



Universidade de Évora

**Interação da salinidade e da fertilização azotada na  
cultura do sorgo sacarino**

Mestrado em Engenharia Agronómica

**Jordana Pia Cardoso Branco**

**Orientador**

Doutor Francisco Lúcio dos Reis Borges Brito dos Santos

Évora, 2012

# **Interação da salinidade e da fertilização azotada na cultura do sorgo sacarino**

Mestrado em Engenharia Agronómica

**Jordana Pia Cardoso Branco**

**Orientador**

Doutor Francisco Lúcio dos Reis Borges Brito dos Santos

Évora, 2012

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Francisco Lúcio dos Santos pela oportunidade de realização deste trabalho e pela orientação ao longo do mesmo.

Agradeço ao Professor Doutor Renato Ruas Coelho pela paciência e acompanhamento ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço a Maria Gertrudes Batista, José Lobato Condeças e Custódio José Alves o generoso apoio prestado à realização deste trabalho de investigação.

Agradeço, também, o financiamento do projeto NITROSAL pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), o que permitiu a realização deste trabalho experimental.

# INTERAÇÃO DA SALINIDADE E DA FERTILIZAÇÃO AZOTADA NA CULTURA DO SORGO SACARINO

## Resumo

Plantas de sorgo sacarino foram expostas a quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4, 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) na água de rega, num desenho experimental em blocos casualizados de 4 × 3, com 6 repetições, num total de 72 vasos. Pretendeu-se, assim, avaliar o efeito da interação entre os vários níveis de salinidade e de fertilização azotada na tolerância das plantas de sorgo à salinidade, pela avaliação de parâmetros fisiológicos e do crescimento das plantas.

As plantas sujeitas a altas concentrações de sal (acima de 4 dS m<sup>-1</sup>) apresentaram decréscimos muito pronunciados nos parâmetros evapotranspiração (ET), condutância estomática ( $g_s$ ), teor relativo em clorofilas e taxa de fotossíntese líquida (A), o que se refletiu numa redução da sua biomassa final.

Para níveis de salinidade na água de rega baixos (da ordem de 2 dS m<sup>-1</sup>), os compostos azotados parecem beneficiar a tolerância ao sal. No entanto, nas plantas expostas a elevadas concentrações de sal (maior que 4 dS m<sup>-1</sup>), o aumento da fertilização azotada levou a decréscimos no crescimento, possivelmente pelo efeito osmótico da alta concentração de azoto, potenciando o efeito salino.

**Palavras-chave:** sorgo sacarino, salinidade, fertilização azotada, interação sal-azoto

# INTERACTION OF SALINITY AND NITROGEN FERTILIZATION ON *SORGHUM BICOLOR*

## Abstract

*Sorghum bicolor* plants were exposed to four levels of electric conductivity (0, 2, 4, 6 dS m<sup>-1</sup>) and three levels of nitrogen fertilization (20%, 60% and 100%) in the irrigation water, on a 4 × 3 layout, with a total of 72 pots. The aim of this work was to assess the effect of the interactions between the different salinity and nitrogen levels onto the salt tolerance of the plants, by the evaluation of several physiological and growth parameters.

Plants exposed to high salt levels (above 4 dS m<sup>-1</sup>) showed decreased values of evapotranspiration (ET), stomatal conductance ( $g_s$ ), chlorophyll content and photosynthetic rate ( $A$ ), which resulted in lower plant dry weights.

At low salinity levels (around 2 dS m<sup>-1</sup>), nitrogen seems to have a beneficial effect on the salt tolerance. In contrast, plants exposed to high salt levels (above 4 dS m<sup>-1</sup>) decreased their growth with increasing N-fertilization, possibly because nitrogen behave as a salt itself, enhancing the salinity effect and further inhibiting plant growth.

**Key-words:** *Sorghum bicolor* L. Moench, salinity, nitrogen fertilization, salt-nitrogen interaction

## ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Origem da salinidade no solo .....	1
2. SALINIDADE NAS PLANTAS .....	3
2.1. Efeitos da salinidade nos parâmetros fisiológicos e de crescimento .....	3
2.2. Mecanismos de tolerância das plantas à salinidade .....	7
2.3. Efeitos da interação Sal-Azoto .....	10
2.4. Objetivo .....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
3.1. Esquema experimental do ensaio .....	13
3.2. Aplicação dos tratamentos .....	16
3.3. Avaliação de parâmetros fisiológicos das plantas .....	16
3.3.1. Evapotranspiração (ET) .....	17
3.3.2. Condutância estomática ( $g_s$ ) .....	18
3.3.3. Teor relativo em clorofilas .....	18
3.3.4. Taxa de fotossíntese líquida (A) .....	19
3.3.5. Massa verde (MV), seca (MS) e teor em água (% H <sub>2</sub> O) .....	19
3.3.6. Análise estatística dos dados .....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
4.1. Evapotranspiração .....	21
4.2. Água aplicada .....	22
4.3. Percentagem de água .....	23
4.4. Condutância estomática ( $g_s$ ) .....	24
4.5. Teor relativo em clorofilas .....	26
4.6. Taxa de fotossíntese líquida (A) .....	27

4.7. Biomassa.....	29
5. CONCLUSÕES .....	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição geral dos 72 vasos com as plantas de sorgo. ....	13
Figura 2 – Perfil do solo em Alvalade do Sado, de onde foram colhidas as amostras de solo que serviram o ensaio em vasos descrito neste trabalho. ....	14
Figura 3 – Evapotranspiração (ET, mm) das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. ....	21
Figura 4 - Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias, incluindo regas salinas, azotadas e com água corrente. ....	22
Figura 5 – Percentagem de água na parte aérea das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. ....	23
Figura 6 – Condutância estomática ( $g_s$ , mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) das plantas de sorgo sacarino com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. ....	25
Figura 7 – Teor relativo em clorofilas das plantas de sorgo sacarino expostas a quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. ....	26
Figura 8 – Taxa de fotossíntese líquida ( $A$ , μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. ....	28
Figura 9 – Peso seco da parte aérea (g) das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m <sup>-1</sup> ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. ....	30
Figura 10 – Aspeto de plantas de sorgo sujeitas a 64 dias de exposição a uma salinidade de 6 dS m <sup>-1</sup> e (a) 100% de fertilização azotada ou (b) 20% de fertilização azotada. ....	30



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Características físicas e químicas médias de amostras do perfil de solo de Alvalade-Sado.....	15
--	----

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do TDS ( $\text{g L}^{-1}$ ).....	16
Equação 2 – Cálculo da Evapotranspiração (mm) .....	18
Equação 3 – Cálculo da percentagem de água .....	20
Equação 4 – Equação de regressão sequencial obtida para a evapotranspiração.....	21
Equação 5 – Equação de regressão sequencial obtida para a condutância estomática .....	24
Equação 6 – Equação de regressão sequencial obtida para o teor relativo em clorofilas .....	26
Equação 7 – Equação de regressão sequencial obtida para a fotossíntese líquida.....	28

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para a evapotranspiração (ET, mm). .....	II
ANEXO 2 – Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino. ....	III
ANEXO 3 – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para a condutância estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). .....	V
ANEXO 4 – Condutância estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) média das plantas de sorgo sacarino com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 $\text{dS m}^{-1}$ ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) nos dias do ano 189, 222 e 235, medida através do IRGA – Infrared Gas Analyzer. ....	VI
ANEXO 5 – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para o teor relativo em clorofilas.....	VII
ANEXO 6 – Temperaturas diárias (médias, mínimas e máximas) registada ao longo do ensaio.....	VIII
ANEXO 7 – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para a taxa de fotossíntese líquida ( $A$ , $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). .....	X
ANEXO 8 – Massa Verde (kg) e Massa Seca (kg) das folhas e dos caules com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 $\text{dS m}^{-1}$ ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) após um período de 64 dias. ....	XI

## LISTA DE ABREVIATURAS

A	Taxa de fotossíntese líquida ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
ABA	Ácido abscísico
CE <sub>c</sub>	Condutividade elétrica do extrato de saturação ( $\text{dS m}^{-1}$ )
CE <sub>w</sub>	Condutividade elétrica da água ( $\text{dS m}^{-1}$ )
ESP	Percentagem de sódio trocável – ‘Exchangeable Sodium Percentage’
ET	Evapotranspiração (mm)
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação – ‘Food and Agriculture Organization of the United Nations’
$g_s$	Condutância estomática ( $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
ha	Hectares
IRGA	Analisador de Gás Infra-vermelho – ‘Infra-red Gas Analyzer’
K	Potássio
MV	Massa verde (kg)
MS	Massa seca (kg)
N	Azoto
NaCl	Cloreto de sódio
SAR	Razão de adsorção de sódio – ‘Sodium Adsorption Ratio’ ( $(\text{meq L}^{-1})^{0.5}$ )
TDS	Total de sais dissolvidos – ‘Total dissolved solids’ ( $\text{g L}^{-1}$ )
USDA – ARS	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – Serviço de Pesquisa Agrícola – ‘United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service’
WBR	Base de Referência Mundial para Recursos de Solos – ‘World Reference Base for Soil Resources’

# 1. INTRODUÇÃO

A salinidade nos solos é um problema grave em várias regiões do mundo, principalmente nas regiões áridas e semiáridas. Aqui, os níveis de precipitação são baixos, não havendo dissolução ou lavagem dos sais, levando à acumulação dos mesmos e limitando muito a produtividade agrícola (Shannon, 1998). De acordo com a FAO (2008), mais de 800 milhões de ha de solos, em todo o mundo, encontram-se afetados pela salinidade, correspondendo, este valor, a 6% do total da superfície agrícola mundial. Quanto à agricultura de regadio, dos 230 milhões de ha, 45 milhões (20%) estão afetados por este problema.

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – Serviço de Pesquisa Agrícola (USDA – ARS, 2008) os solos são classificados salinos se a sua condutividade elétrica do extrato de saturação ( $CE_e$ ) é de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  ou mais, que equivale a, aproximadamente, 40 mM de NaCl e gera uma pressão osmótica de 0,2 MPa. Este valor de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  corresponde à  $CE_e$  que reduz significativamente o crescimento da maioria das culturas (Munns e Tester, 2008).

## 1.1. Origem da salinidade no solo

A salinidade pode ter origem em processos naturais, como resultado da desagregação da rocha-mãe (e.g. origem geológica dos solos) ou resultar da atividade humana (e.g. rega com águas salinas). A salinidade primária resulta da acumulação de sais durante longos períodos de tempo, através de processos naturais, no solo e nas águas subterrâneas. A primeira causa para esta acumulação é a desagregação da rocha-mãe, que contém sais solúveis de vários tipos, tais como cloretos de sódio, cálcio, magnésio e, de forma menos extensa, sulfatos e carbonatos. A segunda causa diz respeito à deposição do sal dos oceanos, transportado pela chuva e pelo vento.

As atividades humanas podem alterar o equilíbrio entre a água aplicada ao solo, seja rega ou precipitação, e a água usada pelas plantas – a transpiração. As causas mais comuns são o desbravamento das terras, as regas com águas contendo elevadas concentrações de sal, os sistemas com má drenagem e os métodos de rega utilizados, causadores do aumento do nível dos lençóis freáticos e acumulação de sais na rizosfera (Munns e Tester, 2008). A lixiviação pode afetar as águas subterrâneas, principalmente quando a água de rega juntamente com a água fornecida pela precipitação excedem as necessidades hídricas da cultura, e a água do solo em excesso movimenta-se em profundidade, transportando os sais solúveis (Knapp and Wichelns, 1990). Na zona de enraizamento das culturas, à superfície, diversos estudos indicam de forma quase unânime a dependência da salinização da qualidade da água de rega utilizada, do tipo de solo, da geologia, do clima, da posição topográfica e das técnicas culturais empregues (Papadopoulos, 1988). No entanto, mesmo a rega com águas não salinas faz aumentar a salinidade média do solo, pelo menos sazonalmente, devido ao efeito da evapotranspiração intensa nos meses de verão. Este processo traz à superfície os sais, aumentando a sua concentração na solução do solo na zona das raízes (Sadeh e Ravina, 2000). Quando a rega é feita com água salina, a salinidade média do solo aumenta mais rapidamente, mesmo quando as quantidades de água aplicada são pequenas, atingindo a curto prazo a salinidade da água de rega (Sadeh e Ravina, 2000).

## 2. SALINIDADE NAS PLANTAS

### 2.1. Efeitos da salinidade nos parâmetros fisiológicos e de crescimento

A maioria das espécies vegetais apresenta uma diminuição muito acentuada do seu crescimento como efeito de uma exposição prolongada a solos salinos. Apesar dos efeitos do sal serem conhecidos, continua sem conhecer-se exatamente de que forma estes exercem a sua toxicidade.

A resposta da planta à salinidade, principalmente aos iões sódio, ocorre em duas fases: uma resposta rápida devido ao aumento da pressão osmótica externa e uma resposta lenta devido à acumulação de  $\text{Na}^+$  nas folhas (Munns e Tester, 2008).

A curto prazo, o aumento do teor em sal causa uma redução do potencial osmótico e hídrico no solo, o que leva a uma redução da absorção de água e conseqüente diminuição da pressão de turgescência das células, o que pode levar a redução do crescimento (Munns e Tester 2008). Por outro lado, a acumulação de  $\text{Na}^+$  nos tecidos induz uma série de efeitos, muitos ainda por esclarecer. No apoplasto impulsiona a desidratação celular, no citoplasma leva à inibição de enzimas relacionadas com o metabolismo dos carboidratos e nos cloroplastos, exerce um efeito tóxico nos processos fotossintéticos (Munns e Tester, 2008).

Esmaili *et al.* (2008) referem que a absorção de nutrientes é, frequentemente, reduzida em condições de salinidade como resultado de um processo competitivo entre os nutrientes e o sal. Grattan e Grieve (1999) acrescentam que esta competição depende do tipo de nutriente e da composição da solução do solo.

Na realidade, muitos dos sintomas observados nas plantas devido à salinidade, resultam de alterações das propriedades químicas e inclusivamente físicas do solo. Os iões sódio interagem com a estrutura do solo, diminuindo a agregação e reduzindo, a prazo, a porosidade, a condutividade hidráulica e a infiltração do solo (Hillel, 1982). A diminuição da

permeabilidade está relacionada com a estrutura do solo, isto porque, nos solos sódicos, os níveis de sódio de troca causam a desagregação das partículas de areia, limo e argila. Esta dispersão das partículas torna o solo muito impermeável ao ar, chuva ou água de rega, fazendo com que as plantas fiquem desprovidas de ar e água necessários ao seu crescimento (Provin e Pitt, 1914).

## **Pigmentos**

O teor em clorofilas reflete o desenvolvimento das plantas (Zhang *et al.*, 2005). Netondo *et al.* (2004) afirmam que a concentração de clorofila pode ser usada como um indicador da tolerância dos tecidos ao sal.

Normalmente, a clorofila *a* predomina sobre a clorofila *b*, contudo os seus valores aproximam-se à medida que a salinidade do solo aumenta (Netondo *et al.*, 2004).

A maioria dos trabalhos de investigação mostra que, a exposição continuada à salinidade, decresce significativamente o teor em clorofilas total (Hernandez *et al.*, 1999; Kaya, 2002; Hudai e Arzu, 2008). Os mesmos resultados foram encontrados por vários autores, tanto para espécies glicófitas, com baixa resistência ao sal (Agaistian *et al.*, 2000; Djanaguiraman *et al.*, 2006) como para espécies halófitas, tolerantes ao sal (Congming *et al.*, 2002; Parida *et al.*, 2004), nomeadamente em plantas de sorgo (Netondo *et al.*, 2004).

A redução do teor em clorofilas pode estar relacionada com diversos fatores tais como a alteração da estrutura dos cloroplastos (Locy *et al.*, 1996; Keiper *et al.*, 1998), a existência de um stresse oxidativo (Djanaguiraman *et al.*, 2006), a alterações no teor em lípidos dos pigmentos ou a um aumento da atividade das enzimas que degradam as clorofilas (Iyengar e Reddy, 1996; Netondo *et al.*, 2004), a diminuição da síntese de clorofilas e, ainda, a deterioração da membrana (Ashraf e Bhatti, 2000).



## **Abertura estomática**

Regra geral, a salinidade induz uma redução da abertura dos estomas e, conseqüentemente, dos processos fisiológicos a ela associados – transpiração e fotossíntese.

Observa-se frequentemente um efeito direto, a curto prazo, do aumento do teor em sal no solo sobre os estomas. Este sal causa uma redução da absorção de água, devido à redução do potencial osmótico e hídrico no solo, o que leva a uma redução da pressão de turgescência das células e ao fecho, mesmo que parcial, dos estomas (Netondo *et al.*, 2004; Munns e Tester 2008).

Mas o sal pode também ter efeitos indiretos sobre os estomas. Perera *et al.* (1994) observaram o fecho dos estomas numa espécie tolerante ao sal (*Aster tripolium* L.) devido à excessiva acumulação do ião sódio no apoplasto do mesófilo das folhas, possivelmente pela alteração do mecanismo de transporte ativo de  $K^+$  que leva à abertura dos mesmos. Noutros casos (Akhiiarova *et al.*, 2006; Bano, 2010) foi ainda observado um aumento do transporte de ABA (Ácido Abscísico) da raiz, onde é produzido, para as folhas devido ao aumento do teor em sal no solo. Esta hormona das plantas inibe diversos processos fisiológicos, causando o fecho dos estomas mesmo antes de se observar qualquer efeito osmótico. Mas nalguns casos, o ABA parece não afetar os estomas (Munns e Tester, 2008).

## **Fotossíntese**

A limitação do crescimento vegetativo das plantas por fatores ambientais não está relacionado com um único processo fisiológico mas, sem dúvida, o processo dominante é a fotossíntese (Parida e Das, 2005). Este processo de assimilação de carbono é muito complexo, envolvendo diversos aspetos da fisiologia da planta como seja o teor em pigmentos, a abertura dos estomas e a atividade de um conjunto de enzimas. Assim, qualquer fator que condicione

algum destes processos a montante vai, obviamente, afetar o desempenho fotossintético da planta.

A salinidade, como mencionado anteriormente, decresce tanto o teor em clorofilas como a abertura estomática (Brugnoli e Bjokman, 1992), levando ao conseqüente decréscimo da atividade fotossintética. No entanto, o sal pode causar danos no processo de fotossíntese que não envolvem a abertura estomática (Dionisio-Sese e Tobita, 2000). A acumulação excessiva de sais nas folhas, pela sua incapacidade de compartimentar os sais no vacúolo, causa danos internos, nomeadamente, no aparelho fotossintético. A toxicidade provocada pelo excesso de NaCl pode levar a alterações na atividade enzimática, induzidas por mudanças das estruturas citoplasmáticas. A desidratação das membranas celulares reduz a sua permeabilidade ao CO<sub>2</sub> e, portanto, reduz a fotossíntese (Iyengar e Reddy, 1996). O Na<sup>+</sup>, em particular, inativa as cadeias de transporte de elétrões tanto da fotossíntese como da respiração (Allakhverdiev *et al.*, 1999).

Em casos pontuais, a taxa fotossintética não é muito afetada pela salinidade quando se relaciona com o teor em clorofilas (Parida e Das, 2005). Em qualquer dos casos, a redução da área foliar que normalmente se observa aquando da exposição ao NaCl, significa que a fotossíntese por planta se torna sempre mais reduzida (Munns e Tester, 2008).

Os efeitos negativos do sal sobre os diversos parâmetros fisiológicos da planta vão-se refletir uma redução do crescimento vegetativo. Munns e Tester (2008) referem que a relação causa-efeito entre fotossíntese e crescimento pode ser muito difícil de desvendar, uma vez que a planta pode apresentar níveis fotossintéticos normais e ter um crescimento reduzido. Uma das causas poderá ser a restrição da absorção de alguns nutrientes, causada pela competição com o sódio (Hernandez *et al.*, 1995). Por outro lado, a diminuição da turgescência, devido aos efeitos osmóticos do sal, pode também levar a uma redução do alongamento celular e do crescimento vegetativo causando uma rápida diminuição do nível da expansão foliar (Fricke

*et al.*, 2004). Aquando de um aumento inesperado de sal no solo, as células das folhas perdem água momentaneamente. Assim, em poucas horas, mesmo que as células consigam retomar, através de ajustamentos osmóticos, o seu volume e turgidez inicial, o alongamento das folhas fica comprometido (Yeo *et al.*, 1991; Cramer, 2002). Ao longo do tempo, a restrição do alongamento e da divisão das células das folhas, torna-as mais pequenas e grossas e ainda reduz o seu aparecimento (Munns e Tester, 2008).

A contínua inibição do desenvolvimento foliar também decresce o volume de tecido das novas folhas, no qual o excesso de iões sódio e cloro se iria acumular (Neumann, 1995), podendo acelerar o aparecimento de necroses e provocando a senescência das mesmas (Munns, 1993). Assim, os níveis de fotossíntese global da planta diminuem como consequência da inibição do crescimento vegetativo e, portanto, da diminuição da área total de fotossíntese (Paul e Foyer, 2001). Um aspeto curioso é o facto do desenvolvimento da parte aérea da planta ser normalmente mais sensível ao sal do que as raízes, embora sejam estas a ter o primeiro contacto com a salinidade. Esta redução da área foliar, em relação ao desenvolvimento radicular, vai diminuir o uso da água pela planta (Munns e Tester, 2008). A diminuição da área ocupada pelas plantas (Neumann, 1997) pode levar a um decréscimo da eficiência do uso da água, uma vez que esta é perdida através da evaporação direta do solo ao invés de ser perdida pelas folhas (Van der Boogaand *et al.*, 1996).

## **2.2. Mecanismos de tolerância das plantas à salinidade**

Algumas espécies vegetais, ao contrário da maioria, têm a capacidade de desenvolver estratégias de combate à toxicidade do sal. Deste modo, quanto à sua tolerância ao sal, as plantas podem ser classificadas como glicófitas, sensíveis ao sal, ou halófitas, tolerantes ao sal (Yokoi *et al.*, 2002). As plantas halófitas conseguem manter uma elevada condutância

estomáticas e uma elevada eficiência do uso da água, comparativamente às glicófitas (Parida e Das, 2005).

Nos últimos anos, os investigadores têm-se debruçado sobre os mecanismos fisiológicos das plantas de resposta ou resistência à salinidade. Porém, esta não tem sido uma tarefa fácil uma vez que as respostas adotadas pelas plantas são diversas, podendo variar desde o grau de stresse em que se encontram, o órgão da planta, a espécie, a variedade, o estado de desenvolvimento, o tempo de exposição à salinidade (Neumann, 1997), as condições edafo-climáticas, a gestão da rega e as condições agronómicas (Rhoades *et al.*, 1992).

A tolerância à salinidade tem necessariamente de envolver duas vertentes, a tolerância osmótica e a tolerância à toxicidade do NaCl (Munns e Tester, 2008).

Uma planta a crescer num solo com potencial hídrico ( $\Psi$ ) decrescido pelo sal tem obrigatoriamente de reduzir o seu próprio  $\Psi$  de modo a conseguir extrair água do solo. Essa redução do potencial hídrico da planta realiza-se pela redução do seu potencial osmótico, ou seja, pelo aumento da concentração de solutos nas células (Shannon, 1998), um dos mecanismos que as espécies halófitas desenvolveram particularmente. Este processo constitui o chamado ajuste osmótico.

Em termos gerais, dentro dos componentes que permitem este ajustamento, é possível diferenciar entre os compostos inorgânicos, absorvidos pela planta a partir da solução do solo, e os compostos orgânicos solúveis, sintetizados pela própria planta, como resposta ao stresse. No grupo dos compostos orgânicos, podem ser incluídos alguns aminoácidos como glicina, prolina e outros solutos orgânicos (Flowers *et al.*, 1977; Hasewaga *et al.*, 2000; Munns, 2005). Em muitas halófitas, a prolina e a glicina ocorrem nas folhas em concentrações suficientemente elevadas para contribuir significativamente para o potencial osmótico das células (Flowers *et al.*, 1977). O ajustamento, contudo, só acontece até ao ponto de saturação

que depende do nível de sais do solo e da capacidade da planta de realizar a acumulação. Uma vez atingido esse ponto, sintomas de toxicidade por salinidade aparecem e a planta morre (Flowers *et al.*, 1986). A planta apenas consegue sobreviver se possuir mecanismos de combate ao sal de modo a que o seu nível de crescimento seja tão elevado que a concentração de sal não atinja valores excessivos dentro da planta, prevenindo a dispersão do mesmo para os tecidos sensíveis à sua presença (Shannon, 1998).

Os mecanismos de exclusão de  $\text{Na}^+$  também permitem à planta evitar ou adiar o problema da toxicidade iônica mas, a menos que esta seja compensada pela absorção de  $\text{K}^+$ , requer uma grande concentração de solutos para realização do ajustamento osmótico. A síntese de destes solutos pode pôr em risco o balanço energético da planta (Munns e Tester, 2008).

A acumulação continuada de  $\text{NaCl}$  no interior das plantas cria um problema de toxicidade, impedindo o seu desenvolvimento normal. Esta toxicidade manifesta-se principalmente nas folhas pois é ali que ele se vai acumular, depois de ser transportado no fluxo de transpiração (Munns, 2002). Portanto, a sensibilidade que algumas plantas apresentam em relação ao sal pode estar relacionada com a incapacidade que estas têm de manter o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{Cl}^-$  fora do fluxo transpiratório e, conseqüentemente, dos tecidos da sua parte aérea (Flowers *et al.*, 1977).

As halófitas desenvolveram um conjunto de estratégias destinadas ao combate da toxicidade do sal. A nível celular, as possíveis elevadas concentrações de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  que possam chegar às folhas das plantas podem ser toleradas através de adaptações anatómicas e divisão intracelular. As halófitas dicotiledóneas são o exemplo de plantas que apresentam dois tipos de adaptações anatómicas, o aumento do tamanho das células devido ao aumento do volume do vacúolo e a excreção de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  pelas glândulas (tricomas modificados) e pelas células-guarda dos estomas (Flowers *et al.*, 1986). Outro tipo de mecanismos inclui a

exclusão de iões ou acumulação seletiva, o controlo na absorção radicular de iões, alterações na estrutura da membrana, alterações no mecanismo fotossintético, entre outras (Parida e Das, 2005).

Em condições de stresse, as plantas deverão ser capazes de absorver nutrientes e, em simultâneo, restringir a entrada de iões tóxicos quando o potencial hídrico do solo é mais baixo que o habitual. Bliss *et al.*, (1984) pensam que os mecanismos responsáveis por esta distinção durante a absorção de iões podem estar localizados na membrana dos tecidos e em vários organelos, distribuídos por toda a planta. Desta forma, a exclusão de  $\text{Na}^+$  das folhas é importante, mais para as culturas perenes do que para as espécies anuais pois as folhas das perenes vivem e transpiram durante mais tempo. A maioria do  $\text{Na}^+$  que chega à parte aérea da planta, mantém-se aí, uma vez que o movimento do  $\text{Na}^+$  da parte aérea para as raízes, no floema, pode redistribuir apenas uma pequena parte de  $\text{Na}^+$  que chegou às folhas pelo caule. Como tal, os processos que determinam a acumulação na parte aérea são primariamente os processos que controlam a rede de distribuição de  $\text{Na}^+$  para o xilema das raízes (Munns e Tester, 2008).

### **2.3. Efeitos da interação Sal-Azoto**

O azoto é o nutriente que mais limita o crescimento das plantas, sendo que a sua adição ao solo melhora tanto o crescimento como a produtividade. Esta melhoria deve-se basicamente ao aumento do nível fotossintético, da síntese de metabolitos, da atividade meristemática e do transporte de assimilados para as sementes.

Muitos dos estudos sobre a temática da interação entre salinidade e fertilização azotada, realizados em solos pobres em azoto, mostraram que a aplicação de fertilizantes azotados minimiza, até certo ponto, os danos causados pelo sal às plantas (Grattan e Grieve, 1994), promovendo uma melhoria do crescimento de culturas como cenoura, milho

(Ravikovitch e Porath, 1967), arroz, algodão (Khalil *et al.*, 1967), tomate (Papadopoulos e Rendig, 1983), trigo (Ogo e Moriwaki, 1965) e sorgo (Esmaili *et al.*, 2008) quando os níveis de salinidade são baixos ou moderados. Martinez e Cerda (1989) corroboram estes resultados afirmando que o azoto aplicado às plantas sujeitas a salinidade pode ser importante, dado este ser, por exemplo, um componente de proteínas, clorofila e coenzimas e ser um agente ativador de processos de fotossíntese, respiração, diferenciação celular e crescimento vegetativo. Mansour (2000) reforça, ainda, que o N pode promover, indiretamente, a tolerância ao sal pela alteração da síntese de hormonas vegetais. Amzallag (1997) refere, concretamente, que as citocininas reduzem a inibição do crescimento das plantas provocada pela salinidade e Ben-Ziobi *et al.* (1967) que as cinetinas também reduzem os sintomas de salinidade em várias plantas. As citocininas podem, ainda, influenciar a síntese de poliaminas (Griffith e Banowetz, 1995), adquirindo, estas, uma função protetora em ambientes salinos (Mansour, 2000). Porém, quando as condições de salinidade são extremas, o azoto não surte qualquer efeito no combate à salinidade, ou seja, o azoto não aumenta a tolerância das plantas (Grattan e Grieve, 1994).

A salinidade acarreta normalmente um decréscimo da concentração de nitrato na parte aérea da planta, devido, provavelmente, a uma redução na absorção de N causada pela competição com a absorção de  $\text{Cl}^-$  (Grattan e Grieve, 1994).

O sorgo é uma das culturas mais tolerantes ao sal (Maas e Hoffman, 1977), podendo manter até 50% da sua produtividade mesmo com níveis de condutividade elétrica da água de rega da ordem dos  $6 \text{ dS m}^{-1}$  (Ayers e Westcot, 1994).

Amzallag *et al.* (1993) observaram que o sorgo, exposto a concentrações moderadas de sal durante um período de 3 semanas, desenvolve a capacidade de crescer e reproduzir em condições de salinidade letais para plantas de sorgo que nunca estiveram em contacto com sal. Seligmann e Amzallag (1995) sugerem que a resposta à salinidade se divide em duas fases, a

adaptação e a resistência. Na fase de adaptação, se o sal não estiver em dose letal, o sorgo sacarino ajusta os seus processos fisiológicos à presença de NaCl no solo, através dos mecanismos mencionados anteriormente (Secção 2.2). Na fase de resistência, o sorgo mantém ativos os mecanismos fisiológicos que permitem uma tolerância continuada ao sal ao longo de todo o seu desenvolvimento.

#### **2.4. Objetivo**

O objetivo do presente estudo é avaliar o efeito da interação entre vários níveis de salinidade e de fertilização azotada na tolerância das plantas de sorgo à salinidade, pela avaliação de parâmetros fisiológicos e do crescimento.

Espera-se, deste modo, poder fornecer a agricultores de zonas propensas à acumulação de sais solúveis ou contaminadas pelos mesmos, alguns dados de referência que lhes permitam melhorar a produtividade.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Esquema experimental do ensaio

O ensaio experimental decorreu na Herdade da Mitra da Universidade de Évora, de 21 de junho a 25 de agosto de 2010.

Foi executado em vasos com uma planta de sorgo retida de três previamente germinadas em perlite e transplantadas para os vasos. Optou-se por reter apenas uma planta em cada vaso de modo a disponibilizar aproximadamente o mesmo volume de solo que a planta teria no campo. Nesse processo, que decorreu cerca de duas semanas após a transplantação, a planta que se aparentava como mais robusta foi selecionada, tendo-se então iniciado, a partir daí, a rega com os diferentes teores de sal e azoto: 4 níveis (concentrações) de solução salina (NaCl), 0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>, e 3 níveis (concentrações) de solução azotada, 20%, 60% e 100%, num desenho experimental em blocos casualizados 4 × 3, com 6 repetições (Fig. 1), perfazendo um total de 78 vasos de 38,5 cm de diâmetro e 41,5 cm de altura média, com um



**Figura 1** – Disposição geral dos 72 vasos com as plantas de sorgo.

volume de solo de 0,025 m<sup>3</sup>. Os vasos foram colocados dentro de sacos de plástico branco, para aumentar a reflexão da radiação solar incidente e minimizar o seu aquecimento.

Na preparação dos vasos foi colocada, no fundo dos mesmos, uma camada de argila expandida e, por cima, aproximadamente 21 kg de terra seca originária de Alvalade do Sado, com textura franca a franca-limosa, de acordo com a análise granulométrica efetuada com um sedimentógrafo de Raio X Micromeritics, modelo Sedigraph 5100. O solo de Alvalade do Sado é um Aluviossolo moderno não calcário de textura mediana (Cardoso, 1974) ou Fluviossolo êtrico (WBR, 2006). A figura 2 apresenta um perfil típico deste solo e o quadro 1 apresenta a caracterização textural e as relações granulométricas que lhe dão suporte, bem como algumas características químicas, incluindo a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE), a razão de adsorção de sódio (SAR) e a percentagem de sódio de troca (ESP).



**Figura 2** – Perfil do solo em Alvalade do Sado, de onde foram colhidas as amostras de solo que serviram o ensaio em vasos descrito neste trabalho.

O Fluviossolo êtrico de Alvalade apresenta textura franca a franco-limosa de acordo com a escala de Atterberg, com 8,3% de areia grossa, 52,4% em areia fina, 26,3% de limo e 13,0% de argila. A densidade aparente é de 1,49 g cm<sup>-2</sup> com a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE<sub>e</sub>) de 0,42 dS m<sup>-1</sup>, a Razão de adsorção de sódio (SAR, 'Sodium

*Adsorption Ratio*) de 3,25 ( $\text{meq L}^{-1}$ )<sup>0,5</sup> e a percentagem de sódio trocável (*ESP*, ‘Exchangeable Sodium Percentage’) é 2,06%, características de um solo não salino.

**Quadro 1** – Características físicas e químicas médias de amostras do perfil de solo de Alvalade-Sado.

<b>Prof. (cm)</b>	<b>0-30</b>	<b>30-75</b>	<b>75-160</b>
Textura	Franca	Fr. Lim.	Franca
Areia Grossa (%)	8,3	6,5	5,8
Areia Fina (%)	52,4	46,2	42,0
Limo (%)	26,3	29,3	27,6
Argila (%)	13,0	18,0	24,6
pH (H <sub>2</sub> O)	7,00	7,13	7,33
<i>CE</i> (dS m <sup>-1</sup> )	0,423	1,224	0,959
<i>SAR</i> ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) <sup>0,5</sup>	3,25	3,87	2,96
<i>ESP</i> (%)	2,059	2,103	2,152

Os tratamentos consistiram na combinação de cada nível de sal com todos os níveis de azoto, perfazendo um total de 12 tratamentos (*CE<sub>w</sub>0/N20*, *CE<sub>w</sub>0/N60*, *CE<sub>w</sub>0/N100*, *CE<sub>w</sub>2/N20*, *CE<sub>w</sub>2/N60*, *CE<sub>w</sub>2/N100*, *CE<sub>w</sub>4/N20*, *CE<sub>w</sub>4/N60*, *CE<sub>w</sub>4/N100*, *CE<sub>w</sub>6/N20*, *CE<sub>w</sub>6/N60* e *CE<sub>w</sub>6/N100*), com 6 repetições, em que *CE<sub>w</sub>* representa a condutividade elétrica da água de rega e N a concentração da solução azotada.

Para a rega, foram preparadas quatro soluções com diferentes condutividades elétricas (*CE<sub>w</sub>*), 0 dS m<sup>-1</sup>, 2 dS m<sup>-1</sup>, 4 dS m<sup>-1</sup> e 6 dS m<sup>-1</sup>, correspondentes a 0 g, 45 g, 100 g e 151 g de NaCl respetivamente, em 60 l (3 l de água × 18 vasos/grupo) de água corrente de baixa salinidade (0,42 dS m<sup>-1</sup>), e três níveis de fertilização azotada, tidos como 20%, 60% e 100%, correspondentes a 40 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 200 kg ha<sup>-1</sup> de adubação azotada, respetivamente,

correspondendo este último valor à quantidade de azoto correntemente aplicada na prática agrícola. Estas soluções azotadas foram preparadas diluindo-se 52 ml (20%), 155 ml (60%) ou 260 ml (100%) de nitrato de amónia ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 20% p/p) em 75 l de água (3 l de água  $\times$  24 vasos/grupo).

A quantidade de sal (NaCl) necessária para a preparação de cada solução de rega foi calculada pela equação 1 (Richards, 1954), que indica o total de sais dissolvidos (TDS) em função da condutividade elétrica da solução, (WRB 2006) e posteriormente ajustada com base nos valores medidos com um condutivímetro portátil (Hanna HI9835, Romania).

$$\text{TDS (g L}^{-1}\text{)} \approx 0,64 \times \text{CE (dS m}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. 1}$$

### **3.2. Aplicação dos tratamentos**

As regas com solução salina ou azotada não foram feitas simultaneamente. As salinas foram num total de treze, nos dias do ano 175, 182, 189, 197, 202, 204, 207, 209, 211, 214, 216, 218 e 221 (ou seja, entre 24 de junho e 8 de agosto). A partir do dia 10 de agosto suspenderam-se as regas com solução salina pois as plantas encontravam-se muito debilitadas. As regas azotadas foram apenas cinco, no início do ensaio, nos dias do ano 172, 179, 186, 193 e 200 (ou seja, entre 21 de junho e 19 de julho), intercaladas com as regas salinas.

Para além das regas com solução salina ou azotada, efetuaram-se 21 regas simples (apenas água corrente) ao longo de todo o ensaio.

### **3.3. Avaliação de parâmetros fisiológicos das plantas**

O principal objetivo deste trabalho é de carácter essencialmente agronómico, procurando uma melhoria da produtividade em zonas com elevada salinidade no solo. Neste sentido, mediu-se, no final do ensaio, o crescimento das plantas sujeitas aos diferentes níveis de

salinidade e fertilização azotada pela avaliação da sua massa verde (MV) e seca (MS). Julgou-se também importante avaliar quais os aspetos da fisiologia da planta de sorgo que mais diretamente determinaram o seu crescimento. Assim, a evolução do comportamento das plantas foi acompanhada ao longo do ensaio pela medição periódica da evapotranspiração média diária ( $ET_d$ ) e dos mais importantes parâmetros fisiológicos, a taxa de fotossíntese líquida ( $A$ ), a condutância estomática ( $g_s$ ) e o teor relativo em clorofilas nas folhas.

A taxa de fotossíntese ( $A$ ), que mede a assimilação do dióxido de carbono da atmosfera pela planta, é geralmente o parâmetro que mais diretamente se relaciona com o crescimento. Esta assimilação do  $CO_2$  atmosférico depende de um conjunto de processos 'a montante', em primeiro lugar da facilidade com que o  $CO_2$  consegue difundir-se para o interior das folhas através dos estomas. Tornou-se portanto importante avaliar o grau de abertura dos estomas, quantificado pela denominada condutância estomática ( $g_s$ ). Dado que a abertura estomática é gerada por elevadas pressões intracelulares com origem osmótica, será de esperar algum efeito da salinidade sobre este parâmetro. Mas a fotossíntese depende também diretamente da capacidade de absorção da energia da luz. Daí a necessidade de medir o teor em pigmentos nas folhas, geralmente muito afetado, quer pelo sal quer pelo azoto.

Os detalhes da avaliação destes parâmetros, medidos entre os dias 21 de junho e 25 de agosto de 2010, são descritos seguidamente.

### **3.3.1. Evapotranspiração (ET)**

A evapotranspiração (ET, mm) foi medida em três datas (dias do ano 202, 222 e 235). As plantas foram regadas pela manhã e depois cada conjunto vaso-planta foi pesado (balança de precisão Kern DS65 K1) por volta das 7 horas. Ao fim da tarde, pelas 19 horas, foram novamente pesadas. A evapotranspiração média no período das 7 h da manhã às 7 h da tarde

foi calculada pela equação 2. A área de solo em cada vaso era de 0,1164 m<sup>2</sup>.

$$ET \text{ (mm)} = \text{Peso 7 horas} - \text{Peso 19 horas (kg)} / \text{Área do solo em cada vaso (m}^2\text{)} \quad \text{Eq. 2}$$

### 3.3.2. Condutância estomática ( $g_s$ )

Para quantificar a resposta dos estomas à salinidade e à fertilização azotada a que as plantas foram sujeitas, mediu-se a condutância estomática ( $g_s$ , mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) com um porômetro de difusão (AP4 Delta T, U.K.). Este aparelho avalia a condutância difusiva da superfície da folha, tanto para o vapor de água que sai da folha como para o dióxido de carbono que entra. O valor da condutância foliar é obtido pela comparação entre o fluxo de vapor de água que sai da folha com o fluxo a partir de uma placa de calibração com poros de condutância conhecida.

A medição foi feita na zona mediana das 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> folhas (contadas a partir do ápice caulinar) de cada uma das plantas, estando assim representadas folhas mais jovens e mais velhas, respetivamente. Todas as medições foram efetuadas às 9 horas, às 12 horas e às 15 horas solares, coincidindo aproximadamente com as 10:30 h, 13:30 h e 16:30 horas legais, respetivamente, em 5 datas diferentes entre 8 de julho e 23 de agosto de 2010.

### 3.3.3. Teor relativo em clorofilas

A avaliação do teor relativo em pigmentos foi efetuada com um medidor de clorofilas (CL-01 Hansatech Instruments, U.K.). A folha é colocada entre a pinça do aparelho, a parte superior da pinça emite um feixe de luz que atravessa a folha e parte inferior da pinça mede a absorbância a dois comprimentos de onda, 620 e 940 nm. Quanto maior o teor em pigmentos da folha, maior a absorbância.

As medições foram realizadas na zona mediana das 4ª e 6ª folhas de cada planta (contadas a partir do ápice caulinar) em seis datas diferentes, entre 1 de julho e 23 de agosto de 2010.

#### **3.3.4. Taxa de fotossíntese líquida (A)**

A avaliação da fotossíntese líquida (A,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ou seja,  $\mu\text{moles de CO}_2$  absorvidos por cada  $\text{m}^2$  de folha em cada segundo) foi realizada com um IRGA – Infra-red Gas Analyzer (ADCpro+, U.K.). O aparelho consiste numa pequena câmara com um sensor do  $\text{CO}_2$ , com uma fonte de luz própria, ajustada para uma radiação (Q) de  $1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , e com controlo da temperatura, ajustada a  $30^\circ \text{C}$ . A câmara é encostada à epiderme inferior da folha, sendo a taxa de fotossíntese avaliada com base na velocidade de decréscimo do  $\text{CO}_2$  na câmara.

As medições foram efetuadas na zona mediana da 4ª folha (contada a partir do ápice caulinar), em três plantas por cada tratamento, nos dias do ano 189, 222 e 235 (8 de julho, 10 e 23 de agosto, respetivamente), por volta das 11 horas.

#### **3.3.5. Massa verde (MV), seca (MS) e teor em água (%H<sub>2</sub>O)**

Para verificar o impacto da salinidade e da fertilização azotada sobre a biomassa e a percentagem de água nas plantas do sorgo, foram determinadas as massas verde e seca das folhas e caules, após colheita das plantas.

Os valores de massa verde foram obtidos pesando as folhas e os caules do sorgo, imediatamente após a colheita, no dia 24 de agosto. A massa seca foi determinada após a secagem das folhas e dos caules em estufa a  $105^\circ \text{C}$  durante 48 horas. Todas as pesagens foram efetuadas numa balança de precisão (Kern DS65 K1, Germany, Balingen).

A percentagem de água foi calculada pela equação 3.

$$\%H_2O = (MV - MS) / MV \quad \text{Eq. 3}$$

### 3.3.6. Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados foi feita no programa SPSS v. 18, para um nível de significância de  $p \leq 0,05$ .

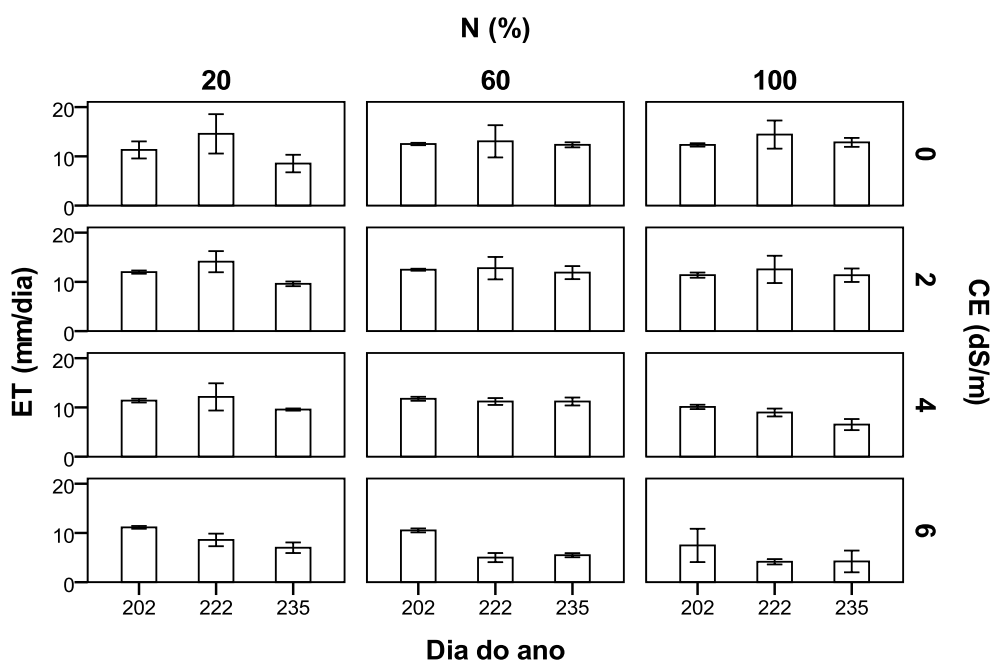
Os parâmetros de biomassa e percentagem de água foram analisados através de uma análise de variância (ANOVA) e por um teste de comparação de médias (Waller-Duncan). Todos os restantes parâmetros (evapotranspiração, condutância estomática, teor relativo em clorofilas e taxa de fotossíntese líquida), em que era absolutamente necessário levar em conta o fator "tempo de exposição à salinidade/azoto", foram analisados através de um modelo de regressão linear pelo método sequencial ("Stepwise regression"). Foram admitidos como fatores, não só o sal, o azoto, o tempo de exposição e a hora do dia (quando apropriado), como foram ainda incluídos a segunda potência de alguns destes fatores (consoante o parâmetro em análise) e todas as interações possíveis, geralmente com um total de pelo menos 16 fatores e interações. A título de exemplo, para a condutância estomática, o parâmetro de análise mais complexa, foram incluídos, à partida, na análise estatística um total de 64 fatores. Neste tipo de análise, a equação de regressão final inclui apenas os fatores e/ou as interações entre eles que mostrem ser significativos ( $p \leq 0,05$ ), pelo que, neste caso, a equação final (ver eq. 5, página 24) tinha apenas seis membros (fatores ou combinações deles).



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Evapotranspiração

Regra geral, a evapotranspiração (Fig. 3) diminuiu ao longo do período de exposição à salinidade, principalmente nos vasos em que também foram aplicadas altas concentrações de azoto. Assim, no último dia em que foi determinada (dia do ano 235), a evapotranspiração média nos vasos em que se aplicou a máxima concentração de sal e azoto (6 dS m<sup>-1</sup> de sal e 100% de azoto), foi apenas cerca de 35% da ET nos vasos com o mesmo teor de azoto mas em que não se aplicou sal.



**Figura 3** – Evapotranspiração (ET, mm) das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. A ET foi calculada com base na diferença de peso do conjunto vaso e planta. As barras representam média ± erro padrão (n=6).

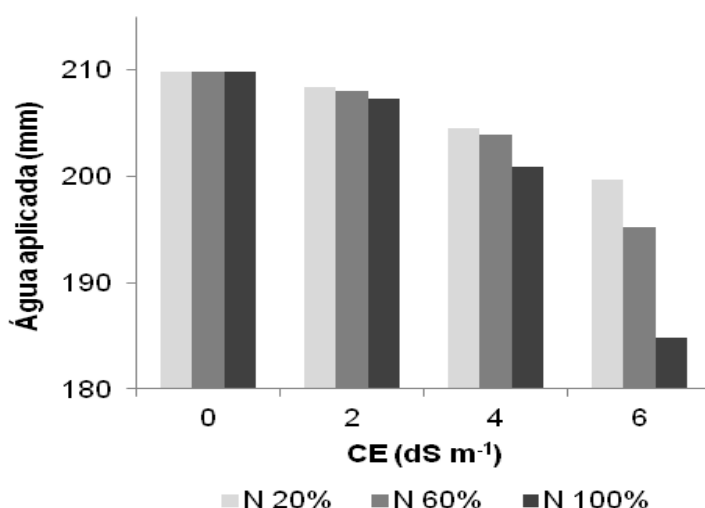
A equação 4, obtida por regressão sequencial, resume os efeitos observados.

$$ET \text{ (mm)} = 13,21 - (0,017 \text{ SD}) - (0,007 \text{ SN}) \quad \text{Eq. 4}$$

Verifica-se um decréscimo da ET com o passar dos dias de exposição à salinidade (SD) e um agravamento deste efeito pela simultânea presença de altas concentrações de sal e azoto (SN). A tabela com o resultado da análise estatística encontra-se no ANEXOS 1.

## 4.2. Água aplicada

Durante o ensaio, as plantas receberam em média cerca de 210 mm de água (3,4 mm dia<sup>-1</sup>) (ANEXO 2), observando-se um decréscimo da água que foi necessário fornecer com o aumento da salinidade (Fig. 4), uma vez que as plantas já não tinham capacidade de absorção da água que lhes era fornecida e os vasos se encontravam encharcados sendo o limite de salinidade tolerado de 4 dS m<sup>-1</sup>. Provin e Pitt (1914) referem que com o aumento da salinização do solo, as plantas são incapazes de absorver água com tanta facilidade. Isto acontece porque as raízes das plantas contêm concentrações variáveis de sais que promovem o fluxo de água do solo para as plantas. Porém, quando a concentração de sais é extremamente alta, estes são forçados a voltar para o solo e as plantas não conseguem absorver tanta água do mesmo.



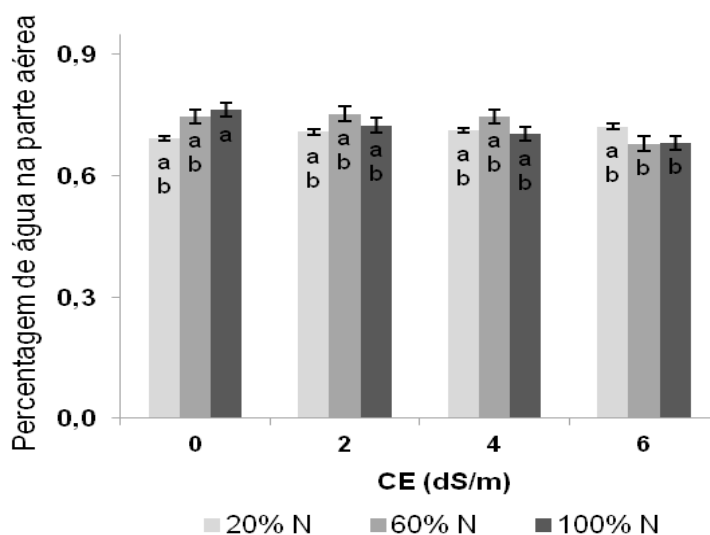
**Figura 4** - Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias, incluindo regas salinas, azotadas e com água corrente.

Neste caso as plantas cresceram menos, logo têm menos área foliar e perdem menos água por transpiração. Por outro lado, como crescem menos, não necessitam de tanto volume de água no interior das células como uma planta maior necessita. Finalmente, as plantas expostas a elevada salinidade, tinham também uma condutância estomática menor (ver fig. 6, pág. 25) e, portanto, menor absorção de água do solo.

No caso mais extremo, as plantas regadas com a solução salina mais elevada (6 dS m<sup>-1</sup>) consumiram menos 10% de água (3,0 mm dia<sup>-1</sup>), como resultado de uma menor evapotranspiração causada por um também menor desenvolvimento vegetativo das plantas expostas a essa concentração salina.

### 4.3. Percentagem de água

A percentagem de água na parte aérea das plantas (Fig. 5) foi relativamente semelhante em todos os tratamentos, com um ligeiro decréscimo com elevados teores de sal (6 dS m<sup>-1</sup>) e de fertilização azotada (60 e 100 %).



**Figura 5** – Percentagem de água na parte aérea das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. As barras representam média ± erro padrão (n=6). Letras diferentes (a e b) indicam diferenças significativas entre médias (p ≤ 0,05).

Estes resultados sugerem que as plantas de sorgo conseguiram manter um teor em água elevado, mesmo na presença de elevada salinidade no solo, possivelmente porque conseguiram realizar um ajuste osmótico suficiente para a manutenção do seu metabolismo. Podem também estar relacionados com a tolerância do sorgo à salinidade, tendo este uma maior resistência a solos salinos, comparativamente a outras culturas (Camargo *et al.*, 2008). No entanto, nos tratamentos com as concentrações máximas de sal e azoto, as plantas já não foram capazes de realizar um ajuste osmótico suficiente para manter o mesmo teor em água.

#### 4.4. Condutância estomática ( $g_s$ )

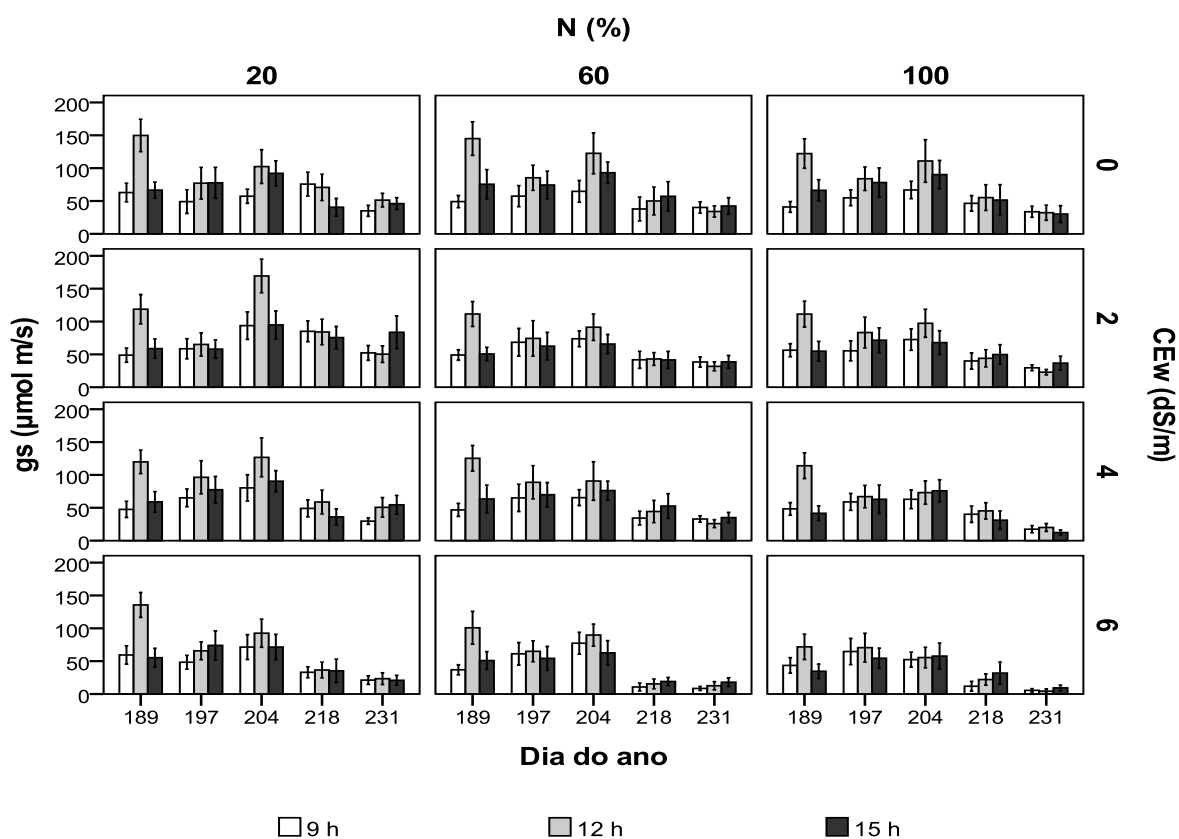
A condutância estomática ( $g_s$ ) foi medida em alguns dias, às 9 h, 12 h e 15 horas solares (aproximadamente 10:30 h, 13:30 h e 16:30 h legais, respetivamente, no período em que decorreu este ensaio).

O padrão de evolução diário de  $g_s$  (Fig. 6) foi o esperado, ou seja, houve um aumento das 9 horas para as 12 horas e uma redução às 15 horas. No entanto, a partir do dia 218 (6 de agosto) os valores de  $g_s$  ao meio-dia solar (13:30 h legais) mantiveram-se quase ao mesmo nível dos valores das restantes horas, possivelmente refletindo as elevadas temperaturas que ocorreram ao meio-dia solar limitando, de algum modo, a abertura dos estomas.

A equação 5 mostra o efeito da salinidade e da fertilização azotada sobre as plantas.

$$g_s = 11,8 H - (0,38 H^2) - (0,22 SD) - (0,01 ND) + (0,003 SND) - (2,59 \times 10^{-4} S^2ND) \quad \text{Eq. 5}$$

No que diz respeito à salinidade (S), esta decresceu significativamente  $g_s$  (ver análise estatística no ANEXO 3) sendo este efeito mais pronunciado com o passar dos dias (SD). A fertilização azotada (N) teve um efeito semelhante mas em menor grau.

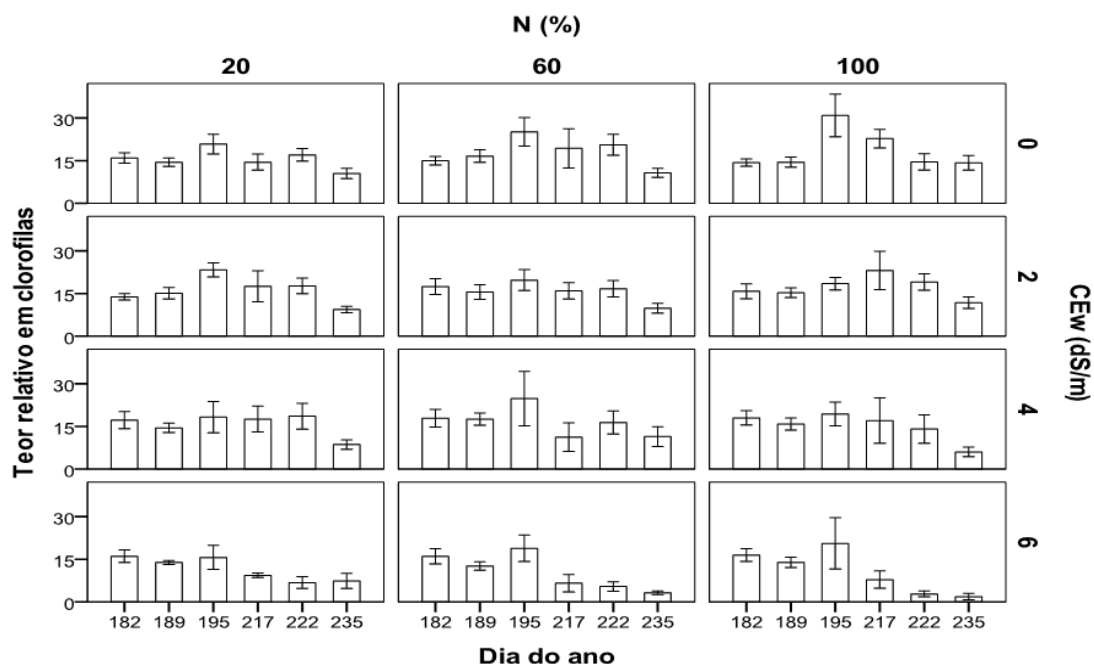


**Figura 6** – Condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) das plantas de sorgo sacarino com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6  $\text{dS m}^{-1}$ ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. As medições foram feitas nas 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> folhas, pelas 9 h, 12 h e 15 horas solares (10:30 h, 13:30 h e 16:30 horas legais). Cada barra representa a média  $\pm$  erro padrão ( $n=36$ ) das medições no dia indicado, dois dias antes e dois dias depois.

Observa-se um aumento da condutância estomática proporcional à hora do dia (H) e uma redução proporcional ao quadrado da hora do dia ( $H^2$ ), o que se traduz num decréscimo de  $g_s$  para horas mais tardias. É, ainda, proporcional ao tempo de exposição ao sal (SD) e mais ligeiramente ao tempo de exposição ao azoto (ND). Os dois últimos membros da equação mostram que o efeito negativo da salinidade é mais acentuado para altas concentrações de sal (S). O declínio dos valores de condutância estomática com os elevados teores de sal pode estar relacionado com a incapacidade das plantas para efetuarem um ajustamento osmótico a concentrações muito elevadas.

#### 4.5. Teor relativo em clorofilas

Regra geral, o teor relativo em clorofilas (Fig. 7) aumentou sucessivamente até atingir um máximo no dia 195 (14 de julho), excetuando o tratamento com um nível de salinidade baixa (2 dS m<sup>-1</sup>) em que, para a maior concentração de azoto (100%), o valor máximo se observou no dia 217 (5 de agosto) ao invés do dia 195.



**Figura 7** – Teor relativo em clorofilas das plantas de sorgo sacarino expostas a quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias, medido nas 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> folhas de cada planta. As barras representam média ± erro padrão (n=12).

Apesar de se verificar um padrão semelhante em todos os tratamentos, nos tratamentos com maiores concentrações de sal e azoto (4 dS m<sup>-1</sup> e 6 dS m<sup>-1</sup>) verificou-se que a diminuição dos teores em clorofila foi mais acentuada como é mostrado pela equação de regressão 6.

$$\text{Teor relativo em clorofilas} = 17,0 - (1,05 \times 10^{-4} S^2 ND) + (3,41 \times 10^{-6} SN^2 D) - (0,01 SD) \quad \text{Eq. 6}$$

Para níveis de salinidade elevados ou muito elevados (S), e depois de alguns dias (D) de exposição ao sal, ocorreu um decréscimo substancial do teor em clorofilas, apenas ligeiramente atenuado por elevados teores de azoto (N) na presença de baixas concentrações de sal. No ANEXO 4 encontra-se a tabela com os níveis de significância obtidos pela regressão sequencial, para o teor relativo em clorofilas.

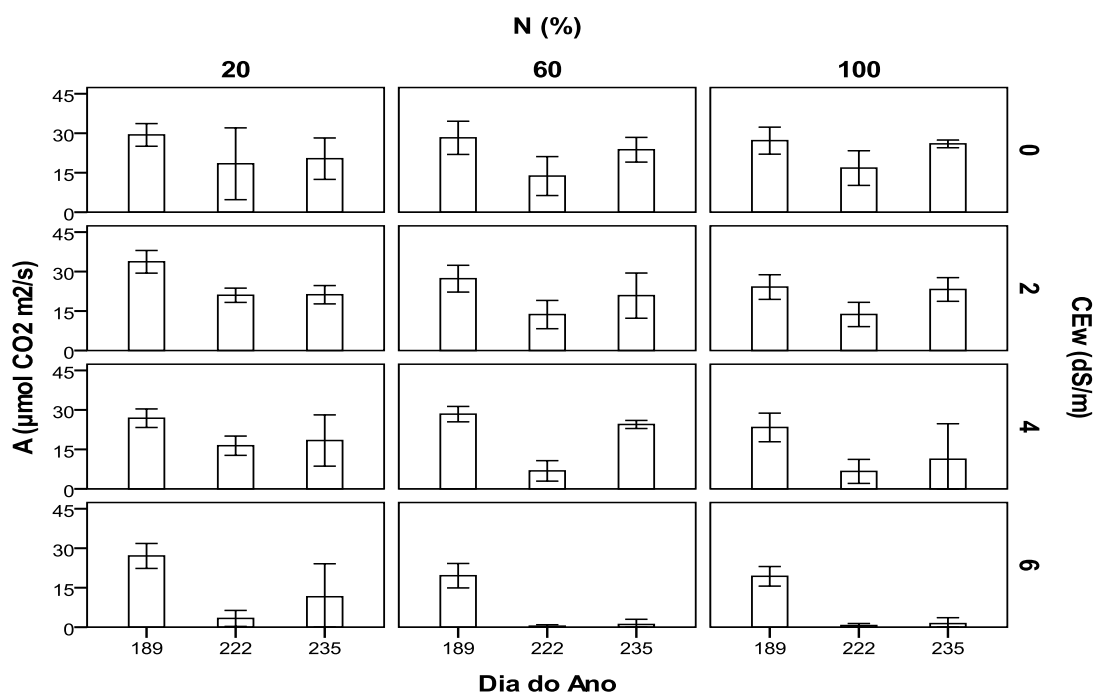
Parida e Das (2005) afirmam que, de um modo geral, o teor relativo em clorofilas, como referido anteriormente (ver Secção 2.1, pág. 4) e os carotenoides das folhas decrescem em condições de salinidade.

#### **4.6. Taxa de fotossíntese líquida (A)**

Os resultados da taxa de fotossíntese líquida foram o reflexo da diminuição ocorrida nos parâmetros clorofila e condutância estomática, ou seja, verificou-se uma diminuição da mesma ao longo do ensaio.

A taxa de fotossíntese líquida (Fig. 8) apresentou, no primeiro dia de medições (dia 189, ou seja, 8 de julho) valores da ordem dos  $30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , aos quais se seguiu um decréscimo no dia do ano 222 (10 de agosto) e um novo aumento, ainda que muito ligeiro em alguns casos, no dia 235. Este decréscimo generalizado de A, observado no dia 222, ficou-se a dever principalmente a um decréscimo acentuado da condutância estomática, resultando na diminuição de  $\text{CO}_2$  disponível para as reações de carboxilação (Parida e Das, 2005).

Na realidade, na primeira data (dia 189), a condutância estomática média indicada pelo IRGA (ANEXO 5) foi de  $180 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto que na segunda data (dia 222) foi três vezes menor ( $60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Esta redução de  $g_s$  foi possivelmente causada pelas elevadas temperaturas (ANEXO 6) que ocorreram neste dia (máxima de  $40^\circ \text{ C}$ ) comparativamente aos dias do ano 189 e 235 (máximas de  $34^\circ \text{ C}$  e  $30^\circ \text{ C}$ , respetivamente).



**Figura 8** – Taxa de fotossíntese líquida ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6  $\text{dS m}^{-1}$ ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. As medições foram feitas na 4<sup>a</sup> folha de três plantas de cada tratamento. As barras representam média  $\pm$  erro padrão ( $n=6$ ).

Em condições de temperaturas elevadas, como as verificadas nos meses de verão e em regiões áridas, quando as necessidades hídricas são superiores, as plantas não conseguem absorver água em teor adequado devido à rápida depleção da água do solo e ao aumento da concentração de sais junto da zona radicular (Ayers e Westcot, 1994).

A equação 7 mostra os resultados da análise estatística, obtidos por regressão sequencial, para a taxa de fotossíntese líquida e no ANEXO 7 encontram-se os níveis de significância obtidos por regressão sequencial para a taxa de fotossíntese líquida.

$$A = 30,1 - (0,06 \text{ SD}) - (0,002 \text{ ND}) \quad \text{Eq. 7}$$

Verifica-se que a salinidade ( $S$ ) decresceu fortemente a taxa de fotossíntese sendo o efeito proporcional ao tempo ( $D$ ) de exposição. A fertilização azotada ( $N$ ) também decresceu



ligeira mas significativamente  $A$ , não sendo observada, no entanto, nenhuma interação entre o azoto e o sal. Estes resultados evidenciam a existência de uma correlação linear entre a abertura dos estomas e a fixação do dióxido de carbono (Parida e Das, 2005). Claramente, esta redução de  $A$  foi causada pela redução quer da condutância estomática (Fig. 6) quer do teor em pigmentos (Fig. 7).

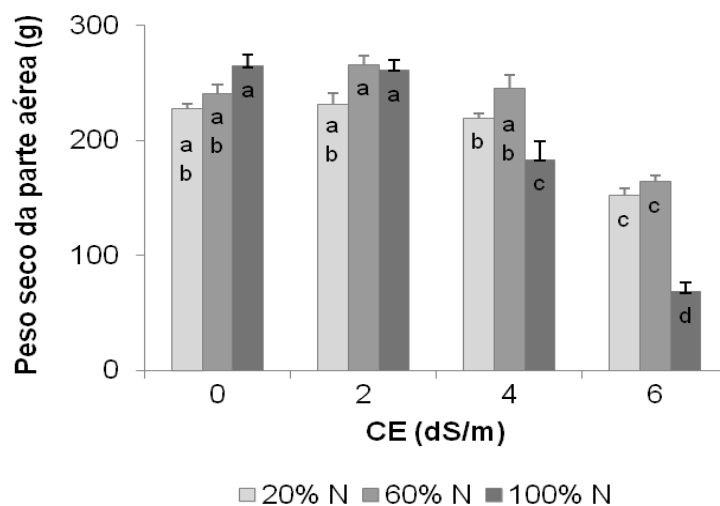
Parida e Das (2005) sugerem que a salinidade inibe o processo fotossintético pela redução do potencial hídrico. Desta forma, a tolerância à salinidade só é conseguida se as plantas conseguirem aumentar a sua eficiência hídrica pela adoção do ciclo CAM em detrimento do ciclo  $C_3$ . Esta mudança leva a uma redução da perda de água pela abertura dos estomas no período noturno e pela diminuição do nível de transpiração quando em condições prolongadas de salinidade.

#### **4.7. Biomassa**

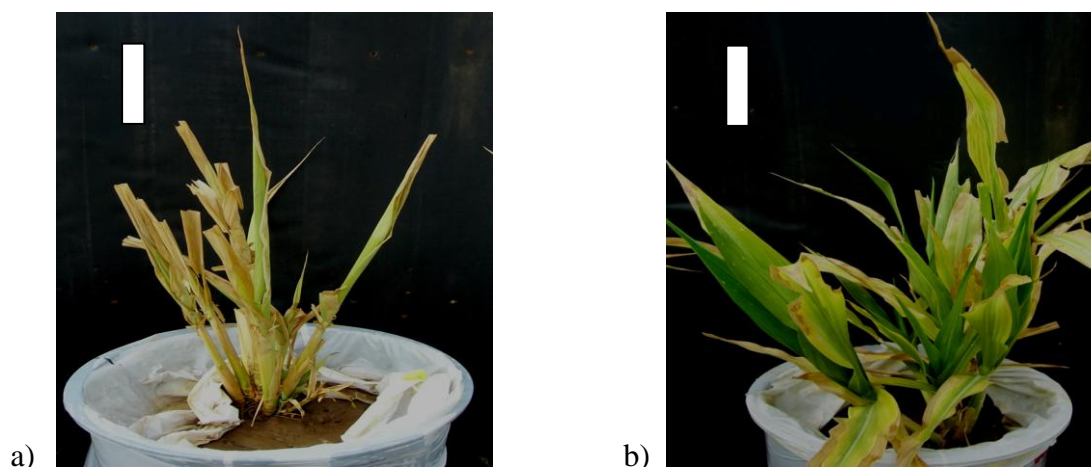
Os resultados da biomassa das plantas (Fig. 9) no final do ensaio refletem os valores dos processos fisiológicos apresentados anteriormente.

Observou-se que, nas plantas regadas com a mais alta concentração de azoto (100%), a salinidade mais elevada ( $6 \text{ dS m}^{-1}$ ) reduziu o seu crescimento (massa seca) em cerca de 75% (Fig. 10a). No entanto, nos tratamentos com 20% ou 60% de fertilização azotada, a salinidade de  $6 \text{ dS m}^{-1}$  reduziu o crescimento das plantas em apenas cerca de 30% (Fig. 10b).

Os valores obtidos no presente trabalho apontam para uma maior toxicidade do sal relativamente à referenciada por outros autores (Ayers e Westcot, 1994), segundo os quais a cultura de sorgo em presença de sais mantém cerca de 50% da sua produtividade com  $6 \text{ dS m}^{-1}$  de condutividade elétrica na água de rega ( $CE_w$ ).



**Figura 9** – Peso seco da parte aérea (g) das plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) durante um período de 64 dias. Os valores de massa verde (MV) foram obtidos após colheita das plantas e os valores de massa seca (MS) após secagem dos caules e folhas em estufa (105° C), durante 48 horas. As barras representam média ± erro padrão (n=6). Letras diferentes (a, b, c e d) indicam diferenças significativas entre médias (p ≤ 0,05).



**Figura 10** – Aspeto de plantas de sorgo sujeitas a 64 dias de exposição a uma salinidade de 6 dS m<sup>-1</sup> e (a) 100% de fertilização azotada ou (b) 20% de fertilização azotada. As barras brancas correspondem a 10 cm.

Esmaili *et al.* (2008) afirmam que quando a salinidade da água é considerada elevada para a cultura, a aplicação de níveis de fertilização mais elevados podem levar ao acréscimo de sal e causar uma pressão osmótica maior. Pode igualmente tornar menor a absorção de água e nutrientes diminuindo o crescimento das plantas. Isto significa que em condições de baixa salinidade o fator mais limitante ao crescimento da planta é a deficiência em nutrientes. Por outro lado, em condições de elevada salinidade este torna-se, mais do que a deficiência de nutrientes, o fator limitante ao crescimento.

## 5. CONCLUSÕES

Observou-se uma redução do crescimento das plantas expostas a altas concentrações de sal na água de rega. Constatou-se também que elevadas concentrações de azoto agravaram ainda mais o efeito da alta salinidade. É possível que o azoto atue como um sal, potenciando o efeito salino e inibindo o crescimento das plantas.

O menor crescimento das plantas expostas ao sal foi, ainda, causado por uma redução da assimilação de dióxido de carbono que, por sua vez, terá sido devido a uma redução quer da abertura estomática quer do teor em clorofilas.

Face aos resultados, pode-se concluir que, se os níveis de salinidade na água de rega forem baixos (da ordem de 2 e 4 dS m<sup>-1</sup>), os compostos azotados parecem ter alguma expressão na tolerância ao sal, observando-se o efeito contrário para elevados níveis de salinidade (maior que 4 dS m<sup>-1</sup>).

A aplicação excessiva de azoto é uma prática muito comum na agricultura, contudo esse excesso para além de ser prejudicial à cultura e ao ambiente, não potencia a tolerância à salinidade. Com base nos resultados, a aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de azoto é suficiente para que o sorgo desenvolva alguma tolerância até um máximo de 4 dS m<sup>-1</sup> de sal na água de rega.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agastian, P., S. J. Kingsley, e M. Vivekanandan. 2000. *Photosynthetica*, 38 287-290.
- Akhiiarova, G. R., W. Fricke, D. S. Veselov, G. R. Kudoiarova, e S. lu Veselov. 2006. "ABA accumulation and distribution during the leaf tissues shows its role stomatal conductance regulation under short-term salinity." *Tsiologiia, Volume 48, Issue 11* 918-923.
- Allakhverdiev, S. I., Y. Nishiyama, I. Suzuki, Y. Tasaka, A. Sakamoto, e N. Murata. 1999. "Genetic engineering of the unsaturation of fatty acids in membrane lipids alters the tolerance of *Synechocystis* to salt stress." *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96:5862-5867.
- Amzallag, G. N. 1997 "Tolerance to salinity in plants: new concepts for old problems." In *Strategies for Improving Salt Tolerance in Higher Plants*, de P. K. Jaiwal, R. P. Singh e A. Gulari, 1-24. New Delhi: Oxford and IBH Publ. Co..
- Amzallag, G. N., H. Seligmann, e H. R. Lerner. 1993. "A developmental window for salt-adaptation in *Sorghum bicolor*." *J. Exp. Bot.* 44: 645-652.
- Ashraf, M. Y., e A. S. Bhatti. 2000. *Pak. J. Sci. Ind. Res.*, 43 130-131.
- Ayers, R. S., e D. W. Westcot. 1994. "Water quality for agriculture ." *FAO Irrigation and Drainage Paper, 29 Rev. 1.*
- Bano, A. 2010. "Root-to-Shoot Signal Transduction in Rice Under Salt Stress." *Pak. J. Bot.*, 42(1) 329-339.
- Ben-Zioni, A., C. Itai, e Y. Vaadia. 1967. "Water and salt stress, kinetin and protein synthesis in tobacco leaves." *Plant Physiol.* 42:361-368.
- Bliss, R. D., K. A. Platt-Aloia, e W. W. Thompson. 1984. "Changes in Plasmalemma organization in cowpea radicle during imbibition in water and NaCl solution." *Plant Cell Environm.* 7: 606-606.
- Brugnoli, E., e O. Bjorkman. 1992. "Growth of cotton under continuous salinity stress: influence on allocation pattern, stomatal and non-stomatal components of photosynthesis and dissipation of excess light energy." *Planta* 187: 335-347.
- Camargo, P. M. P., R. C. Costa, A. G. T. Barreto, C. F. O. Neto, e F. J. R. Cruz. 2008. "Mecanismos de tolêrancia ao estresse salino relacionados com o metabolismo de nitrogenio e ajustamentadores osmóticos em plantas de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]." *VI Seminário de Iniciação Científica/UFRA e XII Seminário de Iniciação Científica da EMBRAPA.*
- Cardoso, J. C. 1974. "A classificação de solos de Portugal." *Boletim de Solos do S.R.O.A*, 17. Lisboa., 14-46.

- Congming, L., Q. Nianwei, L. Qingtao, W. Baoshan, e K. Tingyum. 2002. "Does salt stress lead to increased susceptibility oh photosystem II to photoinhibition and changes in photosynthetic pigment composition in halophyte *Suaeda sal* grown outdoors." *Plant Science*. 163 1063-1068.
- Cramer, G. R. 2002. "Response of abscisic acid mutants of *Arabidopsis* to salinity." *Funct. Plant Biol.* 29: 561-67.
- Dionisio-Sese, M. L., e S. Tobita. 2000. "Effects of Salinity on Sodium Content and Photosynthetic Responses of Rice Seedlings Differing in Salt Tolerance." *Journal of Plant Physiology*, 157 54-58.
- Djanaguiraman, M., J. A. Sheeba, A. K. Shanker, D. Durgadevi, e U. Bangarusamy. 2006. *Plant Soil*, 284 363-373.
- Esmaili, E., S. A. Kapourchal, M. J. Malakouti, e M. Homae. 2008. "Interactive effect of salinity and two nitrogen fertilizers on growth and composition of sorghum." *Plant Soil Environ.*, 5,: 537-546.
- FAO. 2008. *FAO Land and Plant Nutrition Management Service*. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>.
- Flowers, T. J., P. F. Troke, e A. R. Yeo. 1977. "The mechanism of salt tolerance in halophytes,." *Annu. Rev. Plant Bhyiol.* 28: 89-121.
- Flowers, T., e A. Yeo. 1986. "Ion relations of plants under drought and salinity." *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 75-91.
- Fricke, W., G. Akhiyariva, D. Veselov, e G. Kudoyarova. 2004. "Rapid and tissue-specific changes in ABA and in growth rate response to salinity in barley leaves." *J. Exp. Bot.* 55: 1115-1123.
- Grattan, S. R., e C. M. Grieve. 1994. *Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. - In: Pessaraki, M. (ed): Handbook of Plant and Crops Stress. Pp. 203-226.* New York: Marcel Dekker.
- Griffith, S. M., e G. M. Banowitz. 1995. "Nitrogen nutrition and flowering." In *Nitrogen Nutrition in Higher Plants.*, de H. S. Srivastava e R. P. Singh, 358-400. Associated Publ. Co., New Delhi.
- Hasegawa, P. M., R. A. Bressan, J. K. Zhu, e H. J. Bohnert. 2000. "Plant cellular and molecular responses to high salinity." *Annu. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.* 51 463-499.
- Hernandez, J. A., E. Olmos, F. J. Corpas, F. Sevilla, e L. A. del Rio. 1995. "Salt-induced oxidative stress in chloroplast of pea plants." *Plant Sci.* 105: 151-167.
- Hernandez, J., A. Campillo, A. Jimenez, J. J. Alacon, e F. Sevilla. 1999. "Response of antioxidant systems and leaf water relations to NaCl stress in pea plants." *New Phytol.* 141: 241-251.

- Hillel, D. 1982. "Introduction to Soil Physics." *Academic Press*.
- Hudai, Y., e K. Arzu. 2008. *Afr. J. Biot.*, 7 3299-3305.
- Iyengar, E. R. R., e M. P. Reddy. 1996. "Photosynthesis in highly salt-tolerant plants." In *Handbook of photosynthesis.*, de M. (Ed.) Pesserkali, 897-909. Baten Rose, USA: Marshal Dekar.
- Kaya, C. 2002. *J. Plant Nutr.*, 25:599-611.
- Keiper, F. J., D. M. Chen, e L. F. De F. 1998. *J. Plant Physiol.*, 152, 564-573.
- Khalil, M. A., F. Amer, e M. M. Elgabaly. 1967. "A salinity-fertility interaction study on corn and cotton." *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31: 683-686.
- Knapp, K., e D. Wichelns. 1990. "Dynamic optimization models for salinity and drainage management." In *Agricultural Salinity Assessment and Management Manual. No. 71*, de K. K. Tanji. ASCE: New York.
- Locy, R. D., C. C. Change, B. L. Nielsen, e N. K. Singh. 1996. *Plant Physiol.*, 110 265-272.
- Maas, E.V., e Hoffman, G.J.. 1977. Crop salt tolerance, current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* ASCE 103, 115-134.
- Mansour, M. M. F. 2000. "Nitrogen containing compounds and adaptation of plants to salinity stress." *Biologia Plantarum* 43: 4: 491-500.
- Martinez, V., e A. Cerda. 1989. "Influence of N source on rate Cl, N. Na and K uptake by cucumber seedling grown in saline conditions." *J. Plant. Nutr.*, 12: 971-983.
- Munns, R. 2005. "Genes ans salt tolerance: bringing them together." *New Phytol.* 167 645-663.
- Munns, R. 2002. "Comparative physiology of salt and water stress." *Plant, Cell and Environment*, 25 239-250.
- Munns, R. 1993. "Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypothesis." *Plant, Cell and Environment*, 16: 15-24.
- Munns, R., e M. Tester. 2008. "Mechanisms of Salinity Tolerance." *Annu. Rev. Plant Biol.* 59: 651-681.
- Netondo, G. W., J. C. Onyango, e E. Beck. 2004. "Sorghum and Salinity: II. Gas Exchange and Chlorophyll Fluorescence of Sorghum under Salt Stress." *Crop Sci.* 44 806-811.
- Neumann, P. M. 1995b. "The role of cell wall adjustment in plant resistance to waters deficits." *Crop Science* 35, 1258-1266.

- Neumann, P. 1997. "Salinity resistance and plant growth revisited." *Plant, Cell and Environment*, 20: 1193-1198
- Ogo, T., e S. Moriwaki. 1965. "Relationship between certain nitrogen fractions in leaf-blad of crops and salt-tolerance." *Bull. Shimme Agric. College*, 13A: 5-9.
- Papadopoulos, I. 1988. "Field salinity profile development under drip irrigation with sulfate water. ." *Soil Science* 145(3) 201-206.
- Papadopoulos, I., e V. V. Rendig. 1983. "Interactive effects os salinity and nitrogen on growth and yield of tomato plants." *Plant Soil*, 73: 47-57.
- Parida, A. K., A. B. Das, e B. Mitra. 2004. "Effect of salinity on bichemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*." *Aquatic Botany*, 80 77-87.
- Parida, A. K., e A. B. Das. 2005. "Salt tolerance and salinity effects on plants: a review." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60: 324-349.
- Paul, M. J., e C. H. Foyer. 2001. "Sink regulation of photosynthesis." *J. Exp. Bot.* 52 1400.
- Perera, L. K. R.R., T. A. Mansfield, e A. J. C. Malloch. 1994. "Stomatal responses to sodium ions in *Aster tripollium*: a new hypothesis to explain salinity regulation in above-ground tissues." *Plant Cell and Environment*, 17: 335-340.
- Provin, T., e J. L. Pitt. 1914. "Managing Soil Salinity." *Texas Agricultural Extension Service*.
- Ravikovitch, S., e A. Porath. 1967. "The effects of nutrients on the salt tolerance of crops." *Plant Soil*, 26: 49-71.
- Rhoades, J. D., A. Kandiah, e A. M. Mashali. 1992. "The use of saline waters for crop production." *FAO irrigation and drainage*, 48.
- Richards, L. A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline an Alcaly Soils*. *USSL - United States Salinity Laboratory*. Washington, USA.
- Sadeh, A. e Ravina, I. 2000. Relationships between yield and irrigation with low-quality water – a system approach. *Agricultural Systems* 64: 99-113
- Seligmann, H., e G. N. Amzallag. 1995, "Adaptative determinism during salt-adaptation in *Sorghum bicolor* exposed to salinity." *BioSystem* 36: 71-77.
- Shannon, M. C. 1998. "Adaptation of plants to salinity." *Adv. Agron.* 60: 75-119.
- USDA-ARS. 2008. Research Databases. Bibliography on Salt Tolerance. *George E. Brown, Jr. Salinity Lab. US Dep. Agric., Agric. Res. Serv. Riverside. CA.* . <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8908>.
- Van der Boogaard, R., E. J. Veneklaas, e H. Lambers. 1996. "The association of biomass allocation with growth and water use efficiency of two *Triticum aestivum* cultivars." *Australian Journal of Plant Physiology*, 23: 751-761.



- WBR. 2006. "World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication." *World Soil Resources Reports 103*. Food and Agriculture Organization of United States. Rome, Italy.
- Yeo, A. R., K. S. Lee, P. Izard, P. J. Bousier, e T. J. Flowers. 1991. "Short- and long-term effects of salinity on leaf growth in rice (*Oryza Sativa* L.)." *J. Exp. Physiol.* 42: 881-889.
- Yokoi, S., R. A. Bressan, e P. M. Hasegawa. 2002. "Salt Stress Tolerance of Plants." *JIRCAS Working Report*, 25-33.
- Zhang, M., Z. Qiu, e X. Liu. 2005. *Precision Agric.*, 6, 489-508.

## ANEXOS

**ANEXO 1** – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para a evapotranspiração (ET, mm).

Modelo		Coeficientes não standardizados	
		<b>B</b>	<b>Erro Padrão</b>
2	(Constante)	13,209	,245
	SD	-,017	,002
	SN	-,007	,001

**ANEXO 2** – Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino.

<b>CE<sub>w</sub> (dS m<sup>-1</sup>)</b>	<b>N (%)</b>		
	20%	60%	100%
<b>0</b>	209,8	209,8	209,8
<b>2</b>	208,3	208,1	207,3
<b>4</b>	204,5	204,0	200,9
<b>6</b>	199,7	195,2	184,8

**Anexo 2.1** – Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino regadas três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%).

<b>CE<sub>w</sub> (dS m<sup>-1</sup>)</b>	<b>N (%)</b>			<b>Total</b>
	20%	60%	100%	
<b>0</b>	128,9	128,9	128,9	386,6
<b>2</b>	128,9	128,9	128,9	386,6
<b>4</b>	128,9	128,9	128,9	386,6
<b>6</b>	128,9	128,9	124,6	382,3

**Anexo 2.2** – Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino regadas com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>).

<b>CE<sub>w</sub> (dS m<sup>-1</sup>)</b>	<b>N (%)</b>			<b>Total</b>
	20%	60%	100%	
<b>0</b>	43,1	43,1	43,1	129,2
<b>2</b>	43,1	43,1	43,1	129,2
<b>4</b>	43,1	43,1	43,1	129,2
<b>6</b>	43,1	43,1	37,7	123,8

**Anexo 2.3** – Total de água aplicada (mm) às 72 plantas de sorgo sacarino regadas com água corrente.

<b>CE<sub>w</sub> (dS m<sup>-1</sup>)</b>	<b>N (%)</b>			<b>Total</b>
	20%	60%	100%	
<b>0</b>	37,9	37,9	37,9	113,8
<b>2</b>	36,4	36,1	35,4	107,9
<b>4</b>	32,5	32,0	29,0	93,5
<b>6</b>	27,8	23,2	22,6	73,6

**ANEXO 3** – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para a condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

Modelo		Coeficientes não standardizados	
		<b>B</b>	<b>Erro Padrão</b>
6	H	11,841	,251
	SND	,003	,000
	H <sup>2</sup>	-,384	,015
	ND	-,014	,001
	SD	-,220	,015
	S <sup>2</sup> ND	,000	,000

ANEXO 4 – Condutância estomática ( $g_s$ ,  $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) média das plantas de sorgo sacarino com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6  $dS\ m^{-1}$ ) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) nos dias do ano 189, 222 e 235, medida através do IRGA – Infrared Gas Analyzer.

Dia do ano	$CE_w$ ( $dS\ m^{-1}$ )	N (%)		
		20%	60%	100%
189	0	26,9	25,2	22,5
	2	32,4	24,2	20,7
	4	23,8	28,1	19,8
	6	24,4	15,6	18,1
222	0	18,4	13,8	16,8
	2	21,0	13,6	13,7
	4	16,4	6,8	6,6
	6	3,3	0,4	0,6
235	0	20,3	23,7	26
	2	21,2	20,9	23,2
	4	18,4	24,5	11,2
	6	11,6	1,0	14,2

**ANEXO 5** – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para o teor relativo em clorofilas.

Modelo		Coeficientes não standardizados	
		<b>B</b>	<b>Erro Padrão</b>
3	(Constante)	17,004	,297
	S <sup>2</sup> ND	,000	,000
	SN <sup>2</sup> D	3,412 × 10 <sup>-6</sup>	,000
	SD	-,011	,003



**ANEXO 6** – Temperaturas diárias (médias, mínimas e máximas) registada ao longo do ensaio.

<b>Data</b>	<b>Temperaturas (° C)</b>		
	<b>Média</b>	<b>Mínima</b>	<b>Máxima</b>
<b>21-06-2010</b>	31,43	30,57	31,93
<b>22-06-2010</b>	33,0	32,71	33,41
<b>23-06-2010</b>	34,18	33,23	35,21
<b>24-06-2010</b>	31,66	30,78	32,64
<b>25-06-2010</b>	30,17	29,85	30,63
<b>26-06-2010</b>	32,87	31,89	33,61
<b>27-06-2010</b>	33,22	32,73	33,86
<b>28-06-2010</b>	33,73	33,36	34,03
<b>29-06-2010</b>	35,11	34,31	35,5
<b>30-06-2010</b>	36,33	35,22	37,12
<b>01-07-2010</b>	35,42	34,83	36,26
<b>02-07-2010</b>	31,94	31,4	32,66
<b>03-07-2010</b>	34,15	33,18	34,76
<b>04-07-2010</b>	38,76	38,38	39,04
<b>05-07-2010</b>	39,91	39,62	40,25
<b>07-07-2010</b>	35,23	34,96	35,47
<b>08-07-2010</b>	33,4	33,02	33,92
<b>09-07-2010</b>	34,38	34,07	34,77
<b>10-07-2010</b>	36,56	36,21	36,86
<b>11-07-2010</b>	36,15	35,83	36,54
<b>12-07-2010</b>	30,85	30,6	31,34
<b>13-07-2010</b>	28,76	28,32	29,15
<b>14-07-2010</b>	28,56	28,29	29,26
<b>15-07-2010</b>	30,78	30,42	31,15
<b>16-07-2010</b>	31,75	31,51	31,93
<b>17-07-2010</b>	36,09	35,58	36,83
<b>18-07-2010</b>	36,59	36,1	37,25
<b>19-07-2010</b>	33,07	32,53	33,51
<b>20-07-2010</b>	30,89	30,5	31,15
<b>21-07-2010</b>	29,95	29,48	30,41
<b>22-07-2010</b>	29,95	29,54	30,42
<b>23-07-2010</b>	35,32	35	36,06
<b>24-07-2010</b>	38,01	37,74	38,52
<b>25-07-2010</b>	38,69	38,47	38,97
<b>26-07-2010</b>	38,75	38,51	39,01
<b>27-07-2010</b>	39,09	38,5	40,01
<b>28-07-2010</b>	38,93	38,44	39,55

---

<b>29-07-2010</b>	38,96	38,57	39,32
<b>30-07-2010</b>	37,81	37,31	38,33
<b>31-07-2010</b>	35,8	35,35	36,13
<b>01-08-2010</b>	34,27	34,02	34,79
<b>02-08-2010</b>	32,17	31,73	32,6
<b>03-08-2010</b>	37,45	37,04	37,74
<b>04-08-2010</b>	37,82	37,35	38,1
<b>05-08-2010</b>	35,67	35,33	35,96
<b>06-08-2010</b>	38,22	37,53	38,65
<b>07-08-2010</b>	38,05	37,74	38,33
<b>08-08-2010</b>	32,49	31,96	33,28
<b>09-08-2010</b>	37,34	37,01	37,71
<b>10-08-2010</b>	39,83	39,33	40,15
<b>11-08-2010</b>	38,12	37,68	38,4
<b>12-08-2010</b>	32,48	31,93	32,83
<b>13-08-2010</b>	34,27	33,95	34,97
<b>14-08-2010</b>	33,8	33,43	34,39
<b>15-08-2010</b>	34,82	34,16	35,29
<b>16-08-2010</b>	32,38	31,69	32,67
<b>17-08-2010</b>	27,2	27,1	27,35
<b>18-08-2010</b>	30,21	29,78	30,92
<b>19-08-2010</b>	32,9	32,37	33,47
<b>20-08-2010</b>	36,31	35,85	36,76
<b>21-08-2010</b>	36,15	35,73	37,07
<b>22-08-2010</b>	34,42	33,96	34,84
<b>23-08-2010</b>	29,83	29,5	30,35

---

**ANEXO 7** – Tabela dos coeficientes de regressão sequencial obtidos pelo software SPSS v. 18 para a taxa de fotossíntese líquida ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Modelo		Coeficientes não standardizados	
		<b>B</b>	<b>Erro Padrão</b>
2	(Constante)	30,095	,828
	SD	-,057	,006
	ND	-,002	,000

**ANEXO 8** – Massa Verde (kg) e Massa Seca (kg) das folhas e dos caules com quatro níveis de condutividade elétrica (0, 2, 4 e 6 dS m<sup>-1</sup>) e três níveis de fertilização azotada (20%, 60% e 100%) após um período de 64 dias.

Massa	CE <sub>w</sub> (dS m <sup>-1</sup> )	Folhas			Caules		
		N (%)					
		20%	60%	100%	20%	60%	100%
<b>Verde</b>	<b>0</b>	0,27	0,39	0,46	0,478	0,563	0,665
	<b>2</b>	0,26	0,42	0,37	0,528	0,656	0,581
	<b>4</b>	0,25	0,36	0,23	0,518	0,604	0,397
	<b>6</b>	0,18	0,16	0,06	0,364	0,363	0,186
<b>Seca</b>	<b>0</b>	0,11	0,13	0,14	0,120	0,113	0,121
	<b>2</b>	0,10	0,13	0,13	0,136	0,135	0,115
	<b>4</b>	0,11	0,12	0,11	0,111	0,121	0,189
	<b>6</b>	0,09	0,10	0,03	0,065	0,059	0,040