dS m⁻¹; S2 = 6,25 dS m⁻¹; S3 = 25,80 dS m⁻¹ e S4 = 40,70 dS m⁻¹. Foram utilizadas quatro repetições, com uma planta por vaso, perfazendo um total de oitenta unidades experimentais.

As mudas de coqueiro 'Anão Verde' do Brasil de Jiqui, com 40 dias pós-germinação, foram transplantadas para vasos de material plástico flexível com capacidade volumétrica de 25 L, preenchidos, em média, com 32,57 kg de solo da classe Neossolo Flúvico, coletado em diferentes pontos, de modo a se obter quatro níveis de salinidade, estabelecida por meio da condutividade elétrica (Tabela 1). Uma amostra de cada ponto de coleta foi encaminhada para

Tabela 1 - Atributos químicos dos solos utilizados como substratos para o cultivo das plantas jovens de coqueiro, cultivar “Anão Verde”, no experimento¹

Table 1 - Chemical attributes of the soils used in the experiment as substrates for the cultivation of young plants of the coconut “Dwarf Green”¹

Salinidade	pH	CE	Complexo sortivo					
	(Água)		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺ + Al ³⁺	Al ³⁺
	(-)	(dS m ⁻¹)	cmol _c kg ⁻¹					
S1	6,8	1,72	6,58	4,34	0,06	4,32	2,56	-
S2	7,5	6,25	7,80	5,24	0,08	7,23	0,00	-
S3	7,4	25,80	7,51	5,69	0,05	15,78	0,00	-
S4	7,0	40,70	14,91	4,58	0,07	22,46	0,00	-

Salinidade	S	T	V	PST	C	M.O.	P _{Assimilável}	Classificação*
	cmolc kg ⁻¹		%		g kg ⁻¹		(mg kg ⁻¹)	
S1	15,30	17,86	86	24	12,26	21,13	30	Sódico
S2	20,35	20,35	100	36	16,64	28,66	30	Salino – sódico
S3	29,03	29,03	100	54	9,22	15,89	69	Salino – sódico
S4	42,02	42,02	100	53	20,23	34,88	82	Salino – sódico

¹pH – potencial hidrogeniônico, CE – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; S – soma de bases; T – capacidade de troca de cátions; V – saturação por bases; PST – percentagem de sódio trocável; C - carbono orgânico; M.O. – matéria orgânica; P_{Assimilável} – fósforo assimilável; * - Classificação dos solos quanto à salinidade.

¹pH – hydrogenionic potential, CE – electrical conductivity of the soil saturation extract; S – sum of bases; T – cation exchange capacity; V – base saturation; PST – exchangeable sodium percentage; C – organic carbon; M.O. – organic matter; P_{Assimilável} – assimilable phosphorus; * - soil classification for salinity.

laboratório e caracterizada quanto aos atributos químicos, cujos resultados estão expressos na Tabela 1. Com base nos resultados da análise do solo, realizou-se a correção com fertilizantes minerais. A quantidade aplicada foi definida conforme Fontes *et al.* (1998), que sugerem, para o estabelecimento do coqueiro ‘Anão Verde’, a aplicação de 200 g por planta da mistura de grânulos 15 – 10 – 15 (NPK). Aplicou-se, ainda, o equivalente a 30 g por planta de FTE BR 12, para suprir as exigências por micronutrientes.

Adotou-se o sistema de irrigação por gotejamento, utilizando-se emissores do tipo autocompensantes, com vazão nominal de 4 L h⁻¹. O método de manejo de irrigação adotado foi baseado nas condições climáticas. Para a determinação da evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}), adotou-se a metodologia proposta por Bernardo *et al.* (2006). A diferenciação dos tratamentos de deficiência hídrica se deu mediante a variação do tempo de irrigação, controlado através de registros independentes. Procederam-se, ainda, todos os tratamentos culturais e fitossanitários necessários (FONTES *et al.*, 1998).

Para a determinação dos pigmentos foliares (clorofilas totais e carotenóides), aos 121 dias após o transplante (DAT), foram retirados dois discos foliares de 5 mm de diâmetro, na terceira folha contada a partir da base e, em laboratório, adotou-se a metodologia proposta por Wellburn (1994). O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado antes do nascer do sol (“predawn”), ao término do experimento (121 DAT),

utilizando-se uma bomba de pressão do tipo Scholander, conforme a metodologia descrita em Turner (1981).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando denotado efeito significativo, os dados foram analisados através de regressão. Para efeito significativo nas interações entre os fatores estudados, os dados foram analisados segundo os procedimentos inerentes à análise de regressão linear múltipla e plotaram-se as respectivas superfícies de respostas. Os modelos matemáticos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t”. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos softwares Microsoft Excel[®] (versão 2007), ASSISTAT[®] (versão 7.6 beta) e STATISTICA[®] (versão 7.0).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da ANOVA indicaram que os teores totais de clorofilas e carotenóides, assim como o potencial hídrico foliar, foram influenciados significativamente pelos efeitos isolados dos fatores deficiência hídrica ($p \leq 0,01$) e salinidade do solo ($p \leq 0,01$), porém, apenas os teores de carotenóides sofreram influência da interação entre esses dois fatores ($p \leq 0,05$).

Na Figura 1a, estão contidas as médias dos teores totais de clorofilas (a+b), nos diferentes níveis de deficiência

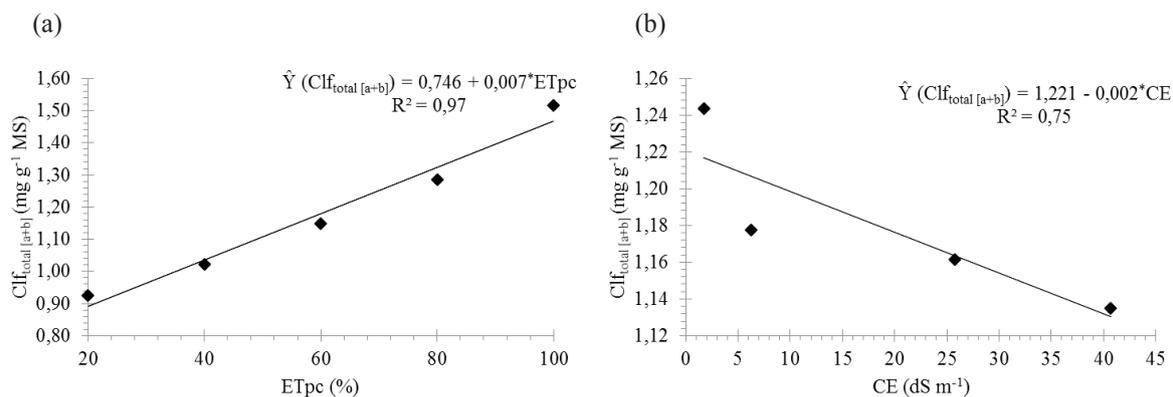


Figura 1 - Teores totais de clorofilas ($Clf_{total [a+b]}$) em folhas de plantas jovens de coqueiro, cultivar “Anão Verde”, em função de diferentes níveis de deficiência hídrica - % ETpc (a) e de salinidade do solo – CE (b). Fortaleza, CE, 2013/2014¹

¹(*), significativo a 5% de probabilidade, pelo teste “t”.

Figure 1 - Total chlorophyll content ($Clf_{total [a + b]}$) in leaves of young plants of the coconut “Green Dwarf”, for different levels of water deficit - % ETpc (a) and soil salinity – CE (b), Fortaleza, Ceará, 2013/2014¹

¹(*), significant at 5% probability by t-test.

hídrica estudados. Pelos resultados, verificou-se que os teores totais de clorofilas (a+b) variaram de 0,91 a 1,47 $mg\ g^{-1}\ MS$, de tal forma que os menores valores resultaram da aplicação de 20% da ETpc, ao passo que as maiores médias foram obtidas com 100% da ETpc.

Conforme o estudo de regressão, constatou-se que a aplicação dos crescentes níveis de reposição das perdas de água por evapotranspiração (% ETpc) provocou aumentos lineares nos teores totais de clorofilas (a+b), independentemente do nível de salinidade do solo (Figura 1a).

Assim, para os teores totais de clorofilas (a+b), foi observado incremento linear de aproximadamente 39%, entre o limite mínimo (20% ETpc) e máximo (100% ETpc) da lâmina de irrigação fornecida à cultura, com acréscimos de 0,0072 mg de clorofila total (a+b) $g^{-1}\ MS$ (0,96%), para cada aumento unitário no nível de ETpc aplicado (Figura 1a).

Esses resultados podem ser explicados levando-se em conta que a deficiência hídrica beneficia a síntese de espécies reativas de oxigênio (EROs), que prejudicam o metabolismo vegetal, dentre outras razões, por induzirem a oxidação dos pigmentos fotossintéticos. Em plantas sob estresse hídrico, têm sido verificados decréscimos nos teores de clorofila, o que pode ser enquadrado como um típico indício de estresse oxidativo, sendo, provavelmente, resultado de foto-oxidação dos pigmentos, associados à própria degradação das moléculas de clorofila (CARLIN *et al.*, 2012).

Tais observações estão condizentes com Carvalho *et al.* (2011), ao relatarem que condições ambientais adversas, tais como deficiência hídrica e salinidade, acarretam desequilíbrios entre a produção e a remoção das EROs. Para os autores, o resultado final desse desbalanço é uma

ascensão dos níveis de EROs, ao ponto de desencadear estresse oxidativo, acarretando uma série de implicações negativas nos mecanismos metabólicos, associados aos processos fotossintéticos.

Por outro lado, esses resultados são divergentes dos obtidos por Silva Júnior e Santana (2013), ao evidenciarem que os teores de clorofila total, mensurados em plantas de coqueiro, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas frente à imposição de três diferentes lâminas diárias de irrigação equivalentes a 150, 100 e 50 L por planta, respectivamente.

A representação gráfica dos teores totais de clorofilas (a+b) para o efeito principal do fator salinidade do solo pode ser observado na Figura 1b. Pelos resultados, constatou-se que independentemente do nível de deficiência hídrica, os teores totais de clorofilas variaram de 1,13 a 1,22 mg de clorofila total (a+b) $g^{-1}\ MS$. O menor dos valores (1,13 $mg\ g^{-1}\ MS$) foi resultado da salinidade do solo correspondente a 40,70 $dS\ m^{-1}$, enquanto o maior (1,22 $mg\ g^{-1}\ MS$), superior em aproximadamente 7,4% quando equiparado a esse, foi obtido justamente no solo caracterizado por possuir CE de 1,72 $dS\ m^{-1}$ (Figura 2). Conforme o modelo matemático, verificam-se decréscimos relativos de 0,18% (0,0022 mg de clorofila total (a+b) $g^{-1}\ MS$), por incremento unitário de CE.

Corroborando com os presentes resultados, Lima (2014) também observou redução linear dos conteúdos totais de clorofilas, em plantas de coqueiro, quando submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação correspondentes a 0,9; 5,0; 10; 15 e 20 $dS\ m^{-1}$. Para o referido autor, o excesso de sais, além do limite tolerado por parte das espécies vegetais, estimula a ação da enzima clorofilase, que, diante das condições adversas de

salinidade do solo, passa a atuar degradando as moléculas dos pigmentos fotossintetizantes.

Por outro lado, deve-se considerar que existem controvérsias na literatura acerca do comportamento dessa variável em função do estresse hídrico e/ou salino. De acordo com Mendes *et al.* (2011), enquanto alguns autores descrevem diminuição dos teores de clorofila, outros reportam incrementos, o que pode ser interpretado como uma resposta adaptativa aos agentes estressantes. Conforme os referidos autores, acréscimos nos teores totais de clorofilas sob condições adversas, possivelmente, indicam a ativação de um mecanismo de proteção ao aparato fotossintético, e aparentam ser uma implicação direta do próprio desenvolvimento dos cloroplastos, através da ampliação no número de tilacóides ou, até mesmo, do aumento no número de cloroplastos.

Dessa forma, reduções nos processos de síntese de moléculas de clorofilas, em consequência da escassez hídrica e/ou do acúmulo de sais nos tecidos vegetais, não podem ser interpretadas apenas do ponto de vista dos efeitos deletérios inerentes às consequências desse feito ao metabolismo vegetal. É possível que essa redução possa ser decifrada como uma resposta de aclimação à atuação dos agentes estressantes, adotada por parte dos vegetais, na

tentativa de conservar energia e, conseqüentemente, captar menos energia luminosa, evitando, dessa forma, eventuais estresses foto-oxidativos (TABOT; ADAMS, 2013).

Com relação aos valores médios observados nos teores de carotenóides, em função dos tratamentos de deficiência hídrica e de salinidade do solo, estimou-se que o máximo valor de 0,41 mg g⁻¹ MS foi obtido no tratamento equivalente à associação entre 100% da ETpc e o solo caracterizado por deter uma CE de 1,72 dS m⁻¹. Já o menor valor médio da variável em questão, 0,08 mg g⁻¹ MS, inferior em aproximadamente 80%, quando equiparado ao máximo, foi constatado no tratamento em que foi aplicada a menor lâmina de água (20% da ETpc), combinado com o valor mais elevado de salinidade do solo (40,80 dS m⁻¹), conforme a Figura 2.

Dessa forma, verificou-se que houve incrementos nos teores de carotenóides à medida que se aumentou a aplicação de água (Figura 2). Isso possivelmente ocorreu em decorrência do comprometimento da síntese de carotenóides sob condições de deficiência hídrica. De acordo com Fiaz *et al.* (2014), a insuficiência de água acarreta redução na atividade enzimática da protoclorofila redutase, inibindo a conversão dos respectivos precursores em pigmentos fotossintéticos, sendo essa redução apontada como a principal razão da menor produção de pigmentos

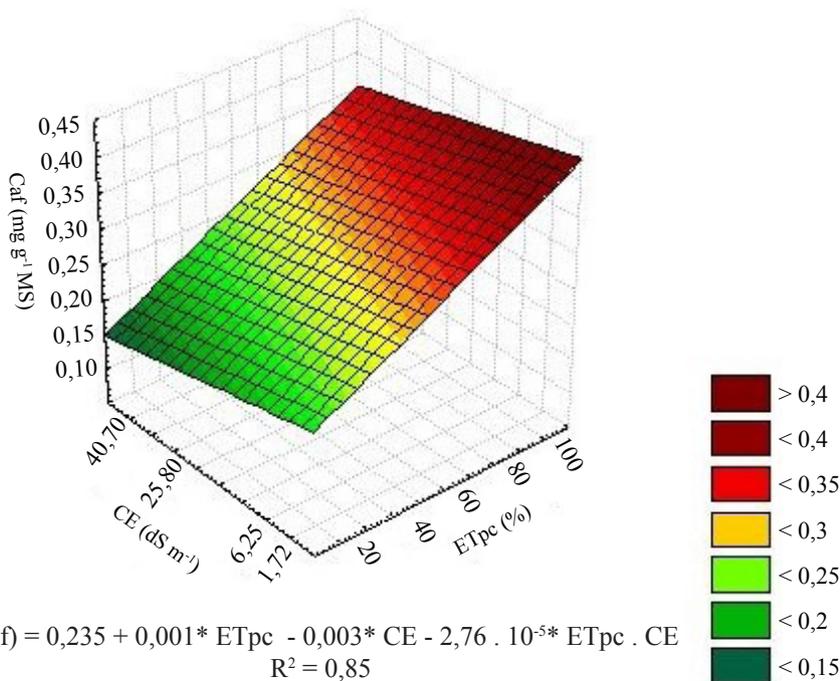


Figura 2 - Teores de carotenóides (Caf) em folhas de plantas jovens de coqueiro, cv. "Anão Verde", em função das combinações de diferentes níveis de deficiência hídrica (% ETpc) e de salinidade do solo (CE). Fortaleza, CE, 2013/2014¹

¹(*), significativo a 5% de probabilidade, pelo teste "t".

Figure 2 - Carotenoid content (Caf) in leaves of young plants of the coconut "Green Dwarf", for combinations of different levels of water stress (% ETpc) and soil salinity (EC). Fortaleza, Ceará, 2013/2014¹

¹(*), significant at 5% probability by t-test.

fotossintéticos, inclusive de carotenóides, quando as plantas são submetidas à deficiência hídrica.

No entanto, esses resultados divergem dos obtidos por Rojas *et al.* (2012), ao relatarem que o conteúdo de carotenóides foliares aumentou, em função do avanço da deficiência hídrica em plantas de *Gmelina arborea* Roxb, na tentativa de minimizar danos ao aparato fotossintético, devido ao estresse imposto. Para os autores, esse comportamento, demonstra ser uma estratégia de dissipação do excesso de energia luminosa, utilizado pelas espécies vegetais, sobretudo, diante de condições de deficiência hídrica, na qual os carotenóides desempenham papel fotoprotetor.

Os carotenóides absorvem radiação visível (400 – 700 nm), agindo como um filtro à radiação ultravioleta (200 - 400 nm), reduzindo os eventuais danos celulares decorrentes da incidência de luz em demasia, bem como exercendo função fotoprotetora por meio da rápida extinção dos estados excitados da clorofila, protegendo, assim, as células da fotooxidação (TAIZ; ZEIGER, 2013). Por outro lado, a expressão da resposta à elevação do nível de salinidade do solo apontou que os crescentes níveis de CE proporcionaram reduções no teor de carotenóides (Figura 2).

Esse comportamento pode ser atribuído, dentre outras causas, ao fato do estresse salino desacelerar a produção de pigmentos fotossintéticos, induzindo a degradação de β - caroteno, provocando uma diminuição no teor de carotenóides, que são componentes integrados dos tilacóides, atuantes na absorção e na transferência de luz para a clorofila (GOMES *et al.*, 2011).

Por outro lado, o incremento no suprimento hídrico das plantas aparenta mitigar os efeitos deletérios que a elevada salinidade do solo é capaz de exercer sob as concentrações foliares de carotenóides, levando-se em consideração que, sob condições de baixa salinidade (1,72 dS m⁻¹), estimou-se que a elevação do nível de reposição da ETpc de 20 para 100% implicou em um aumento de aproximadamente 35,06% nos teores foliares de carotenóides, enquanto sob condições extremas de salinidade (40,70 dS m⁻¹), esse incremento foi de aproximadamente 80%.

O modelo matemático de superfície de resposta apresentado na Figura 2 ilustra que o incremento na ETpc e na CE proporcionaram aumentos e decréscimos lineares nos teores de carotenóides, respectivamente. Esse aumento foi na proporção aproximada de 0,001 mg de carotenóides g⁻¹ MS (0,63%), ao passo que a redução foi de 0,003 de carotenóides g⁻¹ MS (1,40%), a cada incremento unitário de ETpc e de CE, respectivamente. No que diz respeito ao parâmetro equivalente à interação entre os referidos fatores, supõe-se que a associação entre os tratamentos contribuiu com os efeitos deletérios da salinidade sob a variável em questão, com reduções, embora não tão expressivas em termos de valores absolutos (0,01%).

Dessa forma, observa-se que a deficiência hídrica foi o fator mais limitante à produção de carotenóides em folhas de coqueiro, em detrimento à salinidade do solo, fato esse comprovado pelo maior gradiente referente à deficiência hídrica na superfície de resposta da variável, embora o modelo matemático atribua maior contribuição do efeito depressivo da salinidade sob a expressão final das respostas da variável em questão (Figura 2).

Tais fatos sugerem que a espécie, diante de inadequadas condições de suprimento hídrico e/ou de salinidade do solo, possui uma baixa capacidade natural de defesa aos agentes de estresse, tendo em vista que a presença reduzida ou ausência de carotenóides torna a planta mais sujeita à ação das espécies reativas de oxigênio (EROs), que são normalmente formadas em decorrência dos estresses impostos sob as espécies vegetais (RIBEIRO *et al.*, 2014).

Em linhas gerais, pode-se considerar que esses resultados corroboram com as informações de Cuzzuol e Clippel (2009), ao discorrerem que diferenças nos teores de clorofila e de carotenóide são comuns em plantas expostas aos estresses ambientais, tendo em vista que essas condições adversas geram mecanismos fisiológicos que levam, entre outras consequências, à diminuição dos teores dos pigmentos, que são associados aos processos fotossintéticos nos vegetais.

Os dados relativos ao potencial hídrico foliar ajustaram-se à equação de regressão linear positiva ($R^2 = 0,69$), significando que à medida que os níveis de deficiência hídrica (% ETpc) diminuíram, ocorreu um aumento no potencial hídrico foliar, com acréscimos de aproximadamente 0,007 MPa para o aumento de 1% na ETpc, independentemente do nível de salinidade considerado (Figura 3a).

Resultados análogos foram obtidos por Peçanha (2007), ao verificar que o potencial hídrico das plantas de coqueiro está diretamente relacionado com a disponibilidade de água no solo. Na referida pesquisa, essa variável também decresceu linearmente, com a redução do conteúdo de água no solo.

Dos resultados, estimou-se que o potencial hídrico foliar aumentou de forma linear à medida que se forneceu mais água para a cultura (Figura 3a). Conforme a equação de regressão, no mais severo nível de deficiência hídrica (20% ETpc), foi estimado o valor de -1,12 MPa, enquanto nas plantas bem supridas de água (100% ETpc), estimou-se que esse valor chegou a -0,57 MPa.

De forma semelhante, Passos *et al.* (2007) também observaram aumento do potencial hídrico, com a variação no nível de água no solo do período seco para o chuvoso, em quatro variedades de coqueiro-anão, cultivadas em condições de campo, no Nordeste do Brasil.

Os valores médios registrados no nível de deficiência hídrica correspondente a 20% da ETpc (-1,12 MPa) assemelham-se aos de Gomes *et al.* (2008), ao constatarem

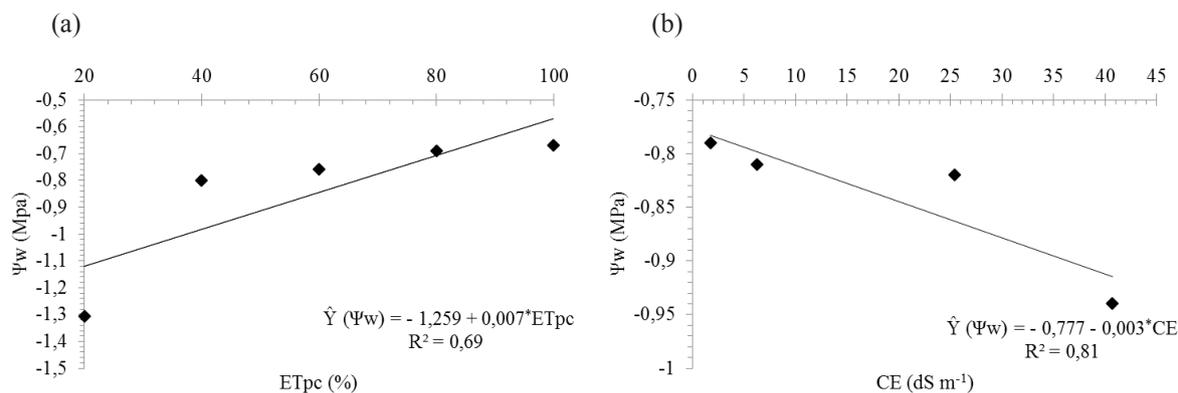


Figura 3 - Potencial hídrico foliar - Ψ_w (Mpa), em plantas jovens de coqueiro, cv. "Anão Verde", cultivadas em função de diferentes níveis de deficiência hídrica - % Etpc (a) e de de salinidade do solo - CE (b). Fortaleza, Ceará, 2013/2014¹

¹(*), significativo a 5% de probabilidade, pelo teste "t".

Figure 3 - Leaf water potential - Ψ_w (Mpa) in young plants of the coconut "Green Dwarf" grown at different levels of water stress -% Etpc (a) and soil salinity - CE (b). Fortaleza, Ceará, 2013/2014¹

¹(*), significant at 5% probability by t-test.

que a progressiva deficiência hídrica no solo acarretou diminuição no potencial hídrico foliar para o valor médio de -1,22 MPa, no nível mais crítico de deficiência hídrica, também em plantas jovens de coqueiro. Para os autores, em curto prazo, as reduções nos potenciais hídricos na folha são apontadas como uma das principais respostas evidenciadas em plantas de coqueiro sob estresse hídrico.

De acordo com Fernandes *et al.* (2015), esse comportamento, possivelmente, é consequência de uma série de modificações, inclusive de nível bioquímico, que induzem alterações na concentração do suco celular, que, além disso, podem derivar também da própria redução do volume das células foliares, como implicações da elevação do grau de insuficiência de água no solo, até o ponto de inviabilizar o atendimento das necessidades hídricas das plantas.

Quanto aos efeitos do fator salinidade do solo sob o potencial hídrico foliar, de acordo com a Figura 3b, verifica-se que valores de potencial hídrico foliar variaram de -0,94 a -0,79 MPa entre os níveis de CE avaliados. Contudo, as diferenças observadas, apesar de significativas, podem ser consideradas de pequena amplitude, registrando-se maiores valores de potencial hídrico foliar (-0,79 MPa) para o tratamento equivalente a CE de 1,72 dS m⁻¹, ao passo que o menor dos valores (-0,94 MPa) foi obtido no mais severo nível salino (40,70 dS m⁻¹).

Conforme os estudos de regressão, o efeito foi linear negativo ($R^2 = 0,81$), havendo decréscimo no potencial hídrico foliar de 0,003 para cada incremento unitário de CE, refletindo o efeito adverso da salinidade sobre o potencial hídrico foliar (Figura 3b). Esses resultados corroboram com Lima (2014) e Marinho *et al.* (2005), que também constataram reduções lineares no potencial hídrico foliar em

plantas de coqueiro, em resposta ao acréscimo da salinidade da água de irrigação.

De acordo com Benzarti *et al.* (2014), plantas capazes de tolerar elevada concentração salina podem responder aos efeitos da salinidade através da diminuição do potencial osmótico, que contribui para a redução do potencial hídrico foliar, aumentando, dessa forma, o fluxo de água através da planta, assegurando o status hídrico necessário à manutenção de processos fisiológicos que são essenciais à sobrevivência dos vegetais.

Considerando-se os intervalos nos quais os valores médios de potencial hídrico foliar variaram frente aos diferentes níveis de deficiência hídrica (-1,31 a -0,67 MPa) e de salinidade do solo (-0,79 a -0,94 MPa), pode-se inferir que as plantas jovens de coqueiro apresentaram maior capacidade de adaptação à salinidade em detrimento da deficiência hídrica, uma vez que manteve seu potencial hídrico foliar menos variável e com maiores valores situados dentro de um trecho de maior amplitude sob o predomínio dessas condições, quando comparadas as categorias de deficiência hídrica avaliadas.

O que é condizente com Mesquita *et al.* (2012), ao discorrerem que, em algumas espécies vegetais, a capacidade de diminuição do potencial hídrico foliar tem sido associada com sua respectiva tolerância à deficiência hídrica e/ou a salinidade. Por outro lado, essas reduções no potencial hídrico foliar frente às condições adversas de suprimento hídrico e/ou de salinidade do solo podem estar associadas aos decréscimos nos potenciais de turgescência celular, em decorrência dos efeitos biofísicos que esses agentes estressores são capazes de exercer nas relações hídricas dos vegetais (TAIZ; ZEIGER, 2013).

CONCLUSÕES

A tolerância das plantas jovens de coqueiro à deficiência hídrica e/ou à salinidade do solo não está atribuída à manutenção dos conteúdos foliares de clorofilas e de carotenóides;

O principal mecanismo bioquímico aclimatativo adotado por plantas jovens de coqueiro, frente à deficiência hídrica e à salinidade do solo, é a redução do potencial hídrico foliar, supostamente decorrente de ajustes osmóticos.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), pelo fomento da pesquisa.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

BENZARTI, M.; REJEB, K. B.; MESSEDI, D.; MNA, A. B.; HESSINI, K.; KSONTINI, M.; ABDELLY, C.; DEBEZ, A. Effect of high salinity on *Atriplex portulacoides*: Growth, leaf water relations and solute accumulation in relation with osmotic adjustment. **South African Journal of Botany**, v. 95, p. 70–77, 2014.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625 p.

CARLIN, S. D.; RHEIN, A. F. de L.; SANTOS, D. M. M. dos. Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 553-564, 2012.

CARVALHO, F. E. L.; LOBO, A. K. M.; BONIFACIO, A.; MARTINS, M. O.; LIMA NETO, M. C.; SILVEIRA, J. A. G. Aclimação ao estresse salino em plantas de arroz induzida pelo pré-tratamento com H₂O₂. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 416 – 423, 2011.

CUZZUOL, G. R. F.; CLIPPEL, J. K. Aspectos ecofisiológicos de *Sinningia aghensis* Chautems em condições de campo. **Hoehnea**, v. 36, n. 1, p. 73-81, 2009.

FERNANDES, E. T.; CAIRO, P. A. R.; NOVAES, A. B. de. Respostas fisiológicas de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. **Ciência Rural**, v. 45, n. 1, p. 29-34, 2015.

FERREIRA NETO, M.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; HOLANDA, J. S. de; BLANCO, F. F. Emissão foliar, relações iônicas e produção do coqueiro irrigado com água salina. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, 2007.

FIAZ, K.; MALIK, S. A.; YOUNIS, U.; DANISH, S.; RAZA SHAH, M. H.; NIAZ, S. Drought impact on Pb/Cd toxicity remediated by biochar in *Brassica campestris*. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 14, n. 4, p. 845-854, 2014.

FONTES, H.R.; CINTRA, F.L.D.; CARVALHO FILHO, O.M. de. Implantação e manejo da cultura do coqueiro. In: FERREIRA, J.M.S.; WARWICK, D.R.N.; SIQUEIRA, L.A. (Ed.). A cultura do coqueiro no Brasil. 2 ed. Brasília: EMBRAPA, - SPI, 1998, cap. 5, p. 99-128.

GOMES, F. P.; OLIVA, M. A.; MIELKE, M. S.; ALMEIDA, A.A. F. de, LEITE, H. G., AQUINO, L. A. Photosynthetic limitations in leaves of young Brazilian Green Dwarf coconut (*Cocos nucifera* L. 'nana') palm under well-watered conditions or recovering from drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 62, p. 195–204, 2008.

GOMES, M. A. da C.; SUZUKI, M. S.; CUNHA, M. da; TULLII, C. F. Effect of salt stress on nutrient concentration, photosynthetic pigments, proline and foliar morphology of *Salvinia auriculata* Aubl. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 23, n. 2, p. 164-176, 2011.

LIMA, B. L. de C. Respostas fisiológicas e morfométricas de mudas de coqueiro anão irrigado com águas salinas. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MARINHO, F. J. L.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P. D.; FERREIRA NETO, M. Alterações fisiológicas em coqueiro irrigado com água salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Suplemento, p. 370-374, 2005.

- MENDES, B. S. da S.; WILLADINO, L.; CUNHA, P. C. da; OLIVEIRA FILHO, R. A. de; CAMARA, T. R. Mecanismos fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 71-77, 2011.
- MENDONÇA, A. V. R.; CARNEIRO, J. G. de ARAÚJO; BARROSO, D. G.; SANTIAGO, A. R.; RODRIGUES, L. A.; FREITAS, T. A. S. de. Características biométricas de mudas de *Eucalyptus sp* sob estresse salino. **Revista Árvore**, v. 31, n. 3, p. 365-372, 2007.
- MESQUITA, F. de O.; CAVALCANTE, L. F.; PEREIRA, W. E.; REBEQUI, A. M.; LIMA NETO, A. J. de; NUNES, J. C. Produção de mudas de maracujazeiro amarelo submetidas à salinidade em solo com biofertilizante bovino. **Ciencia Del Suelo**, v. 30, n. 1, p. 31-41, 2012.
- MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends Plant Science**, v. 11, n. 1, p. 9-15, 2006.
- PASSOS, E. E. M.; PRADO, C. H. B. A.; ARAGÃO, W. M. Estado hídrico e trocas gasosas foliares do coqueiro anão verde nos tabuleiros costeiros e na região semi-árida do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, Supl. 2, p. 441-443, 2007.
- PEÇANHA, A. L. Biometria, relações hídricas e trocas gasosas do coqueiro anão verde em função da compactação, lâmina de irrigação e classe de solo. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.
- RIBEIRO, M. V.; DEUNER, S.; BENITEZ, L. C.; EINHARDT, A. M.; PETERS, J. A.; BRAGA, E. J. B. Betacyanin and antioxidant system in tolerance to salt stress in *Alternanthera philoxeroides*. **Agrociencia**, v. 48, p. 199-210, 2014.
- ROJAS, A.; MORENO, L.; MELGAREJO, L. M.; RODRÍGUEZ, M. A. Physiological response of gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.) to hydric conditions of the colombian Caribbean. **Agronomía Colombiana**, v. 30, n. 1, p. 52-58, 2012.
- SILVA JÚNIOR, C. D.; SANTANA, M. C. de. Effects of Vapour Pressure Deficit on Gas Exchange of Coconut Palm Tree Grown under Irrigation. **Acta Horticulturae**, v. 1, p. 191-195, 2013.
- SILVA, L. de A.; BRITO, M. E. B.; SÁ, F. V. da S.; MOREIRA, R. C. L.; SOARES FILHO; W. dos S.; FERNANDES, P. D. Mecanismos fisiológicos em híbridos de citros sob estresse salino em cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, (Suplemento), p. S1-S7, 2014.
- SILVA, M. R. da; MARTIN, T. N.; ORTIZ, S.; BERTONCELLI, P.; VONZ, D. Desempenho agrônomo de genótipos de milho sob condições de restrição hídrica. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 202-212, 2012.
- SYVERTSENA, J.P.; GARCIA-SANCHEZ, F. Multiple abiotic stresses occurring with salinity stress in citrus. **Environmental and Experimental Botany**, v. 103, n. 1, p. 128-137, 2014.
- TABOT, P.T.; ADAMS, J.B. Early responses of *Bassia diffusa* (Thunb.) Kuntze to submergence for different salinity treatments. **South African Journal of Botany**, v. 84, p. 19-29, 2013.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.
- TURNER, N.C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil**, v. 58, p. 339-366, 1981.
- WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **J. Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.