

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**RAPHAELA REVORÊDO BEZERRA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E CRESCIMENTO INICIAL DA CULTURA**  
**DA CANA-DE-AÇÚCAR**

RECIFE – PE

2017

RAPHAELA REVORÊDO BEZERRA

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E CRESCIMENTO INICIAL DA CULTURA  
DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração: Engenharia de água e solo.

**COMITÊ DE ORIENTAÇÃO:**

Prof<sup>o</sup> Dr. Ênio Farias de França e Silva – Orientador

Prof<sup>o</sup> Dr. Luis Fernando de Souza Magno Campeche - Co-orientador

RECIFE – PE

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

B574i Bezerra, Raphaela Revorêdo.  
Intervalo hídrico ótimo e crescimento inicial da cultura da cana-de-açúcar /  
Raphaela Revorêdo Bezerra. – 2017.  
81 f.: il.

Orientador: Ênio Farias de França e Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2017.  
Inclui referências.

1. Compactação 2. Salinidade 3. Índice de qualidade física do solo I.Silva,  
Ênio Farias de França e, orient. II.Título

CDD 630

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E CRESCIMENTO INICIAL DA CULTURA  
DA CANA-DE-AÇÚCAR**

RAPHAELA REVORÊDO BEZERRA

Dissertação defendida e aprovada em 24 de fevereiro de 2017 pela banca examinadora:

---

Dr. Alexsandro Oliveira da Silva

DENA-UFC

---

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

DEPA-UFRPE

---

Dr. Daniel da Costa Dantas

DEAGRI-UFRPE

---

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

DEAGRI-UFRPE

A minha mãe Betânia e minha tia Maria Rosália pelo apoio incondicional em todas as fases da minha vida até agora.

Ao meu tio Gustavo, in memoriam.

A minha irmã Karolina por sempre me apoiar.

Ao meu noivo Donato e minha sogra Vera Lúcia pelo carinho, apoio e constante incentivo.

Dedico também ao meu orientador Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva, pela confiança, paciência, incentivo e excelente orientação.

Dedico

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado o dom da vida, por me dar forças para superar todas as adversidades impostas pela vida, pois sem ele nada é alcançado ou conseguido;

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, representada pelo Coordenador Professor Dr. Mário Monteiro Rolim, pela oportunidade de ingresso no mestrado e pela concessão da infraestrutura para a execução do trabalho;

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa;

Ao Professor Claudinei Fonseca Souza pela atenção e ensinamentos durante uma parte do mestrado;

À Estação experimental de cana-de-açúcar do carpiná (EECAC-UFRPE) pela doação da cana utilizada no plantio;

Ao professor Brivaldo Almeida, pela atenção, contribuição e esclarecimentos de dúvidas;

Às minhas grandes amigas Raguira Primo e Tiana Ximenes, que são verdadeiras irmãs, pela atenção, paciência, compreensão e, principalmente, pela bela amizade construída;

Ao meu grande amigo Francisco Sanguino pela sua atenção e enorme paciência em me ajudar;

Ao amigo Thiago Schossler que me ajudou muito na reta final deste trabalho;

Aos meus amigos de curso, Carol, Diego Araújo, Diego Souza, Breno, Laercia, Hozanna, Fábio, Hammady, Mara, Raquele e todos os outros colegas da pós-graduação em engenharia agrícola.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos .....	14
3. HIPÓTESES .....	14
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
4.1 Aspectos gerais da Cana-de-Açúcar .....	15
4.2 Fases fenológicas da cana-de-açúcar .....	16
4.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar.....	19
4.4 Definição e distribuição dos Espodossolos no Brasil .....	22
4.5 Estresse hídrico e salino.....	23
4.6 Indicadores físicos de qualidade do solo do ponto de vista agrícola .....	26
4.6.1 Compactação do solo .....	27
4.6.2 Densidade do solo .....	30
4.6.3 Porosidade do solo .....	31
4.6.4 Resistência mecânica do solo à penetração de raízes.....	33
4.7 Intervalo Hídrico Ótimo.....	35
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	38
5.1 Localização e caracterização da área de estudo .....	38
5.2 Caracterização das unidades experimentais .....	40
5.3 Características do material de solo.....	41
5.4 Condução da cultura .....	42
5.5 Delineamento experimental e tratamentos.....	42
5.6 Elevação da umidade do solo à capacidade de campo e manejo da irrigação.....	43
5.7 Salinização do solo .....	45
5.8 Crescimento e rendimento analisado na cultura.....	45
5.9 Amostragem do solo .....	46
5.10 Porosidade do solo .....	47
5.11 Curva de retenção de água no solo.....	47
5.12 Resistencia do solo à penetração de raízes e intervalo hídrico ótimo .....	49
6. RESULTADOS E DICUSSÃO .....	53
6.1 Altura da planta e diâmetro de colmo .....	53

6.2 Variáveis de rendimento .....	57
6.2.2 Massa seca total da parte aérea .....	59
6.3 Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS).....	61
6.4 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) .....	63
7. CONCLUSÕES .....	65
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

## RESUMO

As práticas de uso e manejos agrícolas do solo alteram sua estrutura e, conseqüentemente, suas propriedades físico-hídricas. Visando entender essa relação entre as características físicas (resistências à penetração, densidade do solo e porosidade) e as características hídricas (água disponível) foi desenvolvido o conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Foi realizado um estudo com o objetivo de determinar e avaliar o IHO e sua relação com o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar de acordo com níveis de densidade do solo na presença e ausência de salinidade. Assim, foi conduzido um experimento em ambiente protegido na Estação Experimental de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) no período de junho a setembro de 2016. O estudo foi realizado em vasos de 0,015 m<sup>3</sup>, que foram preenchidos com uma camada de Espodossolo, coletado numa profundidade de 0,0 - 0,40 m. Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2 com cinco repetições, sendo cinco níveis de densidade do solo (1400, 1500, 1600, 1700 e 1800 kg m<sup>-3</sup>) e dois níveis de salinidade (0 e 3 dS m<sup>-1</sup>). Foram coletadas 240 amostras indeformadas de solo em anéis de 98 cm<sup>3</sup>, na profundidade de 0,0 - 0,1 m, destinadas a obtenção dos parâmetros: densidade do solo; curva de resistência à penetração; curva de retenção de água, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo. A densidade do solo crítica foi atingida no cruzamento do limite superior e inferior do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Na ocasião foram avaliados parâmetros morfológicos (altura e diâmetro do colmo); massa fresca, seca e teor de água da planta e massa seca da raiz). De posse dos resultados observou-se que a densidade influenciou de maneira negativa as variáveis de crescimento e rendimento na cana-de-açúcar. Para o nível de salinidade adotado apenas a variável massa fresca total teve um efeito positivo até o nível de densidade 1530 kg m<sup>-3</sup>. Observou-se, para o tratamento submetido à salinidade, que houve uma ampliação do IHO em relação ao tratamento que não recebeu salinidade.

Palavras-chave: Compactação, salinidade, índice de qualidade física do solo.

## ABSTRACT

The land use and management practices of the soil alter its structure and, consequently, its physical-water properties. In order to understand this relationship between physical characteristics (resistance to penetration, soil density and porosity) and water characteristics (available water) the concept of Optimum Water Interval (IHO) was developed. A study was carried out with the objective of determining and evaluating the IHO and its relationship with the initial development of sugarcane according to soil density levels and the presence or absence of salinity. Thus, an experiment was carried out in a protected environment at the Experimental Station in Irrigated Agriculture Ronaldo Freire de Moura at the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE) from June to September 2016. The study was carried out in pots of 15 dm<sup>3</sup>, which were filled with a layer of Spodosol collected at a depth of 0 - 0.40 m. A completely randomized design was used in a 5 x 2 factorial scheme with five replications, with five levels of soil density (1400, 1500, 1600, 1700 and 1800 kg m<sup>-3</sup>), two salinity levels (0 and 3 dS m<sup>-1</sup>). For this research, 240 undisturbed soil samples was collected in 98 cm<sup>3</sup> rings, at a depth of 0.0-0.1 m, to obtain the following parameters: soil density; penetration resistance curve; Water retention curve, total porosity, macroporosity and soil microporosity. The critical soil density was reached at the intersection of the upper and lower limits of the optimum water interval (IHO). Morphological parameters (stem height and diameter), fresh matter and dry matter of the aerial part of the plants and dry root matter) were evaluated. From the results, it was observed that the density influenced in a negative way the growth and yield variables in the sugarcane. For the level of salinity adopted only the variable total fresh matter had a positive effect up to the level of density 1530 kg m<sup>-3</sup> and from that level onwards there was a negative effect. The treatment that was submitted to the salinity there was an increase of the IHO when compared to the treatment that did not receive salinity.

Key words: Compaction, salinity, soil physical quality index.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre o conteúdo de água e os fatores físicos do solo que limitam o desenvolvimento das plantas. A deterioração estrutural e a redução na qualidade física do solo ocorrem de A para C. Fonte: Adaptado de Silva et al. (2001). .....	37
Figura 2. Temperatura do ar máxima, média e mínima no período do experimento. ....	40
Figura 3. Umidade relativa do ar registrada ao longo do experimento. ....	40
Figura 4. Montagem e compactação dos tratamentos. ....	41
Figura 5. Elevação da umidade do solo à capacidade de campo (Figura 1A), plantio dos rebolos de cana-de-açúcar (Figura 1B, 1C e 1D). ....	44
Figura 6. Mesa de tensão. Laboratório de Dinâmica de água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFRPE. ....	48
Figura 7. Câmaras de Richards. Laboratório de Dinâmica de água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFRPE. ....	48
Figura 8. Penetrômetro de bancada. Laboratório de física do solo UFRPE .....	49
Figura 9. Superfície de resposta para altura das plantas de cana-de-açúcar em função da densidade do solo e dias após o plantio (DAP). ....	55
Figura 10. Diâmetro do colmo (DC) de cana-de-açúcar em função dos dias após o plantio (DAP) cultivada sob níveis de salinidade do solo .....	56
Figura 11. Massa fresca total da cana-de-açúcar em função das densidades do solo, submetidas ao solo sem sal e com sal. ....	58
Figura 12. Análise de regressão aplicada a MST em função dos níveis de densidade, submetidas ao tratamento sem manejo de salinidade. ....	60
Figura 13. Análise de regressão aplicada a massa seca total da raiz em função dos níveis de densidade, submetidas ao tratamento com salinidade. ....	61
Figura 14. Curva de retenção de água dos solos salino e não salino ajustada por Van Genuchten. ....	62
Figura 15. Diagrama para o IHO no tratamento sem sal. ....	64
Figura 16. Diagrama para o IHO no tratamento submetido à salinidade. ....	64

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Características físico-químicas do solo na camada de 0-40 cm. ....	42
Tabela 2. Teste de Esfericidade de Mauchly para as variáveis DC e AP da cana-de-açúcar, ao longo do tempo. ....	53
Tabela 3. Análise multivariada de perfil. ....	54
Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis massa fresca total da parte aérea (MFT), massa seca total da parte aérea (MST) e massa seca total da raiz (MSTR). .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), da família Poaceae (Gramínea), é uma das culturas mais importantes do mundo, possuindo grande importância econômica para o Brasil. O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar, sendo a mesma considerada o biocombustível mais eficiente do ponto de vista econômico e ambiental. Na região Nordeste, Pernambuco é o segundo maior estado produtor na safra 2017/18 ficando atrás apenas do estado de Alagoas (CONAB, 2017/18). Tendo em vista a importância que esta cultura abrange no cenário nacional e o manejo que a mesma é submetida, torna-se necessário o estudo das características físicas do solo e como isso afeta seu desenvolvimento fenológico e radicular da mesma.

A qualidade física do solo está associada à sua capacidade em promover ao sistema radicular das culturas condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A estrutura do solo pode ser alterada pelas práticas inadequadas de manejo, influenciando a produtividade das culturas por meio das modificações na disponibilidade de água, nutrientes, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes. Uma das principais alterações na estrutura física do solo é causada pela compactação. Por ser mais sensível às alterações na estrutura do solo, o indicador que vem sendo utilizado é a resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RP), bastante utilizada para avaliar o manejo do solo e o comportamento das raízes ao penetrar no solo, pois as culturas necessitam que o solo apresente condições favoráveis ao crescimento das raízes possibilitando acesso às camadas mais profundas para serem exploradas maior quantidade de água, nutrientes e oxigênio, refletindo em produções satisfatórias.

Diante dessa problemática, a compreensão do impacto das práticas de manejo sobre a qualidade física do solo e que consequentemente reflete na produtividade é de fundamental importância no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. Assim o estudo de métodos que integre, num reduzido número de parâmetros, as diversas propriedades do solo que expressem o ambiente onde as culturas são desenvolvidas para a avaliação da qualidade física do solo se torna cada vez mais necessário.

Surge nesse cenário o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) ou “Least Limiting Water Range” (LLWR), que integra propriedades do solo diretamente relacionadas com o desenvolvimento das culturas e corresponde ao intervalo entre os limites superior e inferior do conteúdo de água no solo, no qual são mínimas as limitações para o

desenvolvimento radicular. O limite superior é a capacidade de campo (CC) ou a porosidade de aeração de 10 % (PA), enquanto o limite inferior é o ponto de murcha permanente (PMP) ou a umidade na qual a resistência do solo à penetração das raízes atinge valores limitantes ao desenvolvimento do sistema radicular. As condições físicas do solo adequadas ao crescimento das plantas são dadas pela relação entre resistência do solo à penetração (RP), aeração e disponibilidade de água, as quais afetam diretamente o crescimento das plantas.

Outro fator que influencia a produtividade das culturas em geral é a salinidade. A salinização do solo influencia diretamente no metabolismo das plantas, impedindo a absorção de água e outros nutrientes, somado ao fato de que certos íons constituintes dos sais, quando adsorvidos em altas quantidades, provocam modificações no balanço nutricional capaz de resultar em clorose e necrose nas folhas, reduzindo a produção e, às vezes, morte da planta jovem (PRISCO; FILHO 2010).

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 Geral

Avaliar o intervalo hídrico ótimo do solo e o crescimento da cana-de-açúcar com diferentes níveis de densidades de solo e salinidade em Espodossolo.

### 2.2 Específicos

Avaliar os parâmetros de crescimento e o rendimento da cana-de-açúcar sob diferentes níveis de densidade e concentração de salinidade;

Quantificar os limites superiores e inferiores do intervalo hídrico ótimo (IHO) para o Espodossolo adotado levando em consideração a ausência e a presença da salinidade e os diferentes níveis de densidade;

Avaliar a densidade crítica para o desenvolvimento da cana-de-açúcar para este tipo de solo.

## **3. HIPÓTESES**

3.1 Existe efeito da densidade do solo no IHO;

3.2 Existe efeito da salinidade do solo no IHO.

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Aspectos gerais da Cana-de-Açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro, tendo em vista o aumento da demanda mundial por etanol, oriundo de fontes renováveis, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornam o país promissor para a exportação dessa commodity (CONAB, 2017/18). Ainda segundo dados da CONAB (2017/18), o Brasil ocupa uma área de 8.738,6 mil hectares de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira e uma produtividade equivalente a 72.734 kg/hectare, destacando a Região Sudeste, maior produtora nacional, responsável por 73,6% do açúcar produzido no país, seguido da Região Centro-Oeste (11,1%), Sul (7,6%) e Nordeste (7,5%). São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Alagoas são os maiores produtores de açúcar, com estimativa de produção acima de 1 milhão de toneladas.

A cultura é bastante influenciada por variáveis climáticas ao longo de todo o ciclo vegetativo, sendo que os principais fatores que determinam o sucesso da sua produção e a sua exploração econômica são o clima, o solo e a precipitação pluvial (BRUNINI, 2010). O ciclo fenológico da cana-de-açúcar completa-se em aproximadamente 11 a 22 meses e necessita de um período quente e úmido para brotar, emergir, perfilhar e outro relativamente seco e/ou frio, para acumular sacarose (maturação) (MAURI, 2012).

Devido à necessidade da diversificação da matriz energética, principalmente por conta das pressões ambientais, o Brasil enfrenta uma perspectiva de um aumento significativo da demanda de etanol, matéria-prima derivada da cana, pois os combustíveis fósseis são os grandes responsáveis pela emissão de gases poluentes na atmosfera. Esta situação sustenta-se em três realidades atuais de mercado: (i) aumento interno do consumo de etanol pelo sucesso da introdução da alternativa flex-fuel no mercado de veículos automotivos leves; (ii) expansão das exportações brasileiras de etanol em função do crescente interesse mundial pela mistura do etanol à gasolina; e (iii) opção brasileira pela produção do biodiesel utilizando etanol na transesterificação dos óleos vegetais (OLIVETTE; NACHILUK; FRANCISCO, 2010).

O setor está investindo cada vez mais e desenvolvendo mais tecnologia para a cogeração de energia, por meio da queima do bagaço e, mais recentemente pela queima da palha de cana. O potencial da cogeração de energia elétrica a partir da cana-de-açúcar é de 9,6 GW e, terá capacidade de atingir pouco mais de 17 GW em 2020, tornando-se uma importante fonte na matriz energética nacional (TOLMASQUIM, 2011).

Com intuito de aumentar a produtividade entre os anos de 1950 e 1960, todas as fases do processo produtivo da cana-de-açúcar passaram por um processo de modernização com a mecanização, utilização de defensivos agrícolas e introdução de novas variedades. Com isso, as práticas de manejo intensivas na cultura da cana-de-açúcar se iniciam no plantio e vão até o final do corte. Desse modo, inúmeras operações de preparo do solo, colheita e transporte da matéria-prima são conduzidas diversas vezes em uma mesma área. Este intenso tráfego de máquinas agrícolas provoca modificações na estrutura física do solo (LANZANOVA, 2007).

A pressão exercida na superfície do solo pelo tráfego de máquinas, normalmente, aumenta a densidade do solo e diminui a porosidade total, sobretudo a macroporosidade, segundo Tsegaye e Hill (1998), sendo mais grave quando as operações de preparo do solo e tráfego de máquinas são realizadas aplicando-se pressões superiores à capacidade de suporte de carga, para um dado teor de umidade do solo (DIAS; PIERCE, 1996; DIAS, 2000).

Diante disso, a compactação do solo é considerada um dos fatores limitantes para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, por caracterizar-se pela redução da macroporosidade, reduzindo a quantidade de água disponível no solo (ALBUQUERQUE; REINERT, 2001; VITTI; MAZZA, 2002).

#### **4.2 Fases fenológicas da cana-de-açúcar**

De acordo com Segato, Mattiuz e Mozambani (2006) a cultura da cana-de-açúcar apresenta quatro estágios fenológicos: brotação e emergência de brotos, perfilhamento e estabelecimento da cultura, crescimento e maturação dos colmos que são distinguidas a seguir:

**Brotação e emergência:** ocorrendo condições ambientalmente favoráveis, principalmente temperatura e umidade, iniciam-se as atividades meristemáticas resultando no desenvolvimento das raízes do tolete e a emergência de um pequeno broto na superfície do solo, que ocorre geralmente após 20 a 30 dias após o plantio.

**Perfilhamento e estabelecimento da cultura:** na sequência, as gemas localizadas na base do colmo primário se desenvolvem, observando novos brotos, com aproximadamente 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. À medida que os colmos desenvolvem-se, novas raízes vão sendo formadas a partir de suas bases e o sistema radicular da touceira vai aumentando. Em função da concorrência pelos fatores limitantes do meio, sobretudo luminosidade, cessa-se esta fase e os colmos mais jovens chegam inclusive a morrer.

**Crescimento dos colmos:** os perfilhos sobreviventes continuam seu crescimento e desenvolvimento, ganhando altura e iniciando o acúmulo de açúcares da base em direção ao ápice da planta. Durante essa fase, as folhas mais velhas começam a ficar amareladas e secam. Nessa fase, o sistema radicular encontra-se bem desenvolvido, tanto nas laterais quanto em profundidade, sendo esta a zona principal de absorção de água e nutrientes por parte da cultura. O canavial pode atingir altura acima de três metros, com a população final de colmos, variando em função das condições de clima e solo.

**Maturação dos colmos:** a maturação inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos sobreviventes do perfilhamento das touceiras. À medida que vão amadurecendo, os colmos continuam o seu crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus internódios. Quando as touceiras atingem altura igual ou superior a dois metros, nota-se o amarelecimento e a conseqüente seca das folhas que se encontram na altura mediana da planta, indicando que já está sendo depositado açúcar nessa região. Ao atingir o seu tamanho final, constituem-se colmos industrializáveis, passando a acumular mais intensamente a sacarose produzida pela fotossíntese. Nesta fase da cultura, 11 a 20 meses após o plantio (conforme época de plantio e variedade), observa-se plena maturação dos colmos.

Na maioria das vezes a formação dos canaviais é feita por pedaços de colmo (tolete). O tolete, sendo um fragmento de colmo maduro, contém feixes vasculares (floema e xilema), que promovem a ligação entre o broto e as raízes em

desenvolvimento, que atuam como drenos fisiológicos (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

O desenvolvimento inicial é influenciado por fatores como: temperatura, umidade e aeração do solo, variedade, profundidade de plantio, posição da gema no colmo, tratamento com inseticidas e fungicidas. Temperaturas entre 26°C e 32°C são ideais para o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, enquanto que umidade do solo entre 15 e 25% seria ideal para a brotação (CASAGRANDE, 1991).

Para Casagrande e Vasconcelos (2010) brotação caracteriza-se fisiologicamente como um sistema fonte-dreno, pois há uma degradação de fontes de reserva do tolete, de modo que os perfilhos a utilizem por cerca de 60 dias após o início da brotação; e além disso a temperatura interfere na velocidade das reações bioquímicas e na ação de enzimas envolvidas na divisão, diferenciação e crescimento celular, sendo um dos fatores que mais influem na brotação, pois a água tem papel fundamental nos processos bioquímicos que ativam a brotação porque a deficiência hídrica no solo pode prejudicar ou impedir a brotação das gemas, e isso depende da intensidade e da duração do período de deficiência.

A brotação é altamente dependente do conteúdo de água no solo, pois em excesso pode levar a condições de anaerobiose, afetando a degradação das reservas do tolete, enquanto teores muito baixos limitam o desenvolvimento do sistema radicular, afetando a absorção de água (INMAN-BAMBER E SMITH 2005). De acordo com Santana et al. (2007) a cana-de-açúcar desenvolve-se bem sob estação quente e longa (com temperaturas médias diárias entre 22 e 30°C), com incidência de radiação alta e umidade relativa adequada, durante a fase de maturação e colheita.

Beauclair e Scarpari (2007) mencionam que para obter uma boa brotação e fornecimento de água para a planta, o solo deve estar o mais próximo da capacidade de campo. Em lugares onde o período de seca é mais prolongado é interessante fazer uso de irrigação, pois é um fator imprescindível para a garantia de produção com qualidade e aumento da produtividade. A cana irrigada apresenta maior crescimento, densidade de colmos e índice de área foliar, e valores de teor de açúcar em comparação ao cultivo sem irrigação.

Procura-se cada vez mais cultivares que tenham uma boa brotação para se ter uma boa produtividade final. Segato et al. (2006) citam que a capacidade de brotação, enraizamento e emergência da cana-de-açúcar é uma característica genética, no entanto,

dentro da mesma variedade, a brotação varia de acordo com a idade da muda, diferença de idade da gema, concentração de açúcares e nutrientes minerais.

O plantio, preferencialmente, deve ser realizado com colmos de idade inferior a 12 meses, pois colmos com idade superior a 12 meses possuem menor quantidade de glicose e sais minerais, as escamas de proteção da gema são mais lignificadas e salientes, resultando em menor brotação em relação aos colmos mais novos (SEGATO et al., 2006). Simões Neto (1986), estudando o efeito da quantidade de reserva do tolete sobre o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, observou efeito direto dos níveis de reserva energética sobre o crescimento do broto primário. Para Casagrande (1991), quanto mais bem nutridos estiverem os toletes, melhor será a brotação.

O colmo da cana-de-açúcar é cilíndrico, sendo composto de nós e entrenós nos diferentes estágios fisiológicos: entrenós maduros (base), em maturação (meio) e imaturos (ponta), que se formam a cada dez dias produzindo uma nova folha a cada internódio. O número de folhas no colmo de cana-de-açúcar é, em média de oito a nove no período do auge do perfilhamento, sendo que a interceptação solar necessária à realização da fotossíntese ocorre nas seis folhas mais apical (GOLINSKI, 2009). O seu crescimento é variável, dependendo da época de plantio, tipo de muda e condições ambientais, de acordo com Castro, Kluge e Sestari (2008) há uma produção média de 2 a 4 entrenós por mês, com 0,10 a 0,15 m de comprimento cada um. A maturação é um processo que acontece de nó para nó e o grau de maturação de cada nó depende da idade destes nós.

A cana-de-açúcar é considerada uma cultura altamente eficiente na conversão de energia luminosa em energia química, pois é uma planta C4 que através de sua alta atividade fotossintética possui alta taxa de crescimento, adaptação a condições climáticas adversas, como temperaturas elevadas e deficiência hídrica e eficiência do uso da água de duas a três vezes maior que as plantas C3 (TAIZ E ZEIGER, 2006)

### **4.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar**

O sistema radicular da cana-de-açúcar é muito amplo e bem desenvolvido, do tipo fasciculado, e as primeiras raízes que se desenvolvem após o plantio da cana-de-açúcar são as de fixação (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007).

As raízes são fasciculadas, sendo que 85% delas encontram-se nos primeiros 0,5 m de profundidade e aproximadamente 60% entre os primeiros 0,2 a 0,3 m, havendo pequenas variações nessa porcentagem dependendo, sobretudo, das cultivares. Sampaio e Salcedo (1987) identificaram, para as condições do nordeste brasileiro, que 75% da massa radicular da cana-de-açúcar estava localizada nos primeiros 0,2 m superficiais e 50% estavam distantes a menos de 0,30 m do centro da touceira.

As primeiras raízes são as raízes superficiais, localizadas nos primeiros 0,3 a 0,4 m do perfil do solo, são bem ramificadas e extremamente absorventes. Já as raízes de fixação, atingem profundidades maiores, com mais de 0,5 m, e ao contrário do que sugere o nome, a função dessas não se restringe exclusivamente à fixação, pois podem perfeitamente absorver água e nutrientes, apesar de ter uma menor eficiência em relação às raízes superficiais. O terceiro tipo são as raízes-cordão, formadas a partir de aglomerações de raízes verticais. Atingem profundidades superiores a 5 m no perfil do solo, fornecendo acesso a reservas profundas de água no solo, em períodos de grande estiagem (MAURI, 2012).

Após o corte da cana planta, o sistema radicular antigo mantém-se ainda em atividade por algum tempo, período em que é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, sendo esse processo lento e gradual. As raízes da soqueira são mais superficiais do que as da cana planta pelo fato dos perfilhos das soqueiras brotarem mais próximo da superfície do que os da cana planta. Pelo mesmo fato, quanto maior o número de cortes, mais superficial torna-se o sistema radicular das soqueiras (BACCHI, 1983).

O entendimento dos fenômenos ocorrentes na parte aérea das culturas torna-se mais completo quando se compreende o que acontece abaixo da superfície do solo, principalmente com a distribuição radicular da cana-de-açúcar, uma vez que o desenvolvimento radicular sofre influência de três conjuntos de fatores do solo, o pedogenético, atributos físicos e químicos. Esta interdependência entre parte aérea e sistemas de raízes está ligado ao transporte de água e nutrientes, que conseqüentemente influenciam na produção (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2010).

O sistema radicular tem influência direta sobre algumas características da planta, como resistência à seca, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, tolerância ao ataque de pragas do solo, capacidade de germinação e brotação, tolerância à movimentação de máquinas, entre outros. Em relação às raízes, quanto mais bem

desenvolvidas por área ou volume de solo, melhor será o resultado do cultivo, sendo a caracterização do crescimento e distribuição das raízes fundamental para explicar a resposta da cultura e praticar um adequado manejo de irrigação. Além disso, não é a quantidade de raízes o fator determinante, mas sua distribuição no perfil do solo. Uma quantidade muito grande de raízes nas camadas superficiais do solo pode ser maléfica, pois em época de verão a planta fica submetida a um maior risco de estresse hídrico, ou também pode ser benéfico, no caso de cana irrigada (VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

Segundo Vasconcelos e Casagrande (2010) logo após o plantio da muda (ou tolete), com a existência de condições favoráveis para seu desenvolvimento, inicia-se o processo do desenvolvimento radicular, com as raízes originárias a partir dos primórdios radiculares situados na zona radicular dos colmos plantados, tendo a função de suprir os perfilhos recém-brotados com água e nutrientes do solo, juntamente com as reservas do tolete.

Segundo Muñoz et al. (2010), a compreensão e o estudo do sistema radicular das culturas apresentam alguns desafios como: a arquitetura geométrica complexa do sistema radicular e ampla gama de tipos e diâmetros de raízes, tornado assim a pesquisa muito trabalhosa devido às dificuldades metodológicas relacionadas com a amostragem de raízes, sendo uma das causas da pouca quantidade de pesquisas sobre o sistema radicular.

Entre os fatores que afetam o desenvolvimento radicular da cultura da cana-de-açúcar pode-se citar a compactação, que está entre os fatores físicos, a qual promove: aumento na densidade do solo e redução na macroporosidade, conseqüentemente reduzindo a aeração, condutividade hidráulica e gasosa do solo; textura do solo e a disponibilidade hídrica. Dentre os fatores climáticos são citados a temperatura do ar e do solo, que interferem na elongação e na ramificação de raízes, e a precipitação pluviométrica que é responsável pelo fornecimento de umidade do solo (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008).

A susceptibilidade do solo à compactação pode ser estimada pela densidade inicial, em que o desenvolvimento de funções que facilitem a compreensão dessa susceptibilidade depende do efeito da compactação nos atributos físicos do solo (SUZUKI et al., 2007). A compactação quando elevada, pode reduzir a distribuição e

infiltração da água no perfil do solo, como também a penetração do sistema radicular limitando assim a absorção de nutrientes pelas plantas (VOGELMANN et al., 2012).

Existem vários métodos disponíveis para realização da avaliação do sistema radicular das culturas. Uma das revisões pioneiras sobre o tema foram realizadas por Böhm (1979), citado por Vasconcelos e Casagrande (2008), e Köpke (1980); esses autores descrevem, detalhadamente, os métodos da escavação, do monólito, do trado, do perfil, do tubo ou paredes de vidro, além de vários métodos indiretos. Para Otto et al. (2009) salientam que a escolha do método de avaliação do sistema radicular depende da cultura, das condições edáficas, de haver possibilidade de amostragem destrutiva ou não, disponibilidade de mão-de-obra, e, principalmente, os objetivos do estudo, pois não existe uma forma perfeita de analisar as raízes.

#### **4.4 Definição e distribuição dos Espodossolos no Brasil**

O conceito de Espodossolo desenvolveu-se de podzóis, são solos ácidos e pobres em bases trocáveis; do ponto de vista físico, apresentam em geral textura arenosa, com baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, e problemas de drenagem nas posições abaciadas, onde ocorrem horizontes endurecidos que bloqueiam a percolação da água, formando lençol freático suspenso no período chuvoso, podendo também influenciar no crescimento das raízes quando muito superficiais (CARVALHO et al., 2013).

No atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2006) os Espodossolos são solos constituídos por material mineral que apresentam horizonte B espódico (Bh, Bhs ou Bs) abaixo de quaisquer horizontes A ou E ou horizonte hístico com menos de 40 cm de espessura. Esses solos são desenvolvidos basicamente a partir de produtos de intemperização de arenitos, com sequência de horizontes A, B e C bem diferenciados e com suas transições geralmente bem definidas. Os horizontes espódicos são formados pelo acúmulo de compostos amorfos de alumínio e ferro iluviados associados a materiais orgânicos. De forma geral, os 5 horizontes espódicos ocorrem dentro de 200 cm a partir da superfície do solo ou 400 cm se os horizontes A + E ou hístico + E apresentam espessura superior a 200 cm. Normalmente, a sequência de horizontes dos Espodossolos é A, E, Bh/Bhs/Bs e C, sendo os horizontes facilmente diferenciados entre si. Os horizontes B espódicos podem se apresentar

cimentados por matéria orgânica e alumínio com ou sem ferro onde os horizontes espódicos são denominados “ortsteins” (EMBRAPA, 2006). No Brasil os Espodossolos uma área absoluta de 160.892,69 Km<sup>2</sup>, equivalente a um tota de 1,89% da área brasileira (EMBRAPA, 2006).

A deficiência de água e oxigênio, comum em Espodossolos, está relacionada à textura mais arenosa nos horizontes superficiais e à camada endurecida e impermeável em subsuperfície, influenciando a elevação do lençol freático suspenso no período úmido (SILVA et al., 2012). No Nordeste este solo é muito comum em regiões produtoras de cana-de-açúcar.

#### **4.5 Estresse hídrico e salino**

A utilização da irrigação é um dos aspectos primordiais e mais eficazes na melhoria da produtividade agrícola. No entanto, o manejo dessa deve ser feito de forma racional e equilibrada para não utiliza-la em excesso ou escassez e assim provocar perdas na produção.

Segundo Larcher (2006), devido à condição desse estresse, as culturas passam por três fases: fase de alarme, caracterizada pela perda da estabilidade das estruturas que mantêm as funções vitais (processos bioquímicos ligados ao mecanismo fotossintético); fase de resistência, quando as culturas são submetidas a um estresse contínuo podendo apresentar adaptações através do ajuste osmótico; fase de exaustão, quando a planta está submetida a condições sub-ótimas por um período prolongado ou intenso deixando a planta suscetível à pragas ou doenças por consequência da diminuição de suas defesas.

Sendo assim a baixa disponibilidade hídrica afeta negativamente o crescimento dos cultivos agrícolas e é a principal causa da redução da produtividade (FLEXAS et al., 2006). As plantas tendem a diminuir a perda de água pelo fechamento parcial dos estômatos, o que evita a redução do potencial da água na planta ( $\psi$ ) em condições de déficit hídrico, minimizando a perda de água pela transpiração. A deficiência hídrica além de causar danos no alongamento celular, no alongamento das folhas e do colmo, também causa acentuada senescência foliar e restrição ao surgimento de novas folhas, e o grau dessas alterações é decorrente da intensidade do estresse hídrico e depende do genótipo (SMIT; SINGELS, 2006).

Contudo, o fechamento dos estômatos tem consequências complexas, exigindo ajustes de fotossíntese, respiração e no fluxo de água (BOHNERT; JENSEN, 1996). Durante o estresse hídrico, as plantas costumam ter uma menor taxa de assimilação de carbono, o que ocasiona uma baixa utilização dos elétrons gerados na cadeia de transporte de elétrons e, conseqüentemente, uma superprodução de espécies reativas de oxigênio as chamadas ROS (EDREVA, 2005). A suscetibilidade da cana-de-açúcar à deficiência hídrica é maior nas fases de perfilhamento e de crescimento intenso, pois nessas ocorrem alongamento dos colmos, o que causa sérios prejuízos na produção de fitomassa e no rendimento de sacarose, pois é quando as plantas apresentam grande área foliar e necessitam de maior quantidade de água para a realização das trocas gasosas com a atmosfera (TRENTIN et al., 2011).

A velocidade de imposição do estresse hídrico às plantas causa efeitos diferenciados. Quando ocorre rapidamente, os mecanismos morfofisiológicos são severamente afetados. Entretanto, quando o déficit hídrico é estabelecido gradualmente, ocorrem adaptações na planta, principalmente se ocorrer no início do ciclo. Redução no crescimento, diminuição no tamanho das folhas e senescência foliar são algumas das respostas das plantas que lhes conferem adaptação a essa condição, uma vez que são mecanismos que diminuem a perda de água para atmosfera (CHAVES et al., 2009).

A cana-de-açúcar tem um metabolismo para fixação do CO<sub>2</sub> do tipo C<sub>4</sub>, o que a permite ser adaptada à produção de biomassa em regiões tropicais, uma vez que as plantas possuem um controle estomático que possibilita maior economia de água e nitrogênio, recursos limitantes da produtividade das culturas nessas regiões.

As fases de perfilhamento e crescimento intenso são as mais críticas no que diz respeito à demanda hídrica, porque nessa fase são produzidos 70-80% de toda a biomassa acumulada durante o ciclo da cultura (MACHADO et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2010). Dentre os processos afetados pelo déficit hídrico, o crescimento foliar da cana-de-açúcar é um dos mais sensíveis e perceptíveis. Zhao et al. (2010) verificaram reduções de até 59% no índice de área foliar, devido a ocorrência de estresse hídrico em plantas de cana-de-açúcar, e ainda decréscimo de cerca de 69% na biomassa de folhas verdes e aumento de 137% na biomassa de folhas mortas.

Como já foi discutido anteriormente o manejo inadequado da água também pode causar salinidade de solos agricultáveis, que é um dos fatores de maior preocupação na agricultura moderna, devido ao aumento considerável da quantidade de solos

degradados por salinização (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Estima-se que 19,5% das terras irrigadas (45 milhões de hectares) e 2,1% das não irrigadas (32 milhões de hectares), no mundo, estejam afetadas pelos sais, e é particularmente evidente nas regiões áridas e semiáridas, atingindo cerca de 25% das áreas irrigadas. Também se estima que ocorra uma perda de cerca de 1,5 milhões de hectares de terras aráveis a cada ano devido ao acúmulo de sais, com tudo isso, a salinização tem sido identificada como o principal processo de degradação dos solos (FAO, 2006).

Os sais são transportados pelas águas de irrigação e depositados no solo, onde se acumulam à medida que a água se evapora ou é consumida pelas culturas. Os sais do solo e da água reduzem a disponibilidade da água para as plantas, a tal ponto que afetam os rendimentos das culturas. Nem todas as culturas respondem igualmente à salinidade, algumas produzem rendimentos aceitáveis a níveis altos de salinidade e outras são sensíveis a níveis relativamente baixos. Esta diferença deve-se à melhor capacidade de adaptação osmótica que algumas culturas têm, o que permite absorver, mesmos em condições de salinidade, maior quantidade de água (AYERS; WESTCOT, 1999).

De um modo mais amplo, um solo é considerado salino quando a quantidade de sais existentes é capaz de prejudicar o desenvolvimento sadio das plantas. Para Holanda et al. (2010) na maioria das culturas isso ocorre quando a condutividade elétrica do extrato de saturação é igual ou superior a  $2 \text{ dS m}^{-1}$ . Já de acordo com a classificação do “U.S. Salinity Laboratory”, solos salinos são os que possuem pH inferior a 8,5, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) superior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  e percentagem de sódio trocável (PST) inferior a 15%; os salinos-sódicos possuem pH próximo de 8,5, CEes superior  $4 \text{ dS m}^{-1}$  e PST superior a 15% e os solos sódicos possuem pH em geral de 8,5 a 10, CEes inferior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  e PST superior a 15% (DAKER, 1988). Deve-se, então, entender os efeitos causados pelo estresse salino aos tecidos vegetais e como as plantas respondem a esse estímulo ambiental para obtenção de espécies tolerantes.

A resposta das plantas à salinidade acontece em duas fases distintas. A primeira fase, chamada fase osmótica, é rápida, pois ocorre imediatamente após o contato com a salinidade, em que o sal atinge as raízes diminuindo o potencial osmótico da relação solo-planta, com conseqüente redução do crescimento da parte aérea pela falta de água. A segunda fase, que ocorre lentamente, é a fase iônica, quando o sal atinge a parte aérea da planta em altas concentrações causando toxicidade e, neste caso, se a velocidade da toxicidade e morte foliar for maior que a produção de novas folhas a fotossíntese é

prejudicada e, conseqüentemente, a produção de carboidratos, o que ocasionará a redução do crescimento e produtividade da cultura (MUNNS; TESTER, 2008).

A tolerância à salinidade está na maioria das vezes associada à tolerância à seca, uma vez que a alta concentração de sódio no solo inibe a absorção de água pela planta induzindo a deficiência hídrica, que prejudica o crescimento das plantas, estando diretamente relacionado à fotossíntese, ou seja, plantas sob estresse diminuem a capacidade fotossintética, bem como o crescimento (PLAZEK et al., 2013; KUMAR et al., 2014). Plantas submetidas ao estresse salino iniciam mecanismo de ajuste osmótico para manter a turgidez das células fechando seus estômatos na tentativa de amenizar a perda de água, o que causa o crescimento lento das plantas estressadas (JAMES et al., 2002; GUERZONI et al., 2014).

A cultura da cana-de-açúcar tem sido classificada como glicófito, sendo, assim, pouco tolerante à salinidade de solos (KUMAR et al., 2014), embora esta classificação sofra influência de características genótípicas com relação ao nível de sensibilidade à salinidade. Para cana-de-açúcar, o valor limite de condutividade elétrica acima da qual já há prejuízos para o desenvolvimento da planta situa-se em  $1,7 \text{ dS m}^{-1}$  (AYERS; WESTCOT, 1999). A salinidade reduz o conteúdo de sacarose nos colmos, retarda o crescimento e perdas na produtividade (GUERZONI et al., 2014). Sengar et al. (2013) relatam perdas de até 40% na produtividade de cana-de-açúcar na Índia devido a salinidade de solos. Cha-Um e Kirdmanee (2009) encontraram efeitos mais prejudiciais na fisiologia e crescimento de cana-de-açúcar quando submetidas ao estresse salino que em condições de deficiência hídrica, pela diminuição de clorofilas e carotenóides, com conseqüentes prejuízos na fotossíntese e desenvolvimento das plantas.

#### **4.6 Indicadores físicos de qualidade do solo do ponto de vista agrícola**

Para a avaliação de um sistema de produção quanto à sustentabilidade, faz-se necessário a utilização de indicadores que representem padrões ou classes de sustentabilidade, e a partir desses índices se tenha subsídios para a tomada de decisão (NORTCLIFF, 2002).

O conhecimento e o estudo das características de todo perfil do solo são de extrema importância para o desenvolvimento das plantas, levando-se em consideração o

crescimento radicular, e de características que as afetam como compactação, densidade, movimento e armazenamento de água no solo e trocas gasosas (PIRES et al., 2012).

A avaliação da sustentabilidade de sistemas agropecuários para verificação da qualidade física do solo deve ser realizada através de indicadores que reflitam o seu comportamento (PEREIRA et al., 2011). Para Reynolds (2002) os indicadores físicos exercem função de sustentação do solo além de encontrarem-se em processo de expansão, pois o maior número de indicadores avaliados em um solo está diretamente ligado à melhoria na qualidade química e biológica do mesmo (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007).

Do ponto de vista agrícola, os principais indicadores para avaliação da qualidade física do solo são: estrutura, textura (saber a constituição do solo em areia, silte e argila), resistência à penetração, profundidade de enraizamento, porosidade, capacidade de retenção d'água e densidade do solo (SANTOS et al., 2011).

Dentre as modificações que ocorrem na estrutura do solo podem-se citar as alterações nos valores da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, redução na porosidade total, restrição ao crescimento radicular, compactabilidade do solo, alteração do movimento da aeração, da infiltração e a condutividade hidráulica, além de promover alterações nos processos químicos e biológicos no solo (STRECK et al., 2004).

Como existem várias propriedades físicas para avaliar a qualidade do solo e o crescimento radicular, observou-se a necessidade da criação de um parâmetro que interagisse com os efeitos da densidade, a porosidade do solo e a resistência mecânica à penetração destacando-se o intervalo hídrico ótimo (IHO), sendo definido como um indicador da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas, que descreve uma faixa de conteúdos de água no solo na qual as limitações ao crescimento das plantas, associadas com a aeração, a resistência à penetração e a disponibilidade de água são mínimas (TORMENA, 1998; SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

#### **4.6.1 Compactação do solo**

O solo é um sistema composto de materiais orgânicos e inorgânicos que estão interligados e em constante transformação, muitas vezes causadas por adversidades

climáticas e antrópicas, e dependendo do tipo de uso e manejo do solo as características físicas, químicas e biológicas do mesmo são afetadas.

Segundo Seixas, Oliveira e Souza (1998) compactação é o ato ou ação de forçar a agregação das partículas do solo, reduzindo, desta forma, o volume por elas ocupado. Ela pode ser descrita em termos da tensão aplicada no solo e das mudanças resultantes em suas condições. As mudanças que ocorrem nas propriedades físicas do solo incluem: aumento da densidade do solo; decréscimo do volume de macroporos; infiltração e movimento interno de água mais lentos; aeração mais pobre e maior resistência mecânica do solo ao crescimento de raízes. A compactação pode ser compreendida como a redução do volume de uma massa de solo, que antes deste processo a massa de solo ocupava um volume maior e após a compactação passou a ocupar um volume menor (CAMARGO; ALLEONI, 2014).

O manejo inadequado do solo, geralmente causado pelo cultivo intensivo do mesmo, altera os fatores de crescimento e conseqüentemente produtividade das culturas causando grande perda econômica. Para tanto, faz-se a opção por veículos de maior capacidade unitária de carga, os quais, muitas vezes, trafegam sobre o solo em condições desfavoráveis em termos de conteúdo de água potencializando a sua alteração de diversas formas, tornando praticamente inevitável a ocorrência da compactação do solo, isso tem sido considerado um dos principais fatores de degradação da sua estrutura (MOSADDEGHI et al., 2007). Como muitos agricultores estão interessados, na maioria das vezes, em produtividade operacional ( $t\ h^{-1}$ ), faz-se a seleção de implementos e tratores de alta capacidade, inadequados para a condição do solo, provocando uma maior degradação no mesmo. O grande número de operações mecanizadas necessárias para a produção de algumas culturas, principalmente no caso da cana-de-açúcar devido ao alto nível de mecanização, faz com que ao longo dos anos, seu rendimento produtivo seja afetado em virtude da degradação física do solo (LIMA; LEÓN; SILVA, 2013). As máquinas agrícolas produzem tensões na interface solo/pneu e solo/implemento; essas interações compactam as diferentes camadas do solo, alterando a resistência interna e conseqüentemente as propriedades físicas do solo (ECCO; CARVALHO; FERRARI, 2012).

A compactação do solo pode induzir alterações na absorção e concentração de nutrientes nas plantas e, em conseqüência, em seu desenvolvimento além de afetar drasticamente o desenvolvimento radicular e os processos de armazenagem e disponibilidade de água, podendo acarretar redução dos efeitos da adubação mineral e

da irrigação, diminuindo o rendimento das culturas, apesar de toda tecnologia empregada; também promove a concentração das partículas sólidas em decorrência da expulsão do ar gerado pela redução de sua porosidade, de forma que este processo é evidenciado pela redução do volume do solo e aumento de sua densidade provocada pela aplicação de uma carga externa, resultando em aumento da resistência do solo à penetração de uma haste como também da redução da permeabilidade do solo (SOUZA; MARQUES; PEREIRA, 2010). Além disso, Severiano et al. (2010) comentam que a degradação física do solo pode ser agravada pela colheita mecanizada durante a estação chuvosa. Dessa forma, monitorar a compactação do solo é de fundamental importância na manutenção da longevidade dos canais (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006).

A susceptibilidade do solo à compactação é função de fatores como teor de água e textura os quais influenciam o comportamento do solo, quando submetido a pressões externas, por meio do atrito entre as partículas e tipo de ligação entre elas. Em geral, quanto maiores as partículas do solo, menor sua compressibilidade e agregação (MACEDO; SILVA; CABEDA, 2010).

Deve-se salientar que os aspectos estruturais do solo são influenciados por diversos fatores, como a natureza do solo, em especial sua granulometria e arranjo de poros, sendo também influenciada pela matéria orgânica e pela atividade biológica do solo, ou seja, pelas raízes e pelos animais da fauna do solo (GONÇALVES; STAPE, 2002)

Pesquisas têm demonstrado que a resistência do solo à penetração apresenta correlação negativa com o crescimento radicular, destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular; e, além disso, a elevada compactação do solo resulta em diminuição da produtividade das culturas em razão do menor desenvolvimento radicular (STRUDLEY; GREEN; ASCOUGH, 2008). Letey (1985) considerou a resistência do solo à penetração uma das propriedades físicas diretamente relacionadas com o crescimento das plantas e modificadas pelos sistemas de preparo do solo, assim valores excessivos de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro e na direção preferencial do crescimento radicular.

A resistência do solo à penetração tem sido frequentemente utilizada como indicador da compactação do solo em sistemas de manejo, por ser um atributo

diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (LANÇAS, 1996).

#### **4.6.2 Densidade do solo**

A relação entre a massa de uma amostra de solo seca (solo seco em estufa a 105-110 °C para eliminação total da água) e o volume total que essa amostra ocupa, volumes ocupados pelas partículas e poros, é definido como densidade do solo ( $D_s$ ). A  $D_s$  é afetada pela cobertura vegetal, pelo grau de compactação, pelo teor de matéria orgânica, pelo uso e manejo do solo; a  $D_s$  geralmente aumenta com a profundidade do perfil (SILVA; CURI; BLANCANEUX, 2000). A  $D_s$  é capaz de detectar modificações de volume do solo e caracterizar os efeitos do manejo do solo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), por isso é um importante atributo que varia de acordo com o volume total de poros, ou seja, representa um índice do grau de compactação do solo. É uma ferramenta importante no estudo dos fluxos hidráulicos, fornecendo informações indiretas sobre estrutura, porosidade, armazenamento e condução de água (REICHARDT; TIMM, 2008).

A  $D_s$  é um método pontual e eficaz que fornece indicações a respeito do estado de compactação do solo e pode indicar se existe a necessidade de utilizar práticas para descompactação do mesmo com a utilização do subsolador ou do escarificador (REICHARDT; TIMM, 2008).

Segundo Jimenez et al. (2008) a formação de camadas compactadas reduz a atividade biológica e a macroporosidade no perfil do solo, aumentando a densidade, o que proporciona maior resistência física à expansão radicular.

Todo agricultor deseja alcançar a máxima produtividade agrícola em suas terras, no entanto a compactação, causada pelo aumento da densidade do solo, pode afetar a germinação de sementes, o desenvolvimento das raízes devido à formação de blocos densos que ocasionam problemas na extração da água, dos nutrientes pelas plantas e disponibilidade de oxigênio (RAPER, 2005).

Pelo fato de ser comum relacionar o crescimento radicular em solos compactados com sua densidade, deve-se avaliar que cada solo possui um comportamento diferente, pois sua estrutura e sua formação são fatores que ocorreram de forma diferente, e para cada solo há densidades benéficas e críticas para o

desenvolvimento de uma cultura. Foi verificado por Argenton et al. (2005) que, em Latossolo Vermelho argiloso, a deficiência de aeração inicia-se com densidade do solo próxima de  $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ , e Klein (2006), para mesma classe de solo, baseado no intervalo hídrico ótimo, observou que a densidade limitante foi de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ ; já Reichert et al. (2003) propuseram densidade do solo crítica para as seguintes classes texturais:  $1,30$  a  $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$  para solos argilosos,  $1,40$  a  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  para os franco-argilosos e de  $1,70$  a  $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$  para os franco-arenosos.

Para Fagundes, Silva e Silva (2014) avaliando as variáveis número de perfilhos, área foliar, massa seca de folhas, comprimento de colmos e massa seca de colmos com cinco densidades do solo ( $1,0$ ;  $1,2$ ;  $1,4$ ;  $1,6$  e  $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ ), observaram que à medida que o nível de densidade aumentou o valor das variáveis diminuíram. Sá e Junior (2005), estudando classes texturais de solos, observaram que, os solos arenosos apresentam valores de densidade naturalmente mais elevados em relação aos solos argilosos, exemplificando uma densidade de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , que em solo argiloso pode significar um elevado grau de compactação, enquanto que em um solo arenoso não há problema.

Na cultura da cana-de-açúcar, Ds muito altas podem comprometer a respiração das raízes e exercer resistência ao seu desenvolvimento (LIMA; LEÓN; SILVA, 2013). O maior prejuízo ao desenvolvimento do sistema radicular ocorre quando a Ds aumenta na camada superficial, pois esta cultura tem maior exploração nutricional na camada arável do solo. A compactação afeta mais o desenvolvimento da cultura se suas raízes se localizam no perfil de menor porosidade do solo (FERNANDES; FURLANI; STOLF, 1980).

#### **4.6.3 Porosidade do solo**

Denomina-se porosidade a relação entre o volume de espaços vazios e o volume total de solo. As partículas sólidas do solo formam um arranjo poroso, onde os espaços vazios, denominados de poros, têm a capacidade de armazenar líquidos e gases. É esse arranjo poroso que determina propriedades importantes tais como a capacidade de reter e conduzir a água pelo solo (SANTOS, 2005), condicionando o comportamento físico-hídrico do solo, influenciando a sua potencialidade agrícola (RIBEIRO et al., 2007). As cargas mecânicas aplicadas ao solo pelas máquinas agrícolas ocasionam alterações no seu arranjo estrutural, modificando a densidade e a distribuição dos poros (CAVALIERI

et al., 2009). Segundo Lima et al. (2013), a redução no volume de macroporos do solo pode ser maior que 50% em condições de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

Um solo é considerado com estrutura ideal, com boas condições para o crescimento das plantas, quando apresenta aproximadamente 50% do volume do solo ocupado por poros (BRADY; WEIL, 2008).

Muitos conceitos têm surgido afim de padronizar a classificação dos poros quanto ao tamanho. Embora não exista um consenso entre poros grandes e pequenos, várias classificações são citadas na literatura e uma das mais simples é a divisão entre micro e macroporos. Segundo Brady (2008) microporos, também denominados poros capilares, representam os poros responsáveis pela retenção da água no solo, enquanto os macroporos representam os poros responsáveis pela drenagem e aeração do solo.

Os macroporos são os responsáveis pela condução de  $O_2$  e água através do perfil, e a perda destes poros leva à diminuição das trocas gasosas (GENRO JUNIOR et al., 2009). Já os microporos são os responsáveis pela retenção de água no solo, e com a redução do tamanho dos poros a água estará mais fortemente retida, dificultando a sua absorção pelas plantas (BATEY, 2009).

Uma das diferenças entre macro e microporos está na manifestação do fenômeno de capilaridade (ascensão da água no solo entre espaços muito finos), onde apenas os microporos possuem esse fenômeno. Em solo compactado, o número de macroporos é menor em relação aos microporos; os microporos são em maior quantidade e a densidade também é maior (JIMENEZ et al., 2008).

Para garantir o bom desenvolvimento das culturas deve-se ter uma relação entre quantidade de poros e variação de diâmetro dos mesmos para proporcionar boa infiltração, drenagem, aeração e manutenção de adequado teor de água, facilitando, assim, a penetração das raízes e as trocas gasosas com a atmosfera (REICHERT et al., 2009). O potencial (tensão) com que a água é retida pela matriz do solo está ligada ao diâmetro dos poros, ou seja, quanto maior o tamanho dos poros, menor será a tensão a ser aplicada para retirar a água e, quanto menor o tamanho dos poros, consideravelmente maior será a tensão necessária (MESQUITA; MORAES, 2004).

A distribuição do diâmetro dos poros no solo tem um papel preponderante em seu comportamento físico-hídrico. Textura, estrutura e teor de matéria orgânica relacionam-se com a porosidade do solo. Solos de textura argilosa possuem maior volume total de poros e seu alto volume de microporos confere boa retenção de água e

menor drenagem. Apesar de um solo arenoso apresentar porosidade total relativamente reduzida, a movimentação da água e do ar é mais rápida devido ao predomínio de macroporos, permitindo maior movimento da água e do ar (BRADY, 2008).

A porosidade é variável conforme o estado de compactação do solo; a faixa de porosidade considerada adequada para solos arenosos está situada entre 0,32 e 0,47 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (REICHARDT; TIMM, 2004).

#### **4.6.4 Resistência mecânica do solo à penetração de raízes**

A resistência mecânica do solo à penetração (RMP) tem sido utilizada, ao longo de muitos anos, com inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônômica, sendo várias já consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas; estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo; prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas; predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento (CUNHA et al., 2002). A compactação por sua vez é causada, na maioria dos casos, principalmente no cultivo da cana-de-açúcar, pelo uso de máquinas agrícolas. Em condições de solo altamente compactado, o sistema radicular se concentra na superfície do solo, limitando o acesso à água e nutrientes (COLLARES et al., 2006).

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RMP) tem sido muito utilizada, dentre os atributos físicos utilizados para determinar a compactação do solo, para avaliar sistemas de manejo, por estar diretamente relacionada ao crescimento de plantas e ser considerada um dos indicadores mais sensíveis pela resistência que a matriz do solo oferece ao crescimento das raízes (SERAFIM et al. 2008). O processo de compactação interfere na densidade, porosidade e resistência à penetração e dificulta o crescimento radicular e a dinâmica de água e dos nutrientes; a compactação limita o crescimento de raízes e diminui o volume de solo explorado pelo sistema radicular e, conseqüentemente, reduz a altura e produtividade das plantas (LEONEL et al., 2007).

Existe relação estreita entre RMP, densidade do solo, conteúdo de água, teor de argila e teor de matéria orgânica (FILHO; RIBON, 2008). Segundo Moraes et al. (2013), o teor de água no solo é o fator que mais influencia a medida da RMP. Em condição de baixa umidade, a água nos poros do solo se encontra sob maior tensão e se

expressam as forças de coesão e de adesão já existentes entre os sólidos do solo, resultando em maior resistência à deformação ou à penetração de raízes (CUNHA; VIEIRA; MAGALHÃES, 2002). Com o aumento do teor de água, diminui a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, provocando a diminuição da RMP (ASSIS et al., 2009).

A RMP é um parâmetro de extrema importância para avaliação da qualidade física do solo, pois através dela pode-se conhecer e estudar o estado da estrutura do solo, a identificação de limitantes ao crescimento das raízes, e de possibilitar o estabelecimento de valores críticos de umidade e de densidade do solo (IVANILDA, 2008).

A RMP é considerada um indicativo do estado de compactação, e em termos práticos demonstra a força necessária que as raízes de uma planta precisam fazer para penetrar no solo. É uma propriedade física do solo que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação do efeito do sistema de manejo do solo sobre o ambiente radicular (FILHO; RIBON, 2008). Ela é determinada por meio de penetrômetro, chamado de “índice de cone” (IC), que caracteriza as propriedades físicas e mecânicas do solo relacionadas à trafegabilidade, compactação e manejo; mede a resistência exercida pelo solo à penetração de uma haste com ponta cônica, que apesar de sua limitação ainda é o meio importante para avaliar a resistência à penetração no solo, sendo o penetrômetro eletrônico o mais indicado para diagnosticar a compactação do solo em grandes propriedades (ALMEIDA et al., 2012).

A determinação do IC identifica as camadas com maior resistência à penetração, o grau da compactação e a profundidade da camada compactada no perfil do solo e, tendo posse desses dados pode-se optar por uma forma de descompactação mais adequada (ASAE, 2006). O índice reflete o comportamento do solo quanto à compactação, ao conteúdo de água, à granulometria e tipo de argila (SAFFIH-HDADI et al., 2009).

A ASAE (2006) definiu índice de cone (IC) como sendo a força por unidade de área da base (kPa), necessária para cravar a agulha do penetrômetro no solo, durante um pequeno deslocamento da ponta cônica e garantindo que o início da leitura seja feito no instante em que a base do cone seja introduzida numa velocidade de penetração constante de 30 mm/s, respeitando as dimensões da haste padronizada. Os penetrômetros ou penetrógrafos manuais não são muito recomendados, pois é

praticamente impossível ao operador imprimir uma velocidade constante de penetração de acordo com as variações do solo (LANÇAS, 1996).

Por estar diretamente relacionada ao crescimento das plantas, a RP tem sido um dos atributos físicos priorizados em trabalhos que estudam a compactação do solo (RALISCH et al., 2008). Valores da RMP podem ser utilizados para caracterizar os solos em termos de habilidade de crescimento das culturas, de resistência à penetração das raízes e de emergência das sementes (OLIVEIRA et al., 2012). Não existe um consenso nos estudos sobre o limite crítico da RMP e a sua quantificação. Para a condição de umidade no estado de capacidade de campo, Portz et al. (2009) sugeriram o valor de 2 MPa como o limite crítico para o crescimento radicular. Souza et al. (2006), consideram críticos ao crescimento radicular das plantas valores de resistência do solo à penetração entre 1,5 a 3,0 MP. Valores críticos de RMP variam de 1,5 a 4,0 MPa, conforme o tipo de solo e a espécie vegetal sendo, em geral, o valor de 2,0 MPa aceito como impeditivo ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998)

Para a cultura da cana-de-açúcar, valores de resistência do solo à penetração de até 2,5 MPa são considerados baixos e apresentam pouca limitação ao desenvolvimento das raízes; entretanto, valores a partir de 5,5 MPa são considerados altos e representam sérias limitações ao desenvolvimento do sistema radicular (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

#### **4.7 Intervalo Hídrico Ótimo**

O desenvolvimento adequado das plantas, dentre outras variáveis, é função da disponibilidade de água, contato solo-raízes, espaço poroso suficiente ao movimento de água, nutrientes e gases e resistência à penetração de raízes que não comprometa o crescimento radicular, pois esses fatores prejudicam diretamente o crescimento radicular e a produtividade das culturas (LETEY, 1985). O conceito de uma única variável que descreve as interações entre os atributos físicos e o crescimento das plantas foi proposto por Letey (1985) - “Non Limiting Water Range” (NLWR) ou Intervalo Hídrico Não Limitante, sendo definido como a faixa de conteúdos de água no solo, em que as limitações para o crescimento das plantas em função do potencial mátrico, aeração e resistência do solo, são nulas.

Desejando-se ter mais praticidade e resposta rápida, surgiu a necessidade de conhecer as interações entre essas variáveis que atuam sobre o crescimento radicular para quantificar o ambiente físico na zona radicular do solo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998), e a partir dessas variáveis Silva, Kay e Perfect (1994) desenvolveram um modelo para integrar esses atributos físicos em um único parâmetro, aprimorando o conceito do NLWR, transformando-o no atual “Least Limiting Water Range” (LLWR); que foi introduzido no Brasil por Tormena (1998), denominado intervalo hídrico ótimo (IHO). Este indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração e resistência do solo à penetração das raízes num único atributo, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas.

O limite superior do IHO é definido como o menor valor do teor de água entre a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), enquanto o limite inferior é o maior valor do teor de água entre o ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e a umidade de resistência à penetração das raízes ( $\theta_{RP}$ ). Esses limites do IHO são de 0,01 MPa para a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e 1,5 MPa para a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) de 10% e umidade de resistência à penetração das raízes ( $\theta_{RP}$ ) a 2,0 MPa (SILVA et al., 1994 e TORMENA et al., 1999).

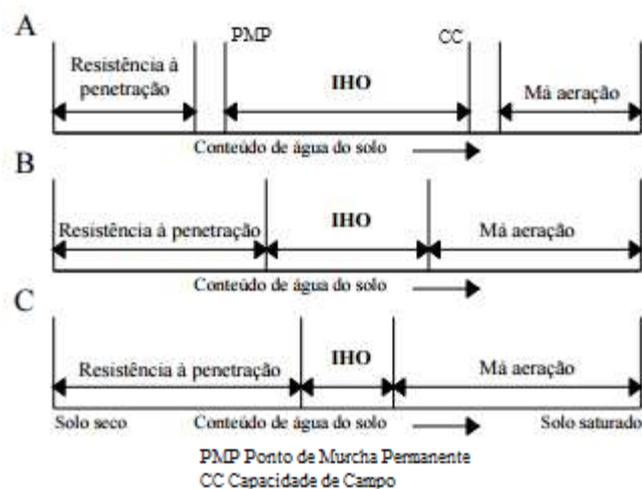
Nesse contexto, o uso do IHO para avaliação da qualidade física e estrutural do solo vem se destacando, pois esse indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração e resistência do solo à penetração das raízes num único atributo, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Tais particularidades tornam o IHO um indicador útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade das culturas, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Em solos com qualidade física adequada, o IHO corresponde à água disponível (AD) (SILVA; TORMENA; IMHOFF, 2002); já em solos degradados encontra-se redução da quantidade de AD, da taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo (ARAUJO; TORMENA; SILVA, 2004). Na figura 1A pode-se perceber o limite superior, capacidade de campo, e o limite inferior, ponto de murcha permanente. A diminuição do IHO, de A para C, como

representado na Figura 1, indica um processo de degradação da qualidade estrutural do solo, no que diz respeito ao crescimento das plantas (LEÃO et al., 2005). A contração do IHO pode ser induzida, por exemplo, pela compactação do solo, sendo o IHO o indicador mais sensível às alterações estruturais do que o parâmetro AD (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

Ocorre um estreitamento da faixa do IHO à medida que o estado de compactação aumenta havendo degradação da estrutura (SILVA, 2003). A aeração do solo pode reduzir a difusão de oxigênio e, conseqüentemente o crescimento radicular, quando o teor de água está abaixo da CC, assim como a resistência do solo à penetração pode restringir o crescimento quando o teor de água for superior ao PMP. A partir do IHO se obtém um valor de  $D_s$  e quando o IHO atinge o valor zero, tem-se a densidade crítica ( $D_{sc}$ ) (COSTA, 2014).

Nesse cenário, o IHO significa grande avanço nos estudos de biofísica do solo, sendo o indicador de qualidade física e estrutural do solo que melhor se correlaciona com o crescimento das plantas (TORMENA et al., 2007). Quando a aeração substitui a capacidade de campo como seu limite superior e a resistência do solo à penetração substitui o ponto de murcha permanente como seu limite inferior, ocorre um decréscimo no IHO (Figura 1B) e esses decréscimos continuam à medida que a resistência à penetração aumenta (Figura 1C).



**Figura 1.** Relação entre o conteúdo de água e os fatores físicos do solo que limitam o desenvolvimento das plantas. A deterioração estrutural e a redução na qualidade física do solo ocorrem de A para C. Fonte: Adaptado de Silva et al. (2001).

Quando o solo atinge a densidade crítica para qualquer conteúdo de água no solo, ocorrerá limitação física para o desenvolvimento das plantas. Tormena et al. (1998) encontraram valores de Dsc igual a  $1,28 \text{ gcm}^{-3}$  para um Latossolo Argiloso, enquanto que valores para solos de textura média variaram de  $1,55$  a  $1,62 \text{ gcm}^{-3}$  (BEUTLER et al., 2004) e, para solos arenosos, os valores assumiram a ordem de  $1,70 \text{ gcm}^{-3}$  (SILVA; TORMENA; IMHOFF, 2002), o que demonstra forte relação desse atributo à textura do solo.

O valor de densidade crítica varia de acordo com cada tipo de solo. Além disso os indicadores devem ser suficientemente sensíveis a mudanças no manejo para que possa comparar uma prática com a outra. Zou et al. (2000) estudaram a interação entre conteúdo de água, potencial mátrico, resistência do solo e porosidade de aeração em quatro tipos de solos florestais com texturas diferentes e submetidos a três níveis de compactação, utilizando o IHO. Esse foi negativamente correlacionado com a densidade do solo em solos de textura média, similar aos resultados encontrado por Silva et al. (1994). O valor de 3 MPa foi utilizado como limite a partir do qual o crescimento radicular é restrito. A conclusão deste estudo foi que o IHO é um potencial indicador da qualidade do solo para manejo sustentável.

Silva et al. (2002), determinaram o IHO em solos do Rio Grande do Sul sob sistema de plantio direto. Foram utilizados três solos (Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Arênico, Latossolo Vermelho Distrófico e um Latossolo Vermelho Distroférico). No Argissolo a Dsc encontrada foi de  $1,80 \text{ g.cm}^{-3}$ , este valor representa o limite crítico, a partir do qual o solo não apresenta condições para desenvolvimento favorável das plantas. No Latossolo Vermelho Distrófico a Dsc obtida foi de  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$  a RP enquanto que no Latossolo Vermelho Distroférico, obteve-se valor de Dsc de  $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ . No geral, os resultados obtidos para os três tipos de solo, mostraram que o IHO foi negativamente correlacionado com a Ds, ou seja, o IHO diminuiu com o aumento da Ds.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

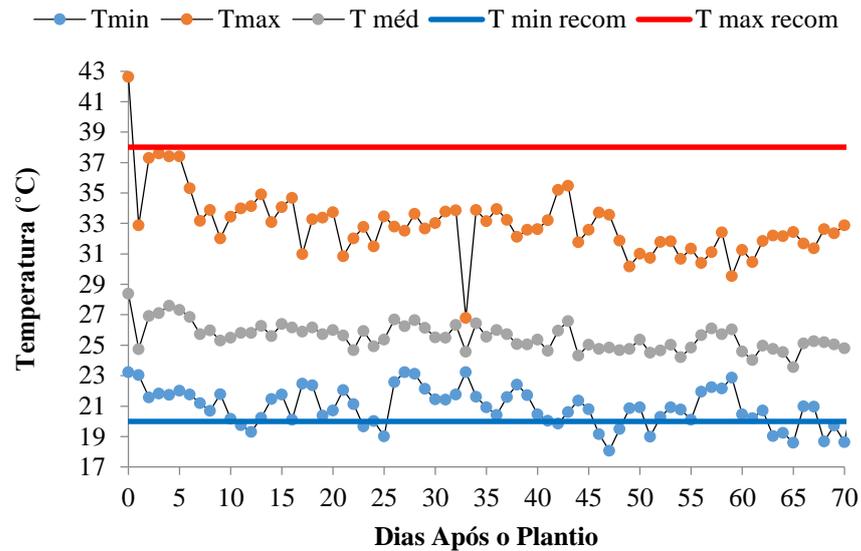
### **5.1 Localização e caracterização da área de estudo**

O experimento foi realizado na Estação Experimental de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura em ambiente protegido localizado no Departamento de

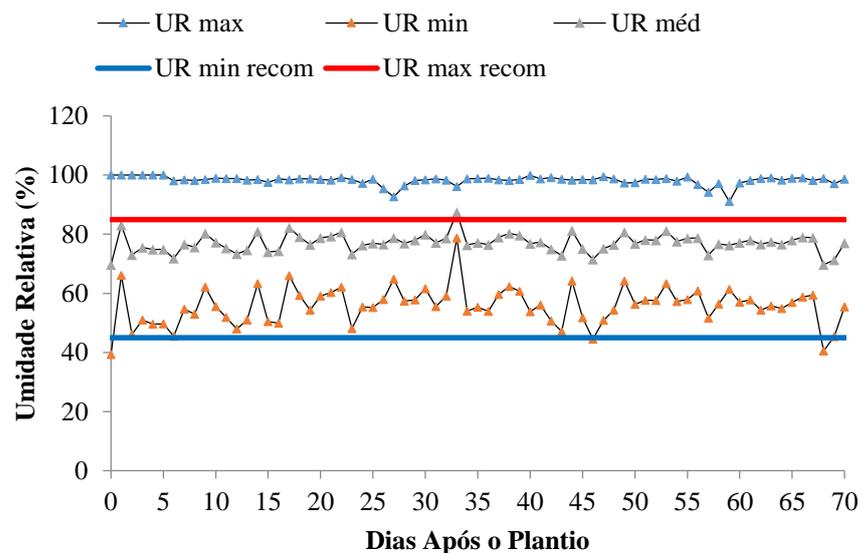
Engenharia Agrícola da UFRPE, Campus Recife, localizada a 8° 01' 05" de latitude Sul e 34° 56' 48" de longitude Oeste, e altitude de 6,5 m de acordo com o sistema SAD 69 (South American Datum). O clima da região segundo Köppen é classificado como tropical chuvoso (tipo As' a Ams') com temperatura média anual de 27 °C e precipitação anual acima de 1700 mm (SILVA et al., 2012b). A evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 mm ano<sup>-1</sup> e 1.600 mm ano<sup>-1</sup> (BARROS, 2011).

O ambiente protegido é em estrutura plástica comercial, com cobertura em arco, nas dimensões 7,0 m de largura e 24,0 m de comprimento e 3,0 m de pé direito, com cobertura do tipo arco e filme de polietileno de baixa densidade com 150 µm de espessura, tratado contra a ação dos raios ultravioletas e com difusor de luz. As paredes laterais e frontais foram confeccionadas com telas de nylon, cor preta, com 50% de sombreamento. O piso foi revestido com manta geotêxtil (bidim), com o objetivo de melhorar as condições fitossanitárias. No interior do ambiente protegido foi instalado um piranômetro, para medição da radiação solar global, e um termo-higrômetro para medir temperatura e umidade.

As temperaturas do ar (máxima, média e mínima) durante os cultivos da cana-de-açúcar ficaram dentro da amplitude adequada ao bom desenvolvimento da cultura (Figura 2). A temperatura média esteve sempre acima de 23,0°C, a máxima entre 27,0 e 35,0°C e a mínima na faixa de 18,0 a 23,1°C, em que alguns valores mínimos inferiores a 20°C ocorreram sempre no final da noite. Observa-se que a umidade relativa do ar permaneceu com sua média acima de 70% (Figura 3), como recomendado por Souza et al. (2004), para o desenvolvimento ideal da cana-de-açúcar.



**Figura 2.** Temperatura do ar máxima, média e mínima no período do experimento.



**Figura 3.** Umidade relativa do ar registrada ao longo do experimento.

## 5.2 Caracterização das unidades experimentais

Foram confeccionadas quatro bancadas experimentais apoiadas em tijolos com altura em relação ao chão de 0,10 m. Em cada bancada foram utilizados vinte vasos de 15 l correspondente a uma linha de plantio, espaçados por 1 m entre linhas, conforme recomendação da Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC, 2016).

A unidade experimental foi constituída por dois vasos, os quais foram graduados a cada 0,05m e preenchidos com camadas de solo, que eram levemente compactadas com a ajuda de um compactador de metal, até atingirem a densidade desejada de cada tratamento (Figura 4).



**Figura 4.** Montagem e compactação dos tratamentos.

### **5.3 Características do material de solo**

O solo utilizado foi proveniente do Município de Goiana/PE, localizado a 7°33'38" de latitude Sul e 35°00'09" de longitude Oeste, e altitude de 13 m. Utilizou-se uma camada superficial de um Espodossolo classificado segundo Sistema Brasileiro de classificação de solos (Santos et al., 2013). Tal solo apresenta uma nítida diferenciação de horizontes, e possuem textura arenosa na camada superficial e são desenvolvidos principalmente de materiais arenoquartzosos. Coletou-se com retroescavadeira a camada correspondente à profundidade de 0 - 0,40 m, com o intuito de se utilizar apenas um horizonte do espodossolo. As características físico-químicas estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características físico-químicas do solo na camada de 0-40 cm.

Característica química	Valor	Característica Física	Valor
pH (H <sub>2</sub> O)	5,0	Areia (%)	94
MO (g Kg <sup>-1</sup> )	20,39	Silte (%)	0
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,0	Argila (%)	6
K <sup>+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,02	Classe textural	Areia
Ca <sup>2+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,30	ADA (%)	0
Mg <sup>2+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,40	GF	100
Na <sup>+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,11	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	1,80
SB (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,83	Dp (g cm <sup>-3</sup> )	2,63
Al <sup>3+</sup> (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,75	AD (%)	1,68
CTCefetiva (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,58	U 0,33 atm (%)	3,02
		U 15 atm (%)	1,34

MO - Matéria orgânica; SB - Soma de bases (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>); CTCefetiva (SB + Al<sup>3+</sup>); ADA - Argila dispersa em água; GF-Grau de floculação; Ds - Densidade do solo; Dp - Densidade de partícula; AD - Água disponível.

#### 5.4 Condução da cultura

No dia 06 de junho de 2016 foi feito o plantio da cana-de-açúcar colocando-se dois rebolos por vaso, em seguida, após a germinação realizou-se o desbaste de uma mantendo-se as plantas mais uniformes. Os rebolos foram posicionados de forma que todas as gemas ficassem ligeiramente voltadas para cima e posteriormente foram cobertos por uma camada de dois cm de solo (Figura 5 B, C e D). Os rebolos utilizados foram provenientes da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC-UFRPE), no qual, utilizou-se a variedade RB 867515. A adubação de cobertura foi feita, conforme necessidades da cultura, com nitrogênio e potássio, seguindo a recomendação descrita no Manual de Adubação para o Estado de Pernambuco (IPA, 2008).

#### 5.5 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 2, com oito repetições, totalizando 80 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram da utilização de cinco densidades do solo (1400, 1500, 1600, 1700 e 1800 kg m<sup>-3</sup>) e solo com dois níveis de salinidade (CEes = 0,5 e 3 dS m<sup>-1</sup>) para saturação.

### 5.6 Elevação da umidade do solo à capacidade de campo e manejo da irrigação

Para cada vaso foi calculado a massa de solo seco ( $M_{ss}$ ) (equação 1) para que o mesmo atingisse cada densidade em testada (equação 2).

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad \therefore \quad M_{ss} = V_t \times D_s \quad (1)$$

Onde:

$M_{ss}$  - Massa do solo seco (g);

$V_t$  - Volume total do vaso, que neste caso foi feito a cada 0,05cm, (cm<sup>3</sup>) e

$D_s$  - Densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>)

Em posse do valor da umidade volumétrica na capacidade de campo ( $\Theta_{cc} = 0,30$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) calculou-se a umidade gravimétrica para cada nível de densidade do solo (equações 3 e 4).

Posteriormente, para cada  $M_{ss}$  foi calculada uma massa de água ( $M_a$ ) necessária para ser adicionada ao solo e leva-lo à capacidade de campo (CC) (Figura 5 A), utilizou-se para isso as equações 2 e 3.

$$U_{cc} = \frac{\theta}{D_s} \quad 2$$

$$M_a = U_{cc} \times M_{ss} \quad 3$$

Onde:

$U_{cc}$  - Umidade gravimétrica na capacidade de campo

$M_a$  - Massa de água (g)

$M_s$  - Massa de solo seco (g)

$\theta$  - Umidade volumétrica

$D_s$  - Densidade do solo ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

No decorrer do experimento procurou-se deixar o solo dos vasos sempre na umidade equivalente à CC. O manejo da irrigação foi feito através da drenagem e o turno de rega adotado nos primeiros trinta dias foi de 2 dias, passando a diário a partir do 31º dia. A água utilizada para a irrigação foi a de abastecimento da UFRPE. Em cada irrigação foi aplicado um volume de água suficiente para elevar a umidade do solo à máxima capacidade de retenção de água no solo, sendo o volume de água calculado pela diferença entre aplicado e o volume drenado.



**Figura 5.** Elevação da umidade do solo à capacidade de campo (Figura 1A), plantio dos rebolos de cana-de açúcar (Figura 1B, 1C e 1D).

## 5.7 Salinização do solo

Nos tratamentos com sal a adição dos sais foi feita junto com a elevação da umidade do solo dos vasos à CC, diluídos na água, obtendo-se um solo com condutividade elétrica do extrato de saturação de 3,0 dS m<sup>-1</sup>, para isso foram estimadas a quantidade de sais a serem adicionadas conforme Richards (1954), equação 4. A salinização do solo foi obtida por meio de adição de NaCl e CaCl<sub>2</sub> na proporção de 1:1 molar Na/Ca na água de abastecimento local da UFRPE, segundo Pizarro (1978).

$$QS = CEes \times 640 \times Vs \dots\dots\dots(4)$$

Em que

*QS* = quantidade de sais aplicados, mg por vaso;

*Vs* = volume de água presente no solo quando este estiver saturado, L por vaso;

*CEes* = condutividade elétrica requerida no extrato de saturação, dS m<sup>-1</sup>.

## 5.8 Crescimento e rendimento analisado na cultura

Ao longo dos 72 dias iniciais foram analisados o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, por meio das medições do diâmetro de colmo (DC) e altura de planta (AP) aos 30, 37, 44, 51, 58, 65 e 72 dias após o plantio (DAP). Para a determinação do DC realizou-se medições na altura correspondente a 1/3 do tamanho total, a partir da base, com auxílio de paquímetro. Para medida da AP, utilizou-se uma trena e mediu-se a distância da superfície do solo até a última região auricular visível da folha +1 (primeira folha de cima para baixo, que se apresenta inserida com a aurícula bem visível), segundo a numeração sugerida por Kuijper (DILLEWIJN, 1952).

Para análise estatística, das variáveis DC e AP, aplicou-se o Teste de Esfericidade de Mauchly (MAUCHLY, 1940) para definição do tipo de análise a ser

utilizada: univariada com parcelas subdivididas (caracterizada pela independência das medidas ao longo do tempo), ou multivariada com medidas repetidas com o tempo (considera a dependência entre as medidas intra-indivíduos, quando a hipótese de esfericidade é violada). Em caso de análise multivariada com medidas repetidas com o tempo foram utilizados os testes de Wilk's Lambda, Pillai's Trace, Hotelling-Lawley Trace e Roy's Greatest Root, considerando se o efeito foi ou não significativo com os resultados da maioria dos testes. Os dados foram analisados no sistema computacional Statistica 10 (STATSOFT, 2011) e interpretados por meio das significâncias das análises de variância e regressão múltipla, considerando-se o nível de probabilidade de até 5% pelo teste F. Para estabelecer um modelo que representasse o fenômeno em estudo utilizou-se o teste "t" de Student para testar os coeficientes de regressão e os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ). A apresentação das equações de regressão e suas interpretações seguiram recomendação de Alvarez e Alvarez (2003).

Aos 72 DAP coletaram-se as plantas para avaliação das massas fresca e seca da parte aérea (MFPA) (MSPA) respectivamente, e massa seca da raiz (MSR). A MFPA foi obtida por pesagem em balança digital. Após a pesagem o material foi submetido à secagem em estufa com circulação de ar forçado a temperatura de 65 °C até obtenção de peso constante obtendo-se a MSPA e MSR. Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando o programa estatístico SISVAR. As variáveis foram avaliadas pelo teste F, sendo as variáveis com efeitos significativos por esse teste submetidas à análise de regressão, visando ajustar modelos de comportamento. Os modelos foram selecionados com base na significância do modelo de regressão analisado pelo teste F a 5% de probabilidade.

## **5.9 Amostragem do solo**

Para a determinação da porosidade, resistência do solo à penetração e da curva característica de retenção de água no solo foram retiradas 240 amostras indeformadas em anéis volumétricos do tipo Köpeck com 0,50 m de altura por 0,5 m de diâmetro interno, nas camadas de 0-0,10 m de profundidade com o auxílio de uma prensa mecânica. A coleta com anéis volumétricos foi realizada com amostrador tipo Uhland. Logo após a coleta as amostras foram levadas ao laboratório e preparadas, retirando-se o

excedente de solo dos extremos dos anéis de maneira que o solo amostrado ocupasse somente o volume do anel. Em seguida, o fundo do anel recebeu um disco de tecido fixado com elástico, permeável ao fluxo de água e de ar, e que impedisse a perda de solo.

### 5.10 Porosidade do solo

Para determinação da porosidade total foi realizada a retirada de amostras indeformadas e procedeu-se de acordo com a metodologia descrita pela Embrapa (2011) dada pela equação (5).

$$P = \left( \frac{Dp - Ds}{Dp} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$P$  = Porosidade do solo (%);

$Ds$  = Densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );

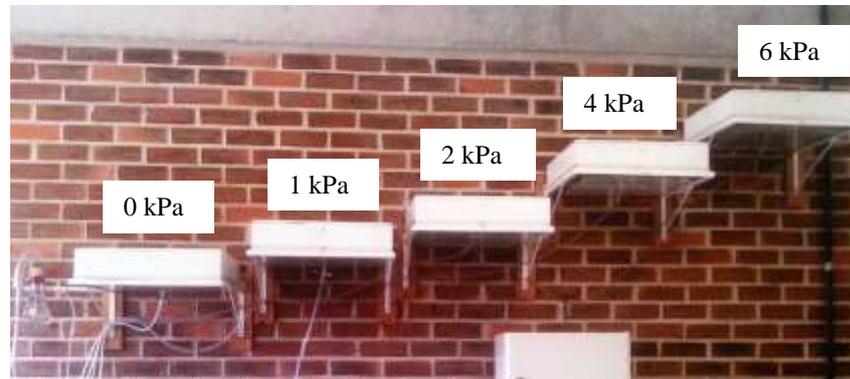
$Dp$  = Densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

### 5.11 Curva de retenção de água no solo

As curvas característica de retenção de água no solo foram determinadas no Laboratório de Dinâmica de Água no Solo (DEEAGRI/UFRPE), em Recife- PE. As amostras indeformadas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura do anel e em seguida foram pesadas, para determinação da umidade da amostra saturada.

Para obtenção da curva de retenção de água no solo, foram coletadas em cada tratamento seis amostras por vaso as quais foram submetidas às tensões de 1, 6, 10, 33,3, 80, 300, 500 e 1500 kPa (Figuras 6 e 7) com três repetições. Após ter alcançado o

equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas para a obtenção da umidade do solo, obtendo-se a média aritmética das três repetições.



**Figura 6.** Mesa de tensão. Laboratório de Dinâmica de água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFRPE.



**Figura 7.** Câmaras de Richards. Laboratório de Dinâmica de água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFRPE.

A curva de retenção foi ajustada por meio da equação proposta por Van Genuchten (1980), conforme equação (6).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (6)$$

Onde:

$\theta$  = umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$  = umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$  = umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\alpha$  = parâmetro inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros ( $\text{cm}^{-1}$ );

$\psi$  = tensão que a água está retirada no solo (cca) e

$n$  e  $m$  são parâmetros empíricos da equação. Para calcular o valor de  $m$ , utilizou-se a expressão  $m = 1 - 1/n$ , conforme sugere Van Genuchten (1980).

### 5.12 Resistência do solo à penetração de raízes e intervalo hídrico ótimo

A resistência do solo à penetração (RP), foi determinada no Laboratório de Física do solo da UFRPE, em cada amostra indeformada uma única vez, com a utilização do penetrômetro eletrônico de bancada MARCONI (modelo MA - 933), composto por um atuador linear elétrico com motor de passo, um painel para controle da velocidade ( $0,4 \text{ mm min}^{-1}$ ), uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste, e uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg, contendo na sua extremidade inferior uma haste com agulha de 4 mm de diâmetro de cone formando um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal, que foi introduzida no solo na direção perpendicular (Figura 8).



**Figura 8.** Penetrômetro de bancada. Laboratório de física do solo UFRPE

A resistência do solo à penetração foi registrada por um sistema automático de aquisição de dados. Foram selecionados os valores de RP correspondentes à profundidade de 1,0 a 3,0 cm. Os valores adquiridos em kgf foram então transformados em MPa, e foi calculada a média aritmética dos valores para cada ensaio correspondendo ao valor da RP para cada amostra. Após a obtenção da RP, as amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, para determinação do conteúdo de água em base gravimétrica ( $\theta_g$ ) e da densidade do solo ( $D_s$ ). Com os dados obtidos foi calculada, para cada amostra, a umidade volumétrica ( $\theta$ ), multiplicando-se a  $D_s$  por  $\theta_g$ .

A resistência do solo à penetração varia com a  $D_s$  e com o conteúdo de água no solo. Para a determinação do IHO, a curva de resistência do solo à penetração foi ajustada segundo o modelo proposto por Busscher (1990), descrito pela equação (7):

$$RP = a\theta^b D_s^c \quad (7)$$

Em que:

$RP$  = resistência do solo à penetração (MPa);

$\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ );

$D_s$  = densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ );

$a, b$  e  $c$  : parâmetros de ajuste do modelo.

Com o ajuste da curva de resistência do solo à penetração pode-se determinar o conteúdo de água no solo em que a resistência do solo à penetração atinge o valor crítico para o desenvolvimento das plantas, 2 MPa ( $\theta_{RP}$ ). Assim, pode-se determinar a umidade do solo em função da densidade do mesmo, pela equação (8):

$$\theta_{RP} = (RP_{crítica} / (aD_s^c))^{1/b} \quad (8)$$

Em que:

$\theta_{RP}$ : conteúdo de água no solo em que a RP atinge o valor crítico;

$RP_{crítica}$ : resistência à penetração crítica;

$D_s$ : densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );

$a$ ,  $b$  e  $c$ : parâmetros de ajuste do modelo.

Posteriormente, foi ajustada por meio do modelo não-linear empregado por Ross et al. (1991), a curva de retenção de água, que relaciona a variação de umidades em função dos potenciais mátricos aplicados, descrito na equação (9):

$$\theta = \exp(d + eD_s)\phi^f \quad (9)$$

Onde:

$\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3\ m^{-3}$ );

$D_s$  = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );

$\phi$  = potencial mátrico aplicado (kPa);

$d$  e  $f$  parâmetros de ajuste do modelo.

Considerou-se a capacidade de campo (CC) como o conteúdo volumétrico de água retido no solo, depois de submetido à pressão de 10 KPa e o ponto de murcha permanente (PMP) à uma pressão de 1500 KPa. Foram calculados os valores críticos do conteúdo de água na CC e no PMP pelas equações 10 e 11 respectivamente:

$$\theta_{CC} = (\exp(d + eD_s)\phi_{CC})^f \quad (10)$$

$$\theta_{PMP} = (\exp(d + eD_s)\phi PMP)^f \quad (11)$$

Em que:

$\theta_{CC}$  = umidade volumétrica na capacidade de campo (%);

$\theta_{PMP}$  = umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (%);

$D_s$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );

$\phi_{CC}$  = potencial mátrico aplicado na capacidade de campo (kPa);

$\phi_{PMP}$  = potencial mátrico aplicado no ponto de murcha permanente (kPa);

$d$ ,  $e$ ,  $f$  : parâmetros de ajuste do modelo.

A porosidade de aeração (PA) foi calculada conforme equação (12).

$$\theta_{PA} = (1 - D_s / D_p) - 0,1 \quad (12)$$

Em que:

$\theta_{PA}$  = umidade volumétrica em que a porosidade de aeração é de 10% ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$D_p$  = densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ );

$D_s$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

O IHO é o intervalo entre o limite superior e inferior de umidade. O limite superior é o menor valor de umidade encontrado na CC ou na PA de 10 % e o limite inferior é o maior valor de umidade encontrado no PMP ou quando a resistência do solo

à penetração atinge os valores limites ao desenvolvimento das plantas, que são entre 2 e 3 MPa. De acordo com esses intervalos, existem quatro possibilidades para o cálculo do IHO:

- 1) Se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (13)$$

- 2) Se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP} \quad (14)$$

- 3) Se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP} \quad (15)$$

- 4) Se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP} \quad (16)$$

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Altura da planta e diâmetro de colmo

O teste de esfericidade de Mauchly indicou o uso de análise de variância multivariada com medidas repetidas, para as duas variáveis estudadas, com nível de significância ( $p < 0,05$ ) (Tabela 2). A hipótese de perfis coincidentes verificada através do teste para fator entre indivíduos, ou seja, entre tempos, foi rejeitada para DC e AP ( $p < 0,0001$ ). Indicando que os tempos possuem efeito diferenciado sobre as variáveis analisadas.

**Tabela 2.** Teste de Esfericidade de Mauchly para as variáveis DC e AP da cana-de-açúcar, ao longo do tempo.

Variáveis	Crerios de Mauchly	Qui-Quadrado $X^2$	Valor p
DC	0.12099	58.666	< 0.0001
AP	0.0007474	199.969	< 0.0001

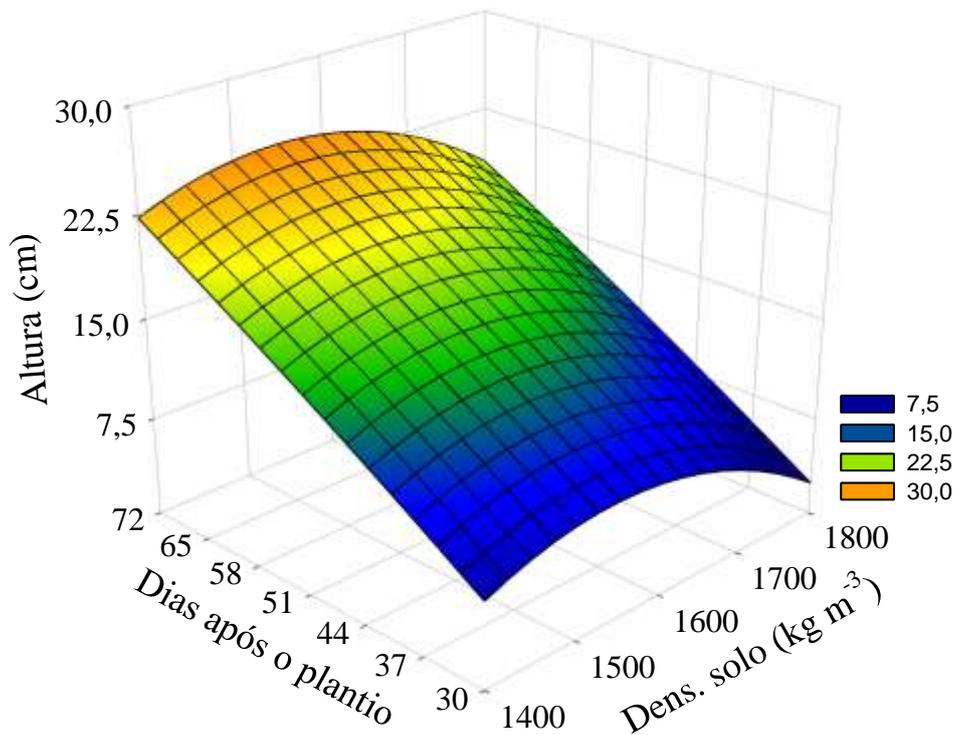
A análise multivariada aplicada às variáveis DC e AP, apresentou diferença significativa ( $p < 0,01$ ) de acordo com os testes de Wilks, Pillai, Hotelling-Lawley, e Roy, para os vetores de médias dos tratamentos, havendo efeito isolado do Tempo para DC e AP, e interação dos fatores Sal x Tempo para a variável DC, e interação Densidade do Solo x Tempo para a variável AP (Tabela 3).

**Tabela 3.** Análise multivariada de perfil.

Efeito	Estatística	GL <sup>1</sup>	GL <sup>2</sup>	DC	AP
				Teste F	
Tempo	Wilks' Lambda	6	25	237.71**	134.58**
	Pillai's Trace	6	25	237.71**	134.58**
	Hotelling-Lawley Trace	6	25	237.71**	134.58**
	Roy's Greatest Root	6	25	237.71**	134.58**
Sal x Tempo	Wilks' Lambda	6	25	7.27**	2.44 <sup>n.s.</sup>
	Pillai's Trace	6	25	7.27**	2.44 <sup>n.s.</sup>
	Hotelling-Lawley Trace	6	25	7.27**	2.44 <sup>n.s.</sup>
	Roy's Greatest Root	6	25	7.27**	2.44 <sup>n.s.</sup>
Dens. x Tempo	Wilks' Lambda	24	88.425	1.17 <sup>n.s.</sup>	1.84*
	Pillai's Trace	24	112	1.10 <sup>n.s.</sup>	1.71*
	Hotelling-Lawley Trace	24	50.968	1.25 <sup>n.s.</sup>	1.96*
	Roy's Greatest Root	6	28	4.28**	5.88**
Solo x Dens. x Tempo	Wilks' Lambda	24	88.425	0.78 <sup>n.s.</sup>	1.49 <sup>n.s.</sup>
	Pillai's Trace	24	112	0.78 <sup>n.s.</sup>	1.45 <sup>n.s.</sup>
	Hotelling-Lawley Trace	24	50.968	0.79 <sup>n.s.</sup>	1.52 <sup>n.s.</sup>
	Roy's Greatest Root	6	28	2.49 <sup>n.s.</sup>	4.08*

\* e \*\* significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente. ns - não significativo.

Cabe ressaltar que, para um efeito ser ou não significativo, nas variáveis analisadas, deve-se verificar o resultado da maioria dos testes, que nesse caso foram usados testes de Wilks' Lambda, Pillai's Trace, Hotelling-Lawley Trace e Roy's Greatest Root. Os gráficos da análise de regressão podem ser verificados nas Figuras 9 e 10.



$$AP = 0,026167 + 0,032**Ds + 0,0008**DAP - 0,0001**Ds^2 - 0,00003*Ds*DAP$$

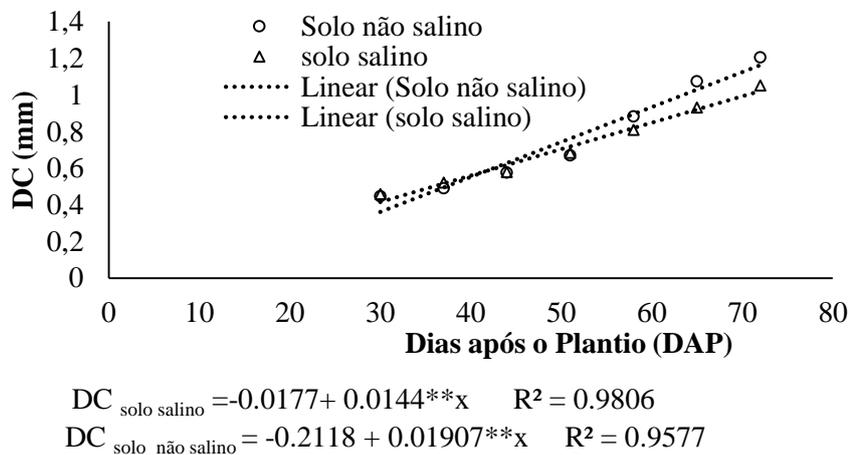
**Figura 9.** Superfície de resposta para altura das plantas de cana-de-açúcar em função da densidade do solo e dias após o plantio (DAP).

Observa-se na Figura 9 que a AP possui um efeito quadrático em relação à densidade do solo ( $D_s$ ) e um efeito com aumento linear ao longo do tempo do experimento. A  $D_s$  que proporcionou as maiores médias de altura da planta durante todo tempo do experimento foi de  $1600 \text{ kg m}^{-3}$ , onde tem-se a altura máxima da planta que nesse caso é de aproximadamente 22,2 cm. De acordo com Imhoff et al. (2000) a densidade máxima que a cultura suporta é de  $1,70 \text{ kg dm}^{-3}$  o que corresponde a  $1700 \text{ kg m}^{-3}$  já que, para a cultura da cana-de-açúcar um aumento na densidade do solo, principalmente na camada superficial, prejudicaria o desenvolvimento do sistema radicular uma vez que a cultura tem o nível de exploração nutricional arranjado na camada arável do solo.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que densidades elevadas podem comprometer a respiração e o desenvolvimento das raízes devido à força que a raiz faz para adquirir água disponível e nutrientes para seu pleno desenvolvimento, causando um estresse na planta que reflete no seu crescimento. Resultados semelhantes foram obtidos por Sousa et al. (2014), cujas densidades aplicadas ( $1650, 1690, 1780$  e  $1820 \text{ kg m}^{-3}$ ) em solo de textura franco-arenosa não interferiram na altura da planta. Foloni et al.

(2006) verificaram que a altura da soja, adubos verdes guandu, guandu anão e crotalaria não foi afetada pelas densidades aplicadas (1100, 1300 e 1500 kg m<sup>-3</sup>).

Para o DC (Figura 10), pode-se perceber que o solo salino apresentou um crescimento inferior, mostrando que essa variável foi afetada significativamente por este fator. Esse curto período de avaliação mostra uma tendência que muitas culturas sofrem com o aumento da pressão osmótica da solução do solo, que conseqüentemente dificulta a absorção de água, ocasionando um decréscimo no DC de acordo com o aumento do nível de salinidade.



**Figura 10.** Diâmetro do colmo (DC) de cana-de-açúcar em função dos dias após o plantio (DAP) cultivada sob níveis de salinidade do solo

Ao final do experimento pode-se observar uma redução de 12,07% quando submetidas ao solo de maior salinidade. Muitos trabalhos ao utilizarem desse parâmetro para avaliar a influência da salinidade começam a fazer medições após os 120 DAP, e nesse período a planta já tem-se adaptado ao estresse. Essa tendência corrobora com Toledo (2016), cujos níveis de salinidade (3, 6, 10 e 13 dS m<sup>-1</sup>) em quatro variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB855453, RB928064 e RB92579), observou que quanto maior a concentração de NaCl, maior foi a redução no diâmetro dos colmos. Simões et al. (2016) trabalhando com dez variedades de cana-de-açúcar, dentre elas a avaliada nesse experimento (RB 867515), submetidas a cinco níveis de salinidade (0, 1,

2, 4, 6 e 8.0 dS m<sup>-1</sup>) verificaram uma redução no DC de 8% quando submetidas ao nível de maior salinidade. Outros autores com Almeida et al., (2012), trabalhando com genótipos e variedades de diferentes culturas, também relatam os efeitos deletérios dos sais sobre as variáveis de crescimento. Souza et al. (2014), trabalhando com desenvolvimento inicial de duas culturas de milho sob estresse salino, verificaram que uma das culturas apresentou uma redução do diâmetro do colmo de 15,7% quando irrigadas com água de maior salinidade.

## 6.2 Variáveis de rendimento

De acordo com a análise de variância (Tabela 4) a densidade do solo promoveu efeito significativo a 1% de probabilidade sobre as variáveis: massa fresca total da parte aérea (MFT), massa seca total da parte aérea (MST) e massa seca total da raiz (MSR); a salinidade mostrou efeito significativo a 1% de probabilidade para as variáveis MFT e MSTR; da mesma forma a interação apresentou efeito significativo nessas variáveis.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância para as variáveis massa fresca total da parte aérea (MFT), massa seca total da parte aérea (MST) e massa seca total da raiz (MSTR).

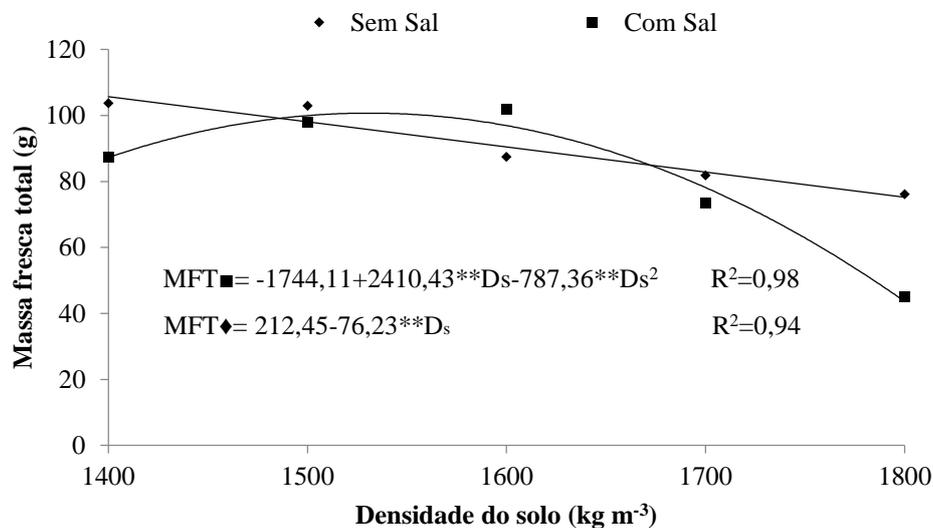
Fonte de variação	Teste F		
	MFT	MST	MSTR
Densidade	39,5**	4,27**	5,13**
Salinidade	15,61**	0,48 <sup>ns</sup>	8,42**
Densidade x salinidade	10,02**	2,43 <sup>ns</sup>	8,8**
CV %	8,65	17,07%	20,69%

\*\* significativo a 1% de probabilidade, ns - não significativo

De acordo com os resultados determinados pela MFT em função da densidade do solo, para o tratamento sob manejo sem salinidade, ajustou-se um modelo linear decrescente com o aumento dos níveis de compactação do solo (Figura 8) podendo-se observar que houve uma redução na produção de MFT a partir da densidade de solo 1400 kg m<sup>-3</sup> para a densidade de solo de 1800 kg m<sup>-3</sup> de 28,84%. Esses resultados podem ser justificados pela redução da porosidade do solo devido ao aumento da densidade ocasionando impedimento mecânico ao crescimento radicular, que resultou

em menor produção. Esse resultado corrobora com os obtidos por Leonel et al. (2007) em ensaios com as cultivares de amendoim IAC 886 e IAC Tatu ST. Resultados semelhantes também foram encontrados por Labegalini; Damião e Andrade (2016) na cultura do milho; Guimarães et al. (2013) na cultura do milheto e Fagundes; Silva e Silva (2014) com a cultura da cana-de-açúcar na variedade RB002504.

Para o solo salino, obteve-se um modelo quadrático para a MFT, obtendo-se ponto de máximo de 100,72 g na densidade do solo de 1530 kg m<sup>-3</sup> (Figura 11).



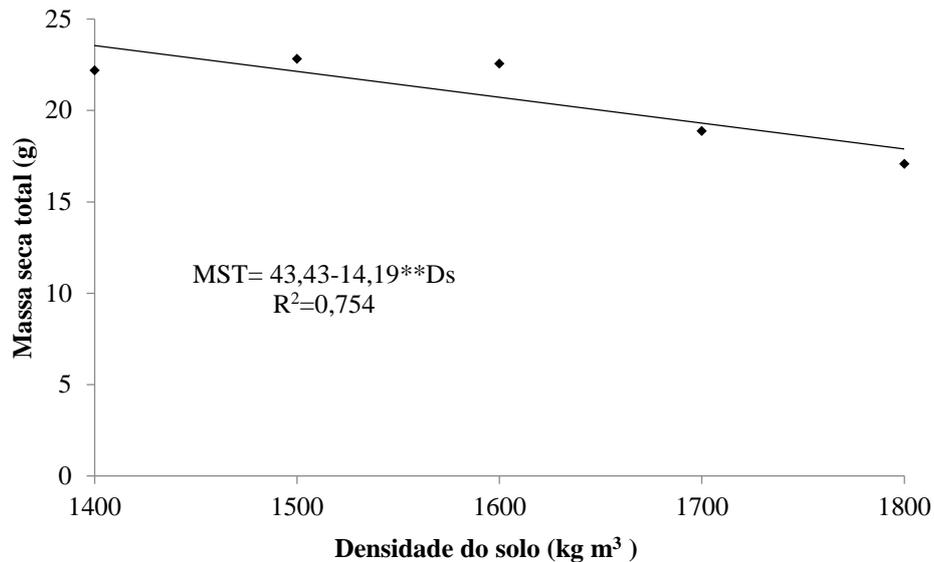
**Figura 11.** Massa fresca total da cana-de-açúcar em função das densidades do solo, submetidas ao solo sem sal e com sal.

Observa-se que houve um efeito positivo da salinidade até a densidade de 1530 kg m<sup>-3</sup> e a partir do qual houve um decréscimo na variável analisada. Pode-se atribuir essa resposta ao conhecimento dessa cultivar de cana-de-açúcar ser tolerante a salinidade e também essa concentração ser relativamente baixa para afetar a MFT, pois segundo Santos et al. (2013) para afetar o desenvolvimento da maioria das culturas a CE<sub>s</sub> do extrato de saturação deve ser igual ou maior que 4 dSm<sup>-1</sup> e menor que 7dSm<sup>-1</sup>. Willadino et al. (2011), estudando duas variedades de cana-de-açúcar (RB 867515 e RB 863129), verificaram que a variedade RB 867515 teve melhor desempenho em função do incremento dos níveis de sal na solução nutritiva. Dias et al. (2011) analisando o

desenvolvimento inicial do meloeiro, verificaram que na fase de frutificação houve um efeito significativo da CEs a partir de  $4 \text{ dS m}^{-1}$ . Oliveira et al (2014) verificaram tolerância do algodão em soluções que variam de  $0,5$  à  $7,5 \text{ dS m}^{-1}$  ocorrendo aumento da MFT até o último nível de salinidade. Esses resultados também corroboram com Marinho et al. (2002) analisando a melancia cv. Fairfax, apresentou redução da matéria fresca quando submetida a  $8,22 \text{ dS m}^{-1}$  de NaCl.

### **6.2.2 Massa seca total da parte aérea**

Foi observado efeito significativo ( $p < 0,01$ ) da densidade do solo sobre a MST. A MST foi reduzida linearmente em função do aumento da densidade, sendo observada redução de cerca de 24,07 % na densidade de  $1800 \text{ kg m}^{-3}$  em comparação com a menor densidade de  $1400 \text{ kg m}^{-3}$  (Figura 12). Com a limitação física do solo ocorreu diminuição da MST da planta. Para Medeiros et al. (2005), a redução na massa seca da parte aérea ocorre em função das alterações das propriedades físico-hídricas do solo, ocasionada pela compactação, diminuindo a absorção de nutrientes e o acúmulo de carbono pela fotossíntese que, consecutivamente reduziu o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas. Outra hipótese é explicada por Barreto et al. (2008) é que as plantas quando em condições adversas, as raízes enviam sinais à parte aérea informando que as condições para o desenvolvimento estão se restringindo, sendo necessário reduzir a taxa de crescimento. Devido a uma maior resistência no solo as raízes fazem mais força para penetrar no solo causando um possível estresse no seu sistema fenológico retardando seu desenvolvimento radicular e conseqüentemente aéreo.



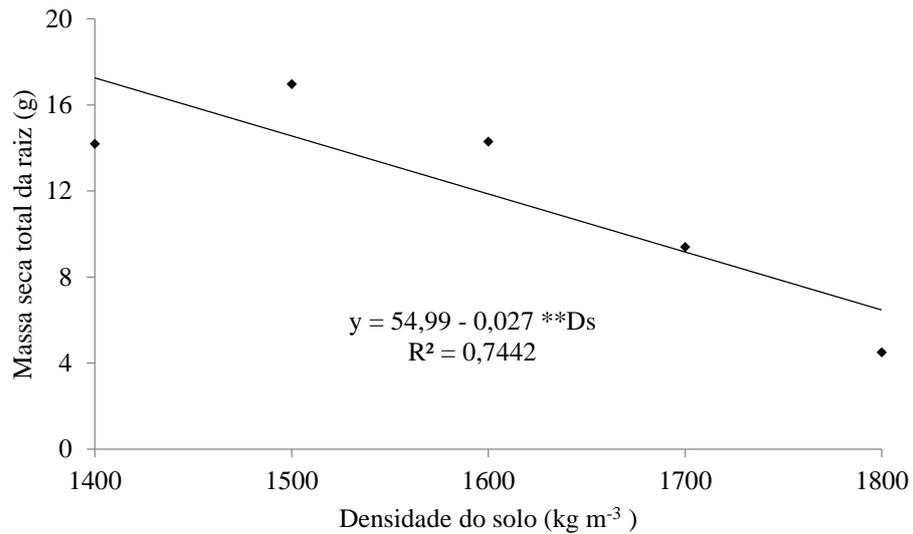
**Figura 12.** Análise de regressão aplicada a MST em função dos níveis de densidade, submetidas ao tratamento sem manejo de salinidade.

Resultado semelhante foi encontrado no cultivo de feijão de porco com uma redução de MST de 79,91% com o aumento da densidade de 1,0 Mg m<sup>-3</sup> para 1,8 Mg m<sup>-3</sup> (PALUDO; SILVA; SILVA, 2014). Bonelli et al. (2011), também verificaram que sempre que os níveis de densidade do solo aumentavam, o capim-mombaça apresentava redução da sua MST. Esse resultado também corroborou com Fagundes; Silva e Bonfim-Silva (2014) no estudo da mesma variedade, RB867515, porém com ajuste quadrático sendo crescente até a densidade de 1,33 Mg m<sup>-3</sup> e decrescente a partir dessa densidade.

Segundo a análise de variância houve diferença significativa na interação entre as densidades e as salinidades do solo na variável MSR. No entanto não houve ajuste significativo na análise de regressão do desdobramento da interação para os níveis de densidade submetidos ao tratamento sem salinidade.

Para os tratamentos submetidos à salinidade, a compactação apresentou efeito significativo, nesse parâmetro, tendo os resultados apresentados um modelo linear de regressão (Figura 13). Comparando a produção de MSR das variedades na densidade do solo 1400 kg m<sup>-3</sup> com a produção na densidade do solo 1800 kg m<sup>-3</sup>, pode-se observar redução de 62,80 %. Pode-se perceber que à medida que aumenta o nível de densidade do solo as raízes têm dificuldade de romper a camada compactada e produzirem aproximadamente 11 g de raízes planta<sup>-1</sup> a menos que na densidade de 1400 kg m<sup>-3</sup>, essa diferença é resultante das resistências à penetração do solo que foram maiores de acordo

com os níveis de tensão aplicados. Freddi et al. (2007) também verificaram redução na MSR em plantas de milho com o aumento da densidade do solo. Esses resultados também confirmam com os encontrados por Fagundes; Silva e Silva (2014) no estudo de três variedades de cana-de-açúcar, RB002504, RB867515 e RB931011, essas tiveram o mesmo comportamento. Para Ohland et al. (2014), avaliando a influência da densidade do solo no desenvolvimento inicial da cultura do pinhão-manso, foi verificado redução linear com o aumento da densidade.



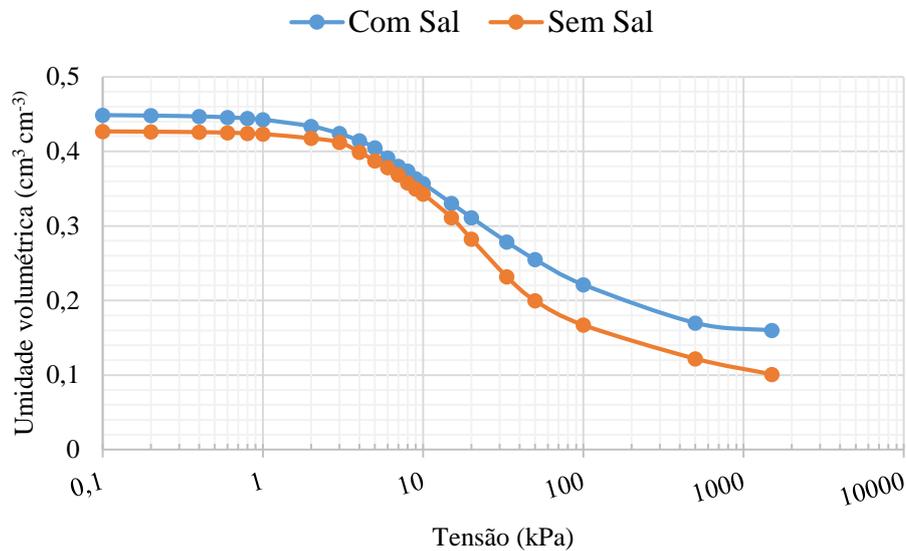
**Figura 13.** Análise de regressão aplicada a massa seca total da raiz em função dos níveis de densidade, submetidas ao tratamento com salinidade.

### 6.3 Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS)

A análise da CCRAS sob os tratamentos (Figura 14) mostra que em todas as tensões empregadas o tratamento que recebeu salinidade apresentou maior retenção de água em relação ao tratamento sem salinidade. Esse processo pode ser explicado pela higroscopicidade dos sais acumulados no solo. No entanto esse aumento da retenção de água não significa que a mesma esteja disponível para as plantas, pois dependendo do nível de excesso desses sais solúveis as plantas não terão força suficiente para absorver água devido ao aumento do potencial osmótico.

A salinização do solo também causa a expansão da argila quando úmida e contração quando seca, devido ao excesso de sódio trocável, fazendo com que o solo

apresente problemas de permeabilidade de modo que qualquer excesso de água pode causar encharcamento na superfície do solo, segundo Duarte et al. (2015).



**Figura 14.** Curva de retenção de água dos solos salino e não salino ajustada por Van Genuchten.

A salinidade do solo pode reduzir a disponibilidade de água para as plantas, no entanto nem todas as culturas são afetadas da mesma forma pelo mesmo nível de salinidade, usando até mecanismos como o ajuste osmótico, onde as plantas aumentam a concentração salina no seu interior, de modo que permaneça um gradiente osmótico favorável para absorção de água pelas raízes, e conseguem ainda absorver água sendo caracterizada como tolerante a salinidade.

Verificando a tolerância à restrição hídrica, Gava et al. (2011), estudando três variedades de cana-de-açúcar em cana-planta na região de Jaú, SP, observaram que a variedade RB867515 foi a mais produtiva. Resultados semelhantes foram encontrados por Abreu et al. (2013), estudando seis variedades de cana-de-açúcar verificaram que a variedade RB867515 ficou entre as três que melhor se desenvolveram na condição de estresse hídrico. Carvalho et al. (2016) analisando três variedades das cana-de-açúcar submetidas a níveis de salinidade, verificaram que, por apresentar maior atividade das enzimas catalase e ascorbato peroxidase, a variedade de cana-de-açúcar RB867515

mostrou-se mais tolerante à salinidade quando comparada com as variedades RB962962 e RB92579.

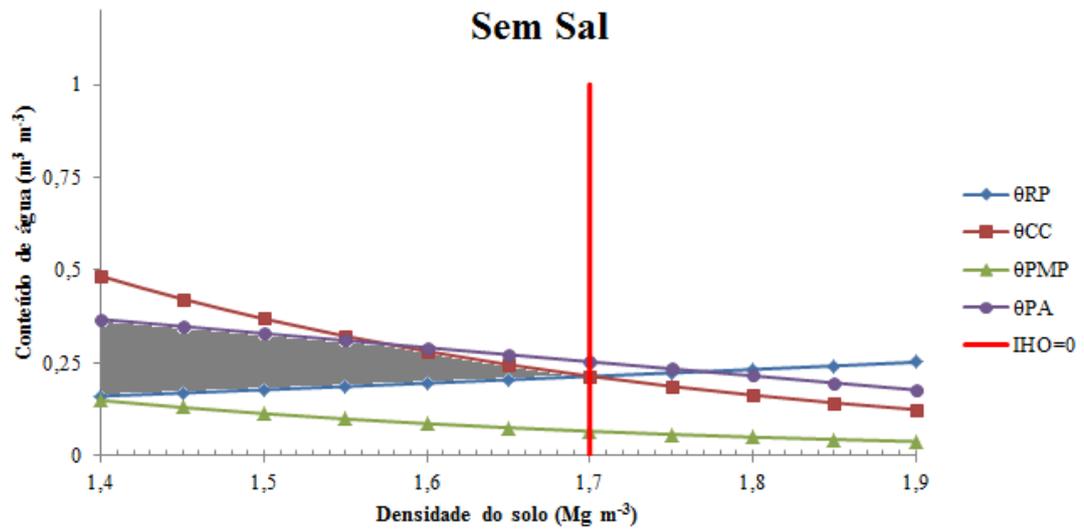
#### 6.4 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

As Figuras 15 e 16 ilustram o IHO do solo nas duas condições de solo sem sal e salino, respectivamente. A área hachurada, mostra a grande amplitude de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento das plantas. Os limites críticos são definidos por  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PA}$ ,  $\theta_{RP}$  e  $\theta_{PMP}$  em função da  $D_s$ .

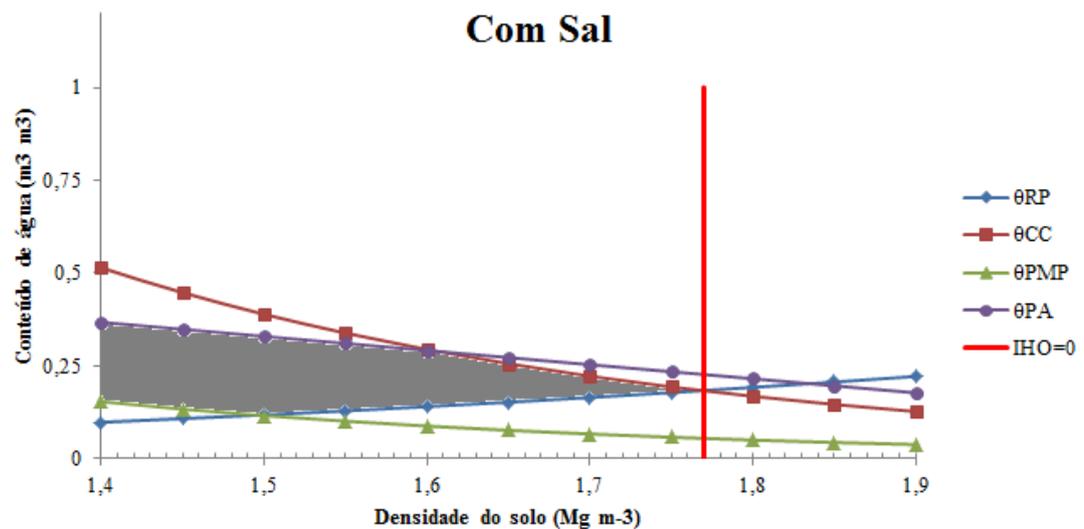
Umidades acima ou abaixo da área hachurada indicam condições limitantes ao crescimento de plantas e críticas ao seu desenvolvimento quando a densidade do solo estiver acima da  $D_s$  onde o IHO é igual a zero, isto é, densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ), indicadas nas figuras pelas retas verticais em vermelho.

De forma geral, os limites para construção do IHO foram a umidade volumétrica na porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), umidade volumétrica na qual a resistência à penetração das raízes atinge 2,5 Mpa ( $\theta_{RP}$ ), a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e pouco influenciada pela umidade volumétrica na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ).

Pode-se observar um efeito negativo da densidade sobre a retenção de água nos potenciais de -0,01 e -1,5 MPa. Outros autores também observaram efeito negativo da densidade sobre a retenção de água (Smedema, 1993; Silva e Kay, 1997a), argumentando que, sob elevados potenciais, a retenção é fortemente influenciada pela porosidade total que diminui com o aumento na densidade, enquanto, sob baixos potenciais, a retenção é controlada pelo volume de micro-poros. Como pode-se observar na Figuras 15 e 16 na capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ocorre uma redução na retenção de água ao longo dos valores de densidade. Esse resultado corrobora com Reeve, Smith e Thomasson (1973), ou seja: sob elevados potenciais, a maior retenção de água ocorre em menores valores de  $D_s$ , em virtude do maior espaço poroso advindo da melhor condição estrutural do solo. Com o aumento na densidade do solo, ocorrem, simultaneamente, um aumento na  $\theta_{RP}$  e um decréscimo na  $\theta_{PA}$  (Figuras 15 e 16). A porosidade de aeração é progressivamente reduzida com o aumento da densidade, conforme constatado por Archer e Smith (1972) e Silva, Kay e Perfect (1994).



**Figura 15.** Diagrama para o IHO no tratamento sem sal.



**Figura 16.** Diagrama para o IHO no tratamento submetido à salinidade.

Pode-se observar por meio das figuras 15 e 16 que o IHO foi limitado superiormente pela  $\theta_{PA}$ , em mais de 70% e 60% das amostras, respectivamente; pela  $\theta_{RP}$  no limite inferior em todas as amostras da figura 15 e na figura 16 em mais de 70% das amostras.

Na figura 15 a porosidade de aeração foi limitante com densidades de até 1,57 Mg m<sup>-3</sup>. Para a figura 16 a porosidade de aeração foi limitante com densidades de até

1,61 Mg m<sup>-3</sup>. Com a porosidade de aeração como limite superior pode-se inferir que as plantas terão seus desenvolvimentos limitados pela reduzida difusão de oxigênio no solo, nesta faixa de D<sub>s</sub>.

A  $\theta_{RP}$  definiu o limite inferior na maioria das amostras. Isto pode ser um indicativo de que os valores de D<sub>s</sub> simulados neste solo limitam os valores do IHO ou ainda que o conceito de água disponível não é suficiente para prognosticar valores de umidade do solo adequados ao crescimento das plantas. A maior influência da resistência à penetração no IHO também foi encontrada por diversos autores (SILVA, 2008; AGUIAR, 2008) e em solos de classe textural compreendido em siltoso e areia franca (SILVA et al., 1994).

Em todos os tratamentos à medida que aumenta a D<sub>s</sub> ocorreu simultaneamente aumento na  $\theta_{RP}$  e decréscimo na  $\theta_{PA}$ , concordando com os resultados de Silva et al., (1994); Leão et al., (2006); Klein e Camara, (2007), pois esses autores afirmam que as  $\theta_{PA}$  e  $\theta_{RP}$  são mais fortemente influenciadas pela densidade do solo do que as limitações de pressão mátrica, o que indica que o IHO é mais sensível às mudanças na estrutura do solo que à disponibilidade de água.

Ressalta-se, assim, a vantagem de uso do IHO, pois possibilita a integração de fatores físicos diretamente relacionados ao crescimento das plantas, assim como a indicação da necessidade de práticas de manejo que modifiquem a estrutura do solo para a ampliação do IHO.

## 7. CONCLUSÕES

- I. O indicador de qualidade física do solo (intervalo hídrico ótimo) mostrou-se sensível à variação da salinidade no solo permitindo maior compreensão dos efeitos do manejo agrícola na qualidade do solo.
- II. O nível de salinidade de solo de 3 dSm<sup>-1</sup> empregado no experimento influenciou negativamente a massa fresca da planta e a massa seca da raiz da cultura.
- III. O aumento da densidade do solo afetou negativamente as variáveis de rendimento, massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea e massa seca da raiz sob condição de solo não salino;
- IV. Sob condição de salinidade do solo os melhores resultados para a altura de planta e massa fresca foram obtidos entre as densidades de 1530 e 1600 kg m<sup>-3</sup>.

- V. Solos salinos apresentaram maior capacidade de retenção da água no solo verificado tanto na curva característica de retenção como no IHO.
- VI. Para o solo não salino a densidade crítica foi de  $1700 \text{ kg m}^{-3}$  e para o solo salino a densidade crítica foi de  $1770 \text{ kg m}^{-3}$

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, M. L.; Silva, M. A.; Teodoro, I.; Holanda, L. A.; Neto, G. D. S. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. *Bragantia*, Campinas, v. 72, n. 3, p. 262-270, 2013.
- AGEITEC. Cana de açúcar: Corte. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_98\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_98_22122006154841.html)>. Acesso em: 24.Jul.2016.
- Aguiar, M. I. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Viçosa: UFV, 2008. 91p. Dissertação Mestrado.
- Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, n.3, p.539-549, 2001.
- Almeida, C. X.; Centurion, J. F.; Jorge, R. F.; Barbosa, J. C.; Andrioli, I. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 1, p. 1745- 1755. 2012.
- Almeida, W. S; Fernandes, F. R. B; Bertini C. H. C. M; Pinheiro M. S.; Teofilo; E. M. Emergência e vigor de plântulas de genótipos de feijão-caupi sob estresse salino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.10, p.1047–1054, 2012
- Alvarez V. V.; H.; Alvarez, G. A. M. Apresentação de equações de regressão e suas interpretações. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.28-32, 2003.
- American Society of Agricultural and Biology Engineering. ASABE STANDARTS 2006 93: ASAE S313.1 FEB 04 Soil cone penetrometer, 2006.
- Araujo, M. A.; Tormena, C. A.; Silva, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 2, p.337-345, 2004.
- Araújo, R.; Goedert, W.J.; Lacerda, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31: p.1099-1108, 2007.
- Archer, J.R.; Smith, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. *J. Soil Sci.*, v.23, p.475-480, 1972.
- Argenton J.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Wildner, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.3, p.425-435, 2005.

- Assis, R. L.; Lazarini, G. D.; Lancas, K. P.; Cargnelutti Filho, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.
- Ayers, R.S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2ª Ed. Campina Grande: UFPB. 1999. 153p. Estudos da FAO Irrigação e Drenagem, 29.
- Bacchi, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: Orlando Filho, J. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba: IAA/Planalsucar. cap.2, p.24-37, 1983.
- Barreto, A. C.; Rodrigues, J. J. R.; Bezerra, S. A.; de Moura, P. M. Efeito da compactação em dois solos de classes texturais diferentes na cultura de rabanete. *Revista Caatinga*, v.21 n.5 (Número Especial), p.107-112, 2008.
- Barros, A. H. C. Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento - Território Mata Sul Pernambucana – Clima. 2011. [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio\\_mata\\_sul\\_pernambucana/arvore/CONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h6815n4.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h6815n4.html). 12 Jun 2016.
- Batey, T. Soil compaction and soil management: a review. *Soil Use and Management*, Oxford, v. 25, p. 335–345, 2009.
- Beauclair, E.G.F.; Scarpari, M.S. Noções fitotécnicas. In: Ripoli, T.C.C.; Ripoli, M.L.C.; Casagrandi, D.V.; IDE, B.Y. Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, p. 92-101, 2007.
- Beutler, A.N.; Centurion, J.F.; Silva, A.P.; Roque, C.G.; Ferraz, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.6, p.575-583, 2004.
- Bohnert, H.J.; Jensen, R.G. Strategies for engineering water- stress tolerance in plants. *Trends in Biotechnology*, v.14, p.89–97, 1996.
- Bonelli, E. A.; Bonfim-Silva, E. M.; Cabral, C.E.A.; Campos, J. J.; Scaramuzza, W.L.P.; Polizel, A.C. Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.15, n.3, p.264–269, 2011.
- Brady, N. C. Natureza e propriedades dos solos. 5.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 647p.
- Brady, N. C. Natureza e propriedades dos solos. 5. ed. São Paulo: F. Bastos, 1979. 647p.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. The nature and properties of soils. 14. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson-Prentice Hall, 2008. cap. 05, p. 173-217.

- Braunbeck, O. A.; Oliveira, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.300-308, 2006.
- Brunin, I. O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: Dinardomiranda, L.L.; Vasconcelos, A.C.M.; Landell, M.G.A. (Ed.). *Cana-de-açúcar*. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. p.57-78.
- Busscher, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Am. Soc. Agron. Eng.*, v.33: 519-524, 1990.
- Camargo, O. A. de; Alleoni, L. R. F. Causas da compactação do solo. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C3/Comp3.htm>. Acesso em: 09 de março de 2014.
- Camargo, O. A.; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Degaspar, 132p, 1997.
- Carvalho, M. F.; Correa, M. M.; Carvalho, G. C.; Neto, F. C. R.; Marinho, G. P. A.; Andrade, S. B. Enzymatic activity of three sugarcane varieties under salt stress. *Revista Brasileira de engenharia. Agrícola e Ambiental*, v.20, n. 9, p. 806-810, 2016.
- Carvalho, V. S.; Ribeiro, M. R.; Júnior, V. S. S.; Brilhante, S. A. caracterização de espodosolos dos estados da paraíba e do pernambuco, nordeste do brasil. *Revista Brasileira de. Ciência do Solo*, v.37, n.6, p.1454-1463, 2013.
- Casagrande, A. A; Vasconcelos A. C. M. Fisiologia da parte aérea In: Dinardo-Miranda L.L., Vasconcelos ACM, Landell MGA, editores. *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônomo; 2010. p.57-78.
- Casagrande, A. A. Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.
- Castro, P.R.C. Kluge, R.A. Sestari, I. *Manual de Fisiologia Vegetal:Fisiologia de Cultivos*. Piracicaba: Editora Agrônomo Ceres, 864 p., 2008.
- Cavaliere, K. M. V.; Silva, A. P.; Arvidsson, J.; Tormena, C. A. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um Cambissolo Háplico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 3, p. 477-485, 2009.
- Cha-um, S.; Kirdmanee, C. Proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) plantlets in response to iso-osmotic salt and water-deficit stress. *Agricultural Sciences in China, Amsterdam*, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2009.
- Chaves, M. M.; Flexas, J.; Pinheiro, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, v.103, p.551–560, 2009.

- Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Kaiser, D.R. Qualidade física do solo na produtividade do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006
- CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento (2017/2018). Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, 3º levantamento: dezembro 2017.
- Corsini, P.C.; Ferraudo, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.289-298, 1999.
- Costa, S. E. V. G. A. Intervalo hídrico ótimo do solo e estado hídrico das plantas em sistema integrado de produção agropecuária no subtropical brasileiro. Porto Alegre: UFRGS, 2014. 226 f. Tese Doutorado.
- Cunha, J. P. A. R.; Vieira, L. B.; Magalhães, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Engenharia na Agricultura*, v.10, p.1-7, 2002.
- Cunha, J.P.A.R. da; Vieira, L.B.; Magalhães, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.
- Daker, A. A água na agricultura; manual de hidráulica agrícola. 7.ed. Rio de Janeiro, RJ: Freitas Bastos, 543p, 1988.
- Dias Junior, M. de S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. 1994. 114p. Michigan State University, East Lansing, 114p, 1994.
- Dias, J. M.S. Compactação do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.V. & Schaefer, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.56-94, 2000.
- Dias, J. M.S.; Pierce, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 20, p.175-182, 1996.
- Dias, N. S.; Oliveira, A. M.; Neto, O. N. S.; Blanco, F. F.; Rebouças, J. R. L. Concentração salina e fases de exposição à salinidade do meloeiro cultivado em substrato de fibra de coco. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.33, n.3, p.915-921, 2011.
- Dillewijn, C. V. Botany of sugarcane. Waltham: Chronica Botânica, 433 p., 1952.
- Duarte, S. N.; Silva, E. F.F.; Miranda, J. H.; Medeiros, J. F.; Costa, R. N. T.; Gheyi, H. R. Fundamentos da drenagem agrícola. Fortaleza, CE. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2015.

- Ecco, M.; Carvalho, L. A. de; Ferrari, L. P. Variabilidade espacial da resistência do solo a penetração em área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2008/2009. *Revista Agrarian*, v. 5, p.263-269, 2012.
- Edreva, A. Generation and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts: a submolecular approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment - Journal*, v.106, p. 119-133, 2005.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. Londrina: Editora Planta, 403p, 2006.
- Fagundes, E. A. A.; Silva, T. J. A.; Silva, E. M. B. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.188–193, 2014.
- FAO. *Water in agriculture: opportunity untapped*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
- Fernandes, J.; Furlani Neto, V.L., Stolf, R. O subsolador alado como implemento de preparo de solo para a cana-de-açúcar. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, v.96, n.6, p.33-40, 1980.
- Filho, J. T.; Ribon, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.487-494, 2008.
- Flexas, J.; Ribas-Carbo, M.; Bota, J.; Galmes, J.; Henkle, M.; Martinez-Canellas, S.; Medrano, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. *New Phytologist*, v.172, p.73-82, 2006.
- Foloni, J. S. S.; Lima, S. L.; Bull, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.49-56, 2006.
- Freddi, O.S. *Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho*. Jaboticabal, Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2007. 105p. Tese Doutorado.
- Genro Junior, S.A.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Albuquerque, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, p. 65-73, 2009.
- Golinski, N.G. *Introdução da maturação de dois genótipos de cana-de-açúcar em função da interação entre dose de etefon e Ph da calda de aplicação*. Piracicaba: ESALQ, 2009. 56f. Dissertação Mestrado.

- Gonçalves, J. L. M.; Stape, J. L. Conservação e cultivo de Solos para Plantações Florestais. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Piracicaba – São Paulo, 2002. 498 p.
- Guerzoni, J. T. S.; belintani, N. G.; Moreira, R. M. P.; Hoshino, A. A.; Domingues, D. S.; Bessalho Filho, J. C.; Vieira, L. G. E. Stress-induced D1-pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS) gene confers tolerance to salt stress in transgenic sugarcane. *Acta Physiologiae Plantarum*, Krakow, v. 36, p. 309– 2319, 2014.
- Guimarães, C. V.; Assis, R. L.; Simon, G. A.; Pires, F. R.; Ferreira, R. L.; Santos, D. C. Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v. 17, n. 11, p. 1188–1194, 2013.
- Holanda, J. S.; Amorim, J. R. A.; Ferreira Neto, M.; Holanda, A. C. Qualidade da água para irrigação. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. (ed.) Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.
- Imhoff, S.; Silva, A. P.; Tormena, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, p.1493-1500, 2000.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.; Dias Júnior, M.S.; Tormena, C.A. Quantificação de pressões críticas Para o crescimento das plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.11-18, 2001.
- Inman-Bamber, N. G.; Smith, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 92, p.185-202, 2005.
- IPA. Instituto Agrônomo de Pernambuco Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco. 2.ed . Recife, 198p. 2008.
- Ivanilda, M. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Viçosa: UFV, 2008. 86p. Dissertação Mestrado.
- James, R. A.; Rivelli, A. R.; Munns, R.; Von Caemmerer, S. Factors affecting CO<sub>2</sub> assimilation, leaf injury and growth in salt-stressed durum wheat. *Functional Plant Biology*. Victoria, v. 29, p. 1393–1403, 2002.
- Jimenez, R. L.; Gonçalves, W. G.; Araújo Filho, J. V.; Assis, R. L.; Pires, F. R.; Silva, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um latossolo vermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2. p.116-121, 2008.
- Kiehl, E.J. Manual de edafologia: Relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 264p.

- Klein, V. A., Física do Solo. Passo Fundo-RS, Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.
- Klein, V.A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. Revista de Ciências Agronomicas, v.5, p.26-32, 2006.
- Klein, V.A.; Camara, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto e escarificado. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v.31, p.221- 227, 2007.
- Köpke, V. Methods for studying root growth. In: Symposium on the soil/root system, 1., Londrina, 1980. Proceedings. Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, p.303-318, 1981.
- Kumar, T.; Khan, M. R.; Jan, S. A.; Ahmad, N.; Niaz Ali, N.; Zia, M. A.; Roomi, S.; Iqbal, A.; Ali, G. M. Efficient regeneration and genetic transformation of sugarcane with AVP1 gene. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, Dubai, v. 14, p. 165-171, 2014.
- Labegalini, N. S.; Damiano, F. N.; Andrade, L. Desenvolvimento da cultura do milho sob efeitos de diferentes profundidades de compactação do solo. Revista de Agricultura Neotropical, Cassilândia-MS, v. 3, n. 4, p. 7-11, 2016.
- Lanças, K. P. A compactação do solo agrícola. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. São Paulo, 1996.
- Lanzanova, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavourapecuária sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do. Solo. V.31, p.1131-1140, 2007.
- Larcher, W. Ecofisiologia vegetal. São Carlos: RIMA, p. 531, 2006
- Leão, T.P.; Silva, A.P Macedo; M.C.M.; Imhoff, S.; Euclides, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. Soil Tillage. Res., v.88, p.279-285, 2006.
- Leão, T.P.; Silva, A.P.; Perfect, E. & Tormena, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. Agron. J.v.97; p.1210-1215, 2005.
- Leonel, C.L.; Centurion, M.A.P.C; Centurion, J.F.; Beutler A.N.; Freddi, O.S. Relação da compactação do solo com a cultura do amendoim. Biosci. J., Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 70-81, 2007.
- Leonel, C.L.; Freddi, O.S.; Beutler, A.N.; Centurion, M.A.P.C.; Centurion, J.F. Influência da compactação do solo no crescimento radicular e na produtividade do amendoim. Científica, v.35, p.51-60, 2007

- Letey, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, New York, v.1, n.1, p.277-294, 1985.
- Lima, R. P.; de León, M. J.; Silva, A. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Revista Ceres*, v. 60, n.1, p. 016-020, 2013.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Influência de tensões compressivas na pressão de precompactação e no índice de compressão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 856-862, 2010.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Cana-de-açúcar. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em : outubro de 2015.
- Marinho, Lígia Borges et al. Efeito do estresse salino sobre cultivares de melancia no sub-médio São Francisco. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 17, n.3, p.125-127, 2002.
- Mauchly, J. W. (June 1940). Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, 11 (2): 204-209. 1940. doi:10.1214/aoms/1177731915
- Mauri, R. Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar submetida a déficit hídrico variável. São Paulo: ESALQ, 2012. 105p. Dissertação Mestrado.
- Medeiros, R.D.; Soares, A.A.; Guimarães, R.M. Compactação do solo e manejo de água I: efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. *Ciência Agrotécnica*, Lavras, v.29, n.5, p.940-7, 2005.
- Mesquita, M. G. B. F.; Moraes, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.
- Moraes, M. T.; Debiasi, H.; Franchici, J. C.; Silva, V. R. Soil penetration resistance in a rhodiceutradox affected by machinery traffic and soil water content. *Engenharia Agrícola*, v.33, p.748-757, 2013.
- Mosaddeghi, M.R.; Koolen, A.J.; Hemmat, A.; Hajabbasi, M.A.; Lerink, P. Comparisons or different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structure soils. *Journal of Terramechanics*, v.44, n.1, p.53-63, 2007.
- Munns, R.; Tester, M. Mechanism of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, Palo Alto, v.59, p.651-681, 2008.
- Muñoz-Romero, V.; Benítez-Vega, J.; López-Bellido, L.; Lópezbellido, R. J. Monitoring wheat root development in a rainfed vertisol: Tillage effect. *European Journal of Agronomy*, v. 33, n. 3, p.182-187, 2010.

Nortcliff, S. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture Ecosystem Environmental*, v.88; p.161-168, 2002.

Ohland, Tatiane et al . Influência da densidade do solo no desenvolvimento inicial do pinhão-mansão cultivado em Latossolo Vermelho eutroférico. *Revista Ceres*, v. 61, n. 5, p. 622-630, 2014 .

Oliveira, E. C. A.; Oliveira, R. I.; Andrade, B. M. T.; Freire, F. J.; Júnior, M. A. L.; Machado, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.9, p.951–960, 2010.

Oliveira, F.A.; Medeiros, J.F.; Oliveira, F.R.A.; Freire, A.G.; Soares, L.C. Produção do algodoeiro em função da salinidade e tratamento de sementes com regulador de crescimento. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, n. 2, p. 279-287, 2012

Oliveira, Líssia et al. Tolerância de cultivares de algodão (*Gossypium hirsutum*) à salinidade da água de irrigação. *Agropecuária científica no semiárido*. V. 10, n. 2, p. 66-71, 2014.

Oliveira, P. R. de.; Centurion, J. F.; Centurion, M. A. P.da C.; Franco, H. B. J.;Pereira, F. de S.;Júnior L. S. B.; Rossetti, K. de V. Qualidade Física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 587-597, 2012.

Olivette, M.P.A.; Nachiluk, K.; Francisco, V.L.F.S. Análise comparativa da área plantada com cana-de-açúcar frente aos principais grupos de culturas nos municípios paulistas, 1996-2008. *Informações Econômicas*, São Paulo, v.40, n.2, p.42-59, 2010.

Otto, R.; Trivelin, P. C.; O., Franco, H. C. J.; Faroni, C. E.; Vitti, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 3, p. 601-611, 2009.

Paludo, J. S.; Bonfim-Silva, E. M.; Silva, A. Compactação do solo no desenvolvimento do feijão de porco em latossolo de cerrado. *XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014*. 27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil.

Pereira, F.S. Andrioli, I. Pereira, F.S. Oliveira, P.S. Centurion, J.F. Falqueto, R.J. Martins, A.L.S. Qualidade física de um latossolo vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.87-95, 2011.

Pires, B.S.; Dias Junior, M.S.; Rocha, W.W.; Araújo Júnior, C.F.; Carvalho, R.C.R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-amarelo sob

- diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol.36, n.2, p. 635-642, 2012.
- Pizarro, F. *Drenage agrícola y recuperacion de suelos salinos*. Madrid: Editorial Agrícola Española, 1978.
- Płazek, A., Tatrzańska, M., Maciejewski, M., Kościelniak, J., Gondek, K., Bojarczuk, J., Dubert, F. Investigation of the salt tolerance of new Polish bread and durum wheat cultivars. *Acta Physiologiae Plantarum*, Krakow, v. 35, n. 8, p. 2513-2523, 2013.
- Portz, G., Schoenknecht, E., Albuquerque, M., Trein, C. Ajuste dos valores obtidos por resistência a penetração (índice de cone), em função da umidade e densidade do solo em condições de campo. *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 2009.
- Prisco, J. T.; Filho, E. G. Fisiologia e bioquímica do estresse salino em plantas. In: *Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicações.. INCT sal*, Fortaleza, 472p, 2010.
- Ralisch; R.; Miranda, T. M.; Okumura, R. S.; Barbosa, G. M. C.; Guimarães, M. F.; Scopel, E.; Balbino, E. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.381-384, 2008.
- Raper, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*. v.42, p.259-280, 2005.
- Reeve, M.J., Smith, P.D.; Thomasson, A.J. The effect of density on water retention properties of field soils. *J. Soil Sci.*, v.24; p.355-367, 1973.
- Reichardt, K.; Timm, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 478p, 2012.
- Reichardt, K.; Timm, L.C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri, Manole, 2004. 478p.
- Reichert, J. M.; Kaiser, D. R.; Reinert, D. J.; Riquelme, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.44, p.310-319, 2009.
- Reichert, J.M.; Reinert, D.J. & Braidá, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, v.27, p.29-48, 2003.
- Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C.A.; Silva, L.S. da; Reichert, J.M. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134, 2007.

- Reynolds, W.D.; Bowman, B. T.; Drury, C. F.; Tan, C. S.; Lu, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110: 131-146, 2002.
- Ribeiro, K. D.; Menezes, S. M.; Mesquita, M. G. B. F.; Sampaio, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
- RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society for Testing and Materials, p. 128-152, 1965.
- Richards, L.A. (Ed.) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).
- Sá, M. A. C.; Junior, J. D. G. S. Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 26p. 2005
- Saffih-hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y.- J.; Tang, A.M.; Chaplain, V. An evaluation of the susceptibility of french surface layers soil to compaction at various water contents and bulk densities. *Soil Tillage Res.*, 105:96-103, 2009.
- Sampaio, E.V.S.B; Salcedo, I.H. Eficiência de utilização de uréia-15N por canaplanta e três socas em tabuleiro costeiro de Pernambuco. In: congresso nacional da stab, 4., convenção da actalac, 7., Olinda, 1987. *Anais Olinda: STAB*, 1987. p.46-49.
- Santana, M. J.; Carvalho, J. A.; Souza, K. J.; Sousa, A. M. G.; Vasconcelos, C. L.; Andrade, L. A. B. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e em solos com diferentes níveis texturais. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, 2007.
- Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Silva, E. M.; Silveira, P. M.; Becquer, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, p.1339-1348, 2011.
- Santos, H.G.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C.; Oliveira, V.A.; Lumbrreras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A.; Cunha, T.J.F.; Oliveira, J.B. *Sistema Brasileiro de classificação de solos*. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- Santos, R. A. Propriedades de retenção de água por espaços porosos não homogêneos: experimentos de laboratório e simulação computacional. Ponta Grossa: UFGP, 2005. 124 p. Dissertação Mestrado
- Segato, S.V.; Mattiuz, C.F.M.; Mozambani, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: Segato, S.V.; Pinto, A.S.; Jendiroba, E. Nóbrega, J.C.M. (Ed.) *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. 1.ed. Piracicaba: Livroceres, 2006. p.19-36.

- Seixas, F.; Oliveira Júnior, E.D.; Souza, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. *Scientia Florestalis*, v.54, p.9-16, 1998.
- Sengar, K., Sengar, R.S., Singh, A. Biotechnological and genomic analysis for salinity tolerance in sugarcane. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research*, Baoding, v. 4, p. 407-414, 2013.
- Serafim, M. E.; Vitorino, A. C. T.; Peixoto, P. P. P., Souza, C. M. A.; Carvalho, D. F. . Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. *Engenharia Agrícola*, 28(4), 654-665, 2008.
- Severiano, E.C.; Oliveira, G.C.; Dias Júnior, M.S.; Castro, M.B.; Oliveira, L.F.C.; Costa, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.30, n.3, p.404-413, 2010.
- Silva, A. O.; Silva, E. F. F.; Moura, G. B. A.; Lopes, P. M. O. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para região norte de Recife-PE. *Engenharia na agricultura*, Viçosa-MG, v. 20, n.2, p. 163-174, 2012b.
- Silva, A. P.; Kay, B. D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.58, n.6, p. 1775-1781, 1994.
- Silva, A. P.; Tormena, C. A.; Imhoff, S. Intervalo hídrico ótimo. In: Moraes, M. H.; Müller, M. M. L.; Foloni, J. S. S. *Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo*. Jaboticabal: Funep. p. 1-18, 2002.
- Silva, A.P.; Kay, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.61, p.884- 888, 1997b.
- Silva, E. A.; Gomes, J, B. V.; Filho, J. C. A.; Silva, C. A.; Carvalho, S. A.; Curi, N. Podzolização em solos de áreas de depressão de topo dos tabuleiros costeiros do nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de. Ciência do Solo*, v.37, n.1, p.11-24, 2013.
- Silva, G.J.; Valadão Júnior, D.D.; Bianchini, A.; Azevedo, E.C.; Maia, J.C.S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo VermelhoAmarelo do cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. *Revista Brasileira de. Ciência do Solo*, v.32, n.5, p.2135-2143, 2008.
- Silva, M.L.N.; Curi, N.; Blancaneaux, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, p.2485-2492, 2000.
- Silva, V. R.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Silva, A. P.; Braida, J. A.; Kaiser, D. R. Intervalo hídrico ótimo para três solos em sistema de plantio direto. In: reunião

- brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 14., 2002, Cuiabá, MT. Resumos...Cuiabá: s.ed., 2002, p. 4.
- Silva, V.R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria:UFSM, 2003. 171 p. Tese Doutorado.
- Simões Neto E. D.; Efeito da quantidade da reserva energética do tolete e da compactação do solo no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Sacharum sp.*). Piracicaba: ESALQ, 1986. 94p. Dissertação Mestrado.
- Simoies, W. L.; Calgaro, M.; Coelho, D. S.; Santos, D. B.; Souza, M.A. Growth of sugar cane varieties under salinity. *Rev. Ceres, Viçosa*, v. 63, n. 2, p. 265-271, 2016.
- Smedema, L.K. Drainage performance and soil management. *Soil Technol.*, v.6, p.183-189, 1993.
- Smit, M.A.; Singels, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. *Field Crops Research*, v.98, p.91-97, 2006.
- Soane, B.D., Ouwerkerk, C. V. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B.D., Ouwerkerk, C. van, (eds). *Soil compaction in crop production*. Netherlands : Elsevier, p.1-21, 1994.
- Souza, C. C. M.; Pedrosa, E. M. R.; Rolim, M. M.; Filho, J. V. P.; Souza, M. A. L. M. Influência da densidade do solo infestado por nematoide no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.5, p.475–479, 2014
- Souza, J.L.; Moura filho, G.; Lyra, R.F.F. Teodoro, I.; Santos, E.A.; Silva, J.L.; Silva, P.R.T.; Cardim, A.H.; amorin, E.C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, v.12, n.1, p.131-141, 2004.
- Souza, M. W. de L.; Cunha, R. C. da.; Costa, P. A. de A.; Moura, I. N. B. M. de.; Bezerra, F. M. S.; Lima, L. A.; Pereira, L. A. F.; Oliveira, F. de. A. de. Desenvolvimento inicial de milho doce e milho pipoca sob estresse salino. *ACSA – Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v.10, n.3, p 65-72, 2014.
- Souza, Z. M.; Campos, M. C. C.; Cavalcante, Í. H. L.; Marques Júnior, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural, Santa Maria*, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.
- Souza, Z. M.; Marques J, J.; Pereira, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural, Santa Maria*, v.40, n.1, p.48-56, 2010.

- STATSOFT, INC. 2011. Statistica (data analysis software system) version 10. Disponível em: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Streck, C. A.; Reinert, D. J.; Reichert, J.M.; Kaiser, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ci. Rural*, 34:755-760, 2004.
- Strudley, M.W.; Green, T.R.; Ascough, J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research*, v.99, p.4-48, 2008.
- Suzuki, L.E.A.S.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Lima, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária, Brasileira*, v.42, p.1159-1167, 2007.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Fisiologia vegetal*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 719 p.
- Toledo, J. V. Efeito do estresse salino no crescimento e na evapotranspiração de cultivares de cana-de-açúcar. Minas Gerais: UFV, 2016, 126f. Tese Doutorado.
- Tolmasquim, M.T. Perspectiva e planejamento do setor energético no Brasil. *Estudos Avançados*, São Paulo, v.26, n.74, p.249-260, 2011.
- Tormena, C. A. Caracterização e avaliação do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Roxo. São Paulo: ESALQ, 1998, 106f. Tese Doutorado.
- Tormena, C. A.; Araújo, M. A.; Fidalski, J.; Costa, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31; p.211-219, 2007.
- Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.573- 581, 1998.
- Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v.22, n.4, p.573-581, 1998.
- Tormena, C.A.; Araújo, M. A.; Fidalski, J.; Costa, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v,31, n.2, p.211-219, 2007.
- Trentin, R.; Zolnier, S.; Ribeiro, A.; Steidle Neto, A.J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. *Engenharia Agrícola*, v.31, n.6, p.1085-1095, 2011.
- Tsegaye, T.; Hill, R.L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. *Soil Science*, v.163, p.143- 154, 1998.

Vasconcelos A. C. M.; Casagrande, A. A. Fisiologia do sistema radicular In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. de A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação- IAC. Cap. 4, p. 79-98, 2008.

Vasconcelos, A. C. M.; Garcia, J. C. Cana-de-açúcar: ambientes de produção – Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Encarte Técnico - Potafós, Informações Agrônômicas, n.110, p.1-5, 2005.

Vasconcelos, A.C.M de; Casagrande, A.A.; Fisiologia do sistema radicular. In: Dinardo-Miranda, L.L.; Vasconcelos, A.C.M. de; Landell, M.G.A. (Ed.). Cana-de-Açúcar. Campinas: IAC, 2010. p. 79-98.

Vitti, G.C.; Mazza, J.A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 16p. (Informações Agrônômicas, n. 97, Encarte Técnico).

Vogelmann, E. S.; Mentges, M. I.; Reichert, J. M.; Rosa, D. P.; Barros, C. A. P.; Reinert, D. J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. Ciência Rural, v.42, n.2, p.291-297, 2012.

Willadino, Lilia et al . Estresse salino em duas variedades de cana-de-açúcar: enzimas do sistema antioxidativo e fluorescência da clorofila. Revista de Ciências Agronomicas, Fortaleza , v. 42, n. 2, p. 417-422, 2011.

Zhao, D.; GLAZ, B.; Comstock, J. C. Sugarcane response to water-deficit stress during early growth on organic and sand soils. American Journal of Agricultural and Biological Science, v.5, p. 403-414, 2010.

Zou, C.; Sands, R.; Buchan, G.; Hudson, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. Australian Journal of Soil Research, Melbourne, v. 38, p. 947-958, 2000.