UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PEDRO FRANCISCO SANGUINO ORTIZ

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO EM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Recife
2016

PEDRO FRANCISCO SANGUINO ORTIZ

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO EM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentado ao Programa de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim
Co-orientador: Prof. Dr. Thais E. Monteiro de Santos

Recife
2016

Ficha catalográfica

S195q Sanguino Ortiz, Pedro Francisco
Qualidade física do solo e susceptibilidade à erosão em argissolo cultivado com cana-de-açúcar / Pedro Francisco Sanguino Ortiz. – Recife, 2016.
89 f. : il.

Orientador: Mário Monteiro Rolim.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2016.
Inclui referências e apêndice(s).

1. Física do solo 2. Produção agrícola 3. Erosão 4. Simulador de chuva I. Rolim, Mário Monteiro, orientador II. Título

CDD 631

PEDRO FRANCISCO SANGUINO ORTIZ

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO EM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Djalma Euzébio Simões Neto
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profº Drº Edivan Rodrigues de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profª Drª Thais E. Monteiro de Santos
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabajo es para mis padres Omaira Ortiz y Pedro Sanguino, por ser la base de lo que soy, por darme la confianza, el apoyo que siempre me han dado y por ser mis primeros maestros en enseñarme la recompensa del sacrificio.

A mis hermanos: Johana, Wilmer, Marlies y Luz, por la paciencia, por los tiempos y momentos compartidos, por el apoyo incondicional y la fuerza que me han dado.

DEDICO

AGRADECIEMTNOS

Agradezco a Dios por la fuerza, sabiduría y serenidad que siempre me ha dado. Infinitas gracias a mis padres por el amor, sacrificio, motivación, la confianza que siempre me han dado y por creer siempre en mí.

Agradezco al programa de Becas académicas de la OEA y a todo el personal que conforma esta organización, por el trabajo y esmero para apoyar la educación colombiana que me permitió cumplir un sueño más.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), agradeço pela concessão da bolsa de estudos. Às demais pessoas que contribuíram para a realização das pesquisas.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco, ao programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela colaboração durante todo este tempo e pela oportunidade de realização do curso.

Agradeço ao Coordenador, Professor e Orientado Mário Rolim, por acompanhar e pelas orientações realizadas durante o curso de Mestrado e pela oportunidade de ter realizado este estudo.

Também agradeço a EECCA, ao diretor Djalma Simões Neto por permitir realizar esta pesquisa e também agradeço aos funcionários da estação pela ajuda e colaboração.

Infinitos agradecimientos a mis padres y hermanos porque gracias a ellos, por ser los confidentes, consejeros y por apoyar que he recibido. Thiago Trindade, Isabelle Trindade e a tia Cristina e a toda família Trindade, também agradeço a senhora Andrea, o senhor Davi, Deive, por tornar-se minha família Brasileira, por todo a amizade, colaboração, carinho. Especial Agradecimento a minha namorada Juline Carolina Silva Santos por todo o amor, colaboração, compensação e confiança.

Agradecimento a todos os meus colegas do curso de mestrado em Engenharia Agrícola e especialmente a Diego, Sr. Eulampio, Carol, Denize, e também para John Lennon e Celinha, pela colaboração e sincera amizade, pela paciência e por ser os meus professores de português.

Agradeço também a todo corpo de docentes de programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pelo apoio e disponibilidade.

Muito obrigado.

"Y Jesús le contestó: Tengan fe en Dios. Pues les aseguro que si alguien le dice a este cerro ¡quítate de ahí y arrójate al mar! y no dudas en su corazón, sino creyendo que ha de suceder lo que dice, entonces, sucederá. Por eso os digo que todo lo que ustedes pidan en oración, crean que ya lo han conseguido, y lo recibirán. Y cuando estés orando, perdonen lo que tengan contra otro, para que también su padre que está en el Cielo les perdone a ustedes sus pecados". Marcos 11. 22 – 25.

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes para o Brasil, devido ao grande aporte econômico no setor da agroindústria açucareira e também no mercado do etanol. Entre as estratégias agrícolas para aumentar as produções está o uso de máquinas agrícolas, utilizadas para executar, facilitar e fazer mais eficientes os trabalhos em campo, porém o excessivo uso pode prejudicar os solos, diminuindo o potencial agrícola e deixando-o mais exposto à degradação, consequentemente causando baixa produtividade. Nesta pesquisa objetivou-se estudar a qualidade física do solo e a sua susceptibilidade à erosão hídrica de 3 diferentes áreas produtoras de cana-de-açúcar, com ciclos e tempos de produção diferentes, a saber, área de primeiro ciclo e 44 anos de produção (1F), área de terceiro ciclo e 44 anos de produção (3F), área de quinto ciclo e 15 anos de produção (5F) e, uma floresta nativa (FN). A qualidade foi determinada analisando os atributos físicos e os desempenhos nas funções de armazenamento de água e suporte radicular do solo; também foi estudada a susceptibilidade à erosão realizando simulações de chuvas em campo e analisando a infiltração, escoamento superficial e as perdas de solo. A análise estatística mostrou baixa variabilidade e normalidade nos dados e, a análise de conglomerado classificou três grupos, o primeiro formado pelas áreas 1F e 3F pelas semelhanças e mesmo distanciamento euclidiana, o segundo grupo formado pela área 5F e, o terceiro grupo foi a FN. As áreas com mais baixa qualidade física foram 1F e 3F pelo ineficiente desempenho tanto nas funções de armazenamento de água e de suporte radicular. A maior susceptibilidade à erosão também foi presenciada nas áreas 1F e 3F, devido à maior quantidade de perda de solo; o indicador de qualidade física que apresentou maior correlação com a erodibilidade foi a macroporosidade. Os solos com baixa qualidade física, apresentaram os maiores valores de susceptibilidade à erosão e os com alta qualidade física apresentam melhor condição do solo para armazenar e reter água diminuindo a perda de solo por escoamento superficial.

Palavras-chaves: Física do solo. Produção agrícola. Erosão. Simulador de chuva.

RESUMEN

La caña de azúcar es una de los cultivos más importantes para Brasil, debido a su grande aporte económico en el sector de la agroindustria azucarera y recientemente también para el mercado del etanol. Entre las estrategias para mejorar las producciones está el uso de máquinas agrícolas, utilizadas para ejecutar, facilitar y hacer más eficientes los trabajos en campo, sin embargo el uso excesivo perjudica el suelo, disminuido su potencial agrícola y su resistencia a la degradación, consecuentemente causando baja productividad. En esta investigación se tuvo como objetivo estudiar la calidad física del suelo y su susceptibilidad a la erosión hídrica de 3 áreas productivas de caña, con ciclos y tiempos de producción diferentes, es decir, 1F área de primer ciclos con 44 años de producción, 3F área de tercer ciclo con 44 años de producción, 5F área de quinto ciclo con 15 años de producción, y también fue seleccionado un bosque nativo (FN). La calidad fue determinada analizando los atributos físicos y el desempeño de las funciones de almacenamiento de agua y soporte radicular del suelo; también fue estudiada la susceptibilidad a erosión realizando simulaciones de lluvia en campo y analizando la pérdida de suelo. Los análisis estadísticos mostraron baja variabilidad y normalidad en los dato, el análisis de conglomerados realizó tres agrupamientos, el primer conformado por las áreas 1F y 3F por sus semejanzas e igual distanciamiento euclidiano, el segundo formado por el área 5F, y el último grupo fue el FN. Las áreas con más baja cualidad física fueron 1F y 3F por el ineficiente desempeño, tanto para las funciones de almacenamiento de agua como para la función de soporte radicular. La mayor susceptibilidad a erosión fue encontrada en las áreas 1F e 3F, debido a que presentaron mayor cantidad pérdida de suelo; el indicador de calidad física que presentó mayor correlación con la erodabilidad fue la macroporosidade. Los suelos con más baja calidad presentaron los valores más altos de susceptibilidad a erosión y los suelos con alta calidad física presentaron mejores condiciones para almacenar y retener agua, disminuyendo la pérdida de solo por escorrentía superficial.

Palabras claves: Física del suelo. Producción agrícola. Erosión. Simulador de lluvia

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Caraterização das áreas experimentais 30

Tabela 2 Parâmetros ajustados para o modelo de retenção de água no solo de Van Genuchten (1980). 31

Tabela 3 Chuvas máximas (mm) em 24 horas da ANA do município de Carpina, PE, para os períodos 1986 a 2014. 37

Tabela 4 Coeficientes de desagregação para diferentes durações de chuvas. 38

Tabela 5 Intensidades de chuva (mm min^{-1}) classificadas por duração e tempo de retorno ... 39

Tabela 6 Valores de intensidade de precipitação e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) obtidos com o bico 80.100, para diferentes pressões de serviço. 41

Tabela 7 Analises descritivas dos dados das propriedades físicas dos solos das diferentes áreas experimentais de cana-de-açúcar e de uma floresta nativa. 46

Tabela 8 Teste de distribuição de normalidade das propriedades físicas dos solos das diferentes áreas de produção de cana-de-açúcar e de uma floresta nativa. 47

Tabela 9 Matriz de Classificação e agrupamento dos diferentes sistemas de produção de cana-de-açúcar e da floresta nativa pelas suas caraterísticas físicas..... 47

Tabela 10 Ponderação das funções principais e dos indicadores de qualidade. 49

Tabela 11 Normalização dos valores em uma mesma escala e escores (υ) da função de *Wymore.* 49

Tabela 12 Índice de qualidade física (IQF) do solo para 3 áreas produtivas de cana-de-açúcar e uma floresta nativa. 50

Tabela 13 Registro de Intensidade de chuvas simuladas e sua uniformidade 65

Tabela 14 Correlação de Pearson entre a erodibilidade e os indicadores de qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar. 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Curvas caraterísticas de retenção de água de três usos do solo de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 31

Figura 2 Funções de pontuação padronizada. Fonte, Karlen et al. (1997). 35

Figura 3 Curvas de Intensidade, duração e frequência – Carpina, Pernambuco. 40

Figura 4 Avaliação do comportamento das chuvas simuladas na parcela de erosão, em um sistema produtivo de cana-de-açúcar. 42

Figura 5 Coleta de sedimentos de solo erodido, durante uma simulação de chuva, de um sistema produtivo de cana-de-açúcar. 43

Figura 6 Dendograma de agrupamento dos sistemas, pelas suas caraterísticas físicas do solo; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 48

Figura 7 Macro e microporos do solo sistemas produtivos de cana-de-açúcar e uma floresta nativa. 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 52

Figura 8 Matéria orgânica do solo em áreas produtivas de cana-de-açúcar e uma floresta nativa. 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 53

Figura 9 Índices de estabilidade de agregados de áreas de produção de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 56

Figura 10 Densidade do solo de sistemas produtivos de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 58

Figura 11 Argila total dispersa e grau de floculação de sistemas produtivos de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 59

Figura 12 Resistência à penetração em via seca e úmida, em sistemas de produção de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa. 62

Figura 13 Taxa de desagregação e perda de solo de diferentes ciclos de cana-de-açúcar; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção. 66

Figura 14 Infiltração e escoamento superficial de água de diferentes períodos de produção de cana-de-açúcar; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção. 69

Figura 15 Erodibilidade de três períodos diferentes cana-de-açúcar, para uma chuva de intensidade de 39,93 mm h^{-1}; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção. 71

Figura 16 Correlação entre porosidade e erodibilidade de solo produtivos de cana-de-açúcar. 73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 13
2 HIPÓTESE 15
3 OBJETIVOS 16
3.1 GERAL 16
3.2 ESPECÍFICOS 16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
4.1 A CANA-DE-AÇÚCAR 17
4.2 QUALIDADE DE SOLOS AGRÍCOLAS 19
4.3 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO 20
4.4 EROSÃO DO SOLO 25
4.5 ERODIBILIDADE (K) 25
4.6 SIMULADORES DE CHUVAS 27
5 MATERIAL E MÉTODOS 29
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 29
5.2 ÁREAS DE ESTUDOS 29
5.3 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO 32
5.3.1 Índices de qualidade física dos solos. 33
5.4 EROSÃO HÍDRICA 36
5.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 43
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 45
6.1 QUALIDADE FÍSICA DOS SOLOS 45
6.2 SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO 65
7 CONCLUSÕES 74
REFERÊNCIAS 75

1 INTRODUÇÃO GERAL

As preocupações com o meio ambiente têm aumentado no mundo todo, não só pelas diferentes crises ambientais, como também, pelos problemas sócio-econômicos e políticos que causam. Para muitos pesquisadores a preocupação ainda é maior, já que, as projeções ambientais futuras não são animadoras e nem as novas tecnologias oferecem soluções imediatas para este problema.

Na área da agricultura o panorama não é diferente, desde décadas anteriores têm percebido sérios problemas econômicos, causados pelos baixos potenciais produtivos agrícolas que envolvem os fatores tecnológicos, como também, as consequências do inapropriado uso e manejo de sistemas agrícolas que reduzem o potencial agrícola e até, também, prejudicar o meio ambiente.

A produção de cana-de-açúcar desde décadas anteriores é uma das culturas mais importantes do mundo, devido a seu grande aporte econômico no setor da agroindústria açucareira e mais atualmente também no mercado do bioetanol, sendo o Brasil o maior produtor, contribuindo com aproximadamente com a terceira parte da produção mundial.

No Estado de Pernambuco o setor canavieiro sempre foi muito importante pelas grandes contribuições socioeconômicas, embora tenha sofrido fortes limitações produtivas pelas situações climáticas adversas (prolongadas secas) ou por fatores edáficos e de relevo, que causam baixa produtividade, o que coloca em alerta o setor canavieiro.

Entre as estratégias utilizadas nesta região para mitigar essas limitantes está o uso de veículos agrícolas para executar diferentes operações em campo, desde o momento do preparo do solo, até a finalização da colheita, com o propósito de facilitar e aumentar a eficiência desses processos e conseguir “otimizar a produções de cana-de-açúcar”, porem o uso destas máquinas pode deixar consequências e sérios problemas de produção.

Entre os problemas que mais afetam os sistemas canavieiros é a compactação do solo, pois envolve inicialmente alterações nas caraterísticas e propriedades físicos, desestruturação, degradação e consequentemente danificam as relações dos processos do sistema solo-água-planta, comprometendo não só a produção da cana-de-açúcar seno também outros ecossistemas.

Assim, diante a necessidade e preocupação com a degradação do recurso solo, surge desde os anos 90 o conceito de qualidade do solo, como um parâmetro de medida e controle para avaliar o estado ou saúde do solo e conseguir reduzir os problemas de degradação e melhorar as condições de produção agrícola.

Desde então, começou-se a relacionar a qualidade do solo com a produtividade agrícola, pois acreditava-se que alta produtividade refletia ótimo estado da qualidade do solo; essa hipótese conseguiu estimular as comunidades na super-exploração das terras, mas também, diminuiu o tempo de uso do solo, pois foram esquecidos o princípio e a razão do conceito de qualidade do solo para a sustentabilidade agrícola (LAL; PIERCE, 1991; EMBRAPA, 2008).

Nessa ordem de ideias, faz-se necessário procurar além da produtividade outros parâmetros de medição da qualidade do solo, como os parâmetros hidrodinâmicos do mesmo (infiltração, retenção de água, erosão etc.) e/ou através de outros indicadores ambientais (qualidade da água) correlacionados com o solo e com os processos agrícolas, permitindo assim, estudar a qualidade do solo e sua interação com outros recursos do ambiente.

Com a preocupação de ter melhores modelos agrícolas e sistemas canavieiros mais sustentáveis, objetiva-se estudar os efeitos das atuais práticas agrícolas de manejo do solo na qualidade física dos solos, através de funções relacionadas ao armazenamento de água, o suporte radicular e também a sua susceptibilidade à erosão de 3 diferentes áreas produtoras de cana-de-açúcar, com ciclos e tempos de produção diferentes e também de uma área de floresta nativa.

2 HIPÓTESE

- A qualidade física do solo e a susceptibilidade à erosão são influenciadas pelo tempo do cultivo de cana-de-açúcar.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Estudar a qualidade física do solo e a sua susceptibilidade à erosão em diferentes áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

3.2 ESPECÍFICOS

- Estimar índices de qualidade física do solo das diferentes áreas de cana-de-açúcar e de uma floresta nativa.
- Avaliar a susceptibilidade à erosão por perda superficial de solo com uso de um simulador de chuva.
- Estimar a taxa de desagregação e perda de solo por escoamento superficial nas diferentes áreas de cana-de-açúcar.
- Mediar a capacidade de infiltração de água nos solos de cana-de-açúcar.

Correlacionar os indicadores físicos e a susceptibilidade à erosão dos solos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.) é uma espécie gramínea de ciclo semi-perene, cujo centro de diversidade é originário da Nova Guiné, e atualmente também cultivada em áreas tropicais. Pertence à divisão Magnoliophyta, classe Liliopsida, sub-classe Commilinidae, ordem Cyperales, família Poaceae, tribo Andropogonae e sub-tribo Saccharininae (LUCCHESI, 2001)

A espécie foi introduzida no Brasil com a expedição portuguesa, pois foi um investimento na época da colonização, oficialmente a cana-de-açúcar foi plantada em 1532 por Martin Alfonso de Souza, na Capitania de São Vicente e, no Estado de Pernambuco iniciou-se dois anos após, com o Duarte Coelho (VARNHAGEN, 1975; FERNANDES, 1990; GOMES, 2006).

Segundo dados da FAO (Food and Agriculture Organization) (2011), a superfície terrestre é de 13,2 bilhões de hectares, dos quais 12% são usadas para a produção agrícola, o Brasil tem aproximadamente 72,4 milhões de ha de áreas agrícolas cultivadas, e aproximadamente 10,2 milhões de ha usadas para a produção de cana-de-açúcar, distribuídas em todas as suas regiões, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013).

Nos registros da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) (2015), o Brasil, desde a década de 1990, tem sido o maior produtor de cana-de-açúcar pela sua grande expansão de área produtiva, aos baixos custos de produção e pelas ótimas condições edafo-climáticas. Atualmente continua sendo o maior produtor da cultura, seguido por Índia e China, classificando-o como o maior produtor de açúcar e etanol de cana-de-açúcar.

Estima-se que nos próximos 10 anos aumentará a produção mundial de cana-de-açúcar em 20% devido ao incremento demográfico que ocasionará maior demanda de açúcar e etanol. Este aumento será desenvolvido principalmente pela expansão das áreas cultivadas na América Latina e com maior participação das produções do Brasil, tornando-o dominante nos mercados de açúcar e etanol de cana (OECD /FAO, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2014).

Atualmente, para o Brasil existe um grande desafio de caráter internacional, incrementar sua produção de cana-de-açúcar, já que, espera-se que a produção do mundo aumente 1,9% por ano, sendo o Brasil responsável por 86% desse incremento até o ano 2023,

tornando um mercado importante foco de desenvolvimento sócio-econômico para o país e principalmente para o setor agroindustrial, conforme Cardoso (2015), e OECD/FAO (2014).

Segundo dados da CONAB (2015b), as produções de cana-de-açúcar no Brasil tiveram um incremento de 4,5% devido à recuperação da crise hídrica e ao aumento na expansão das áreas canavieiras de 0,6% equivalentes a 52,7 mil hectares, sendo os Estados do Norte e Nordeste protagonistas desse aumento com aproximadamente 2 mil hectares.

Nessas regiões as produções agrícolas estão limitadas por fatores econômicos, pelas características topográficas e de relevo, pelas irregularidades climáticas e hídricas, e também, pelas pressões políticas e ambientais entre outras. Entre as estratégias planejadas para mitigar as limitações e/ou para gerar o aumento nas produções está a expansão das áreas produtivas, e com maiores interesses otimizar e/ou aumentar o potencial produtivo nos sistemas da cana-de-açúcar através do uso de tecnologias agrícolas.

Desde os anos 70, no Brasil começou-se a impulsionar as produções de cana-de-açúcar com o surgimento de instituições técnicas e científicas, e também, com a criação do PROÁLCOOL realizou-se a transformação em sistemas agroindustriais da cultura, seguidamente nos anos 90 voltou-se a impulsionar a produção, baseados na eficiência e competitividade de setores privados (Santiago et al., 2006).

Desde então, novas tecnologias e manejos nos sistemas produtivo de cana-de-açúcar têm surgido, mudando os manejos convencionais e as perspectivas de produção. A irrigação, adubação e uso de máquinas e implementos agrícolas, e a sistematização dos processos agrícolas, são algumas das tecnologias adotadas, a fim de tornar mais eficientes os processos produtivos de cana-de-açúcar.

Cavalieri et al. (2011), avaliaram os efeitos da colheita de cana-de-açúcar mecanizada nas propriedades físicas do solo e supõem que a colhedora mecanizada promoveu efeito negativo nas propriedades físicas, e além disso, causou restrição do movimento na água no solo e consequentemente afetou negativamente a produção de cana-de-açúcar.

Long et al. (2012), pesquisaram a produtividade de sistemas de cana-de-açúcar relacionando a qualidade do solo e dependência espacial, concluindo que a menor produtividade foi observada quando o solo apresentou baixa qualidade atribuída a alterações na densidade do solo.

No estudo realizado por Sousa et al. (2014), sobre a influência de diferentes densidades do solo no desenvolvimento de colmos da cana-de-açúcar e na multiplicações de nematoides, concluíram que mudanças físicas do solo afetam o crescimento do colmo e reduz a capacidade da multiplicação dos nematoides.

Conforme Silva (2014), a mesorregião Sul de Goiás apresenta a maior concentrações de áreas de produção de cana-de-açúcar, contudo tem alta expansão das áreas de produção, atribuindo este fenômeno à diminuição do potencial produtivo e à degradação de algumas áreas devido ao uso excessivo de técnicas agrícolas como, aração, gradagem e colheitas mecanizadas etc.

Estes tipos de mudanças e as otimizações nos manejos, como estratégia para melhorar a produção da cana-de-açúcar, devem ser avaliadas e monitoradas continuamente pelo fato de serem técnicas novas de manejo das quais se desconhecem os alcances dos seus impactos ao longo tempo, como também, pelas ocasionadas perdas produtivas e às altas e aceleradas expansões e desertificações que passam as terras canavieiras e, além disso, para melhorar e otimizar o uso dessas técnicas para garantir a sustentabilidade agrícola e o bem-estar das futuras culturas.

4.2 QUALIDADE DE SOLOS AGRÍCOLAS

O solo é um corpo natural, que envolve interações dinâmicas que influenciam o planeta todo como, o clima da terra, o ciclo hidrológico, como também, é um grande meio para uma versatilidade de comunidades de organismos vivos e, além disso, desempenha um importante papel ambiental, já que se comporta como um grande bio-reator de processo físico-químicos que decompõe resíduos e os recicla em nutrientes para a continuidade da vida na Terra (HILLEL, 1998).

Devido as suas múltiplas funções e da importância para manter efetivamente os serviços nos ecossistemas e para toda a biosfera em geral, é também essencial para o bem-estar humano, pois é o meio para obter os recursos necessários para a sua existência e o seu desenvolvimento, pelo qual torna-se de grande importância o seu estudo, como é mencionado por Doran e Parkin (1994), Larson e Pierce (1994), MEA (2005), Singer e Ewing (2000), e Stefanoski et al. (2013).

Desde 1960 já existia preocupação pela acelerada degradação que passam os solos produtivos, causadas pelos efeitos das intervenções humanas com as atividade agrícolas, e que atualmente os dados estatísticos sobre está degradação não são muitos favoráveis, segundo a FAO (2011) revelam que perto de 25% das terras cultiváveis apresentam alta e acelerada degradação e com tendências de multiplicar esses valores.

Com o propósito de buscar sistemas agrícolas com manejo inovadores, capazes de balancear o requerimento do solo e das culturas, enfatiza-se em “não maximizar a produção,

mas sim em otimizar o uso do recurso e sustentar maior produtividade por um maior longo período" e, além disso, melhorar a qualidade de vida das pessoas, diminuir o desequilíbrio ambiental, causados pelo desmatamento e a poluição agrícola; com isso nasceu o conceito de *Qualidade de Solo* (QS), conforme Aratani (2008), Araújo et al. (2012), Doran e Parkin (1994), Melo Filho et al. (2007) e Lal e Pierce (1991).

Segundo Araújo et al. (2012), Melo Filho et al. (2007), Karlen et al. (2003), e Machado e Mielniczuk (2009), nos anos 90 introduz-se com maior insistência o conceito de qualidade do solo, pois cientistas do mundo todo encontraram que assim como a qualidade do ar e da água têm grandes impactos na saúde a qualidade do solo também influencia na saúde das pessoas, dando origem aos diferentes significados e holísticos focos para definir a qualidade do solo, mesmo assim, todos têm em comum a capacidade do solo para funcionar efetivamente no presente e no futuro.

Para Doran e Parkin (1994) e Warkentin e Fletcher (1977), a QS tem sido difícil de definir e quantificar, já que pode ser uma característica abstrata (varia com o enfoque de estudo) que depende de fatores externos, tais como, tipo, uso e práticas de manejo do solo, ecossistemas e interações ambientais e prioridades sócio-políticas.

Já no ano 1997 o cientista Doran e a Sociedade Americana de Ciências de Solo conceituaram a QS como "a capacidade de um dado solo funcionar, dentro dos limites de um sistema natural ou manejado, mantendo a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e suportar a saúde humana e habitacional" (KARLEN et al., 1997).

Quando se fala de avaliação de QS, também está se referindo à sustentabilidade, do modo que, a QS precisa ser vista com uma perspectiva sistemática, formado por três componentes principais, físico, químico e biológico, e além disso, com os pilares da sustentabilidade (produtividade, segurança, proteção, viabilidade e aceitabilidade) procurando garantir a ótima funcionalidade do solo e do sistema todo (ARAÚJO et al., 2012; DEXTER, 2004; NORTCLIFF, 2002; SMYTH; DUMANSKI, 1995; SOJKA; UPCHURCH, 1999; USDA-NRCS -United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service-, 2015).

4.3 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

Apesar das crescentes preocupações com a degradação do solo, ainda não existem critérios universais para avaliar as mudanças na qualidade do solo, pelo qual se faz necessário

obter variáveis que permitam registrar informações, avaliar condições e observar as tendências dos comportamentos, torando-se assim, Indicadores de qualidade, conforme Cruz et al. (2004) e Dumanski et al. (1998).

O propósito principal, em uma visão mais geral, é: 1.) Promover a produtividade do sistema sem perder as propriedades físicas, químicas e biológicas; 2.) Diminuir a poluição ambiental; e 3.) Favorecer a saúde da terra, plantas, animais e humana com foi proposto por Karlen et al. (1997) e García et al. (2012).

Esta grande preocupação que aumenta tanto nas pessoas, agricultores, e como também, nas instituições governamentais e não governamentais, aumenta a necessidade de obter os Índices de Qualidade do Solo (IQS) que não só alertem os estados críticos do solo, mas também, estimulem a continuar a necessidade de pesquisar pela sustentabilidade e da qualidade ambiental. (GRANATSTEIN; BEZDICEK, 1992; DORAN;PARKIN, 1994; DORAN, 1997; HUFFMAN et al., 1998; KARLEN et al., 2001; MACHADO; MIELNICZUK, 2009).

A utilização do IQS, relacionados à sua funcionalidade, constitui uma maneira direta de mensurar a QS, neste caso, as funcionalidades estariam em função da relação do sistema água-solo e planta, ou seja: a) reguladora de processos bióticos (suprimento de minerais e água para as plantas); b) reguladora e controladora do fluxo de bio-elementos (ciclagem de nutrientes); c) regulador das trocas gasosas entre a atmosfera; e) condução e distribuição da água em fluxos hidrológicos (KARLEN; STOTT, 1994).

De acordo com Chaves et al. (2012), e Silva et al. (2015), as alterações na QS podem ser avaliadas pela mensuração do estado atual de determinados atributos do solo em comparação com o estado natural do solo (sem interferências antrópicas) ou com estados ideias, através, do uso de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem características como facilidade de avaliação, aplicabilidade em diferentes escalas, utilização abrangente e sensibilidade a variações de manejo.

Para Karlen et al. (2003), e Stefanoski et al. (2013), um IQS para que possa ser utilizado na avaliação de um processo ou atributo deve: (a) de algum modo influenciar o processo para o qual a avaliação está sendo feita; (b) permitir a comparação com alguma condição definida como padrão; (c) ser sensível e permitir a detecção de diferenças em escala pontual no tempo e no espaço; (d) monitorar os impactos das intervenções antrópicas, e (e) ajudar a determinar a sustentabilidade do sistema.

Segundo Doran e Parkin (1996), Masera et al. (1999), e Ramírez (2004), os IQS deveram cumprir alguns critérios básicos: a) correlacionar-se com os processos naturais do

ecossistema (aspecto de funcionalidade), b) ser fácil de utilizar em campo, de modo que, especialistas como também produtores possam usá-los (aspecto de simplicidade nos processos de extensão rural) e, c) ser suscetível às variações climáticas e de manejo.

Para Adriaanse (1993), os indicadores são instrumentos de análises que permitem simplificar, quantificar e demostrar fenômenos complexos, embora os IQS poderiam ser as suas propriedades físicas, químicas e biológicas ou as funções dentro de um sistema.

Segundo Karlen et al. (2003), indicadores do potencial de qualidade do solo em função das propriedades físicas, incluem: a retenção de água, distribuição da água no solo, condutividade hidráulica, como também, propriedades mecânicas, resistência à penetração.

Para Doran e Parkin (1994), os atributos físicos do solo que sofrem mudanças pelos manejos do solo classificam-se como, *intermediários*, como são: a densidade do solo, a resistência à penetração, permeabilidade, aeração, agregação, porosidade e umidade do solo; já os tributos que sofrem efeitos pelo manejo e, além disso, são atributos *inerentes* as suas propriedades de origem, ou seja, aqueles atributos obtidos através de análises pedológicos: textura, mineralogia, densidade de partículas a cor etc.

A estrutura, a densidade do solo, a estabilidade de agregados, a infiltração, suas profundidades (principalmente a camada superficial), a sua capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica, são características físicas do solo que tem sido proposta como IQS, pois estão diretamente relacionados com as funções e com o uso eficiente da água (GARCÍA et al., 2012).

Stefanoski et al. (2013), no estudo de qualidade propuseram uma classificação hierárquica a partir do grau relativo de dificuldade de obtenção e, além disso, a interdependência das propriedades físicas (a modificação de uma delas, leva a modificação das demais), foram classificadas assim: (I) *primários*, aqueles mais facilmente mensuráveis, obtidos por medidas diretas de campo ou de laboratório e (II) *secundários*, aqueles que, normalmente, são derivados de dados obtidos no campo e/ou no laboratório (indicadores primários), mas que exigem certo grau de tratamento estatístico ou modelagem, sendo de mais difícil interpretação.

Segundo Arshad e Martin (2002), os indicadores primários são: a densidade do solo, resistência à penetração, agregação (>2mm), porosidade total, infiltração, condutividade hidráulica saturada; e para Stefanoski et al. (2013), os secundários são: curva de retenção de água [CRA], parâmetro ou índice-S, intervalo hídrico ótimo e, índice de Reynolds.

Segundo Araújo et al. (2012), Arshad e Martin (2002), e Feller e Beare (1997), a textura é uma características mais estáveis, mesmo assim, sofre leves modificações pelas

práticas agrícolas que misturam as diferentes camadas e, além disso, a textura tem estreita relação como o movimento da água no solo, com a sua estrutura e a sua parte orgânica, como também, influência nos fenômenos de erosão.

As operações agrícolas como a atividade intensiva de preparo do solo, através de aração e gradagem, ou mesmo a movimentação de maquinário no cultivo e na colheita mecanizada, causam a quebra dos agregados e, consequentemente, das unidades estruturais, reduzindo seu tamanho e modificando o ambiente de crescimento radicular, como comumente observado em culturas de cana-de-açúcar (PACHECO; CANTALICE, 2011; ROQUE et al., 2010).

Os solos cultivados com cana-de-açúcar têm sido atribuídos ao manejo altamente tecnificados com uso de máquinas pesada em todas as fases do cultivo (OLIVEIRA et al., 2003; PANKHURST et al., 2003). Esse impacto ocorre com maior intensidade em solos argilosos, porém os solos de textura média a arenosos também revelam alta susceptibilidade aos efeitos destas máquinas (REICHERT et al., 2003; SEVERIANO et al., 2009).

A densidade do solo é uma característica dinâmica e varia em função da textura, a estrutura do solo, mas é modificada com as alterações causadas no solo pelas práticas agrícolas (principalmente a compactação), e em alguns casos pelos efeitos próprios da água, conforme Araújo et al. (2012), Arshad e Martin (2002).

A resistência à penetração é uma propriedade do solo, utilizada para avaliar a sua compactação, pois está diretamente relacionada ao crescimento das raízes das plantas e, além disso, é um atributo rápido e fácil de determinar em campo e sendo fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo Araújo et al. (2012).

A porosidade é outro importante atributo dos IQFS, pois é uma propriedade dinâmica, altamente sensível a mudanças, facilmente mensurável e, além disso, determina a relação do solo com outros componentes como, a água, ar, e crescimento etc. Segundo descrito por Araújo et al. (2012), os poros do solo estão classificados de acordo com a classe de tamanho, macroporos e microporos, sendo estes os limites, ou seja, poros com diâmetros menores e maiores de 0,6mm, respectivamente, e uma altura de coluna de água de 60 cm, admitindo-se que os macroporos sejam responsáveis pelo livre movimento do ar, da água e do crescimento radicular, e os microporos um reservatório de água.

Para Araújo et al. (2012), a condutividade hidráulica é uma propriedade do solo que descreve sua capacidade em transmitir água e que depende do solo e da geometria dos poros e das propriedades do fluido contido neles. Segundo Alves et al. (2007) a infiltração de água é um dos fenômenos que melhor refletem as condições físicas internas do solo, pois uma boa

qualidade estrutural leva a uma distribuição de tamanho de poros favorável ao crescimento de raízes e à capacidade de infiltração de água no solo.

Para Sá et al. (2000), a estabilidade de agregados é o parâmetro que melhor se correlaciona com a erodibilidade do solo, estando influenciada pela infiltração, a retenção de água, a aeração e a resistência à penetração, o selamento e o encrostamento superficial, relacionando diretamente com fenômenos de erosão hídrica. Os agregados estáveis de maior tamanho são responsáveis por proporcionar boa estrutura ao solo, promovendo maiores espaços porosos para o desenvolvimento de raízes, da microfauna e da circulação de ar e água (FERREIRA et al., 2010).

Castro Filho et al. (1998), citaram que as raízes das plantas estimulam a agregação estável do solo pela promoção de alta população microbiana na rizosfera, como pelo suprimento de resíduos orgânicos; por serem fontes ativas de exsudatos orgânicos, os quais são prováveis agentes efetivos na formação dos agregados do solo.

A avaliação da estabilidade dos agregados em solos depende das forças que ligam, os matérias cimentantes (matéria orgânica) nas partículas, e da natureza ou magnitude das forças desagregantes aplicadas nesta avaliação, como foi mencionado por Araújo et al. (2012).

A qualidade física do solo também está governada indiretamente pelo uso de sistemas de cultivo e o uso de matéria orgânica no solo, assim, quando exposto a cultivos intensivos e sem uso de matéria orgânica, aumentam os riscos e problemas no solo, já que, pode perder ou ter sua estrutura original alterada, formação de camadas compactadas, redução no volume dos poros, aumentam da densidade da estabilidade dos agregados (MARIA et al., 2007; RIBON et al., 2014).

Segundo Stefanoski et al. (2013), a curva de retenção de água tem-se revelado como atributo físico-hídrico da matriz do solo, importante nos estudos da QFS, pois as informações obtidas possibilitam calcular valores de outros atributos do solo como por exemplo, densidade do solo, porosidade total e sua distribuição, saturação efetiva, dentre outros, podendo demonstrar através de sua forma (complexidade/ sinuosidade) o estado estrutural do solo, refletindo claramente sua porosidade.

O seguinte passo para dar lugar à avaliação da qualidade do solo é a sua mensuração, comparação e análises dos IQS em relação com uma função, propriedade, processos e/ou resposta do solo, pelo qual os IQS devem de alguma maneira: (a) influenciar a função para a qual está sendo avaliado; (b) sejam mensuráveis e comparados a padrões definidos; e (c) sejam sensíveis o bastante para mostrar diferenças em escala espacial ou temporal (Melo Filho et al., (2007); Karlen et al., (1997); Lal, 1999).

Através da avaliação e dos estudos de qualidade do solo, como é mencionado por Doran e Parkin (1994), vem a responsabilidade de devolver a vitalidade atual e assegurar a vitalidade para as gerações futuras; “À medida que trabalhamos nossas terras para produzir alimentos, vamos deixando um legado de jardim ou deserto?” (HABERERN, 1992). Nossas abordagens para definir e avaliar a qualidade do solo deve ser moldada por esses usos finais.

4.4 EROSÃO DO SOLO

A erosão é o desgaste produzido na superfície do solo pela ação de agentes externos (vento ou água) ou simplesmente pelo atrito causado por outros corpos. O processo de desprendimento, transporte e sedimentação de partículas de solo por efeitos da água, é denominado erosão hídrica (CISEROS et al., 2012).

A erosão do solo é um fenômeno natural que acontece em todos os ecossistemas, contudo, o risco de degradação do solo em regiões brasileiras é muito mais elevado devido às condições climáticas tropicais dominantes e à erodibilidade, ou seja, a susceptibilidade dos solos a erosividade da chuva, como é mencionado por Dias e Silva (2015).

De acordo com Silva et al. (2000), a erosão hídrica deve ser estudada considerando-se a erodibilidade do solo, que representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas, ou seja, sua predisposição à erosão.

Na avaliação da erosão em solos cultivados com cana-de-açúcar, realizada por Bezerra e Cantalice (2006), foram analisadas diferentes taxas de cobertura do solo e o efeito na erodibilidade do solo, concluíram que a cobertura de cana-de-açúcar diminui as lâminas de escoamento e aumenta o volume de infiltração no solo e, assim, reduzem a degradação do solo.

4.5 ERODIBILIDADE (K)

Segundo Dias e Silva, (2015), Enriquez et al. (2015), Machado et al. (2012), e Martins, et al. (2011), Wischmeier foi um dos primeiros autores em discutir a erodibilidade do solo e definiu-a como, sendo parâmetro que representa a maior ou menor vulnerabilidade e/ou susceptibilidade do solo a ser erodido, mas também pode ser entendida como, a resistência do solo aos efeitos dos processos erosivos; essa vulnerabilidade e/ou resistência estão em função de propriedades intrínsecas do solo.

Para Ciseros et al. (2012), a erodibilidade do solo é uma medida de susceptibilidade ao desprendimento e transporte de partículas, causados pelos agentes da erosão; este efeito está integrado pelos processos que regulam a absorção da água da chuva, pelos impactos de chuva e pela resistência das partículas do solo, tal processo também está influenciado pelas propriedades do solo (tamanho das partículas, estabilidade dos agregados, matéria orgânica, distribuição e quantidade dos agregados, estrutura e propriedades hidráulicas do solo).

A erodibilidade não só expressa a perda de solo, além disso, reflete o estado e condições do solo, é por isso que diferentes solos apresentam diferentes taxas de erosão, mesmo quando os fatores que afetam a erosão são iguais (CISEROS et al., 2012).

Os atributos mineralógicos, químicos, morfológicos, físicos e biológicos, acondicionam e definem a erodibilidade do solo e, além disso, aos processos mecânicos intervenientes, pois são atributos que governam e classificam cada um dos tipos de solo, e é por isso que existem diferentes comportamentos e respostas destes aos processos de erosão (BASTOS et al., 2000; LAL, 1988; PANACHUKI et al., 2006).

Na equação universal de perda de solo (USLE) proposta pelo Serviço de conservação de solo do departamento de agricultura dos Estados Unidos de América e criada por Wischmeier e Smith (1978), nos anos 70, anotam 5 fatores principais que a conformam: a força da chuva (erosividade), a topografia, o tipo de manejo do solo, as práticas de conservação e a sua erodibilidade denominada como o fator K.

O fator K é um índice que significa a perda de solo, expressa na relação de massa de solo perdido por uma unidade de área (Mg ha^{-1}), sendo ocasionada por cada unidade do índice de erosividade (R) das chuvas, expressada em MJ.mm $ha^{-1}.h^{-1}$. Os valores de erodibilidade podem ser ajustados numa escala relativa, conseguindo comparar quantitativamente o comportamento de um solo com outro, baixa condições de chuvas especificas, como é mencionada por Schick (2014).

Para obtenção da erodibilidade do solo existem métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos são realizados em campo e conduzidos por longo tempo (períodos de até 22 anos) e sob chuva natural segundo Schick (2014); e o desenvolvimento e/ao aprimoramento de métodos indiretos para a obtenção da erodibilidade, são feitas a partir de uso de simuladores de chuva, possibilitando a condução de experimentos em campo por um período de tempo relativamente curto (Schick, 2014).

Em experimentos de predição de perda de solo por erosão hídrica, usando metodologias indiretas, é fundamental a determinação dos parâmetros edafoclimáticos da área

de estudo, principalmente os da chuva, pois vão permitir ajustar, adequar e simular com maior precisão a realidade (Cassol & Lima, 2003).

Segundo Silva et al. (1999), no Brasil a determinação da erodibilidade é dos fatores mais difíceis de obter, devido à grande extensão territorial e a sua alta diversidade edáfica, o que demanda muitos custos e morosidade para ser determinado; alguns solos do Brasil já têm os valores e modelos de erodibilidade, determinados através do uso de simuladores de chuvas, mesmo sendo, processos que demandem alto custo e tempo (Marques et al., 1997).

A determinação da erodibilidade por métodos diretos usando parcelas de perda de solo, sob chuva natural ou simulada, tem elevados custos, complexidade e tempo, pelo qual se faz necessário o desenvolvimento de modelos indiretos e matemáticos que permitam estimar a erodibilidade de maneira mais simples (Silva et al.,1999).

Não obstante, a existência destes modelos matemáticos indiretos, nem sempre permite estimar a erodibilidade com precisão para todos os tipos dos solos no Brasil, sendo assim, sugere-se que sejam desenvolvidos métodos de avaliação do fator K especificamente para cada tipo de solo brasileiro (Marques et al., 1997).

4.6 SIMULADORES DE CHUVAS

Os simuladores de chuva são uma das alternativas mais viáveis para os estudos de erosão de solos, pois permitem controlar as características das chuvas e têm a vantagem de poderem ser utilizados a qualquer tempo. Vários modelos já foram construídos, simuladores de chuva simples e até simuladores de chuva totalmente controlados por computador (EMBRAPA, 2004).

As simulações de chuvas têm sido realizadas diretamente em campo ou em laboratório, como ferramenta de pesquisa, na caracterização da infiltração, escoamento, erosão do solo, como também, usado para determinação dos índices de erodibilidade (AKSOY et al., 2012).

A redução do tempo, a maior facilidade de obter resultados e a eficiência nas pesquisas, são outros dos argumentos e vantagens que os simuladores de chuva possibilitam, e assim, aumentam o número de estudos realizados na erosão do solo e, com maior precisão, devido à possibilidade de controle das chuva que estes equipamentos permitem (Bertol et al., 2012).

Os simuladores de chuva também denominados infiltrômetro de aspersão, são equipamentos que aplicam água por aspersão com uma intensidade de aplicação geralmente superior à capacidade de infiltração do solo (SANTOS et al., 2009).

O objetivo das simulações de chuva é tentar correlacionar as características das chuvas simuladas com as perdas de solo observadas nas áreas de experimento e, além disso, obter informações importantes a respeito das práticas de manejo do solo e das culturas, visando à conservação de solo e água (PANACHUKI et al., 2006).

Segundo Eltz et al. (2001), Panachuki et al. (2006) e Brandão et al. (2009), no contexto de erosão de solo, as simulações de chuva procuram reproduzir as características e/ou comportamento das chuvas naturais, em termos de intensidade, duração e das características de formação das gotas de chuva (tamanho, velocidade, força de impacto, temperatura etc.) e, além disso, avaliar a resposta de cada tipo de solo aos efeitos das chuvas, no qual considera-se uma parcela como área experimental.

Segundo Brandão et al. (2009), nas simulações de chuva é necessário tamanho das parcelas, tempos, intervalos e volumes da chuva simulada e do escoamento coletado, como também, o simulador deve operar com intensidade de precipitação constante, pra obter precisão e representatividade no experimento.

Nos estudos de erosão e de simulação de chuvas é de grande importância os estudos e as análises de chuvas máximas, pois são as principais responsáveis por causar a erosão, pelo qual dados de intensidade, duração e frequência são chaves para projetos de erosão (CARDOSO et al., 1998; GARCIA et al., 2011).

Na avaliação das práticas de conservação de água e solo por erosão hídrica no agreste Pernambucano, Santos et al. (2009) utilizaram um simulador de chuva com bico aspersor oscilante, em uma parcela de 3 m^2, conseguiram simular dados de erosão, próximos aos obtidos sob condições naturais.

Em simulações de chuva em laboratório realizadas por Montenegro et al. (2013), foi avaliado o transporte de sólido total com diferentes intensidades de chuvas, em parcelas cobertas com diferentes quantidades de palha, conseguindo observar diminuições de transporte de sólidos entre 80% e 90% .

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido em condições de campo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Carpina, na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, situando-se a 7º 51’ 13’’ de latitude sul e 35º 14’ 10’’ de longitude oeste do meridiano de Greenwich e altitude de 180m, limitando-se a norte com Tracunhaém, Nazaré da Mata e Buenos Aires, a sul com Lagoa de Itaenga e Lagoa do Carro, a leste com Paudalho, e a oeste com Limoeiro, distando 42 km da capital, cujo acesso é feito pela BR-408.

O clima da região é quente e úmido, caracterizado como megatérmico (As'), com vegetação natural de tipo florestal tropical chuvosa, com temperatura média de 25,9°C, máxima de 30°C e mínima de 21,7°C, com radiação solar global anual de 14,2 MJ m^{-2} dia^{-1}, e precipitação pluvial anual de 1.094,4mm, distribuída irregularmente, precipitação de inverno e estação seca do verão até o outono, segundo classificação de Köeppen, apresentando uma umidade relativa de 70,3%.

O solo da EECAC é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, com maior quantidade de areia e importante proporção de argila (Areia 785,8 g kg^{-1}, Argila 159,6 g kg^{-1}), densidade de partícula de 2,67 g.cm^{-3} e apresenta pH (H_2O 1:2,5) de 5,20 segundo Simões Neto (2015).

5.2 ÁREAS DE ESTUDOS

As áreas do estudo foram situadas na EECAC e classificaram-se pelo uso do solo, tempo de uso e ciclos produtivos da cana-de-açúcar, ou seja, três áreas foram instaladas em diferentes lotes respetivamente, de primeira folha (1F), terceira folha (3F) e quinta folha (5F), correspondente a 1, 3 e 5 ciclos produtivos, as quais apresentavam-se com diferentes tempo produção, aproximadamente de 44 anos para os ciclos 1 e 3, e 15 anos para o ciclo 5 e, além disso, adicionalmente foi selecionada uma área na floresta nativa (FN); as áreas estavam cultivadas com diferentes variedades de cana-de-açúcar RB962962, RB98710 e RB931011 (cultivadas comercialmente e adaptadas as condições desta região) respetivamente, conforme aos registros do campo da EECAC.

O ciclo de produção é compreendido assim: o primeiro ano é o começo de um ciclo produtivo, iniciando com o preparo solo, utilizando a gradagem aradora e gradagem de nivelamento, logo após, sulcada com espaçamento entre linhas de 1,0m, para realização plantio da cana-de-açúcar; um ano depois é realizada a primeira colheita, com práticas de queimas e corte manual, finalizando com o carregamento e transporte mecanizado (carregador convencional e caminhões respectivamente) da cana-de-açúcar. Nos 4 anos seguintes todo este processo é repetido, não havendo preparo de solo com gradagem, nem renovação de plantio, pois a cana-de-açúcar tem rebrotes que permitem a continuidade do processo pelos 5 anos.

Nos Laboratórios Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos da UFRPE, foram realizadas as caracterizações física dos solos de cada uma das áreas de estudo selecionadas. Dentro das áreas principais de cana-de-açúcar forma demarcadas áreas de 5m de largura e 3 metros de cumprimento e declive com $\leq$ 1%, onde forma retiradas amostras de solo deformadas e indeformadas na profundidade de 0-20 cm.

As amostras deformadas foram obtidas com o uso de uma pá e posteriormente homogeneizadas para determinação de frações granulométricas, densidade de partícula, conforme a metodologia da EMBRAPA (2011). As amostras indeformadas foram retiradas na mesma profundidade, utilizando o amostrador de Ulhand com anéis de 1,5 cm de altura e 5 cm de diâmetro e com isso foram obtidas as curvas caraterísticas de umidade de solo como aprestam-se na Figura 1. Foram utilizadas placas porosas e o equipamento de controle de extração de Richards com diferentes tensões matriciais que vão desde o 0,0 MPa até 1,50 MPa de pressão (Tabela. 1) de acordo com a metodologia da EMBRAPA, (2011).

Tabela 1 - Caraterização das áreas experimentais

Caraterísticas	Usos do solo			
	1F	3F	5F	FN
Classe Textura	Franco - Arenoso			
Areia (g Kg^{-1})	866,00	877,17	869,50	738,67
Silte (g Kg^{-1})	43,50	34,50	39,83	142,00
Argila (g Kg^{-1})	90,50	88,33	90,67	119,33
Dp[1] (g cm^{-3})	2,69	2,67	2,69	2,62
Ds[2] (g cm^{-3})	1,80	1,74	1,56	1,40
*$AR_{0,0\ MPa}$ (cm^3 cm^{-3})	0,34	0,33	0,41	0,46
$AR_{0,1\ MPa}$ (cm^3 cm^{-3})	0,33	0,32	0,40	0,45
$AR_{0,33\ MPa}$ (cm^3 cm^{-3})	0,17	0,11	0,20	0,22
$AR_{1,5\ MPa}$ (cm^3 cm^{-3})	0,09	0,05	0,10	0,11

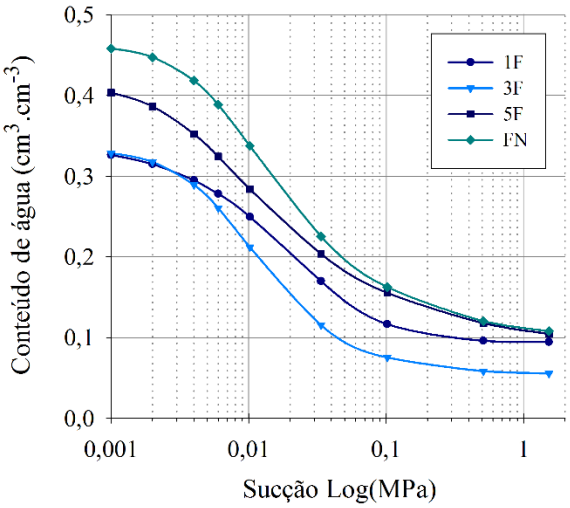
Fonte: Ortiz (2015)
[1]Densdiade de partícula do solo; [2]Densdiade do solo; *Água Retida

As curvas características foram ajustadas ao modelo proposto por Van Genuchten (1980), pela seguinte equação:

$$\theta = \theta R + (\theta S - \theta R) * \left[\frac{1}{1+(\propto * \Psi_m)^n}\right]^m \quad (2);$$ onde,

θ a umidade volumétrica, Ψ_m o potencial matricial; θR e θS são as umidades volumétricas residual e saturação respetivamente e, *m*, *n* e, α são os parâmetros do modelo de ajuste das curvas caraterísticas. Os ajustes das curvas de retenção forma obtidos através dos métodos dos mínimos quadrados, sendo necessário quantificar a quantidade pela qual difere do valor de medição da quantidade a ser estimada. As diferenças entre estes valores são quantificadas usando os critérios de erros quadrado médio e o coeficiente de determinação (Tab. 2) como foi descrito por Yang e You (2013).

Figura 1 - Curvas caraterísticas de retenção de água de três usos do solo de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015)

Tabela 2 - Parâmetros ajustados para o modelo de retenção de água no solo de Van Genuchten (1980).

Parâmetros de ajuste	Usos do solo			
	1F	3F	5F	FN
Ɵr	0,0941	0,0539	0,0857	0,0937
M	2,0226	0,5891	0,3154	0,3397
N	0,9517	1,6806	1,5359	1,7610
Alfa	23,1303	132,5329	0,2448	160,9769
R^2	0,9913	0,9919	0,9970	0,9972

Fonte: Ortiz (2015)

5.3 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

Nos meses de outubro, novembro e dezembro do ano 2015, antes das colheitas da cana-de-açúcar, foram realizadas as atividades de avalição experimental em cada uma das áreas selecionadas de cana-de açúcar (1F, 3F e 5F) e da Floresta Nativa (FN), previamente demarcadas.

As coletas de solo foram realizadas dentro das áreas previamente demarcadas, como amostragem simples, segmentadas e sucessivas, conforme metodologia da EMBRAPA (2006b). A amostragem totalizou 6 pontos e em cada um foram obtidas 3 sub amostras em diferentes profundidades, 0 - 10 15 – 25 e 30 – 40 cm, totalizando 18 amostras de solo por área.

As amostragens do solo para a avaliação da qualidade física, foram executadas manualmente, com o uso de Pá obtiveram-se as amostras com estrutura deformadas e, para amostras indeformadas utilizou-se o amostrador de Ulhand e anéis com dimensiones de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. O solo coletado foi homogeneizado manualmente e conservado quando as amostras foram deformadas e, também foram conservadas em anéis as amostras indeformadas.

A densidade do solo (Ds) foi um dos atributos tomados como indicadores físicos do solo e, foi determinada usando as amostras indeformadas aplicando a metodologia do "cilindro volumétrico" proposta pela EMBRAPA (2011), utilizando o amostrador de Ulhand e anéis com 5 cm de diâmetro e 5cm de altura.

A Porosidade Total (P_T) do solo foi determinada por dedução matemática, a partir de informação obtida da densidade do solo e a densidade de partícula de acordo com os procedimentos relatados por Camargo et al. (1986), aplicando os cálculos da porosidade utilizada a seguinte equação:

$$P_T = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) * 100 \quad (1)$$; em que:

P_T é a porosidade do solo (%); Ds é a densidade do solo (g cm^{-3}) e Dp é a densidade de partículas (g cm^{-3}).

A macroporosidade (P_{MA-6}) e a microporosidade ($P_{MI-1500}$) foram obtidas através da metodologia da EMBRAPA (2011); a $P_{MA-0,006}$ foi determinada através quantidade de água retida nas amostras de solo saturadas, após de ser submetidas a tensões de 0,006 MPa na mesa de tensão. A $P_{MI-1,5}$ foi considerada a partir da quantidade de água retida nas amostras

indeformadas de solo saturado, após de ser submetidas à tensão de 1,5MPa na câmera de Richard.

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi obtida utilizando o medidor automático de compactação do solo SoloTrack PLG5200, com haste HR10 e Cone Tipo 2 (semiângulo 30° e resistência de 7,9MPa); o penetrômetro eletrônico automatizado de velocidade constante, foi configurado para tomar dados de resistência a cada 0,1cm de profundidade em um perfil de 0,0cm até 40cm de cada uma das áreas experimentais; a RP foi realizada sob condições secas (condições de umidade de campo) e logo após saturação do solo. Para obtenção da umidade no solo, realizou-se os procedimentos da metodologia descrita pela EMBRAPA (2011).

A estabilidade dos agregados (EA) dos solos foi determinada via úmida, com amostras de solo deformadas da camada superficial (0-40 cm); O tamisamento das amostras no aparelho de Yoder, método descrito por Demarchi et al. (2011), permitiu obter a estabilidade dos agregados em água. Os tamises necearias para determinar a EA, formo. 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e, pela subtração dos pesos dos agregados peneirados e da amostra total, também foram obtidos os valores dos agregados <0,25 mm. O índice de estabilidade de agregados foi determinado com a equação (3) descrita por Castro Filho, Muzilli e Podanoschi (1998):

$$IEA = \{(P.A. - wp < 0{,}25)/(P.A.)\} * 100 \quad (3);$$ onde:

IEA é o índice de estabilidade de agregados (%), *P.A.* é peso da amostra, *wp<0,25* correspondente ao peso dos agregados menores de 0,25 mm.

O conteúdo de carbono e matéria orgânica presente no solo foi determinado aplicado o método de Yeomans & Bremner descrito por Lopes e Silva (2012), em amostras de solo coletadas na camada de 0-40 cm de profundidades para cada uma das áreas, este método está baseado na redução do dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) por compostos orgânicos e na subsequente determinação do dicromato, obtido por titulação do excesso de cromo como sulfato amoniacal.

5.3.1 **Índices de qualidade física dos solos.**

O Método Integrativo de Avaliação da Qualidade do solo (MIAQS), desenvolvido com o propósito de constatar-se a resposta de um conjunto de indicadores frente a um determinado sistema de manejo, ao longo do tempo. O método é constituído pelas 8 seguintes

etapas, segundo Casalinho et al. (2007): a) Seleção de um conjunto mínimo de indicadores; b) Avaliação dos indicadores; c) Identificação do desempenho (valores quantitativos) de cada indicador que represente seu nível de limitação; d) qualificação dos resultados, dos valores que expressam os melhores e os piores desempenhos dos indicadores; e) Definição dos três níveis de impacto intermediários dos descritores, dividindo-se a diferença entre os valores de melhor e pior atratividade por quatro; f) Atribuição, por juízo de valor, de índices ponderados a cada um dos três níveis de impactos intermediários dos descritores, considerando o grau de importância de cada indicador frente às funções que foram estabelecidas para o solo no agro; g) Determinação, por interpolação matemática, dos índices ponderados correspondentes ao desempenho de cada indicador, a partir dos valores obtidos em suas análises; h) Análise e interpretação dos resultados.

Para a avaliação da qualidade do solo, Melo Filho et al. (2007) e Karlen et al. (2003), também propôs o sistema matemático aditivo, modelo que está em função dos processos principais, dos seus respetivos indicadores de qualidade e da ponderação predefinida pela necessidade do pesquisador. O sistema é aditivo e usa uma série de funções principais do solo, às quais são atribuídos pesos e são integradas conforme a seguinte expressão:

$$IQS = \sum qWi\ (wt) \quad (4);$$ em

que *IQS* é o índice de qualidade do solo; *qWi*, o valor calculado das funções que compõem o índice; e *wt*, um peso numérico atribuído a cada função na composição do índice geral de qualidade.

Segundo Wymore (1993), a combinação dos diferentes indicadores, determinam a qualidade do solo, quando os resultados de IQ são igual 1, o solo é qualificado como de alta qualidade para a função avaliada e, quando o valor é 0 ou próximo, qualifica o solo como baixa qualidade. Assim como para as funções principais, pesos numéricos devem ser atribuídos para os indicadores, e, quanto maior o nível do indicador, maior sua associação com a função. Da mesma forma, o somatório geral dos pesos dos indica- dores em cada nível deve ser 1,0.

Uma vez assinado os respectivos pesos, é necessário normalizar os valores em uma escala única, também entre 0 e 1. O mecanismo utilizado é uma função para padronização de escores, que foi desenvolvida para sistemas de engenharia Wymore:

$$v = \frac{1}{1+(B+L)/(x-L))^{2S(B+x-2L)}} \quad (5);$$ em

que *v* é a pontuação padronizada; B, o valor critico ou limite-base do indicador (propriedade

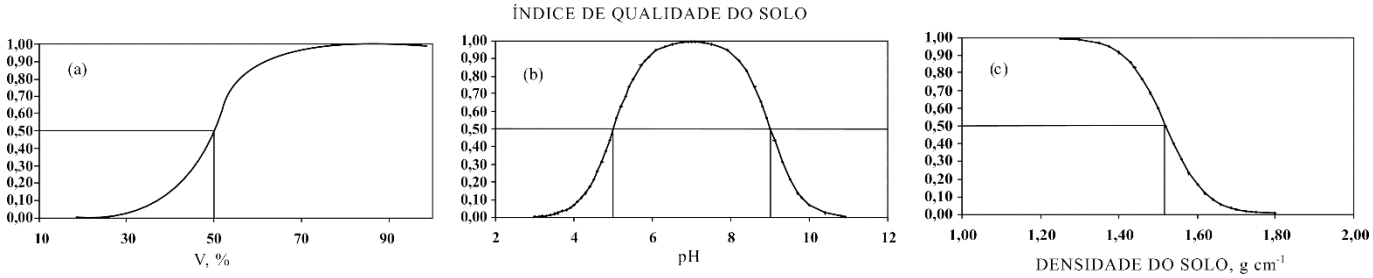
física do solo), cujo valor é a média do indicador e, na escala do *escore padronizado* corresponde a 0,5, estabelecendo o limite entre a ruim e a boa qualidade, pois o mínimos valor do *escore padronizado* é 0 e o maior é 1, *L*, o valor considerado inicial ou mais críticos que uma propriedade do solo possa expressar, ou seja, é o valor mínimo que expressão a propriedade, podendo ser 0,0; X é o valor do indicador medido em campo; *S*, a inclinação tangente à curva no ponto correspondente ao valor crítico do indicador.

Nesta pesquisa o valor de L foi diminuído 0,001 unidades, pois no momento da subtração de $[x - L]$, aconteceria uma incoerência matemáticas, ou seja, quando X tome o mínimo valor do indicador, estaria subtraindo o mesmo mínimo valor assignado ao parâmetro L, pelo qual foi necessário realizar este ajuste obtendo o novo $L_{-0,001}$.

Para a determinação do valor S, foram atribuídos valores gradativos de 0,0 a 20, quando a o comportamento padrão do indicador apresenta um formato da curva crescente positivo ou também denominada “mais é melhor”, pois cresce positivamente tanto para os valores de eixo X e para o eixo Y; quando o comportamento do indicador apresenta um comportamento crescente negativo, também denominada “menos é melhor” o valor de S foi atribuído gradativamente entre -20 a 0,0. O processo gradativo finalizou quando a curva *v* apresentou o formato das curvas de pontuação padronizada por Karlen et al. (1997).

As curvas são classificados pelo seu comportamento, inclinação positiva, negativa ou pelo seu formato, como é explicado por Melo Filho et al. (2007), a curva na Figura 2a. tipo “mais é melhor”, utilizada para aqueles indicadores em que os maiores valores representam melhor qualidade (estabilidade de agregados, teor de CO, porosidade, etc.).

Figura 2 - Funções de pontuação padronizada.



Fonte: Karlen et al. (1997).

A curva da Figura 3b. de “valores máximos”, tem um comportamento tipo gaussiano, ou seja, tem um valor determinante do máximo patamar do melhor comportamento e a partir

do qual sua influência é detrimental ou negativa; está curva presenta duas inclinações positiva e negativa, utilizada representar a qualidade de indicadores como, a macroporosidade, o pH, a condutividade hidráulica etc. Na curva da Figura 3c. “menos é melhor”, é utilizada para padronizar indicadores como, a densidade do solo, a resistência à penetração, em que menores valores, representam a melhor qualidade.

Ajustados os escores de cada indicador, o passo a seguir, é a sua avaliação, através de uso de critérios para facilitar as comparações dos índices de qualidade, assim, primeiramente foram definidas duas funções periciais, a capacidade de armazenamento de água e, o suporte radicular das plantas, e seguidamente foram definidos seus ponderações por importância e, além disso, foram classificados os indicadores pela sua participação em cada uma das funções preestabelecidas, conforme o indicado por Melo Filho et al. (2007).

O cálculo do Indicador de qualidade do solo (IQS) foi da seguinte forma:

$$qFP = I_z * W_1 + \cdots + I_n * W_n \quad (6);$$

em que *q(FP)* é a contribuição parcial de cada função principal para o valor global de IQS; I_n os valores dos diferentes indicadores da função principal avaliada e, W_n os pesos relativos atribuídos a cada indicador, segundo Melo Filho et al. (2007).

Para determinar o índice de qualidade definitivo, realizou-se a soma dos resultados, como expressado na seguinte equação:

$$IQS = (qCAA * wCAA) + (qCSR * wCSR) \quad (7);$$

em que *qCAA* é o valor ponderado da função principal, capacidade de armazenamento de água; qCSR, a função de suporte do radicular e, *w* são os ponderados associados a cada função principal, conforme o descrito por Melo Filho et al. (2007).

5.4 EROSÃO HÍDRICA

A erosão hídrica foi determinada com um simulador de chuva, calibrado para reproduzir uma chuva extrema já apresentada na EECAC, significa que, a chuva simulada é classificada como, de alta intensidade, longa duração e com um curto tempo de retorno.

A classificação das chuvas foi determinada através das Curvas de Intensidade, duração e frequência (IDF), do município de Carpina. Para determinar as curvas foram necessários

obter dados de chuva máximas em 24h, da estação pluviométrica CPRM, código 00735157, localizada com latitude 7°50’34’’, longitude 35°10’57’’ município de Carpina, PE. Disponíveis no banco de dados da (ANA) Agência Nacional de Água (2015), em seu endereço eletrônico Hidroweb. A estação pluviométrica ofereceu os registros de chuvas máximas de 29 anos, referentes ao período de 1986 a 2014, discretizados por mês na Tabela 3.

Tabela 3 - Chuvas máximas (mm) em 24 horas da ANA do município de Carpina, PE, para os períodos 1986 a 2014.

Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SEP	OUT	NOV	DEZ
1986	0,0	0,0	0,0	47,3	40,0	92,1	0,0	25,4	20,9	5,9	44,2	12,8
1987	3,1	21,0	31,2	32,9	16,2	32,5	25,6	9,7	11,4	10,1	0,9	5,2
1988	8,8	10,4	49,0	63,1	63,0	63,2	81,5	21,9	10,8	6,7	6,6	10,4
1989	6,0	11,6	23,1	64,2	35,3	45,5	28,1	23,1	3,5	8,0	8,2	30,0
1990	3,0	2,0	0,0	72,0	37,0	33,7	95,0	40,4	13,1	15,6	1,1	3,8
1991	0,0	0,0	5,0	30,0	30,2	9,2	35,7	26,7	5,6	11,1	6,0	2,8
1992	22,4	17,0	46,0	70,8	19,0	20,1	17,1	13,8	40,5	9,5	10,1	4,2
1993	5,4	1,2	16,0	42,0	16,1	16,1	23,0	23,0	5,9	16,3	5,6	4,6
1994	43,5	19,8	30,6	29,2	50,3	38,6	53,0	16,2	60,9	4,8	4,6	9,4
1995	29,0	30,0	8,9	32,8	31,0	37,3	56,5	7,3	4,7	4,0	11,0	3,1
1996	21,1	43,0	19,8	111,2	13,2	80,9	30,0	86,0	31,0	15,4	35,0	4,9
1997	8,9	30,4	14,3	48,0	78,4	7,1	32,7	11,7	0,8	12,5	0,0	22,4
1998	6,0	5,1	8,8	31,5	48,8	5,7	45,3	29,0	6,3	2,9	0,8	7,3
1999	3,9	61,5	54,1	8,2	28,1	39,1	47,5	10,6	14,6	13,0	2,9	16,3
2000	45,5	25,5	30,7	73,6	17,7	130,1	54,1	49,9	86,2	10,7	4,0	55,3
2001	31,4	3,6	22,4	9,8	5,7	56,1	41,0	20,8	37,5	32,0	8,9	8,3
2002	20,4	24,5	72,7	14,3	21,0	50,5	57,7	7,5	2,2	17,2	12,3	12,5
2003	16,5	20,2	45,2	52,7	32,0	40,2	12,8	18,7	10,9	4,5	2,0	3,6
2004	45,3	51,9	49,3	59,5	29,7	52,3	36,4	7,5	13,9	16,0	4,1	2,2
2005	3,4	15,1	17,8	14,4	35,2	119,8	27,3	29,7	6,4	5,6	3,5	5,4
2006	1,1	5,0	37,3	12,8	15,1	77,7	19,2	35,8	9,0	15,8	26,0	48,3
2007	10,5	57,0	57,0	51,0	22,5	35,4	32,6	14,8	51,5	0,0	9,5	60,4
2008	35,1	16,0	60,9	51,1	90,0	74,0	170,3	86,7	40,8	26,3	6,8	9,8
2009	17,5	127,0	22,5	55,0	105,0	48,5	118,2	82,1	31,9	0,0	49,1	140,0
2010	26,5	15,3	27,8	80,2	71,0	165,4	57,8	86,8	16,8	5,1	20,2	61,2
2011	22,3	35,0	32,7	48,0	48,2	89,3	46,3	3,1	10,0	37,2	35,4	0,0
2012	21,0	46,8	31,1	21,3	41,8	74,1	80,6	5,9	6,6	49,4	3,5	16,9
2013	11,7	18,0	19,3	59,2	43,2	75,5	48,2	31,5	8,1	30,8	52,8	18,7
2014	5,9	11,2	12,4	29,6	81,2	39,9	20,1	17,3	18,3	20,4	11,4	0,0

Fonte: ANA (2015).

Para obtenção da probabilidade de períodos de retorno das chuvas mais intensas, foi aplicado a distribuição de Gumbel para cada um dos anos das series históricas de chuvas de alturas máximas anuais. A função cumulativa de probabilidade, da distribuição de probabilidade de Gumbel para valores extremos, possui a seguinte expressão segundo Tucci (2009):

$$F(X) = exp^{-exp^{-\propto*(x-\mu)}} \quad (8);\ \text{sendo}$$

Y, o valor de uma precipitação extrema na qual se deseja conhecer o tempo de retorno, ∝ e μ são respetivamente os parâmetros de ajuste da posição e escala.

$$\propto = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S \quad (9);$$

$$\mu = \bar{x} - 0{,}5772 * \propto$$

(10); sendo S, a desvio padrão, $\bar{X}$ é a média amostral.

As variáveis de Gumbel obtidas forma reduzidas, aplicando a função de distribuição de frequências descrita por Garcia et al. (2011), descrita na seguinte equação: $Y_{TR} = -ln\left[\left(\frac{Y_{TR}}{Y_{TR}-1}\right)\right]$ (11); sendo

Y_{TR} a variável reduzida da distribuição de Gumbel, *TR* é o período de retorno.

Para a determinação da intensidade de chuva para diferentes tempos de duração, aplicou-se o método de desagregação das chuvas, relacionando uma chuva observada, com uma chuva de 24 h, através da multiplicação das variáveis reduzida como os coeficientes de desagregação (Tab. 4), conforme Aragão et al. (2013).

A intensidade de chuva foi calculada através da relação entre as alturas máximas de chuvas estimadas e os tempos de duração, aplicando a seguinte equação:

$I = \frac{P_{(mm)}}{t}$ (12); sendo

I a intensidade da chuva, P é a altura de chuva em mm e, t é o tempo de duração em horas.

Tabela 4 - Coeficientes de desagregação para diferentes durações de chuvas.

Relação entre alturas pluviométricas	Coeficientes de desagregação
1h para 24h	0,42
2h para 24h	0,48
3h para 24h	0,54
4h para 24h	0,60
5h para 24h	0,66
6h para 24h	0,72
8h para 24h	0,78
12h para 24h	0,85
18h para 24h	0,97
24h para 24h	1,10

Fonte: CETESB (1986).

Para relacionar a intensidade duração e frequência das precipitações, foi necessário determinar os parâmetros da equação de geral de intensidade, segundo Rodrigues et al. (2008).

$$i = \frac{k * T^m}{t^n} \quad (13);$$ onde

i é a intensidade máxima média de chuva (mm h^{-1}), *T* é o tempo de retorno (anos), *t* é o tempo de duração das chuvas (min) e, *k, b, m* e *n* são os parâmetros de ajuste. Para determinar os parâmetros, a anterior equação foi expressada como uma função potencial, da seguinte forma:

$d = k * T^m \longrightarrow I = \frac{d}{t^c} \longrightarrow I = d * t^{-c}$; para obtenção dos parâmetros *d* e *c* foi necessário aplicar regressão potencial das intensidades de chuvas e os tempos de duração, para cada um dos períodos de retorno.

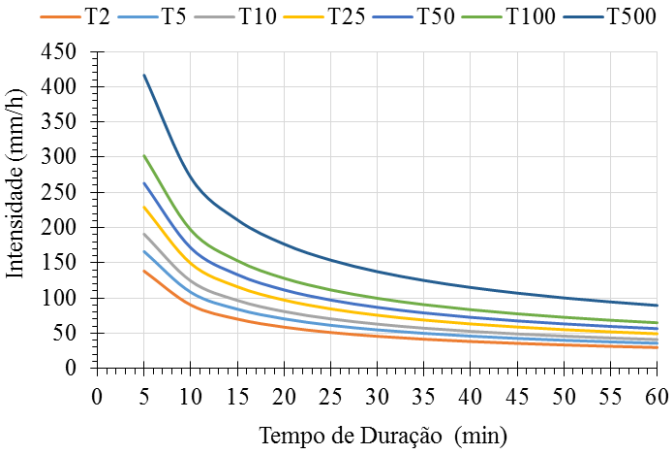
Para a obtenção dos parâmetros *k* e *m* realizou-se uma regressão potencial entre os parâmetros *d* e os períodos de retorno. Para obter o valor do parâmetro *c*, calculou-se a média de todos parâmetros encontrados. Encontrados os parâmetros de ajuste da equação geral de intensidade, duração e frequência, realizou-se a curvas IDF para cada tempo de retorno e duração das chuvas. Na seguinte Figura 3 e na seguinte Tabela 5, aprestam-se as curvas de intensidade, duração e frequências as suas respetivas precipitações tabeladas.

Tabela 5 - Intensidades de chuva (mm min^{-1}) classificadas por duração e tempo de retorno.

Frequência	Duração em minutos											
Anos	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	138,25	90,03	70,05	58,63	51,06	45,62	41,47	38,18	35,49	33,25	31,35	29,70
5	166,02	108,11	84,12	70,40	61,32	54,78	49,79	45,84	42,62	39,93	37,64	35,67
10	190,67	124,16	96,61	80,85	70,43	62,91	57,19	52,65	48,95	45,86	43,23	40,97
25	228,96	149,10	116,01	97,09	84,57	75,55	68,67	63,23	58,78	55,07	51,92	49,19
50	262,96	171,24	133,24	111,51	97,13	86,76	78,87	72,61	67,51	63,25	59,63	56,50
100	302,01	196,67	153,02	128,07	111,55	99,65	90,58	83,40	77,53	72,64	68,48	64,89
500	416,52	271,23	211,04	176,62	153,84	137,43	124,92	115,02	106,93	100,18	94,44	89,49

Fonte: Ortiz (2015).

Figura 3 - Curvas de Intensidade, duração e frequência – Carpina, Pernambuco.



Fonte: Ortiz (2015).

A seguinte fórmula matemática, aprestam a equação representativa de Intensidade, duração e frequência, para o município de Carpina, PE:

$$I = \frac{325{,}9154 * T^{0{,}199737}}{t^{0{,}61885}}$$

donde, T é a frequência ou tempo de retorno em anos; o tempo expressado em minutos.

O simulador de chuva utilizado foi do tipo pendular, com bico aspersor tipo “Veejet 80-100”, da Spraying Systems Company, que fica na parte central e superior da armação, a 2,87m de altura do solo, conforme descrito por Santos et al. (2009).

Para simular as chuvas utilizou-se uma motobomba a gasolina Buffalo de 5CV, autoescorvante, um sistema hidráulico de tubulação de 2,54 cm de diâmetro calibrado, conforme os dados hidráulicos de pressão e a intensidade do bico-aspersor descritas por Montebeller (2001), na Tabela 6 apresentam-se os valores de intensidade de precipitação para diferentes pressões de serviço:

Tabela 6 - Valores de intensidade de precipitação e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) obtidos com o bico 80.100, para diferentes pressões de serviço.

Bico Veejet	Pressão (kPa)	Ip (mm h^{-1})	CUC (%)
80.100	13,6	34,2	29
	20,4	40,9	69
	27,2	40,5	81
	34,0	42,5	88

Montebeller (2001).

Fonte: Ortiz (2015).

Para realizar a simulação de chuvas, foi necessário obter pressões de carga de serviço de 45 kPa, para obter chuvas igual ou levemente superior do que 39,93 mm h^{-1}, para reduzir os efeitos de vento que alteram a distribuição e homogeneidade da chuva.

A chuva simulada foi classificada como chuva forte segundo Souza et al. (2012), pois apresentou uma intensidade máxima superior a 18,6mm e inferior de 55,3 mm em 24 horas. A frequência de retorno foi curta de 5 anos, com longa duração 50min e de alta intensidade de 39, 34 mm h^{-1}.

Em solo sem cobertura vegetal e imediatamente antes da colheita, em cada área experimental de cana-de-açúcar foram realizadas 3 simulações de chuvas, utilizando uma parcela de erosão em ferro de 1m de largura e 3m de comprimento e altura de 0,35m, introduzida na profundidade no solo de 20 cm e deixando um sobressaído da chapa de 15 cm da superfície, como também, foram determinadas as inclinações das áreas.

A uniformidade das chuvas simuladas foram avaliadas empregando-se o coeficiente de Christiansen, descrito por, Montebeller (2001).

$$CUC = 100\ (1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}|Xi - \bar{X}|}{n\bar{X}}) \quad (14);$$ em que:

CUC é o coeficiente de uniformidade de Christiansen, *Xi* é a lamina precipitada em cada coletor, $\bar{X}$ é a lamina média precipitada e, *n* é o número de copos coletores. A intensidade média de precipitação de água foi determinada pela relação entre a lâmina média de água obtida nos coletores e o tempo de aplicação Montebeller et al. (2001).

A perda de solo foi avaliada com a coleta de sedimentos gerados pela enxurrada de água e analisada conforme Santos et al. (2009) e, com a aplicação da seguinte expressão matemática de Taxa de desagregação do solo (kg m^2 s^{-1}), proposta por Cogo (1978):

$$D = \frac{Mss}{A.Dc} \quad (15);$$ em

que, *Mss* é a massa do solo seco desagregado (kg), *A* é área da parcela (m^2) e *Dc* é a duração da coleta (s).

Na seguinte Figura 4, note-se da representação da parcela de erosão, a avaliação do comportamento da chuva com uso de pluviômetros, e a utilização do simulador de chuva:

Figura 4 - Avaliação do comportamento das chuvas simuladas na parcela de erosão, em um sistema produtivo de cana-de-açúcar.

Fonte: Ortiz (2015).

A perda de solo "*Ps*" (kg ha^{-1}) foi calculada aplicando a seguinte equação:

$$Ps = \frac{\Sigma(Q.Cs.t)}{A} \quad (16);$$ sendo,

Q é a vazão (L s^{-1}), *Cs* é concentração de sedimentos (kg L^{-1}), *t* intervalo entre as coletas (300 s) e *A* é a área da parcela (m^2), segundo Cassol et al. (2004). A Figura 5 ilustra o processo de coleta das enxurradas utilizadas no estudo:

Figura 5 - Coleta de sedimentos de solo erodido, durante uma simulação de chuva, de um sistema produtivo de cana-de-açúcar.

Fonte: Ortiz (2015).

A taxa de infiltração foi obtida pela diferença entre a intensidade de precipitação e a taxa de escoamento superficial resultante (Brandão et al., 2009).

A erodibilidade do solo foi determinada utilizando a erodibilidade do modelo WEPP, conforme Franco et al. (2012), aplicando a seguinte expressão:

$$Ki = \frac{Di}{I^2 * Sf} \quad (17);$$ onde:

Ki é o fator de erodibilidade do solo entressulcos (kg s^{-1} m^{-4}); Di é a taxa de desagregação do solo (kg m^{-2} s^{-1}); I é a intensidade da chuva (m s^{-1}); Sf é o fator de declividade do solo.

O fator de declividade do solo é ajustado pela seguinte equação:

$$Sf = 1{,}05 - 0{,}85e^{-4sen\theta} \quad (18);$$ onde

θ representa o angulo do declive em graus, conforme mencionado por Machado et al. (2012). O fator Sf é 0,2 para declive plano e 1 para declive de 45° Cassol et al. (2004).

5.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A estatística permitiu garantir a validade dos dados coletados, das hipóteses e, além disso, verificar se as eventuais discrepâncias entre os resultados previstos e os dados coletados são suficientes para justificar uma resposta.

Nesta pesquisa a estatística descritiva dos valores mínimo, média, mediana, máximo, desvio padrão, foram os métodos científicos e as ferramentas para a organização das coletas. Para Analisar a precisão do experimento, verificar a acurácia nos métodos de amostragem e análises dos atributos físicos, foram feitas com o coeficiente de variação (C.V), pois é um critério valido para avaliar a precisão segundo Ceddia et al. (2008). O C.V. dos atributos

físicos do solo forma estimados conforme Tavares et al. (2015), e considerados segundo Warrick e Nielsen (1980), baixa variabilidade quando C.V. < 12%; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade quando C.V. > 60%.

A tendência ou relações, foi determinado pelo coeficiente de correlação de Pearson, no qual espere-se uma tendência de 100%, determinando assim a proporção de relação dos dados experimentais e os dados estimados (MUKAKA, 2012).

Para a verificação da normalidade da variância dos dados, forma sometidos ao teste de *Kolmogrov-Smirnov* (K-S) com grau de 95% de confiança (nível de significância (α) de 5%), caso os dados não apresentaram distribuição normal, será necessário realizar transformações destes.

Para comparação de diferenças ou similaridade entre as unidades experimentais, aplicou-se a técnica multivariada de *Cluster Analysis* ou também conhecida como agrupamento de análises de conglomerado; esta técnica engloba uma série de diferentes métodos e algoritmos para agrupar objetos do mesmo tipo nas respectivas categorias. Em outras palavras *cluster analysis* é uma ferramenta de análise que visa a triagem de diferentes objetos em grupos, de uma forma que o grau de associação entre dois objetos é máximo se eles pertencem ao mesmo grupo e mínimo em caso contrário (FERREIRA NETO; PEROBELLI, 2013; GOMES et al., 2014)

Para a formação dos grupos aplicou-se o método hierárquico, ou seja, as unidades experimentais são agrupadas de modo crescente, produzindo uma arvore de classificação denominado Dendograma. Para a classificação dos conglomerados utilizou-se a Distância euclidiana, a qual reduze todos os grupos em um único grupo final, aplicando o método do Ward para o análises das distancias dos grupos (ANDERBERG, 1973).

Para o desenvolvimento e a realização dos processos e análises matemáticos estatísticos, utilizou-se os seguintes recursos informáticos: para as análises estatística descritiva o programa Excel 2013 e, para as aplicações da estatística multivariada o programa Statgraphics Centurion XVI.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 QUALIDADE FÍSICA DOS SOLOS

Na avaliação da qualidade e os atributos físico do solo da Floresta nativa foram tomados como a base de análises das caraterísticas físicas, pois é o ponto de referência e controle, por trata-se de um sistema em equilíbrio e sem intervenção humana, e além disso, por apresenta a melhor qualidade no sistema, conforme foi mencionado por Brady e Weil (2008).

Os atributos físicos analisados em cada uma das áreas experimentais estão classificados pelo uso do solo com o período de produção, e também, apresentaram-se os resultados descritivos de cada um dos tributos, Tabela 7.

Os C.V. encontrados nas variáveis físicas dos solos são classificados como de baixa variabilidade e em algumas outras variáveis como média segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980). De maneira geral note-se que as variáveis tiveram baixo coeficiente de variação, garantindo precisão nos métodos e nos resultados obtidos dos atributos físicos utilizados como critérios de comparação.

Entre os atributos físicos que apresentaram a melhor resposta em quanto ao coeficiente de variação foi a densidade do solo e a porosidade total (determinada a partir da densidade da partícula e a densidade do solo) pois apresentaram C.V. inferiores de 1%, comportamento também presenciado por Ceddia et al. 2008 e considerados de baixa variação.

A resistências à penetração em todas áreas experimentais tiveram a maior variação, tanto nas medições feitas em via "seca" como também, em via "úmida", (considerada seca quando o conteúdo de água foi igual ou inferior de 0,10 $g.g^{-1}$ e, úmida quando foi igual ou superior a 0,30 g g^{-1}), fato encontrado também por Souza et al. 2006a, Ceddia et al. 2008, e Santos et al. 2012, os quais atribuíram essa resposta a presença não uniforme de água a longo do perfil do solo.

Os valores do C.V. de 54% no comportamento da macroporosidade da área experimental 1F foi elevado segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980), comportamento também mencionado nos resultados obtidos por Souza et al. (2004), no estudo da variabilidade espacial de atributos físicos do solo, encontrando valores elevados de C.V. na macroporosidade para solos com densidade de 1,4 g cm^{-3}.

Tabela 7 - Analises descritivas dos dados das propriedades físicas dos solos das diferentes áreas experimentais de cana-de-açúcar e de uma floresta nativa.

Uso do solo	Variáveis	Mín.	Média	Máx.	Mediana	D.P.	C.V. (%)
	Densidade do Solo (g.cm^{-3})	1,80	1,80	1,81	1,80	0,00	0,08
	Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,31	0,32	0,32	0,32	0,00	0,56
	[1]I.E.A. (%)	69,60	72,05	75,40	71,40	2,31	3,20
	[2]A.T.D. (g kg^{-1})	30,00	44,00	68,00	42,00	13,08	29,74
	[3]G. Fl. (%)	58,00	65,94	75,00	64,46	7,99	12,12
1F	[4]C.O. (g kg^{-1})	13,63	14,45	15,60	14,34	0,76	5,23
	[5]M.O. (g kg^{-1})	23,45	24,86	26,83	24,66	1,30	5,23
	[6]PMA$_{-0,006}$ (cm^3 cm^{-3})	0,02	0,06	0,10	0,06	0,03	54,08
	[7]PMI$_{-1,5}$ (cm3 cm-3)	0,25	0,27	0,29	0,28	0,01	4,91
	[8]Res. Pent. (MPa) – Seca	3,40	4,20	5,07	4,17	607,15	14,55
	Res. Pent. (MPa) - Úmido	0,53	2,17	3,05	2,52	1003,18	46,18
	Densidade do Solo (g.cm^{-3})	1,73	1,74	1,75	1,74	0,01	0,35
	Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,34	0,34	0,35	0,34	0,00	0,67
	I.E.A. (%)	69,60	72,05	75,40	71,40	2,31	3,20
	A.T.D. (g kg^{-1})	38,00	40,67	42,00	41,00	1,63	4,02
	G. Fl. (%)	67,19	70,55	75,00	69,94	3,36	4,76
3F	C.O. (g kg^{-1})	12,15	15,50	18,15	15,71	1,94	12,52
	M.O. (g kg^{-1})	20,89	26,65	31,22	27,01	3,34	12,52
	PMA$_{-0,006}$ (cm^3 cm^{-3})	0,03	0,06	0,08	0,07	0,02	31,39
	PMI$_{-1,5}$ (cm3 cm-3)	0,25	0,28	0,30	0,29	0,02	5,80
	Res. Pent. (MPa) – Seca	1,53	3,20	4,88	3,020	1179,10	36,81
	Res. Pent. (MPa) - Úmido	0,60	1,57	2,71	1,41	737,54	46,93
	Densidade do Solo (g.cm^{-3})	1,56	1,56	1,57	1,56	0,00	0,23
	Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,41	0,41	0,41	0,41	0,00	0,34
	I.E.A. (%)	83,60	86,35	89,40	86,40	1,86	2,16
	A.T.D. (g kg^{-1})	32,00	36,67	42,00	37,00	3,50	9,55
	G. Fl. (%)	66,63	79,00	85,44	80,00	6,64	8,40
5F	C.O. (g kg^{-1})	17,95	23,88	25,59	25,10	2,97	12,43
	M.O. (g kg^{-1})	30,87	41,07	44,02	43,17	5,11	12,43
	PMA$_{-0,006}$ (cm^3 cm^{-3})	0,05	0,08	0,09	0,08	0,01	17,92
	PMI$_{-1,5}$ (cm3 cm-3)	0,30	0,33	0,35	0,33	0,02	5,06
	Res. Pent. (MPa) – Seca	1,52	2,36	3,02	2,47	593,47	25,08
	Res. Pent. (MPa) - Úmido	0,38	0,72	1,04	0,75	294,50	40,56
	Densidade do Solo (g.cm^{-3})	1,40	1,40	1,41	1,40	0,00	0,27
	Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,47	0,47	0,47	0,47	0,00	0,31
	I.E.A. (%)	85,60	87,88	89,60	88,15	1,41	1,61
	A.T.D. (g kg^{-1})	24,20	24,97	26,20	24,50	0,98	3,94
	G. Fl. (%)	88,71	90,14	90,81	90,33	0,76	0,84
FN	C.O. (g kg^{-1})	25,80	25,80	25,80	25,80	0,00	0,00
	M.O. (g kg^{-1})	44,38	44,38	44,38	44,38	0,00	0,00
	PMA$_{-0,006}$ (cm^3 cm^{-3})	0,07	0,09	0,12	0,08	0,02	19,41
	PMI$_{-1,5}$ (cm3 cm-3)	0,37	0,38	0,39	0,38	0,01	1,57
	Res. Pent. (MPa) – Seca	1,27	2,30	4,23	2,04	1069,47	46,53
	Res. Pent. (MPa) – Úmido	0,36	0,66	0,97	0,58	247,75	37,15

Fonte: Ortiz (2015).

[1]Índice de Estabilidade de Agregados; [2]Argila Total Dispersa; [3]Grau de Floculação; [4]Carbono Orgânico; [5]Matéria Orgânica, [6]Macroporos (-0,006Mpa); [7]Microporos (1,5MPa); [8]Resistência à penetração.

Conforme o teste de normalidade de K-S realizado em cada uma das variáveis física do solo utilizadas, podem ser modeladas adequadamente como uma distribuição normal (Tab.8), devido a que o P-valor em todas a variáveis foi menor quanto aos valores do teste, pelo qual, não se pode rejeitar a H_o e, aceta-se que os valores têm origem de uma distribuição

normal com 95% de confiança, permitindo realizar a analises e comparação dos dados, sem ser necessário fazer nenhum tipo de transformações.

Tabela 8 - Teste de distribuição de normalidade das propriedades físicas dos solos das diferentes áreas de produção de cana-de-açúcar e de uma floresta nativa.

Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnov				
Variáveis	$^{1}D_n^+$	$^{2}D_n^-$	D_{normal}	P-Valor
Densidade do Solo (g.cm^{-3})	0,16	0,24	0,24	0,0008
Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,22	0,17	0,22	0,0009
I.E.A. (%)	0,20	0,23	0,23	0,0015
A.T.D. (g kg^{-1})	0,16	0,10	0,16	0,0966
G. Fl. (%)	0,09	0,12	0,12	0,4322
C.O. (g kg^{-1})	0,22	0,25	0,25	0,0006
M.O. (g kg^{-1})	0,22	0,25	0,25	0,0006
$P_{MA-0,006}$ (cm^3 cm^{-3})	0,13	0,19	0,13	0,3295
$P_{MI-1,5}$ (cm^3 cm^{-3})	0,18	0,13	0,18	0,041
Res. Pent. (MPa) - Seca	0,10	0,13	0,13	0,4175
Res. Pent. (MPa) - Úmido	0,19	0,15	0,19	0,0228

Fonte: Ortiz (2015).
[1]Distribução Normal Positiva; [2]Distribuição normal negativa.

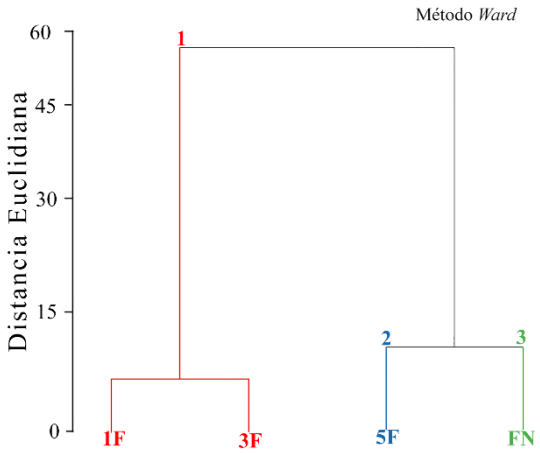
Esta normalidade encontrada em atributos fiscos do solo também foi verificada por Aquino et al. (2015) e Souza et al. (2004), estudando a relação espacial dos atributos físicos de solos agrícolas com cana-de-açúcar. A classificação e agrupamento dos sistemas de produção de cana-de-açúcar e da floresta nativa, apresentam-se na Tabela 9 de matrizes e também na Figura 6 do dendograma de classificação.

Tabela 9 - Matriz de Classificação e agrupamento dos diferentes sistemas de produção de cana-de-açúcar e da floresta nativa pelas suas caraterísticas físicas.

Critérios de classificação Euclidiana				
Uso do solo				
	1F	3F	5F	FN
1F	0,00			
3F	1302281,61	0,00		
5F	5361023,27	1417268,75	0,00	
FN	5783750,62	1638446,56	8280,91	0,00
Matriz de distancias ultra métricas				
Uso do solo				
	1F	3F	5F	FN
1F	0,00			
3F	1302281,61	0,00		
5F	6444963,34	6444963,34	0,00	
FN	6444963,34	6444963,34	8280,91	0,00
Correlação cofonética	0,644			

Fonte: Ortiz (2015).

Figura 6 - Dendograma de agrupamento dos sistemas, pelas suas caraterísticas físicas do solo; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015).

Segundo os resultados de conglomeração foram classificados 3 grupos principais: o grupo 1, composto pelas áreas experimentais 1F e 3F as quais tiveram a mesmas distancia euclidiana; o grupo 2 composto só com a área experimental 5F e; o grupo 3 composto pela FN. Os grupos 1 e 2, são classificados como grupo diferentes mas compartilha a mesma distância euclidiana, o que significa, que este grupos tem algumas similaridades no comportamento dos atributos físico do solo; As análises de conglomeração apresentou alta correlação cofonética, o que evidenciou consistência na formação e classificação dos grupos segundo Carngnelutti Filho et al. (2010).

No estudo de indicadores de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso de manejo florestal, também tiveram a formação de diferentes agrupamentos, devido às alterações nos atributos físicos do solo que causam deterioração (Silva et al., 2012)

Na Tabela 10 apresentassem a ponderação dos atributos físico das funções de capacidade de armazenamento de água e de suporte radicular, utilizadas para a determinação dos índices de qualidade física dos solos através do modelo aditivo.

As normalizações dos indicadores foram padronizadas para uma única escala, obtendo os escores para cada um dos indicadores de qualidade, na Tabela 11 apresentassem os valores de S, B e $L_{-000,1}$, com os respetivos escores.

Os dados obtidos avaliando as funções caraterísticas e dos seus índices de qualidade dos solos, a área experimental 1F apresentou o menor índice de qualidade física 0,0051, seguido pela 3F com um índice de qualidade de 0,056. As áreas experimentais que apresentaram os maiores índices de qualidade foram a área 5F e a FN, com índices de 0,81 e de 0,96 respetivamente.

Tabela 10 - Ponderação das funções principais e dos indicadores de qualidade.

Função Principal	Ponderado da função	Indicadores de Qualidade	Ponderado do indicador
Capacidade de armazenamento e retenção de água	0,5	Porosidade Total	0,3
		Macroporos (0,006MPa)	0,3
		Microporos (-1,5MPa)	0,1
		Matearia orgânica	0,2
		Índice de Estabilidade de agregados	0,1
Suporte radicular	0,5	Densidade do solo	0,30
		Argila Total Dispersa	0,15
		Grau de Floculação	0,15
		Carbono orgânico	0,20
		Resistencia à penetração – seca	0,10
		Resistencia à penetração – úmida	0,10

Fonte: Ortiz (2015).

Tabela 11 - Normalização dos valores em uma mesma escala e escores (υ) da função de *Wymore.*

Variáveis	Parâmetros de ajuste			Uso do solo e escores			
	S	B	$L_{-0,001}$	1F	3F	5F	FN
Densidade do Solo	-1,391	1,627	1,402	0,011	0,047	0,915	1,000
Porosidade Total	2,900	0,386	0,318	0,000	0,051	0,743	0,956
[1]I.E.A	0,020	79,583	72,050	0,000	0,000	0,975	0,987
[2]A.T.D	-0,099	36,575	24,967	0,011	0,073	0,485	1,000
[3]G. Fl	0,015	76,407	65,937	1,97E-17	0,055	0,695	0,968
[4]C.O	0,060	19,907	14,453	5,90E-11	0,022	0,858	0,930
[5]M.O	0,035	34,241	24,859	1,69E-11	0,022	0,859	0,930
[6]$P_{MA-0,006}$	14,000	0,071	0,056	0,000	0,022	0,830	0,914
[7]$P_{MI-1,5}$	2,600	0,316	0,275	0,000	0,020	0,640	0,942
[8]Res. Pent. (MPa) – Seca	-3,00E-04	3010,445	2298,698	0,050	0,357	0,990	1,000
Res. Pent. Úmido	-0,003	1284,272	666,959	2,56E-04	0,098	0,895	1,000

Fonte: Ortiz (2015).
[1]Índice de Estabilidade de Agregados; [2]Argila Total Dispersa; [3]Grau de Floculação; [4]Carbono Orgânico; [5]Matéria Orgânica; [6]Macroporos (-0,006Mpa); [7]Microporos (1,5MPa); [8]Resistência à penetração.

Os cálculos realizados para a obtenção dos índices de qualidade definitiva de cada uma das áreas avaliadas, estão apresentados na Tabela 12. Para Melo Filho et al. (2007), os IQF são classificados assim: <0,50 (ruim), entre 0,50 e 0,70 (media), e ≥ 0,71 (ótima).

Ora assim observa-se que as áreas 1F e 3F enquadram-se na classificação de qualidade ruim e, as áreas 5F e FN enquadram-se como ótima qualidade. Segundo BORGES et al. (1999), Melo Filho et al. (2007) e Leandro, Silva, e Cardoso (2012), presenciaram que valores de IQF inferiores a 0,46, conferem solos de baixa qualidade, pois essas condições do solo diminuem a produção vegetal.

Tabela 12 - Índice de qualidade física (IQF) do solo para 3 áreas produtivas de cana-de-açúcar e uma floresta nativa.

Uso do solo	Função Principal	Ponderado (A)	IQ	Ponderado (B)	X (média)	Escores (C)	B x C	Soma (D)	AxD	Índice
			P.T.1	0,30	0,32	5,9E-09	2E-09			
	Capacidade de Armazenamento de água	0,5	PMA.2	0,30	0,06	1E-05	3E-06			
			PMI.3	0,10	0,27	4,5E-07	4E-08	3E-06	2E-06	
			M.O.4	0,20	24,86	1,7E-11	3E-12			
			I.E.A.5	0,10	72,05	6,7E-26	7E-27			
1F			D.S.6	0,30	1,80	0,01	0,003			0,005
			A.T.D.7	0,15	44,00	0,01	0,002			
	Suporte Radicular	0,5	G.Fl.8	0,15	65,94	0,00	3E-18	1E-02	0,005	
			C.O.9	0,20	14,45	0,00	1E-11			
			R.P. S.10	0,10	4173,71	0,05	0,005			
			R.P.Ú.11	0,10	2172,41	2,6E-04	3E-05			
			P.T.	0,30	0,34	0,05	0,015			
	Capacidade de Armazenamento	0,5	PMA.	0,30	0,06	0,02	0,006			
			PMI.	0,10	0,28	0,02	0,002	3E-02	0,014	
			M.O.	0,20	26,65	0,02	0,004			
			I.E.A.	0,10	72,05	6,7E-26	7E-27			
3F			D.S.	0,30	1,74	0,05	0,014			0,056
			A.T.D.	0,15	40,67	0,07	0,011			
	Suporte Radicular	0,5	G.Fl.	0,15	70,55	0,06	0,008	8E-02	0,042	
			C.O.	0,20	15,50	0,02	0,004			
			R.P. S.	0,10	3203,45	0,36	0,036			
			R.P.Ú.	0,10	1571,71	0,10	0,01			
			P.T.	0,30	0,4105	0,74	0,223			
	Capacidade de Armazenamento	0,5	PMA.	0,30	0,0817	0,83	0,249			
			PMI.	0,10	0,3263	0,64	0,064	0,81	0,403	
			M.O.	0,20	41,074	0,86	0,172			
			I.E.A.	0,10	86,35	0,98	0,098			
5F			D.S.	0,30	1,5621	0,91	0,274			0,808
			A.T.D.	0,15	36,667	0,49	0,073			
	Suporte Radicular	0,5	G.Fl.	0,15	79,002	0,70	0,104	0,81	0,406	
			C.O.	0,20	23,88	0,86	0,172			
			R.P. S.	0,10	2365,9	0,99	0,099			
			R.P.Ú.	0,10	726	0,90	0,09			
			P.T.	0,30	0,4708	0,96	0,287			
	Capacidade de Armazenamento de água	0,5	PMA.	0,30	0,0879	0,91	0,274			
			PMI.	0,10	0,3809	0,94	0,094	0,94	0,47	
			M.O.	0,20	44,376	0,93	0,186			
			I.E.A.	0,10	87,883	0,99	0,099			
FN			D.S.	0,30	1,4024	1,00	0,3			0,96
			A.T.D.	0,15	24,967	1,00	0,15			
	Suporte Radicular	0,5	G.Fl.	0,15	90,135	0,97	0,145	0,98	0,491	
			C.O.	0,20	25,8	0,93	0,186			
			R.P. S.	0,10	2298,7	1,00	0,1			
			R.P.Ú.	0,10	666,96	1,00	0,1			

Fonte: Ortiz (2015).
1Porosidade total; 2Macroporosdiade; 3Microporosidade; 4Materia orgânica; 5Indice de estabilidade de agregados; 6Densidade do solo; 7Argila total dispersa; 8Grau de floculação; 9Carbono orgânico; 10Resistencia à penetração via seca; 11Resistencia à penetração via úmida.

As alterações nas caraterísticas e propriedades do solo causadas pelos manejos e as práticas agrícolas utilizadas e o tempo de produção, são ótimos atributos de avaliação para a

qualidade do solo, pois permitem mediar, avaliar, comparar, relacionar e qualificar através de modelos matemáticos estas alterações (LIMA et al., 2007; SILVA et al., 2005).

Note-se que as áreas 1F e 3F com mais de 40 anos de uso do solo na produção de cana-de-açúcar, tiveram os piores índices de qualidade em comparação com a área de produção 5F (15 anos de produção de cana-de-açúcar) que apresentou qualidade física semelhante da floresta nativa. Segundo Silva et al. (2015), e Iarema et al. (2011), áreas agrícola que permaneceram por mais tempo no uso agrícola, são as que aprestam baixa qualidade física, devido aos manejos que os solos têm recebido no tempo.

A área experimental 5F apresentou diminuição na sua qualidade física em comparação com a FN, não sendo preocupante, pois o fato de ter mudado sua condição inicial para ser uma área de produção agrícola, manteve ótima qualidade física do solo, tanto nas funções de armazenamento de água e na função de suporte radicular.

Segundo Silva et al. (2012), avaliando os índices de qualidade física de sistemas de produção de eucalipto e com manejo de revolvimento mínimo e manual do solo, observaram deterioração dos atributos físicos apresentando redução na QS de 63% quando foi comparada com a floresta nativa.

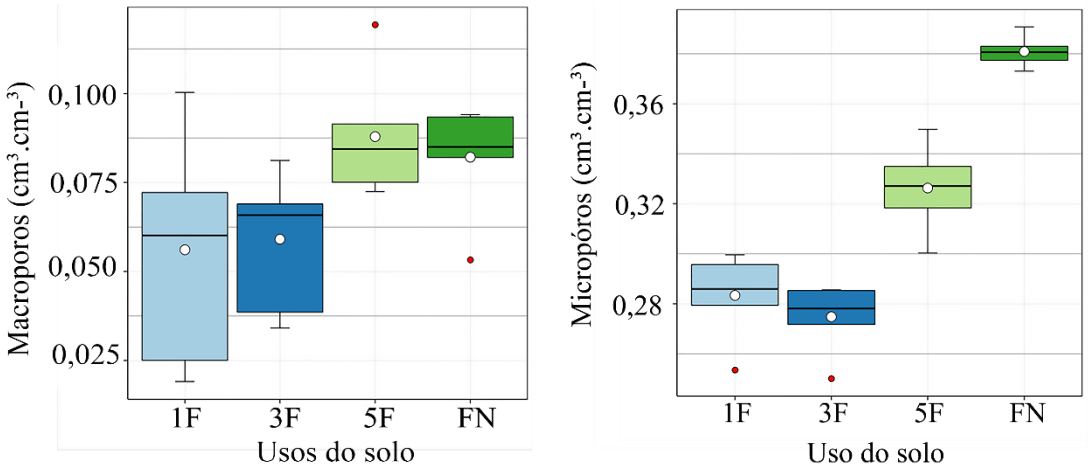
Na avaliação da qualidade do solo de produção de banana e milho realizada por Dantas et al. (2012), encontraram o mínimo valor de QS de 0,77 para banana e 0,56 de milho, atribuindo essas resposta a baixo desempenho nas funções de retenção de água e a resistência a degradação.

Estes resultados de qualidade física do solo permite observar indiretamente o efeito causado pelos sistemas de manejo adaptados na produção da cana-de-açúcar e, além disso, permite estabelecer indicadores de qualidade que permitirão futuras avaliações da qualidade (D'ANDRÉA et al., 2002; TORRES et al., 2015).

Vasconcelos et al. (2014), avaliou a qualidade física de diferentes sistemas de produção de cana-de-açúcar, utilizando como testemunha uma área cultivada com cana-de-açúcar em solo com condições naturais da Mata Atlântica e evidenciou que os sistemas cultivados com cana-de-açúcar por prolongado tempo tinham maiores alterações nos atributos físicos do solo, do que a área cultiva na Mata Atlântica.

Na função de armazenamento e retenção de água no solo, as porosidades das áreas 1F e 3F aprestaram diferenças com as áreas 5F e FN como são apresentadas na Figura 7 com os valores de macros e de microporos das diferentes áreas.

Figura 7 - Macro e microporos do solo sistemas produtivos de cana-de-açúcar e uma floresta nativa. 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015).

As áreas de produção de cana-de-açúcar (1F e 3F) com mais de 40 anos de uso tiveram diminuição na quantidade de macros e microporos, principalmente na diminuição de microporosidade, já na área de produção de 15 anos e na floresta nativa nota-se maior presença de poros; a diminuição de poros nas áreas 1F e 3F foi a causa de obter baixo índice de qualidade física do solo.

Pragana et al. (2012) também afirmou que a densidade, macro e microporosidade, no solo são os atributos que podem ser utilizados como indicadores da qualidade, pois são muitos susceptíveis para detectar variações e ou alterações no solo.

A diminuição dos microporos também foi observada por Ceddia et al. (1999) e mencionaram maior diminuição nos microporos que nos macroporos de 4% e 1% respetivamente, quando são realizadas práticas convencionais da cana-de-açúcar e queima da palha em solos do tabuleiro.

Corroborando com Richard et al. (2001), e Tarawally et al. (2004), a porosidade foi alterada principalmente pelo manejo e a compactação do solo, caracterizado principalmente pelo decréscimo da porosidade total e da macroporosidade e do aumento da microporosidade.

O decréscimo dos poros de maior diâmetro é causado pela ação dos equipamentos de preparo do solo ou pelo peso das máquinas que trafegam o solo com carga superior à máxima resistência interna dos agregados, destruindo os espaços inter-agregados que são de maior diâmetro, como também foi mencionado por Beutler et al. (2005).

A porosidade neste estudo foi representada por mais do 80% pela microporosidade e o restante pela macroporosidade, fato similar encontrado por Ceddia et al. (1999), em solos tabuleiros franco arenosos com sistemas de produção de cana-de-açúcar, justificando esta variação na porosidade pela presencia de teor de argila (10 a 17%).

Corroborando com Ceddia et al. (1999), as práticas de queima de cana-de-açúcar diminui a quantidade de matéria orgânica no solo e altera a porosidade, pois práticas de queima como da palha deixa os agregados mais frágeis e expostos ao efeitos da chuva, maquinaria agrícola que termina reduzindo o tamanho destes e consequentemente reduz a porosidade do solo.

No estudo realizado por Souza et al. (2015), no controle de tráfico e qualidade física do solo em um sistema produtivo de cana-de-açúcar, anota que a predominância macroporos na camada de 15 e 27 cm de profundidade e evidenciando também variação na porosidade total de 6% a 20% causada pelo uso das máquinas agrícolas e pode limitar a infiltração e crescimento radicular da cana-de-açúcar.

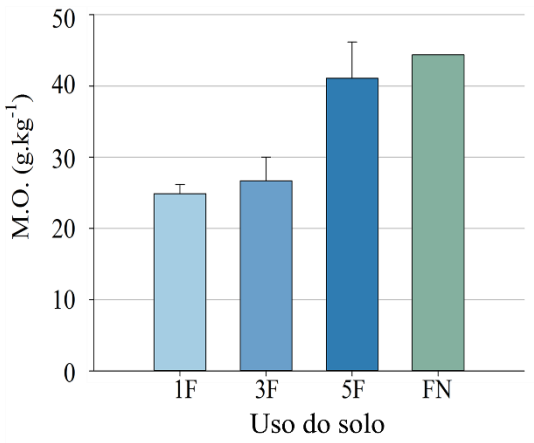
A matéria orgânica também é protagonista na função de armazenamento e retenção de água no solo, a Figura 8, apresenta os valores do conteúdo de MO nas áreas 1F e 3F e as áreas 3F e a FN.

A produção de cana-de-açúcar por mais de 40 anos, tem provocado diminuição do conteúdo de MO nas áreas experimentais 1F e 3F, em aproximadamente a metade do conteúdo presente nas áreas 5F e FN, embora nos processos de queima da cana-de-açúcar, feita para facilitar o processo da sua colheita é reincorpora o material orgânico no solo, mesmo assim, os estoques de matéria orgânica na área 5F e FN ainda são superiores.

Para a função de capacidade de armazenamento de água, muitos autores (MELO FILHO et al., 2007; CAVALIERI et al., 2011; STEFANOSKI et al., 2013; SOTASHI et al., 2015) têm relacionado a matéria orgânica com a capacidade de retenção de água no solo, embora a matéria orgânica não seja uma caraterística própria do solo, afeta significativamente a capacidade de retenção de água, da mesma maneira neste estudo é considerada positiva a influencia da materia organica na função de armazenamento de água no solo.

Segundo Sotashi et al. (2015), observaram maior armazenamento de água no solo cultivado com milho quando tinha presença de resíduos orgânicos na superfície do solo, ou seja, plantios com cobertua do 90% a capasidade de armzenamento de água foi de 0,28 Kg Kg^{-1} e com a diminução de cobertura em 44% a armazenagem de ágia diminuiu para 0,23 kg kg^{-1}.

Figura 8 - Matéria orgânica do solo em áreas produtivas de cana-de-açúcar e uma floresta nativa. 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015).

Bayer e Bertol (1999) e Xavier et al. (2006) também notaram que os preparos do solo com a gradagem ou pelo uso de outras máquinas, aumenta o potencial de perda de matéria orgânica do solo, argumentando que a aeração causada, estimula a atividade microbiana na decomposição da MO, como também no rompimento dos agregados nos solos, consequentemente foi diminuída a capacidade do armazenamento da água no solo.

A mudança de um ecossistema natural para um sistema agrícola de cana-de-açúcar possivelmente levou ao declino da MO como aconteceu na área 1F, possivelmente o uso de máquinas com gradagem reduze o tamanho dos agregados, assim como também, mobiliza e dinamiza a decomposição da MO deixando o solo desprotegido ou até em ausência da MO.

Corroborando com Ceddia et al.(1999) e Shinitzer (1991) a capacidade de retenção de água no solo está diretamente relacionada com o tipo de solo, de agregados, de estrutura e, também pela dinâmica e a capacidade de forma novas estrutura ou ligação entre as partículas de solo, a qual aumenta em função da presença da matéria orgânica, da dinâmica da sua decomposição e dos tipos de compostos orgânicos gerados.

Diferentes autores (CARDOSO et al., 2015, MOREIRA; MALAVOLTA, 2004) mencionam a forte influência da MO na capacidade de retenção de água no solo, especialmente este efeito é mais positivo quando é de origem natura do que os resíduos de origem agrícola.

Nesta pesquisa foi de importância utilizar sistemas de produção de cana-de-açúcar com manejo convencionais da região, onde a queima da palha é uma pratica que facilita a atividade de colheita e indiretamente é incorporada a MO no solo com cinzas geradas da

queima, porém estas incorporações tornam ineficientes como é percebido áreas 1F com 44 anos de produção de cana-de-açúcar.

Ceddia et al. (1999) e Luca et al. (2008) também perceberam diminuição nos estoques de matéria orgânica em solos canavieiros quando é realizada as práticas de queima de palha e, além disso, afirmam que a palha não queimada proporciona aumentos nos estoques da camada superficial do solo e melhora a interação da fração orgânica e mineral do solo.

Canellas et al. (2007) estudaram o comportamento e a qualidade da matéria orgânica no solo dos sistemas de produção de cana-de-açúcar com mais de 50 anos de produção em uma área com práticas de queima do palhiço e outra sem queima, também notaram a significativa afetação, pois com a queima do palhiço encontraram diminuiu até de 40 % nos estoques de MO

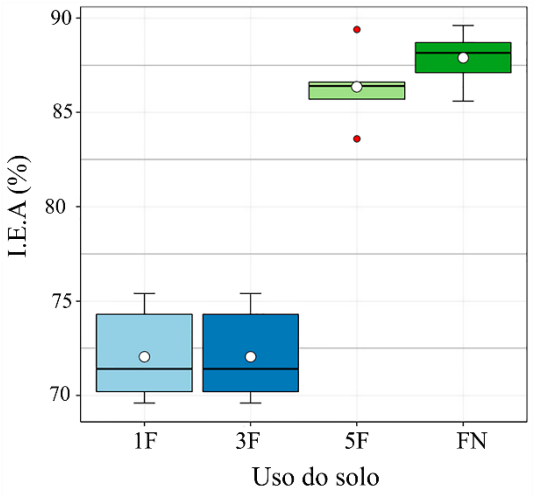
Entre os atributos para a avaliação da qualidade física do solo a matéria orgânica foi dos atributos importantes em participar na função de armazenamento e retenção de água no solo, tornado este atributo como ótimo indicador pela sua significativa influencia no solo, sensível variação de respostas e até pela facilidade mensuração.

Na função de armazém e retenção de água no solo, a estabilidade de agregados também foi indicador da qualidade física, na Figura 9 apresentam-se os IEA para as áreas de produção de cana-de-açúcar e da floresta nativa.

Os solos com longo tempo de produção e, especialmente, pela praticas utilizadas é, possivelmente, as causas da baixa estabilidade dos agregados do solo, note-se que as áreas 1F e 3F apresentaram os menores valos de IEA, já as áreas com poucos anos de produção (5F) ou sem nenhuma alteração como é caso da floresta nativa (FN) os agregados mostraram melhor comportamento no teste estabilidade de agregados.

A baixa estabilidade presente nas áreas 1F e 3F afetam a função de armazenamento e retenção de água no solo, pois este comportamento causa susceptíveis e perda de solo por fenômenos hídricos, desestruturação, selamentos e encrostramentos etc. consequentemente diminuem os espaços porosos, a infiltração da água, levando obter valores de baixa qualidade no solo.

Figura 9 - Índices de estabilidade de agregados de áreas de produção de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015).

A estabilidade dos agregados está fortemente relacionada com presença de matéria orgânica, quando os solos apresentam baixo conteúdo de matéria orgânica (Figura 8) também tiveram baixa estabilidade, possivelmente a falta de formação de novos agregados e/ou a falta de aglutinantes para manter os agregados causou perda da estabilidade nas 1F e 3F.

Corroborando com o estudo de perda de água e solo realizado por Netto et al. (2012), a estabilidade dos agregados não está diretamente relacionada com a retenção de água no solo e sim com a agregação do solo, pois eles observaram maior perda de água quando o solo apresentava baixa estabilidade dos agregados, para este estúdio as áreas com baixa estabilidade (1F e 3F) aprestaram menores diâmetros de poros o que se traduz na baixa capacidade infiltração de água no solo.

Santos et al. (2012) no estudo da estabilidade dos agregados em canaviais com e sem vinhaça, encontrou que a presencia de matéria orgânica originada do uso da vinhaça restabeleceu a estabilidade dos agregados, concordando com os resultados obtidos, pois na diminuição do conteúdo da matéria orgânica existe desagregação pela baixa estabilidade dos agregados.

Roque et al. (2010) e Góes et al. (2005) estudaram a estabilidade dos agregados do solo em sistemas produtivos de cana-de-açúcar e controle de trafego, também constataram o mesmo efeito deste estudo, redução na estabilidade em sistemas produtivos de cana-de-açúcar quando existiu contínuos revolvimentos do solo e a diminuição da matéria orgânica.

Nos estudos de Vasconcelos et al. (2010) e Demarchi et al. (2011) para a restauração dos agregados dos solo, utilizando resíduos orgânicos de vinhaça e utilização de cobertura vegetal, verificaram que a utilização destes melhora a estabilidade dos agregados, permitindo melhorar a estrutura a capacidade de armazenamento de água no solo e consideraram que a estabilidade de agregado é um bom indicativos do estado de qualidade física do solo.

Para a avalição da função de suporte radicular formam associados os indicadores de qualidade e/ou atributos físicos do solo que oferecem as condições estruturais e de suporte para as plantas e, além disso, indicadores sensíveis aos manejos.

A densidade do solo foi um dos indicadores avaliados na função do solo de suporte radicular, na Figura 10 apresentam-se os comportamentos das DS de cada uma as áreas experimentais avaliadas.

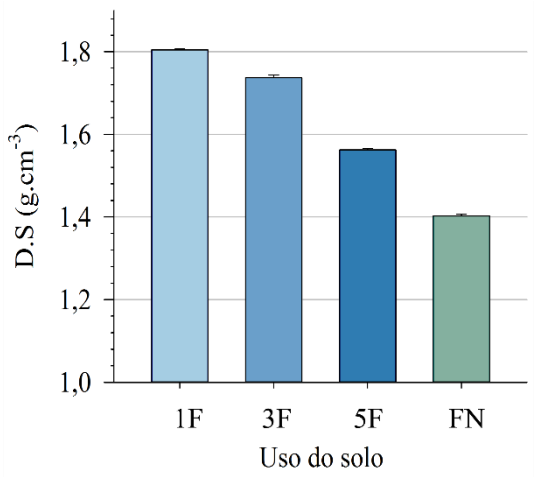
A DS foi um dos indicadores com maior participação teve na função de suporte radicular, para este caso o incremento da densidade foi considerado um motivo na diminuição no valor da qualidade física do solo, pois estes aumentos afetam consideravelmente a estrutura do solo, reduzindo os tamanhos dos poros e até causando compactação, impedimentos na penetração e o normal desenvolvimento das raízes.

As maiores DS foram observadas nas áreas 1F e 3F, alcançando valores até de 1,8 g cm^{-3} indicando redução dos espaços vazios que afetam o meio de suporte para a planta, já as áreas 5F e FN tiveram os menores valores da DS (Figura 10), apresentando o menor valor a FN por ser uma área sem nenhuma alteração antrópica que cause este efeito.

As altas DS do solo foram encontradas nas áreas onde foram usadas máquinas agrícolas pesadas e intervenção de passo numerosas pessoas, como também, indiretamente as técnicas nestes manejos (uso de máquinas em condições inadequadas de umidade) poderiam ser as principais causas nas alterações da DS.

Silva (2014), estudou indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física do solo em três áreas de cana-de-açúcar com manejo de solo convencional (uso intensivo de máquinas agrícola) em solos franco-argiloso-arenoso, também encontraram densidades do solo com valores de 1,65 – 1,82g cm^{-3} causadas pelo uso das máquinas agrícolas e, estes valores foram considerados críticos para as produções de cana-de-açúcar, já que, prejudicam o normal desenvolvimento dos sistemas radicular.

Figura 10 - Densidade do solo de sistemas produtivos de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015).

Corroborando com Klein (2006) a alta DS altera o espaço de suporte para as plantas, caso contrário, estimula o seu desenvolvimento, então para este estudo pode-se considerada ótima indicador para o suporte radicular mas também para o armazenamento de agua no solo, pois baixas DS permite o máximo de água disponível e o mínimo de restrições para o desenvolvimento das plantas.

Figueiredo et al. (2000), sugeriu que o aumento de DS é causada quando o trafego de maquinas é realizado excessivamente e em condições críticas de umidade, já nas áreas estudadas pode se afirmar que o aumento na DS foi causado pelo uso excessivo de maquinas agrícolas por mais de 40 anos.

A área 5F apresentou baixa DS com pouco incremento do seu valor em comparação da FN, mas os resultados podem ser considerados satisfatório para as produções de cana-de-açúcar e para a qualificação da qualidade solo, apesar de ter possivelmente aumentado a sua densidade após 15 anos, o solo mostra resistência da desestruturação causada com os manejos utilizados durante as últimas duas décadas para a produção.

O conteúdo de MO orgânica da área 5F foi de 41,07 g kg^{-1} significativamente superior do que as áreas 1F e 5F, o que pode ser a explicação da menor vulnerabilidade ao aumento da DS do solo, já que, a matéria orgânica possivelmente atua como redutor da pressão gerada nos agregados do solo pelo peso das máquinas agrícolas.

ZHANG et al.(1997) e Lemos Filho et al. (2008), no estudo da variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica, mencionaram também sobre o efeito positivo da matéria orgânica para reduzir os efeitos da compactação no solo, frisando que na comparação

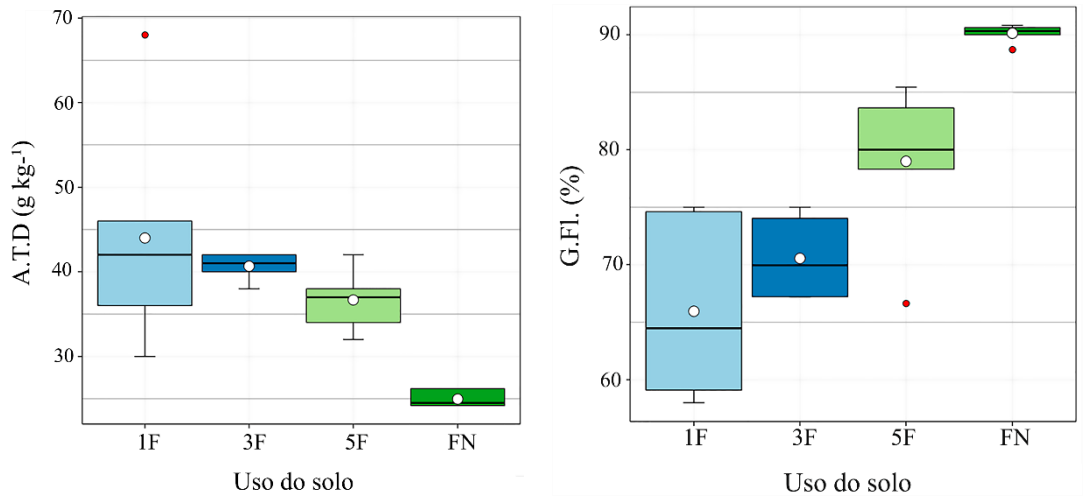
de camadas de solo com diferentes conteúdo de matéria orgânica, a camada mas menos afeta foi aquela que apresentou maior conteúdo de matéria orgânica, justificando esse comportamento à dispersão da pressão do peso das maquinaria sobre o solo.

Segundo Braida et al. (2010) o incremento em MO resultaria em aumento da força das ligações entre as partículas minerais do solo, e além disso, aumento da resistência do solo à deformação causada pela compressão e redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas.

A DS é um atributo físico do solo bastante sensível as mudanças e alterações causadas pelos manejos agrícola, é uma característica comum entre as pesquisas agrícolas pela fácil mensuração e pela importante informação obtida a partir desta sobre o estado do solo, e além disso, pelas interações com outras características e propriedades de solo, a DS torna-se com um dos melhores indicadores para o acompanhamento da qualidade física do solo.

A argila total dispersa e o grau de floculação foram também indicadores de qualidade física do solo para a função de suporte radicular, a Figura 11 apresenta os comportamentos da ATD e GFl das diferentes áreas experimentais.

Figura 11 - Argila total dispersa e grau de floculação de sistemas produtivos de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, FN floresta nativa.



Fonte: Ortiz (2015).

Os solos de 1F e 3F foram as áreas que mais argila dispersaram, como também, foram as que apresentaram as menores porcentagens de floculação dos agregados, estes comportamentos afetam na função de suporte radicular, ocasionando diminuição nos valores da qualidade física nestes solos.

Este tipo reposta dos atributos de dispersão e floculação pode comprometer a estrutura do solo, já que, a alta dispersão do solo pode aumentar os risos de perda de solo por fenômenos hídricos, como também, diminuição estabilidade dos agregados ao contato com água, e na redução da capacidade de manter e formar novos agregados dos solos e reduz a aptidão para suportar as plantas.

A elevada dispersão encontrada nas áreas 1F e 3F deixa mais propenso à deterioração da estrutura, como também, alterações na porosidade dos solos e, além disso, durante eventos

de chuva ou irrigação o solo pode apresentar problemas de entupimento dos poros, formação de novas estruturas com baixa macroporosidade e consequentemente causando camadas com impedimento de infiltração de água e alto escoamento superficial.

No caso da falta da capacidade de floculação dos agregados do solo das áreas 1F e 3F, limita à formação de novos agregados, novas estruturas com maior estabilidade e porosidade, ou seja, criar condições que facilitem e melhorem características de suporte do solo, aumentaram a eficiência e o desenvolvimento radicular das plantas, pois solos com melhor estruturação, aumenta os movimentos gasosos e a infiltração de água, estimulam o desenvolvimento e crescimento radicular.

No caso das áreas 1F e 3F o contínuo e intensivo uso das práticas de preparo do solo para a produção de cana-de-açúcar, aumento a susceptibilidade a dispersão dos agregados, e diminuiu a formação dos agregados por floculação, principalmente pela constante remoção e alteração física do solo, como também, a diminuição os conteúdos de matérias orgânicos, principais substâncias que permitem a cimentação dos agregados do solo, e promover as atividades microbianas responsável pela agregação.

Corroborando com Prado e Centurion (2001) quando são realizados preparos do solo para a produção de cana-de-açúcar em solo com baixo conteúdo de matéria orgânica e elevada umidade, os solos sofrem consequências nas sus propriedades físicas como a alta dispersão de argilas e sucessivamente aprestam outros fenômenos como encrostamento superficial, eluviação da argila, que terminar por diminuir a qualidade do solo.

Segundo Barbosa e Miyazawa (2009), Dantas et al. (2012), e Silva (2014), alta dispersão de argila aumentou a densidade dos solo nos horizontes superfícies superiores a 20 cm, devido à translocação deste material argiloso na profundidade, causando adensamento, diminuição da porosidade e aumento na resistência penetração do solo como foi observado nas áreas agrícolas 1F e 3F.

Quanto à relação entre a matéria orgânica e a dispersão dos agregados, os resultados desta pesquisa corroboraram com os apresentados por Bastos et al. (2005), Calegari et al.

(2006), Ribon et al. (2014), Salton et al. (2008), e Zalamena (2008), os quais também afirmam os efeitos positivos da matéria orgânica, representada pelo teor de carbono orgânico, sobre a agregação do solo. Já Ribon et al. (2014) procurando a proporção ótima de MO, encontraram alta resistência e estabilidade dos agregados quando o conteúdo de MO no solo foi superior a 20 g kg^{-1} nas profundidades de 0 - 20cm.

O grau de floculação em todas as áreas experimentais foi superior de 60%, encontrando os maiores valores na FN e 5F com 90,14% e 79,00% respetivamente, já nas áreas 1F e 3F a floculação diminuíram a 65,94% e 70,55%, embora estes valores representem afetação das nas áreas de produção de cana-de-açúcar, sus valores podem ser considerados ótimos para a qualificação da qualidade do solo.

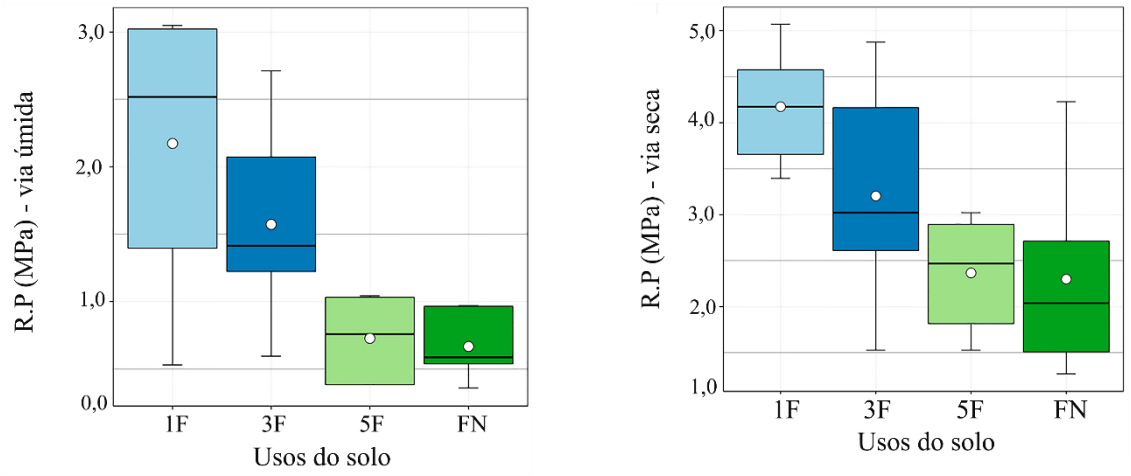
No caso da floculação da argila, Lemos e Silva (2005), afirmam que graus de floculação superior de 50% é uma característica benéfica do ponto de vista agrícola por propiciar a formação de agregados estáveis e, Llanillo (2007) afirmou que a agregação permite obter ótimas condições física dos solo e inúmeras vantagens para a sustentabilidade do sistema de produção agrícola.

Vicente S. et al. (2012), encontraram correlação entre a argila dispersa e o grau de floculação, sendo estes atributos inversamente proporcionais, a pesar de notar diferenças em solos superficiais cultivados com cana-de-açúcar, ou seja, maior dispersão do que floculação das argilas, como foi observado no comportamento destes atributos físicos nas áreas de produção de cana-de-açúcar.

No estudo da qualidade física realizado por Mota et al. (2013), compararam um solo agrícola com a floresta nativa, também encontraram os maiores valores de dispersão de argila na área agrícola pelos efeitos de gradagem e, além disso, do efeito do íon Na proveniente da água de irrigação utilizada no sistema agrícola, o qual também poderia ser uma explicação para a alta dissertação encontrada na área 1F.

A resistência à penetração também foi dos atributos avaliados para a função de suporte radicular. A resistência à penetração foi realizada em dois momentos, ou seja, as primeiras medições foram realizadas com o solo seco (com umidade $\leq$10% de umidade) e o segundo momento realizadas após satura do solo (com umidade $\geq$25% de umidade) e até atingir uma profundidade de 40 cm, na Figura 12 aprestam-se estes comportamentos das áreas experimentais.

Figura 12 - Resistência à penetração em via seca e úmida, em sistemas de produção de cana-de-açúcar e uma floresta nativa; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção, *FN floresta nativa.*



Fonte: Ortiz (2015).

Na avaliação da qualidade física do solo a resistência à penetração também foi um atributo avaliado e relacionado com a função de suporte radicular do solo, considerado valores elevados da resistência a penetração como um comportamento negativo pelo impedimento de crescimento das raízes.

Os maiores valores foram encontrados nas áreas 1F e 3F, tanto nas avaliações com solo úmido e em seco, esta resistência pode ser consequência da quantidade de anos em produção de cana-de-açúcar, onde o preparo e gradagem dos solos, são as técnicas utilizadas para a produção e, o uso de máquinas para o transporte das coletas também são técnicas que afetam o solo.

A alta resistência apresentada no solo seco em todas as áreas pode ser considerada normal, apreciando que estes solos são de tipo coesos, o que significa que apresentam resistência das suas camadas quando seco, já quando o solo está úmido a resistência à penetração diminui, mas este fenômeno de compactação resulto maior nas áreas (1F e 3F) que têm apresentado prolongado tempo, mesmo baixo condições de umidade o que poderia entende-se como um comportamento de compactação.

A alta resistência à penetração do solo pode afetar o desenvolvimento das raízes das plantas e/ou também a deformação das mesmas, diminuído a eficiência de absorção de água e até comprometendo a estabilidade do suporte da planta, causando baixo desenvolvimento fisiológico ou tombamento da planta e o decréscimo produtivo da cana-de-açúcar.

Diferentes autores têm observado que a resistência à penetração é uma alteração nas propriedades física do solo, causado pelo intensificado trafego de máquinas, afetando diretamente a qualidade do solo e trazendo, como consequência, alterações no crescimento e na produtividade da cultura (BORDIN et al., 2005; FREDDI et al., 2009; SOUSA, et al., 2014).

Segundo Silva (2014), valores maiores de 2,5 e 3,0 MPa são considerados indicador de compactação para o solo agrícola e, geralmente este efeito são oriundo de máquinas pesadas utilizadas nos tratos agrícolas, sobretudo na colheita mecanizada. Valores críticos de resistência à penetração podem variar de 1,5 MPa a 4,0 MPa (ROSOLEM et al., 1999); no entanto, valores próximos a 2,0 MPa são, de maneira geral, aceitos como impeditivos ao crescimento radicular (BLAINSKI et al., 2008). Valores de resistência do solo à penetração das raízes de 2,0 a 4,0 MPa, que segundo Santos et al. (2012), e Tavares e Tessier (2010), podem restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes.

Nos solos de produção agrícola utilizados neste estudo apresentaram resistências à penetração superior a 4,0 MPa chegando aos 5,0 MPa (solo seco) nas áreas com 40 anos de manejo e preparo do solo para a produção de cana-de-açúcar, já em condições de saturação a resistência diminui a 3,0 MPa, resistência considerada limitante para o normal suporte do solo para as raízes.

Para Stefanoski et al. (2013), a resistência à penetração do solo pode variar pelo tipo de solo ou cultura, mais a resistência torna-se um problema quando é ocasionada por atividades antrópicas, de forma continuada e mal-planejada.

A resistência à penetração apresentou variação nas respostas de resistência quando os solos apresentaram algum tipo impedimentos físicos próprios dos solos, ou seja, estes solo são classificados como coesos e apresentam consistência muito dura quando secos, dificultando à penetração das raízes, como também, dificultam a distribuição da água ao longo dos perfis, comportamentos também observados por Melo Filho et al. (2007) afirmando que os solos coesos em temporada seca aprestam um resistência à penetração considerada limitante para a qualidade física do solo, por afetar as raízes das plantas e a produção de cana-de-açúcar.

Segundo Singer e Ewing (2000), a resistência à penetração do solo também foi considerada um atributo utilizado como indicadores de qualidade física do solo, pois permite obter uma visão geral do estado estrutural deste, ou seja, considera a profundidade efetiva de enraizamento, a porosidade total, a distribuição e tamanho dos poros e claro o grau de compactação do solo.

A resistência à penetração em solos agrícolas é uma propriedade influenciada diretamente pelo conteúdo de água no solo e da sua uniformidade vertical no horizonte, mas também, associada a resistência com diferentes causas de manejo do solo, que terminar por causar elevada variação nos registros (SOUZA et al., 2014).

Observações registradas por Ribon e FiIho (2008) em seu estudo de resistência à penetração no solo e relação da matéria orgânica onde mencionam que, existe um relação direta entre estas duas variáveis, ou seja, a resistência do solo aumenta com o conteúdo de matéria orgânica, este tipos de comportamentos dificulta ainda mais a interpretação deste atributos físico do solo, levando a não ter conclusões do estado do solo.

Em este estudo de classificação de indicadores de qualidade do solo, pela simplicidade, homogeneidade, o relacionamento com outros componentes do solo, a resistência à penetração não pode ser um indicador direto da qualidade física de solos coesos, pois aprestou alta variação relacionados com outros fatores com efeitos pelo uso e manejo do solo, pela presencia não uniforme da água no solo, pelas próprias características e comportamento do solo, etc. que terminam alterando o verdadeiro estado do solo, podendo ser interpretado como baixa qualidade do solo.

A qualidade física do solo foi de maneira a avalição do estado dos solos avaliados, a partir do analises e estudo dos seus atributos físicos, características que revelam as alterações e/ou mudanças que têm suportado durante os anos de preparo e manejo do solo para a produção da cana-de-açúcar.

A partir desta informação pode ser destacado sobre as limitações que apresentam o solo frente a sua capacidade de armazenamento e suporte radicular, por exemplo a perda de espaços vazios, a diminuição de matéria orgânica, diminuição da quantidade de água disponíveis para as plantas e até possíveis compactações, são os principais sinais de afetação e perda de qualidade do solo para a produção agrícola.

Nas prolongadas décadas de produção de cana-de-açúcar não ter acompanhamento ou registro da qualidade é a maior preocupação, pois desconhecer o estado do solo, a capacidade de serviço para produção e alterações que estão sendo causas pelas práticas de manejo agrícola, dificulta o controle na degradação deste recurso, regular o uso de diferentes equipes e práticas agrícolas e impossibilita o desenvolvimento de técnicas de manejo mais sustentáveis.

A baixa qualidade física dos solos presenciada nas áreas 1F e 3F não inabilita o uso do solo para a produção de cana-de-açúcar, mas nas condições atuais dos solos e de manejo agrícola reduzem a capacidade de armazenamento de água e de suporte radicular das plantas,

limitando o normal desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar, diminuindo a produções e a participação nos mercados, e ambientalmente aumentando os problemas de degradação das áreas de produção agrícola, especialmente o recurso solo.

6.2 SUSCEPTIBILIDADE À EROSÃO

A susceptibilidade à erosão nas áreas agrícola determinou não só a quantidade de solo perdido ou quanto foi erodido após um fenômeno de chuva simulada, senão também quanto resistente foram os solos com as diferentes qualidades físicas aos fenômenos hídricos simulados.

Na avalição da erosão não foi considerada a área de floresta nativa, devido as dificuldades do uso do simulador no seu interior e, também para evitar ao máximo intervenções e/ou alterações da floresta nativa, tecnicamente falando a floresta nativa não é uma área de produção agrícola e não apresenta erosão antrópica pelo qual não foi interesse avaliar a perda de solo.

Conforme a informação das chuvas simuladas, as intensidades de chuva e a uniformidade tiveram baixos coeficientes de variação, aprestando na Tabela 13, garantindo precisão nas simulações de chuvas aplicadas nas três áreas experimentais. Segundo Warrick e Nielsen (1980) é considerada baixa variabilidade quando CV < 12%; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade quando CV > 60%.

A Tabela 13 apresenta os valores das intensidades chuvas registradas e das suas homogeneidades dentro das parcelas de erosão:

Tabela 13 - Registro de Intensidade de chuvas simuladas e sua uniformidade

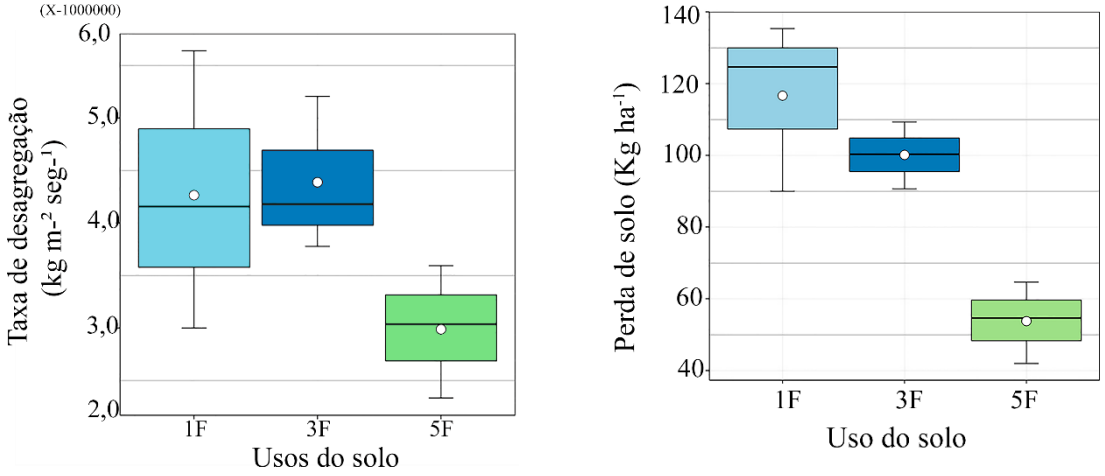
Descrição	Intensidade (mm h^{-1})	*C.U.C (%)
No.	9	9
Mínimo	38,19	84,39
Media	38,98	85,19
Mediana	39,12	85,08
Máximo	39,12	86,51
Desvio padra	0,31	0,72
Coeficiente de variação	0,78	0,85

Fonte: Ortiz (2015).
*Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

Os valores médios do CUC das simulações foram de 85,19%, considerado como alta uniformidade de distribuição das chuvas. Para Santos et al. (2008) chuvas com coeficientes de uniformidade superior a 75% podem ser consideradas adequadas e uniformes para o uso do simulador de chuva, já para Montebeller et al. (2001), valores de C.U.C acima de 80% são aceitáveis para a uniformidade de distribuição em simuladores de chuva, como também, utilizado como infiltrômetro de aspersão.

A perda de solo e a taxa de desagregação, resultante das simulações de chuvas realizadas para os três diferentes períodos de cana-de-açúcar, são apresentados na Figura 13, os maiores valores de perda de solo e taxa de desagregação de solo, foram apresentados nas áreas de produção de cana-de-açúcar de 1F e 3F, e o menor valor foi o de 5F.

Figura 13 - Taxa de desagregação e perda de solo de diferentes ciclos de cana-de-açúcar; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção.



Fonte: Ortiz (2015).

Os solos que apresentaram a maior perda de solo, são os solos que tiveram a mais baixa qualidade física de solo, já a área 5F apresentou uma qualidade física do solo muito próxima com a área de floresta nativa, pois o comportamento e respostas das propriedades físicas e o conteúdo de M.O estiveram mais próximas com a floresta nativa, pelo qual a área 5F será ponto de comparação para as áreas 1F e 3F.

Este comportamento de perda de solo encontrado nos sistemas de produção de cana-de-açúcar, permitiu observar que as áreas com mais de 40 anos de produção de cana-de-açúcar (1F e 3F) apresentam maior risco de erosão e maior perda de solo, já na área 5F com tempo de produção mais recente (15 anos) apresento menor perda de solo.

As taxas de desagregação nos solos cultivados com cana-de-açúcar variaram aproximadamente de 3×10^{-6} kg m^{-2} s^{-1} a $4{,}5\times10^{-6}$ kg m^{-2} s^{-1}, apresentando o menor valor a área 5F e os maiores valores nas áreas 1F e 3F, tendo em conta que todas as áreas avaliadas tinham declives <1% e, as simulações realizadas forma sem cobertura vegetal.

No estudo de Bezerra e Cantalice (2006), avaliando a erosão em cana-de-açúcar encontraram valores de taxa de desagregação ainda maiores que os encontrados neste experimento, em torno de $9{,}413\times10^{-4}$ kg m^{-2} s^{-1} para áreas sem cobertura, declividade >1% e precipitação de chuva de 100 mm h^{-1} , justificando a alta taxa de desagregação pela baixa infiltração de água no solo.

Corroborando com BERTOL et al. (2001) e Panachuki et al. (2006) os solos submetidos ao cultivo intenso têm a estrutura original alterada com fracionamento dos agregados em unidades menores e consequente redução no volume de macroporos, aumentos no volume de microporos e na densidade do solo, e são das principais causas do início dos processos de erosão, diminuição da taxa de infiltração de água no solo, aumento das taxas de escoamento superficial e consequentemente maior perda de solo.

No estudo de estimativas do risco de erosão realizado por Dias e Silva (2015) em solos tabuleiros costeiros e declividade de 0-6% e com uso de solo de culturas e condições de chuvas características do nordeste, o solos apresentam erosão de 10 t/ha/ano, desconsiderando chuvas extremas como foi realizado nestes estudo.

Segundo Lima et al. (2015) avaliaram a perda de solo em área de produção de mandioca, em solo franco argilo-arenoso, com declividade <1%, baixo conteúdo de MO (aproximadamente 7 g kg^{-1}) e intensidade de chuva de 40mm h^{-1}, constataram perdas de solo de 67,25 kg ha^{-1} em presença de cobertura vegetal, em comparação com áreas de cana-de-açúcar no experimento observou-se maior perda de solo, devido à ausência de cobertura vegetal durante as simulações de chuva aplicadas..

Na avaliação de práticas de conservação como plantio direto e a erosão hídrica, Ernesto et al. (2015) afirma que as práticas convencionais diminuiu o índice de floculação 30% devido ao inadequado manejo dos solo e a baixos conteúdo de matéria orgânica (27,35 g kg^{-1}) causada pelas queimas da palhas, consequentemente aumentou a perda de solo de 433 t ano^{-1} a 665 t ano^{-1}.

As taxas de perda de solo dependem da facilidade ou dificuldade no transporte das partículas de solo, dependendo diretamente do tipo, tamanho das partículas, da textura e da matéria orgânica presente no solo, Concordo com Miqueloni et al. (2015) em solos com baixa

declividade, com textura franco-argilo-arenosa, e matéria orgânica baixa (15 g dm^{-3}), provavelmente a causa do aumento da perda de solo está ligada ao manejo inadequado e ao tipo de cobertura no solo, principalmente na cultura de cana-de-açúcar.

No estudo de perda de solo realizado por Garbiate et al. (2011) avaliaram em sistemas de cana-de-açúcar com colheita mecânica com queima e mecânica crua, tiveram maior perda de solo nas áreas onde foi realizada as práticas mecânicas e queima (50 g m^{-2}), devido à eliminação dos resíduos vegetais que protegem ao solo da erosão e à diminuição de MO presente no solo, 16,34 g kg^{-1} para a área de colheita mecânica crua e de 13,23 g kg^{-1} para colheita mecânica com queima, redução que causou menor estabilidade nos agregados e possivelmente menor resistência na perda de solo.

Entre as práticas realizadas nas áreas de cana-de-açúcar deste estudo também são realizados queimas e preparos do solo e colheita com maquina agrícola, observando maior perda de solo (aproximadamente 120 Kg ha^{-1}) na área 1F, a qual teve 40 anos com este tipo de manejos para a produção da cana-de-açúcar.

Corroborando com Albuquerque et al. (2000), e Oliveira et al. (2012), os solos com baixo conteúdo de M.O são solos com baixa estabilidade de agregados, consequentemente estes solos são justamente os que apresentaram maior fração de agregados erodíveis, devido à pouca coesividade.

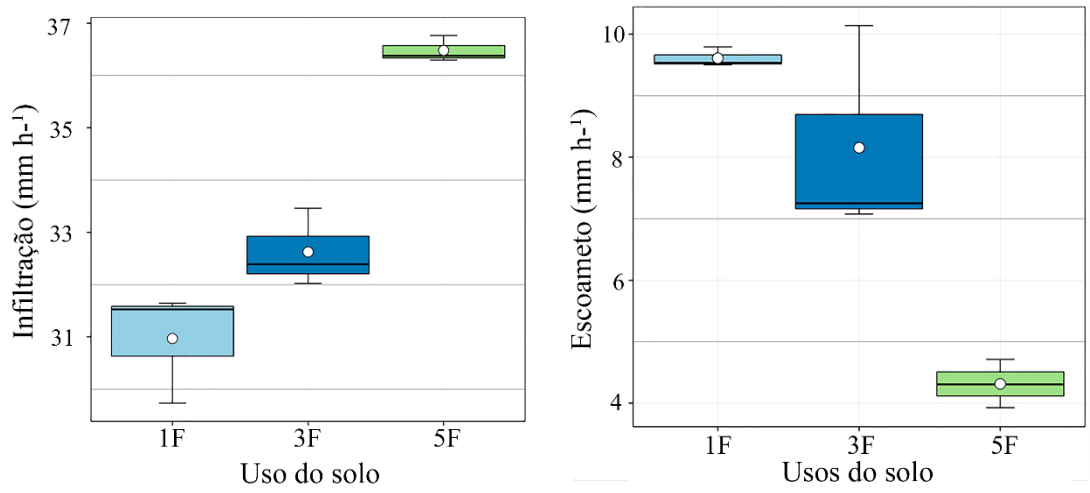
Em estudos de variabilidade espacial de perda de solo por erosão na definição de zonas de manejo, Miqueloni et al. (2015), constataram que os fatores antrópicos e a expectativa de erosão sobres-saíram-se em grande parte da área, concordando que o uso e manejo inadequados como principais fatores do aumento os riscos de degradação.

Um solo com estrutura de boa qualidade apresenta boa capacidade de retenção, infiltração, permeabilidade e armazenamento de água no seu interior, o que, no conjunto, irá refletir em menor susceptibilidade a perda de solo como afirmam muitos autores (WISCHMEIER; SMITH, 1978; FOSTER, 1982), caso que pode ser retificado na área 5F pois o solo apresentou opima qualidade física do solo, com mínimos problemas nas funções de armazenamento de água e com baixa perda de solo.

Weill e Sparovek (2008), na busca de indicadores para avaliação do impacto da erosão na qualidade do solo em sistemas de produção agrícola, observaram que em mais de 99 % da área ocupada com cana-de-açúcar apresentem perda de solo, ou seja, que na grande maioria das áreas têm dificuldades nas práticas de manejo dos solos que reduzem a capacidade de retenção de água.

Os comportamentos da infiltração e do escoamento superficial de água no solo realizadas durante a simulação de chuvas nas três áreas de produção de cana-de-açúcar 1F, 3F e 5F aprestam-se na seguinte Figura 14.

Figura 14 - Infiltração e escoamento superficial de água de diferentes períodos de produção de cana-de-açúcar; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção.



Fonte: Ortiz (2015).

Os solos de 1F e 3F são as áreas de produção que apresentam as qualidades físicas do solo mais reducida, nas caraterísticas de estabilidade dos agregados, na dispersão das argilas, e na floculação etc. consequentemente a infiltração destas também apresentaram diminuição da quantidade de água infiltrada, ou seja, os entupimentos dos poros com partículas dispersadas pela chuva reduzem os espaços e capacidade da infiltração da água no solo.

Entre outras das possíveis causas da diminuição da infiltração é o aumento da densidade do solo que se traduz na reduza dos seus espações vazios, principalmente os macroporos os condutos principais para o movimento e drenagem da água através solo, aumento de 1,56 g cm^{-3} a 1,80 g cm^{-3} reduziu aproximadamente 22% da porosidade total da área 1F e 17% para a área 3F.

Os dados de infiltração encontrados nesta trabalho forma de 31 a 36,5 mm h^{-1}, semelhantes aos valores de aproximadamente 30 mm h^{-1}, encontrados no estudo de Bezerra e Cantalice (2006), onde avaliaram a infiltração de água no solo utilizando um simulador de chuva em áreas de cana-de-açúcar da EECAC, com solos coesos costeiros e com declividades $\leq 1\%$, o que poderia significa que, a taxa de infiltração de água no solo apresenta pouca

variação com respeito às intensidades de chuvas, já que, os autores anotam que utilizaram uma intensidade de 100 mm h^{-1}.

A alta infiltração de água no solo apresentada nas áreas experimentais, provocaram baixo escoamento superficial para um evento de chuva classificado como extremo, caso contrário como foi anunciado por Bertol et al. (2007), chuvas de longa duração e de volume elevado, produzem grandes enxurradas, mesmo assim, os solos das áreas 1F e 3F, ainda apresentam elevados valores de escoamento em comparação com a área 5F.

No estudo de erosão em solos cultivados com cana-de-açúcar e os efeitos da colheita mecanizada, Garbiate et al. (2011), mencionaram que as concentrações de sedimentos na enxurrada foram maiores nos sistemas com colheita mecanizada e menores no sistema com colheita manual, fato relacionado com a capacidade de infiltração do solo, pois quando os solos tem limitações na infiltração a taxa de escoamento superficial tende aumentar, principalmente onde se utiliza a colheita mecânica da cana, devido ao intenso tráfego de máquinas com elevada carga.

Segundo Montenegro et al. (2013), no estudo do impacto de cobertura no solo e a dinâmica da água com chuva simulada, atribuíram a diminuição da quantidade de escoamento superficial solo de 21% e 51%, permitindo maior infiltração de água, quando a cobertura de mulch foi 2 a 4 t/ha.

O aumento do escoamento nos solos está relacionado também com o encrostamento do solo, segundo Oliveira et al. (2011), no estudo de perda de solo por escoamento, notaram maior perda de agua no solo (15 m^3 ha^{-1}) quando o solo foi irrigado utilizando resíduos orgânicos animais, pois provocou encrostamento superficial, entupimento dos poros, causando diminuição da infiltração.

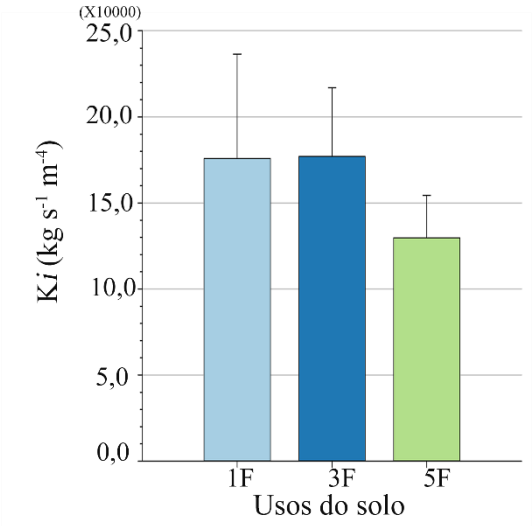
Os valores de erodibilidade (*k)* ou susceptibilidade à erosão estão mostrados na Figura 15. As maiores susceptibilidades foram encontradas nas áreas 1F e 3F, em comparação com áreas 5F, devido a maior quantidade de solo perdido o que incrementou as taxas de desagregação. A alta erodibilidade presentes nas áreas 1F e 3F refletem a baixa qualidade física do solo encontradas nestas áreas.

A avalição da qualidade física do solo nestas áreas, não só estariam indicando limitantes em quanto as suas funções de armazenamento e retenção de água e, de suporte radicular, mas também, poderia estar indicando os riscos de susceptibilidade à erosão.

Conforme Doran e Parkien (1994), a qualidade dos solos agrícolas não pode só ser avaliada pelo foco da produção agrícola, e sim através da resposta do solo a interações com

outros recursos naturais como a água, já para este estudo, quando os solos apresentaram baixa qualidade, também foram os mais susceptíveis a perda de solo por erosão hídrica, frisando que a baixa qualidade física do solo não só afeta a produção agrícola senão também aumento os riscos de perda de solo por erosão hídrica.

Figura 15 - Erodibilidade de três períodos diferentes cana-de-açúcar, para uma chuva de intensidade de 39,93 mm h^{-1}; 1F primer ano de produção, 3F terceiro ano de produção, 5F quinto ano de produção.



Fonte: Ortiz (2015).

Os valores de erodibilidade encontrados para este tipo de solo e manejo, variaram de $1{,}2\times10^{+5}$ kg s^{-1} m^{-4} a $1{,}8\times10^{+5}$ kg s^{-1} m^{-4}. Albuquerque et al. (2000), realizaram estudos de erodibilidade em laboratório de solos arenosos e argilosos, encontrado valores de erodibilidade de $1{,}7\times10^{+5}$ kg s^{-1} m^{-4} a $19{,}6\times10^{+5}$ kg s^{-1} m^{-4} para intensidade de 80 mm h^{-1}; Ben-Hur et al. (1992), em seis solos da África do Sul e condições de chuva simulada em campo e com intensidade da chuva de 42 mm h^{-1}, encontraram valores de erodibilidade em entressulcos de $1{,}5\times10^{+5}$ a $10{,}5\times10^{+5}$ kg s^{-1} m^{-4}.

Bezerra Cantalice (2006), estudando a erosão, determinaram o fator K*i* para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, sem cobertura e cultivado com cana-de-açúcar, encontraram valores de $1{,}39\times10^{6}$ kg s^{-1} m^{-4} a $2{,}12\times10^{6}$ kg s^{-1} m^{-4}. Os valores foram mais elevados que os valores obtidos neste trabalho, o que pode ser justificado pela alta precipitação (100 mm h^{-1}) utilizada.

Segundo Reichert et al. (2001), as diferenças em valores de erodibilidade nos solos do Brasil, pode ser justificada pela variação dos teores de argila e matéria orgânica presentes nos

solos. Bezerra e Cantalice (2006), justificam as diferentes erodibilidades encontradas em um mesmo solo à possível variação dos conteúdos de matéria orgânica.

A erodibilidade e os indicadores de qualidade física dos solos, selecionados para a avalição da qualidade física do solo, apresentaram alta significância, como também, altos índices de correlação, na Tabela 14 apresenta-se as correlações entre os atributos físicos do solo e a erodibilidade.

Tabela 14 - Correlação de Pearson entre a erodibilidade e os indicadores de qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar.

Fator	Indicadores de qualidade	R	R^2	p-valor
K (erodibilidade)	Macroporos (0,006MPA)	-0,950	0,903	0,000
	Argila total dispersa	0,920	0,846	0,001
	Resistencia à penetração -seca	0,920	0,846	0,001
	Grau de floculação	-0,900	0,810	0,001
	Densidade do solo	0,880	0,774	0,002
	Porosidade total	-0,880	0,774	0,002
	Índice de estabilidade de agregados	-0,850	0,723	0,004
	Carbono orgânico	-0,840	0,706	0,004
	Matéria orgânica	-0,840	0,706	0,004
	Micrósporos (1,5 MPa)	0,690	0,476	0,038
	Resistencia à penetração -úmido	0,600	0,360	0,088

Fonte: Ortiz (2015).

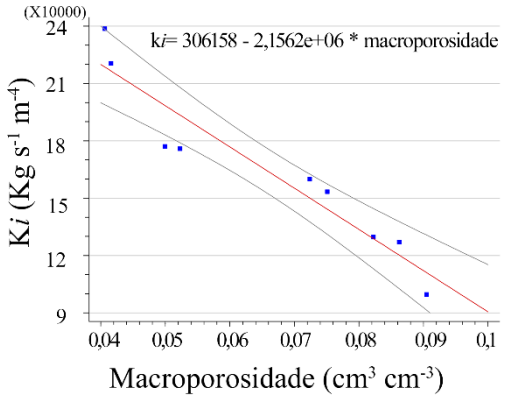
Os indicadores de qualidade apresentam p- valores $\leq$0,05 e aceita-se a ideia que as variáveis tiveram correlação significativa com erodibilidade com 95% de confiabilidade; no caso da resistência à penetração - úmida aceitou-se que a variável apresentou comportamento independente quanto a erodibilidade.

Na correlação de Pearson valores que apresentaram R^2 com valores $\geq$0,9 indicaram uma correlação muito forte, valores de 0,7 a 0,9 indicaram uma relação forte, conforme o descrito por Mukaka (2012), o que significa que, a macroporosidade apresentou uma correlação muito forte com a erodibilidade, a Figura 16 apresenta a correlação entre a macroporosidade e erodibilidade.

Blanco e Lal (2010), e Kiessling et al. (2006), mencionam que a diminuição na macroporosidade na superfície do solo, compromete a infiltração da água de chuva, pois o incremento da microporosidade aumentam a drenagem e movimentação inicial da água no solo, causando uma redução da condutividade hidráulica e aumento na erosão.

Quando os solos apresentam limitantes na macroporosidade, os intervalos dos tempos para dar início ao escoamento superficial são menores, aumentando os riscos de perda de solo, pelo aumento de enxurrada no solo (PANACHUKI et al., 2006).

Figura 16 - Correlação entre porosidade e erodibilidade de solo produtivos de cana-de-açúcar.



Fonte: Ortiz (2015).

Volume de macroporos menores de 0,10 cm^3 cm^{-3} na camada superficial do solo, indicam possíveis problemas de infiltração de água e drenagem do excesso de água de chuva, circulação de oxigênio, e possivelmente também, afetação no desenvolvimento das raízes das culturas.

Concordo com Bertol et al. (2001), Braunack e McGarry, (2006), Souza et al. (2006b) e Streck et al. (2004), práticas de manejo do solo agrícola com o tempo provocam alterações nas propriedades físicas do solo como, o fracionamento dos agregados em unidade menores, altera as estruturas originais dos solos, principalmente na redução no volume dos macroporos. Em decorrência disso apresenta diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com consequente aumento das taxas de escoamento superficial.

Conforme os resultados das correlações da erodibilidade e dos indicadores de qualidade do solo pode-se indicar que as alterações na estrutura do solo principalmente na porosidade, pela utilização de máquinas agrícolas excessivamente pesadas ou em condições não apropriadas para o solo, como também, máquinas não aptas para o uso agrícola, provocam aumento da densidade pela diminuição dos espaços poroso, reduzindo a capacidade de infiltrar, consequentemente o aumento no escoamento superficial que em solo desagregados e instáveis terminam sendo aceleradamente erodidos, ou seja, o inadequado manejo do solo diminuem qualidade do solo, provocando menor resistência do solo à degradação e maior susceptibilidade à erosão.

7 CONCLUSÕES

A qualidade física do solo avaliados, após mais de 40 anos de produção de cana-de-açúcar, indicou limitações nas funções de armazenamento e retenção de água e, também na função de suporte radicular;

Os atributos físicos utilizados como indicadores de qualidade física do solo, permitiram observar e comparar o comportamento das diferentes áreas agrícolas, encontrando a melhor qualidade na área de mentor tempo de produção.

Os solos com maior tempo de produção tiveram a mais baixa qualidade física apresentaram baixa capacidade de infiltração de água, alto escoamento superficial, como também, alta taxa de desagregação e perda de solo.

A macroporosidade foi o indicador que apresentou maior susceptibilidade e redução pelas práticas de manejo e esteve inversamente correlacionado com os processos de perda de solo por erosão hídrica, tornando-o com um indicador sensível para avaliar a qualidade e erosão dos solos.

REFERÊNCIAS

ADRIAANSE, A. **Environmental policy performance indicators: A study on the development of indicators for environmental policy in the Netherlands**. Ed. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach: The Netherlands, p. 175, 1993.

AKSOY, H. et al. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff sediment transport processes over a two-dimensional flume. **Catena**, Amsterdam, v. 98, p. 63-72, 2012.

ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e a estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG, v. 24, p. 141-151, 2000.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 31, n. 3, p. 617-625, 2007.

ANA. **Sistema de informações hidrológicas**: séries históricas de chuvas, Carpina. 2015. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/Estacao.asp?Codigo=735157>. Acesso em: 15 oct. 2015.

ANDERBERG, M. R. **Cluster analysis for applications**. New York: Academic Press, 1973.

AQUINO, L. S.; TIMM, L. C.; REICHARDT, K. et al. State-space approach to evaluate effects of land levelling on the spatial relationships of soil properties of a lowland area. **Soil & Tillage Research,** Amsterdam, v. 145, p. 135–147, 2015.

ARAGÃO, R. de et al. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 243-252, 2013.

ARATANI, R. G. **Qualidade física e química do solo sob diferentes manejos e condições e da foclimáticas no Estado de São Paulo**. 2008. 130 f. Teses (Doutor em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

ARAÚJO, E. A. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v. 5, p. 187-206, 2012.

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 88, p. 153-160, 2002.

AYER, J. E. et al. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, p. 180-191, 2015.

BARBOSA, G. M. C., MIYAZAWA, M. Dispersão da argila em água em solos argilosos em função da adição de esterco de animais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE ANIMAIS, 1, 2009, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC: EMBRAPA, 2009. p. 23 - 607.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Y. Y. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico-pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 1, p. 17-26, 2000.

BASTOS, R. S. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 29, p. 21-31, 2005.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 23, p. 687-694, 1999.

BEN-HUR, M. et al. Slope and gypsum effects on infiltration and erodibility of dispersive and nondispersive soils. **Soil Science Society America Journal**, Wisconsin, v. 56, p. 1571-1576, 1992.

BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F. T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidraulicamente: Fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 36, p. 1905-1910, 2012.

BERTOL, I. et al. Phosphorus, potassium and organic 15 carbon concentrations in runoff under different soil tillage systems during soybean growth. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, p.142-150, 2007.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, São Paulo, v. 58, p. 555-560, 2001.

BEUTLER, A. N. et al. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, p. 193-198, 2005.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulco em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 30, p. 565-573, 2006.

BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, p. 975-983, 2008.

BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. Kansas: Springer, 2010. 617 p.

BORDIN, I. et al. Desenvolvimento de mudas de aceroleira propagadas por estacas e sementes em solo compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 530-536, 2005.
BORGES, A. L.; KIEAHL, J. C.; SOUZA, L. S. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 23, p. 1019-1025, 1999.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson-Prentice Hall, 2008. 990 p.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 131-139, 2010.

BRANDÃO, V. et al. Infiltração de água no solo. 3. ed. Viçosa-MG: IFV, 2009. 62 p.

BRAUNACK, M. V.; McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (Saccharum officinarum) in Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 86-102, 2006.

CALEGARI, A. et al. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. **Semina**, Londrina, v. 27, p. 147-158, 2006.

CAMARGO, O. A. et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: IAC, 1986. 94 p.

CANELLAS, L. P. et al. Stocks and quality of organic matter in an Inceptisol under long-term sugarcane cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 31, p. 331-340, 2007.

CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N.; BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 22, p. 131-140, 1998.

CARDOSO, E. L. et al. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 44, p. 631-637, 2009.

CARDOSO, M. et al. Comparing sugarcane fields and forest fragments: the effect of disturbance on soil physical properties and nematode assemblages. **Soil Use and Management**, Hoboken, NJ, v. 31, p. 397-407, 2015.

CARNGNELUTTI FILHO, A. C.; RIBEIRO, N. D.; BURIN, C. Consistência do padrão de agrupamento de cultivares de feijão conforme medidas de dissimilaridade e métodos de agrupamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 45, p. 236-243, 2010.

CASALINHO, H. D. et al. Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, p. 195-203, 2007.

CASSOL, E. A. et al. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 39, p. 685-690, 2004.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 38, p. 117-124, 2003.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 22, p. 527-538, 1998

CAVALIERI, K. M. V. et al. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p. 1541-1549, 2011.

CEDDIA, G. M. S.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p. 203-211, 2008.

CEDDIA, M. B. et al. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 34, p. 1467-1473, 1999.

CETESB. **Drenagem urbana**: manual de projeto. 3. ed. São Paulo: CETESB, 1986. 464 p.

CHAVES, A. A et al. Indicadores de qualidade de Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiás, v. 42, p. 446-454, 2012.

CISEROS, J. et al. **Erosión hídrica, principios y técnicas de manejo**. Cordoba: Unirío, 2012. 290 p.

COGO, N. P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de erosão em condições de chuva natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., 1978, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 1978. p. 99-107.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar**. Brasília, DF: CONAB, 2015. v. 2, n.1.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira cana-de-açúcar**. Brasília, DF: CONAB, 2015b. v. 2, n.2.

CRUZ, A. B. et al. La calidad del suelo y sus indicadores. **Revista Ecosistemas**, Madrid, v. 13, p. 90-97, 2004.

D'ANDRÉA, A. F. et al. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos Cerrados no sul do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 26, p. 1047-1054, 2002.

DANTAS, J. A. et al. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe / Apodi, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 18-26, 2012.

DEMARCHI, J. C.; PERUSI, M. C.; PIROLI, E. L. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo – SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, p. 7-29, 2011.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, NL, v. 120, p. 201-214, 2004. Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth.

DIAS, E. R.; SILVA, R. M. da. Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena – Paraíba. **Caminhos de Geografia**, Paraíba, v. 16, p. 192-204, 2015.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining soil quality for a sustainable environment. **Soil Science Society America Journal**, Wisconsin, n. 35, p. 3-21, 1994.

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). Methods for assessing soil quality. **Soil Science Society America Journal,** Wisconsin, n. 49, p.25-37, 1996.

DUMANSKI, J.; GAMEDA, S.; PIERI, C. **Indicators of land quality and sustainable land management**. Washington: The World Bank, 1998. 134 p.

ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 25, p. 485-493, 2001.

EMBRAPA. **Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais**. São Paulo: EMBRAPA, 2004. 12 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 124 p.

EMBRAPA. **Manual de procedimentos de coletas de amostras em áreas agrícolas para análises da qualidade ambiental**: solo, água e sedimentos. Jaguariúna: EMBRAPA, 2006b. 169 p.

EMBRAPA. **O que é qualidade do solo?** Cerrados: INFOTECA-E, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/571713>. Acesso em: 5 jan. 2016.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2006a. 286 p.

ENRIQUEZ, A. G. et al. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem de estrada rural não pavimentada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 160-165, 2015.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar**. 2. ed. São Paulo: Livro Ceres, 1990. 196 p.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina**, Londrina, v. 31, p. 913-932, 2010.

FIGUEIREDO, L. H. A; DIAS JUNIOR, M. D. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 24, p. 487-493, 2000.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The State of the World's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): managing systems at risk**. Abingdon, RN: ONU and Earthscan, 2011. 208 p.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: BASSELMAN, J.A. Hydrological modeling of small watersheds. **American Society of Agricultural Engeeniring**, St Joseph, v. 5, p.297-300, 1982.

FRANCO, Â. M. P. et al. Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos em um Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Agrociências**, Pelotas, v. 18, p. 175-187, 2012.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I - Características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 33, p. 793-803, 2009.

GARBIATE, M. V. et al. Erosão em entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p. 2145-2155, 2011.

GARCIA, S. S. et al. Determinação da equação intensidade-duração-frequência para três estações meteorológicas do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 575-581, 2011.

GARCÍA, Y.; RAMÍREZ, W.; SÁNCHEZ, S. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. **Pastos y Forrajes**, Cuba, v. 35, p. 125-137, 2012.

GÓES, G. B. et al. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 10, p. 116-122, 2005.

GOMES, A. C.; SILVA, T. B. de J.; LIMA FILHO, R. N. A tecnologia da informação contábil e a sua influência no trabalho individual dos profissionais de contabilidade em Senhor do Bonfim/BA. **Revista de Estudos Contábeis**, Londrina, v. 5, p. 3-24, 2014.

GOMES, G. **Engenho e arquitetura**. Recife: Massangana, 2006. 411 p.

GRANATSTEIN, D.; BEZDICEK, D. F. The need for a soil quality index: local and regional perspectives. **American Journal of Alternative Agriculture**, Cambridge, v. 7, p.12-16, 1992.

HABERERN, J. Coming full circle—the new emphasis on soil quality. **American Journal of Alternative Agriculture**, Cambridge, v. 7, p. 3-4, 1992.

HILLEL, D. **Enviromental soils physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 801 p.

HUFFMAN, E. et al. Canadian agri-environmental indicators related to land quality: soil cover, soil erosion, soil salinity and risk of water contamination. In: CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., 1998, Montpellier. **Anais…** Montpellier: Rural Development Sector – World Bank, 1998. p. 15-188.

IAREMA, A. A.; et al. Qualidade física e química do solo em áreas de exploração florestal no Mato Grossso. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35, p. 737-744, 2011.

IBGE. **Produção agrícola municipal**: culturas temporais e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. v. 40.

KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; DORAN, J. W. Soil quality: current concepts and applications. **Advance in Agronomy**, Amsterdam, v. 74, p. 1-40, 2001.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how ?. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 145-156, 2003.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, Wisconsin, v. 61, p. 4-10, 1997

KARLEN, D. L.; STOTT, D. A framework for evaluating physical and chemical indicators. **Soil Science Society America Journal**, Wisconsin, n. 35, p. 53-72, 1994.

KIESSLING, R. J. et al. Efecto del pastoreo sobre la distribución del espacio poroso bajo dos sistemas de labranza. In: CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 2006, Argentina. **Congreso...** Argentina: INTA, p. 1 – 7, 2006.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, p. 26-32, 2006.

LAL, R. **Métodos para avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, p.97, 1999.

LAL, R.; PIERCE, F. J. (Ed.). **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil Water Conservation Society, 1991. 189 p.

LAL, R. **Soil erosion research methods**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, p. 340, 1988.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. **Soil Science Society American**, n. 35, p. 68-78, 1994.

LEANDRO, M.; SILVA, N.; CARDOSO, E. L. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 43, p. 417-428, 2012.

LEMOS FILHO, L. C. et al. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (Saccharum officinarum L.). **Revista de ciências agronômicas**, Ceará, v. 39, p. 193-202, 2008.

LEMOS, C. F.; SILVA, E. T. Comparação das características morfológicas, mineralógicas, químicas e físicas do solo entre áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, São José dos Pinhais, v. 3, p. 11-18, 2005.

LIMA, C. A. et al. Agricultural practices in the cultivation of cassava and the relation to runoff, and soil and water loss. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 46, p. 697-706, 2015.

LIMA, H. V. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico e convencional no Semiárido Cearense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 31, p. 1085-1098, 2007.

LLANILLO, R. **Indicadores de sustentabilidade da produção familiar mecanizada de grãos em modalidades de plantio direto no norte do Paraná, Brasil**. 2007. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

LONG, R. M. et al. Indicadores físicos da qualidade do solo relacionados espacialmente com a produtividade da cana-de-açúcar e pastagem. In: 6 CONGRESSOS INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 6, 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IIC, 2012. p. 1-9.

LOPES, D.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 36, p. 1211-1220, 2012.

LOPES, M. M.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. **Transporte**, Brasil, v. 21, p. 59-66, 2013.

LUCA, E. F. et al. Avaliação de atributos físicos e estoque de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, p. 789-800, 2008.

LUCCHESI, A. A. Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira. In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. (Coord). **Cana-de-açúcar (Saccharumspp.)**. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001, p. 13.

MACHADO, Â. et al. Erodibilidade do solo em entressulcos determinada experimentalmente e por modelos matemáticos em um Argissolo Vermelho. **Revista brasileira de Agrociências**, Pelotas, v. 18, p. 175-187, 2012.

MACHADO, F.; MIELNICZUK, J. Revisão de literatura: uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 33, p. 743-755, 2009.

MARIA, I. C.; KOCSSI, M. A.; DECHEN, S. C. F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 291-298, 2007.

MARQUES, J. et al. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 21, p. 447-456, 1997.

MARTINS, S. G. et al. Erodibilidade do solo nos tabuleiros costeiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, p. 322-327, 2011.

MASERA, O.; ASTIER, M.; RIDAURA, S. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. GIRA. México: Mundi-Prensa e Instituto de Ecología-UNAM, 1999.

MEA. **Ecosystem and human well-being**: synthesis. Washington: Island Press, 2005. 137 p.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V.; SILVA SOUZA, L. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 31, n. 6, p. 1599-1608, 2007.

MIQUELONI, D. P.; GIANELLO, E. M.; BUENO PAES, C. R. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, p. 18-28, 2015.

MONTEBELLER, C. A. et al. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, p. 1-5, 2001.

MONTENEGRO, A. A. A. et al. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, Amsterdam, v. 109, p. 139-149, 2013.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 39, p. 1103-1110, 2004.

MUKAKA, M. M. Statistics corner: a guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, Malawi, v. 24, p. 69-71, 2012.

FERREIRA NETO, A. B.; PEROBELLI, F. S. Spatial analysis of cultural activities in the microregions of Minas Gerais. **Economia**, Brasília-DF, v. 14, n. 3/4, p. 139-157, 2013.

NETTO, A. M. et al. Caracterização hidrodinâmica e hidrodispersiva de um Latossolo Amarelo na microrregião do brejo paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, MG, v. 37, p. 86-96, 2012.

NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture Ecosystem Enviromental**, Amsterdam, v. 88, p. 161-168, 2002.

OECD; FAO. **Prespectivas agrícolas**. Chapingo: OECD publishing; FAO, 2014. 341 p.

OLIVEIRA, F. P. de et al. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 337-346, 2012.

OLIVEIRA, G. C. et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 38, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, J. G. R. de et al. Perda de solo e água e riscos ambientais da concentração de nutrientes no escoamento superficial em solo cultivado no sistema de plantio direto e submetido a adubações orgânicas e mineral. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, p. 1275-1291, 2011.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 35, p. 403-415, 2011.

PANACHUKI, E. et al. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 261-268, 2006.

PANKHURST, C. E. et al. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 72, p. 125-137, 2003.

PRADO, R. M.; CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária do Brasil**, Brasília-DF, v. 36, p. 197-203, 2001.

PRAGANA, R. B. et al. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 36, p. 1591-1600, 2012.

RAMÍREZ, M. Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. In: PRIMER TALLER NACIONAL SOBRE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO, 2004. **Congreso...** Palmira, Colombia, 2004.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M. et al. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 36, p. 965-973, 2001.

RIBON, A. A. et al. Alterações na estabilidade de agregados de Latossolo e Argissolo em função do manejo, na entrelinha da Seringueira (Hevea brasiliensis). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, p. 1065-1071, 2014.

RIBON, A. A.; T. TAVARES FIIHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, MG, v. 32, p. 1817-1825, 2008.

RODRIGUES, J. O. et al. Equações de intensidade – duração – frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agraria**, Curitiva, v. 9, p. 511-519, 2008.

ROQUE, A. A. D. O. et al. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 45, p. 744-750, 2010.

ROSOLEM, C. A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 34, p. 821-828, 1999.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, p. 11-21, 2008.

SÁ, M. A. C. et al. Comparison of methods for aggregate stability studies in soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 35, p. 1825-1834, 2000.

SANTIAGO, A. D. et al. Impulsionando a produtividade e a produção agrícola da cana-de-açúcar no Brasil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON TROPICAL AGRICULTURE DEVELOPMENT, 2006, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: IWTAD, 2006. p. 1-4.

SANTOS, K. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no Semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 828-835, 2012.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 217-225, 2009.

SANTOS, T. et al. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Viçosa-MG, v. 13, p. 11, 2008.

SCHICK, J. **Fatores r e k da USLE e perdas de solo e água em sistemas de manejo sobre um cambissolo húmico em lages, SC**. 2014. 150 f. Teses (Doutorado em Manejo de Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

SEVERIANO, E. C. et al. Solos cultivados com a cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 33, p. 159-168, 2009.

SHINITZER, M. Soil organic matter. The next 75 years. **Soil Science**, Amsterdam, v. 151, p. 41-58, 1991.

SILVA, A. A. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um latossolo vermelho textura média cultivado com cana-de-açúcar na microrregião de quirinópolis, goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiás, v. 34, p. 233-251, 2014.

SILVA, G. F. et al. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró**,** v. 28, p. 25-35, 2015.

SILVA, M. et al. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 34, p. 2287-2298, 1999.

SILVA, M. L. N. et al. Avaliação de métodos indiretos e determinação da erodibilidade de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropoecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 35, p. 1207-1220, 2000.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob Sistemas de manejo na bacia do alto do Rio Grande – MG. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 29, p. 719-730, 2005.

SIMÕES NETO, D. E. et al. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropoecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 50, p. 73-80, 2015.

SINGER, M. J.; EWING, S. Soil quality. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000.

SMYTH, A. J.; DUMANSKI, J. A framework for evaluating sustainable land management. Soil Science Society America Journal, Wisconsin, v. 75, p. 401- 406, 1995.

SOJKA, R. E.; UPCHURCH, D. R. Reservations regarding the soil quality concept. **Soil Science Society America Journal**, Wisconsin, v. 63, p. 1039-1054, 1999.

SOTASHI, A. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 46, p. 460-468, 2015.

SOUSA, C. C. M. de et al. Influência da densidade do solo infestado por nematoide no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 475-479, 2014.

SOUZA, G. S. de et al. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 72, p. 270-277, 2015.

SOUZA, G. S. et al. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 38, p. 135-146, 2014.

SOUZA, Z. M. de et al. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 128-134, 2006a.
SOUZA, Z. M. et al. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 41, p. 487-492, 2006b.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, Campina Grande, v. 8, p. 51-58, 2004.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 755-760, 2004.

TARAWALLY, M. A. et al. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. **Soil & Tillage & Research**, Amsterdam, v. 76, p. 95-103, 2004.

TAVARES, J. F.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of Oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, p. 899-906, 2010.

TAVARES, U. E. et al. Spatial dependence of physical attributes and mechanical properties of ultisol in a sugarcane field. **The Scientific World Journal**, Cairo, v. 2015, p. 1-10, 2015.

TORRES, J. L. R. et al. Atributos indicadores da qualidade do solo numa área sob plantio direto há doze anos. **Comunicata Scientiae**, Piauí v. 6, p. 123-133, 2015.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

USDA-NRCS. Soil Quality Institute, Ames, IA. USDA. Healthy Soil for Life.2015. Disponível em: <http://soils.usda.gov/sqi/>. Acesso em: 24 set. 2015.

VAN GENUCHTEN, M. T. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Wisconsin, v. 44, p. 892-897, 1980.

VARNHAGEN, F. A. História geral do Brasil: antes da sua separação e independência de Portugal. São Paulo: Melhoramentos, 1975. 314 p.

VASCONCELOS, R. F. B. et al. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, p. 309-316, 2010.

VASCONCELOS, R. F. B. et al. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 381-386, 2014.

VICENTE S., T. F. et al. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 1215-1222, 2012.

WARKENTIN, B. P.; FLETCHER, H. F. Soil quality for intensive agriculture. In: Intensive Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertilizer Management. **National Institute of Agricultural Science**, Tokyo, p. 594-598 1977.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics.** New York: Academic Press, cap. 13, p. 319-324, 1980

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). II Interpretação da tolerância de perda de solo utilizando o método do índice de tempo de Vida. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** Viçosa-MG, v. 32, p. 815-824, 2008.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58 p.

WYMORE, A.W. **Model-based systems engineering**. New York: CRC PRESS, 1993.

XAVIER, F. A. et al. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 30, p. 247-258, 2006.

YANG, X.; YOU, X. Estimating parameters of van genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. **Applied Mathematics and Information Sciences**, New York, v. 7, p. 1977-1983, 2013.

ZALAMENA, J. **Impacto do uso da terra nos atributos químicos e físicos de solos do rebordo do Planalto-RS**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ZHANG, X.; WANG, X.L.; CORTE-REAL, J. On the relationships between daily circulation patterns and precipitation in Portugal. **Journal of Geophysical Research**, Malden MA, v. 102, p. 13495-13507, 1997.