

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

***AVALIAÇÃO DA EROSÃO EM ENTRESSULCOS NA CULTURA DA CANA DE
AÇÚCAR***

SANDRO AUGUSTO BEZERRA

Engenheiro Agrônomo (UFRPE)

***Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em
Agronomia - Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência do
Solo.***

Orientador:

JOSÉ RAMON BARROS CANTALICE, DR.

Recife, Fevereiro de 2003

Sandro Augusto Bezerra

Engenheiro Agrônomo – Universidade Federal Rural de Pernambuco

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos para obtenção do grau de

MESTRE EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Aprovada em: 28 / 02 / 2003

Pela banca examinadora.

Prof. José Ramon Barros Cantalice, Dr.
Orientador – PPG – Ciência do Solo

Prof. Ivandro de França da Silva, Dr.

Prof. Alex Maurício Araújo, Dr.

Prof. Ronaldo Freire de Moura, Dr.

“Ó amor-próprio estúpido, tola vaidade e louco orgulho, quando, pois, sereis substituídos pela caridade cristã, pelo amor ao próximo, e pela humildade de que o Cristo deu o exemplo e o preceito? Só então desaparecerão esses preconceitos monstruosos que governam ainda os homens, e que as leis são impotentes para reprimir, porque não basta interditar o mal e prescrever o bem, é preciso que o princípio do bem e o horror do mal estejam no coração do homem”.

Um espírito protetor, 1861.

Dedicatória

Aos meus pais, Severino Maurício
Bezerra e Maria do Socorro Bezerra,
por todo o apoio e dedicação aos seus filhos.

Agradecimentos

À Deus por ter me dado saúde, força e coragem para execução deste trabalho e aos Espíritos de Luz que me conduzem nesta vida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, na pessoa daqueles que a fazem, e à sociedade que a mantém, pela oportunidade de realização de mais um curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante o período do curso.

À minha família, pela formação pessoal e pelo constante apoio oferecido, principalmente Mauro, que me deu subsídios para o término do meu curso.

A José Ramon Barros Cantalice, Professor da UFRPE, pela confiança depositada, apoio e orientação durante o estágio de docência e no desenvolvimento deste trabalho, pelos ensinamentos tão pacientemente transmitidos e amizade construída.

A Izabel Cristina de Luna Galindo, professora da UFRPE, pela iniciação em ciência do solo, amizade, estímulo, apoio e valiosas informações ao longo destes anos e por permitir a utilização do seu acervo bibliográfico.

A Estação Experimental de Cana de açúcar de Carpina, na pessoa de Sr. Geraldo e Sr. Gilberto, pelo apoio fundamental no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, em especial José Júlio Villar Rodrigues, Abelardo A. Montenegro, Maria Marly, Fernando José Freire, pelos ensinamentos transmitidos.

A Alexandre Tavares da Rocha pela ajuda no desenvolvimento do trabalho, pela amizade, apoio, companheirismo e convivência durante os anos do curso de mestrado. A Sandra Regina da Silva Galvão, minha eterna amiga e companheira durante todo o curso de graduação e mestrado.

A Patrícia Regina, “minha noiva”, pela compreensão dos dias que tive que ficar ausente, e pelo seu amor.

Aos funcionários da Secretaria de Solos, sobretudo a Maria do Socorro de Santana (“Help”), Funcionária pública exemplar, e Severino dos Ramos Bastos (“Seu Noca”), que sempre demonstraram boa vontade no cumprimento de seu dever e além de seus deveres.

A funcionária Lúcia Guedes, pelo apoio e ação no desenvolvimento do trabalho e ao laboratorista Anacleto pela execução de análises e apoio.

Aos estagiários e alunos da graduação que contribuíram para o andar e desenvolver deste trabalho entre eles: Thaís, Nilton, Patrícia, Bruna e ao motorista Ricardo.

Os Demais colegas do mestrado em Ciência do Solo das turmas de 2001 e 2002: Abel B. Oliveira, Adriana M. M. F de Moura, Adriano Luiz N. Monteiro, Danilo C. de O. Bastos, Isaias F. de Mendonça, Luiz Eduardo S. F. Silva, Rossini M. Corrêa, Silvana A. Espig, Valéria N. Silva, pelas horas de convivência.

AVALIAÇÃO DA EROSIÃO EM ENTRESSULCOS NA CULTURA DA CANA DE AÇÚCAR⁽¹⁾

Autor: Sandro Augusto Bezerra

Orientador: José Ramon Barros Cantalice

RESUMO

A erosão em entressulcos é a forma mais danosa de perdas de solo, pois arrasta a camada mais superficial do solo com a maioria da matéria orgânica, os elementos nutrientes e os insumos agrícolas, que favorecem a produção agrícola. A compreensão do processo erosivo e sua quantificação são de grande importância, pois servem como princípio da elaboração de medidas que evitem a desagregação do solo e da água. Neste sentido o presente trabalho foi realizado para avaliar a eficiência da utilização das diferentes coberturas proporcionadas pela cana de açúcar no controle ao livre escoamento e redução das taxas de erosão em áreas agrícolas, através de chuva simulada na Estação Experimental de Cana de Açúcar de Carpina da UFRPE, nas condições de: (1) solo descoberto; (2) efeito isolado do resíduo em contato com a superfície do solo; (3) efeito isolado do dossel da cana de açúcar e; (4) efeito somado do dossel da cana de açúcar + resíduo em contato com a superfície do solo, para três e 12 meses após corte da cana planta. O valor de erodibilidade do solo em entressulcos para o ARGISSOLO VERMELHO AMARELO TB DISTRÓFICO foi de $1,87 \times 10^6 \text{ Kg s m}^{-4}$. A presença de resíduos em contato com superfície do solo aumentou a rugosidade hidráulica em entressulcos com a conseqüente diminuição das taxas de desagregação do solo. O regime de escoamento encontrado foi laminar lento, e o efeito somado foi mais eficiente na redução das perdas de solo.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, (51f.) – fevereiro de 2003.

EVALUATION OF THE EROSION IN INTERRILL IN THE CULTURE OF THE CANE OF SUGAR⁽¹⁾

Author: Sandro Augusto Bezerra

Adviser: José Ramon Barros Cantalice

SUMMARY

Interrill erosion is the most harmful form of soil loss, because it carries the most superficial layer of the soil with most of organic matter, the nutrient elements and agricultural inputs that enhance the agricultural production. Understanding the erosive process and its quantification are of great importance, since it serves as the beginning of the elaboration of measures to avoid detachment of soil and water loss. The present work aimed to evaluate the efficiency of use of different proportionate coverings for sugarcane to control free drainage and reduce erosion rates in agricultural areas, through simulated rain at the Experimental Station of Cane of Sugar of Carpina of UFRPE, in the conditions of: (1) uncovered soil; (2) isolated effect of crop residue in contact with the surface of the soil; (3) isolated effect of sugarcane canopy; (4) added effect of sugarcane canopy and crop residues soil in contact with surface, for three and 12 months sugarcane harvest. ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Tb DISTRÓFICO interrill erodibility was $1,87 \times 10^6 \text{ Kg s m}^{-4}$. crop residues in contact with soil surface increased hydraulic Interrill roughness in with consequent decrease of the soil detachment. Water flow was laminar slow, and the added effect was more efficient in the soil loss reduction.

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Processos do ciclo hidrológico sobre a superfície terrestre.....	4
2.2 Erosão do solo em entressulcos.....	6
2.3 Importância da chuva na erosão em entressulcos	7
2.4 Utilização de simuladores de chuva para pesquisa sobre erosão do solo.....	9
2.5 Hidráulica e resistência ao escoamento em entressulcos	10
2.5.1 Resistência ao escoamento	11
2.6 Erodibilidade do solo em entressulcos	12
2.7 Eficiência da cobertura do solo na redução erosão em entressulcos.....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Avaliação da erosão em entressulcos	16
3.2 Caracterização geral da área	16
3.2.1 Localização	16
3.2.2 Clima	17
3.2.3 Vegetação e uso atual	17
3.3 Experimento de campo	18
3.3.1 Experimento de campo – 1ª parte.....	18
3.3.2 Experimento de campo – 2ª parte.....	19
3.4 Características da chuva simulada.....	20
3.5 Determinação das características hidráulicas.....	20
3.6 Determinação das taxas de infiltração.....	22
3.7 Determinação das taxas de desagregação do solo e de perdas de solo.....	22
3.8 Determinação da porcentagem de cobertura do solo pelo método fotográfico.....	23
3.9 Análise textural do solo.....	24
3.10 Análise estatística	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 Caracterização hidráulica do escoamento gerado pela chuva simulada.....	25
4.2 Taxas de erosão do solo.....	31
4.3. Erodibilidade do solo na erosão em entressulcos.....	37
5. CONCLUSÕES	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
APÊNDICES	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Interceptação vegetal	5
Figura 2.2	Erosão superficial do solo com o resultado do impacto das gotas de chuva e o transporte de sedimentos pelo escoamento superficial.	6
Figura 2.3	Impacto das gotas de chuva na superfície do solo mostrando o efeito da desagregação e salpico.....	9
Figura 2.4	Relação do Número de Reynolds com o fator perda de carga (f) para escoamento laminar.....	12
Figura 3.1	Mapa da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina – UFRPE.....	17
Figura 3.2	Vista geral do simulador de chuva e da parcela experimental no campo com a cultura da cana de açúcar no 3º mês de estágio fenológico.....	19
Figura 3.3	Vista da Parcela experimental aos 12 meses de estágio fenológico da cultura – Avaliação do efeito isolado da palha da cana de açúcar.....	20
Figura 3.4	Esquema de classificação dos regimes de escoamentos gerados durante as simulações de chuva.....	22
Figura 3.5	Vista aérea da moldura de madeira utilizada para determinação da taxa de cobertura do solo pelo método de Mannering (efeito isolado do dossel).....	23
Figura 3.6	Vista aérea da moldura de madeira utilizada para determinação da taxa de cobertura do solo pelo método de Mannering, à esquerda efeito isolado do resíduo em contato com o solo aos três meses de desenvolvimento à direita aos 12 meses de desenvolvimento.....	23
Figura 4.1.1	Relação do Número de Reynolds com o fator perda de carga de Darcy-Weisbach (f), para o escoamento laminar do tratamento com solo descoberto sob chuva simulada.....	27
Figura 4.1.2	Valores da altura da lâmina de escoamento (a), determinados pela equação (6), e da taxa de infiltração no tempo (b), obtidas pelo método do infiltrômetro aspensor, para o 3º mês de desenvolvimento.....	28
Figura 4.1.3	Aspecto do escoamento pouco espesso em regime laminar lento na cultura da cana de açúcar.....	29
Figura 4.1.4	Valores da altura da lâmina de escoamento (a) determinados pela equação (6) e, taxas de infiltração (b), no tempo obtidas pelo método do infiltrômetro aspensor, para o 12º mês de desenvolvimento.....	31
Figura 4.2.1	Taxas de escoamento médio superficial para a cultura da cana de	

	açúcar: (a) 3° mês de estágio fenológico (b) 12° mês de estágio fenológico, evidenciando o aumento da descarga líquida nos tratamentos estudados.....	33
Figura 4.2.2	Taxas de erosão em entressulcos (desagregação), em função do tempo, para diferentes tratamentos de cobertura do solo promovidos pela cana de açúcar. (a) cana aos três meses de estágio fenológico e (b) cana aos 12 meses de estágio fenológico.....	35
Figura 4.2.3	Taxas de descarga líquida nos entressulcos, em função do tempo, para diferentes tratamentos de cobertura do solo promovido pela cana de açúcar. (a) cana aos três meses de estágio fenológico e (b) cana aos 12 meses de estágio fenológico.....	36
Figura 4.2.4	Taxas de perdas de solo obtidas em função das taxas de cobertura do solo proporcionadas pelos tratamentos do 3° e 12° mês de estágio fenológico da cultura da cana de açúcar	37

Tabela 2.1	Classificação sobre a mudança e uso do solo	5
Tabela 4.1.1	Características hidráulicas do escoamento ocasionado pela chuva simulada na presença de cobertura vegetal aos três meses de desenvolvimento: Cobertura do solo (CS), descarga líquida (q), velocidade média do escoamento (V), altura da lâmina (h), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), viscosidade cinemática (ν), declividade (D) e coeficiente de rugosidade do solo – Darcy-Weisbach (f). Valores médios de três repetições.....	26
Tabela 4.1.2	Características hidráulicas do escoamento ocasionado pela chuva simulada na presença de cobertura vegetal aos 12 meses de estágio fenológico da cultura da cana de açúcar: Cobertura do solo (CS), descarga líquida (q), velocidade média do escoamento (V), altura da lâmina (h), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), viscosidade cinemática (ν), declividade (D) e coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f). Valores médios de três repetições.....	30
Tabela 4.2.1	Cobertura do solo (CS), Taxas de Desagregação (D), perdas de solo (Ps) e coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f), observadas na presença de cobertura vegetal proporcionada pela cana de açúcar aos três meses de desenvolvimento da cultura. Valores médios de três repetições.....	32
Tabela 4.2.2	Cobertura do solo (CS), Taxas de Desagregação (D), perdas de solo (Ps) e coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f) observadas na presença de cobertura vegetal proporcionada pela cana de açúcar aos 12 meses de estágio fenológico da cultura. Valores médios de três repetições.....	34
Tabela 4.3	Valores médios de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}), para todos os testes realizados em condições de solo descoberto (Argissolo Vermelho Amarelo tb Distrófico).....	37

1. INTRODUÇÃO

A desagregação das partículas da superfície do solo pela energia transmitida pela queda das gotas de chuva é o primeiro agente da erosão, particularmente sobre solos com cobertura vegetal escassa, onde o maior dano causado a superfície do solo pelo impacto das gotas de chuva é a deteriorização da estrutura do solo pelo desarranjo de seus agregados. Subseqüente à dispersão física das partículas de solo, a chuva tende a saturar a superfície do solo, e assim, iniciar o escoamento superficial, que tem início quando a intensidade de chuva excede a taxa de infiltração do solo (Brooks, et al, 1997).

A erosão hídrica acelerada constitui um grave problema associado ao uso agrícola dos solos, sendo reflexo do uso e/ou manejo inadequado dos mesmos. Como resultado do escoamento superficial produzido pelas chuvas, partículas da superfície do solo de bacias hidrográficas podem ser erodidas e transportadas através dos processos de erosão em entressulcos, em sulcos e voçorocas. Uma vez erodidas, as partículas de sedimentos são transportadas através dos sistemas fluviais e eventualmente, podem depositar-se em reservatórios ou nos oceanos (Yang & Randle, 1998). Como conseqüências temos a redução da capacidade produtiva do solo, assoreamento de rios, represas, canais e portos, destruição de estradas e poluição de mananciais de água. Indiretamente, afeta a produção de alimentos e os custos de conservação de obras hidráulicas, de estradas e de tratamento de água para o consumo humano (Braidá, 1994).

A compreensão dos fatores que integram o processo de erosão do solo e a quantificação das perdas do solo são de grande importância, pois servem como o princípio da elaboração de medidas que visem a maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis e se possa evitar os efeitos negativos decorrentes da produção, transporte e deposição de sedimentos (Paiva, 2001). Dessa forma, na erosão em entressulcos, quando o solo ainda não apresenta incisões na superfície realizadas pelo escoamento superficial, tem importância a desagregação do solo pelo impacto das gotas de chuva na sua superfície, e a existência de uma lâmina de escoamento pouco espesso que mais parece transportar que desagregar o solo (Govers, 1996). O escoamento superficial que acontece na erosão em entressulcos é com freqüência chamado de fluxo laminar raso (Gerits, 1990).

A erosão dos solos remove argila e a matéria orgânica que se constituem na parte mais reativa do solo. Além do material sólido, a erosão carrega consigo os nutrientes que existem no solo, os fertilizantes aplicados na adubação, os resíduos de pesticidas, existentes no solo. O destino final destes materiais serão as fontes de água, rios, açudes, lagos, represas, etc. e isso provocará grandes problemas de poluição das águas para o consumo humano. A erosão rural também dificulta os trabalhos agrícolas na lavoura. Em áreas erodidas, a presença de sulcos e voçorocas dificulta o trânsito de máquinas e implementos, tanto no preparo do solo como na realização de tratamentos culturais e na colheita, aumentando o tempo necessário para essas operações e o consumo de combustível, além de provocar danos mecânicos às máquinas e implementos. Além disso, a infra-estrutura da propriedade também poderá ser atingida, danificando estradas, cercas e até mesmo benfeitorias (Cassol, 1984).

A zona da mata norte do Estado de Pernambuco, possui grande importância na produção canavieira como matéria prima, para o abastecimento das usinas açucareiras em escala industrial, contribuindo para a utilização da mão de obra, e assim, também servindo como fonte de renda para muitos trabalhadores rurais que dependem deste trabalho. Em função disso, se faz necessário um manejo dos resíduos vegetais na superfície do solo que são efetivos em dissipar a energia do impacto das gotas de chuva, além de constituírem-se em barreira ao livre escoamento superficial da água, concorrendo assim, para que os recursos de solo e água não sejam degradados nas áreas de plantio.

Neste sentido, o presente trabalho visa avaliar a eficiência da utilização das diferentes formas de cobertura de solo proporcionadas pela cana de açúcar no controle ao livre escoamento e redução das taxas de erosão em áreas agrícolas, através de chuva simulada, principalmente pela ação de impacto das gotas de chuva e, pela ação das enxurradas que acarretam na queda da qualidade do solo pela desagregação e transporte das partículas da superfície do solo, que constituem a camada mais fértil para agricultura, e assim:

- Analisar o comportamento das condições hidráulicas do escoamento na produção de sedimentos na erosão em entressulcos,
- Estudar a rugosidade hidráulica do escoamento originada pelos resíduos vegetais da cana de açúcar e sua relação com a redução da erosão;

- Identificar as taxas e o tipo de erosão numa área cultivada com cana de açúcar;
- Relacionar os diferentes níveis de cobertura vegetal promovido pela cultura da cana de açúcar com as respectivas taxas de desagregação do solo;
- Determinar a erodibilidade em entressulcos (K_i) do Argissolo em estudo.

Neste trabalho foram testadas as seguintes hipóteses:

A identificação das características hidráulicas do escoamento em entressulcos possibilitará o conhecimento das condições de contorno em que ocorre a erosão em entressulcos na presença da cultura da cana de açúcar;

A cobertura vegetal promovida pela palha da cana de açúcar relacionar-se-á com a redução das taxas de desagregação do solo na erosão em entressulcos, pelo aumento provocado na resistência hidráulica ao escoamento superficial.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos do ciclo hidrológico sobre a superfície terrestre

Os processos hidrológicos na bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo na bacia: vertical e horizontal. O vertical é representado pelos processos de precipitação e evapotranspiração e o longitudinal pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo). O sistema de circulação da atmosfera é extremamente dinâmico e não linear, dificultando sua previsão quantitativa. Esse sistema cria condições de precipitação pelo resfriamento do ar úmido que formam as nuvens gerando precipitação na forma de chuva e neve (entre outros) sobre os mares e superfície terrestre. A água evaporada se mantém na atmosfera, em média apenas 10 dias. O fluxo sobre a superfície terrestre é positivo (precipitação menos evaporação), resultando na vazão dos rios em direção aos oceanos. O fluxo vertical dos oceanos é negativo, com maior evaporação que precipitação (Tucci, 1997).

No trabalho de Ubarana (1996), é descrita a forma que a precipitação atinge o solo (Figura 2.1), quando o mesmo mantém-se coberto por vegetação: (I) atravessando a vegetação da floresta (em média 85% da precipitação incidente) ou; (II) através dos troncos (1 a 2% da precipitação). A diferença é a interceptação. Na Reserva Duke em Manaus 8,9% da precipitação é interceptada pela vegetação, enquanto que na Reserva da Vale do Rio Doce 13%, sendo 65% no período seco e 1% no período úmido.

Da parcela de precipitação que atinge o solo a mesma pode infiltrar ou escoar superficialmente dependendo da capacidade de infiltração do solo. Essa capacidade depende de condições variáveis, como a quantidade de umidade já existente, das características do solo e da sua cobertura. A água que infiltra, pode percolar para o aquífero ou gerar um escoamento sub-superficial ao longo dos canais internos do solo, até a superfície ou de um curso d'água. A água que percola até o aquífero é armazenada e transportada até os rios, criando condições para manter os rios perenes nos períodos de longa estiagem. Em bacias onde a capacidade da água subterrânea é pequena, com grandes afloramentos de rochas e alta evaporação, os rios não são perenes, como na região Nordeste (Tucci, 1997).

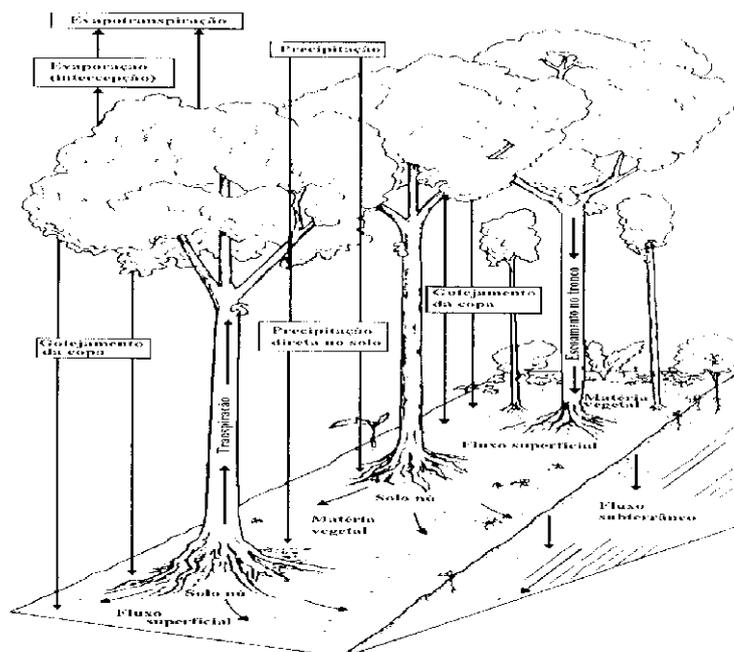


Figura 2.1. Interceptação vegetal – (Fonte: Tucci, 1997).

O ciclo hidrológico, como se observa, sofre uma grande influência do solo, da vegetação e da atmosfera, existindo também a ação do homem agindo no sistema, e a representação desses processos hidrológicos se tornam mais difíceis devido a grande variabilidade do solo, da cobertura vegetal e da atmosfera, inclusive a ação do homem. As alterações sobre o uso e manejo do solo da bacia podem ser classificadas quanto: (1) ao tipo de mudança; (2) ao tipo de uso da superfície ou; (3) à forma de desmatamento. Na tabela 2.1 são apresentadas as principais classificações. Essas alterações da superfície da bacia têm impactos significativos sobre o escoamento.

Tabela 2.1. Classificação sobre a mudança e uso do solo.

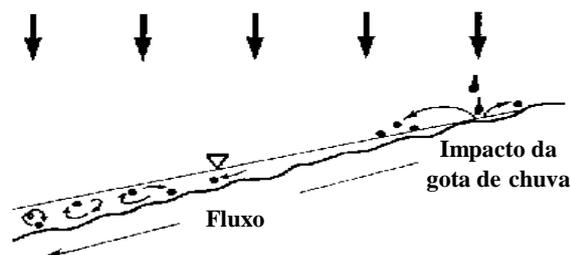
Classificação	Tipo
Mudança da superfície	- Desmatamento; Reflorestamento; Impermeabilização.
O uso da superfície	- Urbanização; - Reflorestamento para exploração sistemática; - Extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes.
Método de alteração	- Queimada; Manual; Equipamentos.

Fonte: Tucci, 1997.

2.2 Erosão do solo em entressulcos

O estudo do processo erosivo, segundo Meyer et al (1975), pode ser subdividido em erosão em entressulcos e erosão em sulcos, conforme as características do fluxo e a origem do sedimento. A erosão em entressulcos é devida ao escoamento superficial uniforme em forma de uma delgada lâmina na superfície do solo, sem, no entanto, ocorrer concentração do fluxo (Foster, 1982). No entanto, segundo Meyer et al. (1975), o processo inicia-se com o impacto direto das gotas de chuva, provocando a desagregação do solo. À medida que a intensidade da chuva supera a taxa da capacidade de infiltração de água no solo e as demandas de retenção e detenção superficial são satisfeitas, inicia-se o escoamento superficial ou enxurrada. Esse escoamento inicialmente ocorre no sentido do declive, tende a concentrar-se em áreas restritas da superfície, formando pequenos canais ou sulcos. Nas áreas de fluxo laminar ocorre uma erosão em entressulcos, onde predomina a desagregação pelo impacto das gotas de chuva e o transporte pelo fluxo laminar raso. Quando ocorre a concentração do fluxo, este causa a desagregação e o transporte das partículas de solo, caracterizando a erosão em sulcos.

A energia é transmitida para a superfície do solo por forças resultantes de impulsos produzidos pela velocidade adquirida da queda das gotas de chuva ou pela velocidade adquirida do movimento do fluxo que, por instantes, pode ser turbulento (eventos de turbulência) do escoamento superficial (Brooks, 1997). O processo de erosão hídrica do solo envolve a desagregação de partículas da sua massa original (Figura 2.2), o transporte dessas partículas (primárias ou agregados) e a eventual deposição das mesmas (Meyer et al., 1975).



Fonte: Brooks, 1997.

Figura 2.2 Erosão superficial do solo com o resultado do impacto das gotas de chuva e o transporte de sedimentos pelo escoamento superficial.

Diversas são as formas de erosão hídrica do solo, a erosão em entressulcos e a erosão em sulcos são as que maiores danos provocam no processo produtivo dos solos utilizados na agricultura. Sendo que, a erosão em entressulcos é a forma mais

danosa, pois arrasta a camada mais superficial do solo onde se encontram a matéria orgânica, os elementos nutrientes e os insumos agrícolas, que favorecem a produção agrícola, como também, as condições para ocorrência dos processos microbiológicos que se refletem na fertilidade do solo, pela decomposição do material orgânico, tornando os nutrientes em forma assimilável pelas plantas (Cantalice, 2002). É uma forma de erosão dificilmente perceptível: entretanto, segundo Bertoni & Lombardi Neto (1990), em culturas perenes formadas em terrenos suscetíveis à erosão, pode-se perceber, após alguns anos, que as raízes, ao serem expostas, indicam a profundidade da camada do solo que foi arrastada.

A erosão em entressulcos é essencialmente independente da erosão em sulcos, ocorrendo em pendentes relativamente curtas e geralmente orientadas segundo o microrelevo superficial. Nessas áreas, o fluxo do escoamento superficial é uniforme e ocorre na forma de fluxo superficial raso (Meyer et al., 1975; Foster, 1982). Para Everaert (1991), a erosão em entressulcos pode ser vista como a combinação de dois diferentes processos: 1) desagregação da massa do solo pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo em entressulcos; 2) o transporte do solo desagregado pelo escoamento em entressulcos, que parece não ter capacidade de transportar todo o sedimento produzido pelo impacto das gotas de chuva, com ou sem influência do impacto das gotas sobre o escoamento em entressulcos.

Segundo Meyer et al. (1975), a capacidade de transporte do fluxo em entressulcos é incrementada com o aumento da declividade da área, quando a disponibilidade de partículas desagregadas para transporte não é um fator limitante, sendo que essa relação é afetada pela textura, agregação, estabilidade dos agregados ao impacto das gotas de chuva, entre outros fatores. Nota-se, que as condições de superfície nos entressulcos são também consideradas no processo de erosão hídrica. A formação de um selo superficial durante a chuva reduz a taxa de infiltração de água no solo, resultando em uma maior taxa de enxurrada e erosão. Este selo forma-se pela ação mecânica das gotas da chuva e pela deposição de partículas desagregadas superficialmente (Ellison, 1947).

2.3 Importância da chuva na erosão em entressulcos

Os danos causados pelas gotas de chuva que golpeiam o solo a uma alta velocidade constituem o primeiro passo no processo da erosão. As gotas golpeiam a superfície do solo rompendo os grânulos e torrões, reduzindo-os à partículas

menores e, em conseqüência, fazendo diminuir a capacidade de infiltração de água do solo. O impacto das gotas de chuva rompe os agregados do solo, desprende e transporta as partículas mais finas, que são as de maior valor, causando também uma compactação na superfície do solo; isso reduz a capacidade do solo de absorver água e aumenta a enxurrada na superfície. Quando a intensidade de chuva é maior que a capacidade de infiltração do solo, as depressões na superfície se enchem de água e causam a enxurrada; durante a chuva, a enxurrada é salpicada, milhões de vezes, pelas gotas. Isso faz romper as partículas do solo, transportando-as em partes cada vez menores, que ficam em suspensão na água (Bertoni e Lombardi, 1985).

Há obviamente uma associação entre o aumento da chuva com o aumento da erosão do solo, ou seja, quanto mais chuva mais erosão, e quanto menos chuva menos erosão, mas em termos estatísticos a correlação entre os dois aspectos são pobres, isto porque, outros aspectos além da quantidade são fundamentais no condicionamento do processo erosivo, como: intensidade e duração da chuva e as condições da superfície do solo no momento do evento, faz a diferença na quantificação do processo erosivo. No trabalho de Siridas et al. (1984), os resultados apresentados evidenciaram que a intensidade e duração de chuva e as condições da superfície do solo são importantes fatores que condicionam a desagregação e o escoamento por impacto das gotas de chuva.

Kinnel em 1991 relata que, se uma partícula de solo, sob uma lâmina de água em movimento, sofre um impacto das gotas de chuva pode ser transportada de três maneiras. Se a partícula é pequena ou possui baixa densidade, poderá mover-se em suspensão; se de tamanho maior ou de alta densidade, pode deslocar-se para o fundo; e se o escoamento tiver velocidade suficiente, as partículas poderão mover-se como carga de fundo. Porém, essas partículas não entram em movimento até que ocorra uma força de ascensão que as coloquem em movimento pela ação de uma força adicional, que é fornecida pelo impacto das gotas de chuva com o fluxo raso e que, dessa forma elevam as partículas de solo no fluxo numa freqüência de ascensão e queda. O transporte é então induzido pelo choque das gotas de chuva sobre o escoamento, o qual, por sua pouca disponibilidade de energia, seria incapaz de transportar essas partículas. Esse processo tem sido chamado de transporte pelo fluxo induzido pelo impacto das gotas de chuva.

Independentemente da capacidade de enxurrada em transportar os sedimentos, várias pesquisas têm demonstrado que, sob condições de fortes intensidades de chuva, a desagregação provocada pelo impacto das gotas de chuva parece ser a fase mais importante da erosão em entressulcos que é o início da erosão hídrica (Ellison, 1947; Young & Wiersma, 1973; Hudson, 1995). O impacto das gotas de chuva (figura 2.3) tem outro importante efeito que a desagregação das partículas. Essas partículas desagregadas conduzem ao selamento da superfície do solo e conseqüentemente reduz a infiltração e aumentando o escoamento superficial (Hudson, 1995).



Fonte: Hudson, 1995.

Figura 2.3 Impacto das gotas de chuva na superfície do solo mostrando o efeito da desagregação e salpico.

2.4 Utilização de simuladores de chuva para pesquisa sobre erosão do solo

Os simuladores de chuva são ferramentas de pesquisa projetada para aplicar chuva de forma semelhante ou de forma a similar às chuvas naturais. Os simuladores são úteis para o estudo da erosão do solo e ensaios hidráulicos, porém, as chuvas devem ser simuladas com características próximas da chuva natural, os dados obtidos de perda de solo e escoamento superficial são analisados cuidadosamente, e os resultados interpretados para obter informações seguras para as condições em que a chuva simulada foi aplicada (Meyer, 1994).

A quantidade e a taxa de aplicação de chuva são importantes para interpretar os dados resultantes. Os simuladores de chuva precisam ser calibrados com precisão para as condições nas quais eles são usados, ou a chuva aplicada precisa ser medida durante as chuvas torrenciais simuladas (Meyer, 1994). Os dados de perdas de solo podem ser obtidos muito rapidamente e eficazmente com o uso dos simuladores de chuva (Meyer, 1979).

No trabalho apresentado por Mondardo (1977), que teve como principal objetivo o uso de simuladores de chuva, “Tipo rotativo”, para prever e avaliar as

perdas por erosão, os testes de calibração revelaram a dificuldade de se obter um controle exato das intensidades de precipitação apenas através da regulação da pressão, indicando a necessidade de medir-se as precipitações durante os testes, usando pequenos pluviômetros, os quais foram distribuídos em vários pontos da parcela.

Meyer (1979), descreveu em seu trabalho com simulador de chuva, as características desejáveis para o equipamento: (1) uma ampla gama de intensidades de chuvas típicas de tempestades; (2) tamanho da gota, velocidade da queda das gotas de chuva e o impacto dessas gotas com características similares as da chuva natural; (3) capacidade de aplicação da chuva simulada em pequenos comprimentos; (4) mínimo tempo entre a aplicação das gotas de chuva, sendo a queda das gotas de chuva intermitente; e, (5) a possibilidade de movimento rápido entre os campos de pesquisas (parcelas).

2.5 Hidráulica e resistência ao escoamento em entressulcos

O conhecimento dos mecanismos da erosão do solo e das propriedades hidráulicas do escoamento superficial tem aumentado nos anos recentes. Entretanto, devido à falta de pesquisas sobre a capacidade de transporte de sedimentos da superfície, muitos modelos matemáticos da erosão do solo empregam relações oriundas da mecânica fluvial. Para o desenvolvimento de modelos de capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento superficial gerado a partir da chuva, é importante a avaliação das características formadas a partir da chuva simulada, como também, se faz necessário avaliar as medidas das características hidráulicas do escoamento superficial, particularmente as condições hidrodinâmicas do fluxo no limite do conhecimento corrente (Guy et al., 1990).

Para o conhecimento da hidráulica de um fluxo, pelo menos alguns parâmetros devem ser estabelecidos com maior precisão. Quando a unidade de descarga e a profundidade da lâmina são medidas corretamente, muitos outros parâmetros podem ser calculados, como a velocidade média do escoamento, a perda de carga, os números de Reynolds e Froude, e ainda, a tensão cisalhante para os estudos de erosão (Savat, 1977). O número de Reynolds relaciona a magnitude das forças de inércia com as forças viscosas, enquanto o número de

Froude relaciona as forças de inércia com os efeitos das forças gravitacionais (Simons & Senturk, 1992).

Guy et al. (1990) observaram que o transporte de sedimentos na erosão em entressulcos, com chuva simulada, ocorreu sob um regime de escoamento laminar subcrítico para Reynolds entre 9 e 40 e número de Froude < 1 . Já a resistência ao escoamento em regime laminar, pode ser descrita pela equação de Darcy-Weisbach, que define a perda de carga do escoamento (Gerits et al., 1990).

2.5.1 Resistência ao escoamento

A resistência ao escoamento em regime laminar lento pode ser descrita pela equação de Darcy-Weisbach que define a perda de carga do escoamento (Gerits et al., 1990), a qual é dada pela equação (1):

$$f = \frac{8ghS}{V^2} \quad (1)$$

onde f = fator de fricção ou de perda de carga (adimensional); S = inclinação do declive ($m\ m^{-1}$); g = aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); h = altura da lâmina do escoamento (m); e V = velocidade média do escoamento ($m\ s^{-1}$).

Em experimentos de erosão em entressulcos, as forças hidrodinâmicas que se contrapõem às forças de resistência ao escoamento produzem a seguinte relação em função do Número de Reynolds para superfícies planas com ou sem impacto das gotas de chuva (Yoon & Wenzel, 1971):

$$f = K / Re \quad (2)$$

onde K é um parâmetro hidráulico adimensional de resistência que varia com as características de forma e de rugosidade da superfície (Phelps, 1975; Chow, 1959), impacto das gotas de chuva, declive e descarga líquida cujo o valor teórico para escoamento laminar é 24 (Savat, 1980; Yoon & wenzel, 1971; Katz, et al., 1995). Esta relação é mostrada por Gerits, et al., (1990) na figura 2.4.

Cantalice, 2002 relata que Einstein, H. A., 1950, dividiu a resistência total (f_t) do escoamento para canais abertos em resistência de grão (partícula) (f_g) e resistência de forma (f_f), ou seja:

$$f_t = f_g + f_f \quad (3)$$

A partir de então, a resistência ao escoamento tem sido dividida em muitas categorias, sendo a resistência de partícula desdobrada em rugosidade de partículas

individuais e a rugosidade dos microagregados, e a rugosidade de forma entre os efeitos de restos vegetais, pedras e vegetação (Abrahms, 1998). A resistência ou rugosidade de partícula resulta das forças de tensão cisalhante e pressões exercidas sobre as partículas, agregados e microagregados do solo. A resistência ou rugosidade de forma é causada por pedras, restos vegetais, vegetação e protuberâncias microtopográficas que obstruem o escoamento e aumentam a diferença de pressão ao longo dos obstáculos (Abrahms, 1998).

Fonte: Radojkovic & Maksimovic In: Gerits, et al. (1990).

Figura 2.4 – Relação do Número de Reynolds com o fator perda de carga (f), para o escoamento laminar.

2.6 Erodibilidade do solo em entressulcos

Erosão é uma função da erosividade e erodibilidade. A erosividade depende completamente da chuva e assim, está fora do controle. A erodibilidade depende em parte das propriedades do solo, o qual novamente não se pode mudar, pelo menos só para uma pequena extensão das propriedades do solo, e a uma maior extensão que seria o manejo do uso do solo e da colheita no qual ambos são completamente controlados pelo homem (Hudson, 1995).

A erodibilidade do solo (fator K_i) da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) refere-se a susceptibilidade natural do solo à erosão, que é recíproca de sua resistência (Hudson, 1995), devido exclusivamente às características intrínsecas dadas pelas propriedades físicas, químicas e mineralógicas (Foster, 1982), então, um solo com alta erodibilidade vai sofrer mais erosão que um solo com baixa erodibilidade se forem expostos a uma mesma chuva (Hudson, 1995; Bertoni e Lombardi Neto 1985). Alguns solos são mais erodidos que outros, mesmo que a chuva, a declividade, a cobertura vegetal e as práticas de manejo sejam as mesmas. Essa diferença, devido às propriedades do solo, é denominada de erodibilidade do

solo (Bertoni e Lombardi, 1985). Essas propriedades e suas interações influenciam a capacidade que o solo tem de resistir às forças de desagregação e transporte desenvolvidas pelo impacto das gotas de chuva (Braidá, 1994).

Na erosão em entressulcos, onde a energia de impacto das gotas de chuva tem importância fundamental para promover a desagregação (Ellison, 1947) e para o transporte das partículas do solo, a erodibilidade representa a susceptibilidade do solo à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e ao transporte pelo fluxo laminar (Braidá & Cassol, 1996). Elliot et al. (1989), apresentaram uma expressão para determinação da erodibilidade do solo em entressulcos, na qual existe um fator de correção da declividade, que reflete a limitação da capacidade de transporte do fluxo em declives reduzidos, como também a limitação à desagregação do solo ocasionada pelo impacto das gotas de chuva em declives elevados. A expressão é a seguinte:

$$K_i = \frac{D_i}{i^2 S_f} \quad (4)$$

Onde, K_i = erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}); D_i = taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); i = intensidade da chuva (m s^{-1}), e S_f = fator de correção para o declive, dado pela equação:

$$S_f = 1,05 - 0,85 \exp^{(-4 \text{sen}(\theta))} \quad (5)$$

Onde θ é o ângulo do declive. Este fator S_f é 0,2 para declive plano, 1 para declive de 45° , e o valor máximo é 1,05 para declives de 90° .

2.7 Eficiência da cobertura do solo na redução da erosão em entressulcos

Os prejuízos produzidos pela agricultura em relação a não utilização de práticas de prevenção ou controle à erosão têm causado, ao produtor rural, um esgotamento dos solos, queda da produção e a degradação das características físicas, químicas e biológicas das áreas produtivas, acarretando abandono da área, antes produtiva. Isso devido o agricultor mal informado, fazendo-se da utilização de áreas declivosas com plantios no sentido da pendente e sem nenhuma medida no controle das perdas de solo. A utilização da cobertura vegetal exerce influência marcante na redução das perdas de solo e água. Em trabalho apresentado por Nascimento & Lombardi Neto (1999), para avaliar a eficiência de três leguminosas utilizadas como adubo verde e plantas no controle da erosão, relata que, a

capacidade de proteção do solo exercida pelas plantas avaliadas em seu trabalho, depende da rapidez de crescimento e de suas características morfológicas, principalmente em relação à cobertura do solo proporcionada.

Fonseca (2001), relata que os sucessivos impactos das gotas de chuva contribuem para reduzir a taxa de infiltração através da redução da rugosidade superficial e da formação de uma fina camada adensada na superfície, como é demonstrado em estudos. Chaves et al. (1983) em seu trabalho observaram que a camada adensada, em suas previsões sobre as taxas de infiltração de água no solo, a qual recebe o nome de selo superficial, pode chegar a reduzir a permeabilidade do solo em 90%. E essa redução nas taxas de infiltração de água no solo aumenta o escoamento superficial e, conseqüentemente os riscos de perda de solo por erosão.

Com isso, a presença de resíduos vegetais na superfície do solo aumenta a rugosidade hidráulica dessa superfície, reduzindo a velocidade e aumentando a profundidade do fluxo superficial (Foster, 1982; Kitahara, 1994; Kitahara, 1995), interceptando as gotas de chuva dissipando sua energia, evitando a desagregação das partículas e a formação de selo superficial (Mannering & Meyer, 1963). Assim, esse tipo de cobertura do solo reduz a erosão em entressulcos a partir de três efeitos: (1) impedindo o impacto direto das gotas de chuva na superfície do solo, principal fonte de energia de desagregação nessas áreas; (2) reduzindo a capacidade de transporte do fluxo superficial, pela redução de sua velocidade, e (3) aumentando a profundidade do fluxo que, então, pode dissipar a energia de impacto das gotas de chuva, reduzindo assim, a taxa de desagregação (Mutchler & Young, 1975).

Em trabalho realizado por Silva, et al. (1986), observou-se que a eficiência da cobertura vegetal oferecida pelas diferentes culturas, associadas ou não a práticas conservacionistas, quando comparadas com a parcela desnuda, manifestou-se através da redução nas perdas de solo da ordem de 99% para o capim-pangola, seguido da cana-de-açúcar com 98%, milho 89%, feijão 87% e algodão 86% e, que a utilização das culturas gramíneas apresentaram maior controle à erosão que as espécies de outras famílias.

Segundo Rockenbach (1992), o contato direto da palha de trigo com a superfície do solo, além de ter propiciado a interceptação das gotas de chuva, dissipando a energia cinética das gotas junto à superfície do solo, serviu também, como obstáculo ao livre escoamento do fluxo superficial da água. Braida & Cassol

(1999), percebeu uma diminuição significativa da concentração de sedimentos na enxurrada com o aumento da quantidade de palha (trigo e milho), independentemente do tipo de palha. Os resíduos vegetais na superfície do solo reduzem a desagregação de partículas do solo, por diminuírem a área exposta ao impacto direto das gotas de chuva, reduzindo a concentração de sedimentos na enxurrada.

Lima (1997), em trabalho realizado com o objetivo de quantificar as taxas de perda de solos em entressulcos sob diferentes tipos de preparo do solo e manejo de resíduos culturais, observou que, essas taxas atingiram valores significativamente menores no sistema de preparo do solo que se caracterizou pela manutenção dos resíduos culturais e por uma menor mobilização na superfície do solo. No tratamento plantio direto, as perdas totais de solo em entressulcos foram reduzidas em 93%, em relação ao tratamento solo descoberto.

Silva (2002), observou que a presença de cobertura proporcionou a estabilidade e proteção de partes dos agregados na superfície do solo reduzindo a erosão, mostrando-se de acordo com o trabalho de Albuquerque et al. (2000), que em solos de alta estabilidade de agregados, a resistência à desagregação pelo impacto das gotas de chuva foi maior verificando que em solos com agregados estáveis a formação do selo superficial é menor, havendo assim, uma maior taxa de infiltração de água e menor erosão hídrica.

No trabalho de Oliveira & Silva (1982), a presença dos restos da cultura antecedente na superfície do solo manejado com plantio direto, dissipa a energia cinética das gotas de chuva, evitando seu choque direto com o solo e a desagregação causada por este impacto, sendo, a erosão, acentuadamente diminuída. Além disso, a menor desagregação, evitando o selamento e, portanto, a obstrução dos poros na superfície do solo, altera o comportamento hidráulico do escoamento na erosão em entressulcos, pela redução da velocidade, pelo aumento da altura e da resistência ao escoamento (Cantalice & Cassol 2002).

O efeito da cobertura do solo na diminuição das perdas por salpico foi estudado por Siridas et al. (1984) nos manejos: preparo convencional, escarificação e plantio direto com cobertura do solo de 30, 50 e 90%, respectivamente. Após 60 minutos de chuva simulada, as massas de solo salpicado e coletadas na área com plantio direto, escarificação e preparo convencional corresponderam a 0,9, 3,8 e 11,3 kg m⁻², respectivamente, indicando claramente que a maior cobertura no plantio

direto reduziu as perdas em 92 e 93% em relação às determinadas no solo escarificado e sob preparo convencional.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Avaliação da erosão em entressulcos

O desenvolvimento dos estudos sobre a avaliação da erosão em entressulcos na cultura da cana de açúcar foram realizados em condições experimentais de campo. Os dados coletados foram trazidos para laboratório, e analisados. As relações de erosão em entressulcos foram determinadas em duas condições: com o solo descoberto e com o solo sob diferentes porcentagens de cobertura do solo, proporcionada pela cultura da cana de açúcar e sua palha, em duas épocas após o corte da cana planta.

3.2 Caracterização geral da área

3.2.1 Localização

Os trabalhos foram desenvolvidos na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina da UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO, localizada na zona úmida costeira do Estado de Pernambuco, na microregião homogênea da Mata Seca Pernambucana, município de Carpina, distando 63 km do Recife e aproximadamente 300m da BR 408 (Figura 3.1). Possui uma área de 261,95 ha e está compreendida entre os paralelos 7° 51'e 7° 53' latitude sul e meridianos 35° 14' e 35° 15' longitude oeste, limitando-se ao norte com o perímetro urbano de Carpina, ao sul com a Usina Petribu e com o Engenho Novo, a leste com o Engenho Novo e a oeste com o curtume (Alves, 1994).

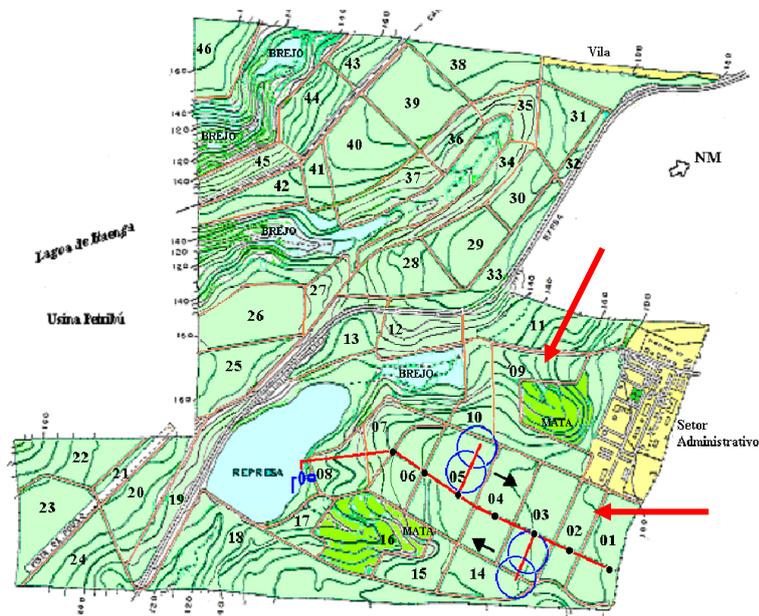


Figura 3.1. Mapa da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina – UFRPE (setas vermelhas indicam a localização da realização dos trabalhos).

3.2.2 Clima

A área é caracterizada pelo tipo climático As' da classificação de Köppen, ou seja, tropical chuvoso com verão seco. Pela classificação bioclimática de Gaussen, a área enquadra-se no tipo 3cTh, mediterrâneo quente ou nordestino de seca atenuada, com índice xerotérmico entre 40 e 100, e 3 a 4 meses secos. O mês mais frio apresenta temperatura superior a 15° celsius (Jacomine et al., 1973, Alves, 1994). Segundo Koffler et al. (1986), fornecidos pelo posto meteorológico de Carpina (7° 47' de latitude sul, 35° 15' de longitude oeste, e 178 metros de altitude). A precipitação pluviométrica média anual de 1975–1985, com 1137,2mm, segundo SUDENE (1990).

3.2.3 Vegetação e uso atual

A vegetação primária foi devastada em quase toda a Estação Experimental de Cana-de-açúcar quer em favorecimento das atividades agrícolas, principalmente a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp), e outras para pesquisa como a acerola, amendoim, etc. A área onde foram feitos os testes de simulação de chuvas, corresponde no mapa, figura 3.2.1, aos talhões 9 e 2, com a utilização das variedades da cana SP-791011 e RB-83102, respectivamente.

3.3. Experimento de campo

Os experimentos foram conduzidos em duas etapas: a primeira realizou-se no mês de março do ano de 2002, com uma cana de açúcar, variedade SP - 791011 no seu 3º mês após o corte da cana planta; a segunda etapa foi realizada no mês de setembro, com a cultivar de cana de açúcar variedade RB - 83102 no seu 12º mês após o corte da cana planta. Os experimentos foram iniciados, após uma breve preparação da área, no caso do solo descoberto foi realizada uma aração e uma gradagem, já os solos com cobertura foram preparados com a limpeza da área e localização dos blocos experimentais, as parcelas foram orientadas segundo o maior declive. Cada etapa é descrita com maior detalhamento a seguir:

3.3.1 Experimento de campo – 1ª parte

No terço médio de uma pendente do talhão nove com uma declividade média de 13% e cultivadas com cana-de-açúcar variedade SP – 791011 (Figura 3.2), foram instaladas 12 (doze) parcelas experimentais de 3m² (1 x 3m) divididas em três blocos, delimitadas por chapas de alumínio de 15cm de altura, sendo fixadas no solo a uma profundidade de 8cm com a maior dimensão no sentido do declive, as quais possuíam na sua parte inferior, uma calha coletora para a amostragem da enxurrada. O solo onde se montou o experimento é um Argissolo Vermelho Amarelo segundo a nova classificação da (EMBRAPA, 1999), conforme perfil descrito por (Alves, 1994). A cultura da cana-de-açúcar estava no seu 3º mês de estágio fenológico e plantadas segundo as curvas de nível. As parcelas experimentais receberam os seguintes tratamentos: **SD**. Solo recém preparado e descoberto. Neste tratamento para que se pudesse obter a máxima taxa de perdas de solo, realizou-se uma aração e uma gradagem, no sentido do maior declive, retirando-se todo resto de palha; **D**. Efeito isolado do dossel da cana de açúcar, que foi removido toda a palha da superfície; **D+R**. Efeito do dossel da cana de açúcar + resíduo em contato direto com a superfície, manteve-se a palha da cana de açúcar presentes na superfície; **R**. Efeito isolado do resíduo em contato direto com a superfície do solo. Neste caso, foram cortadas as touceiras da cana de açúcar presentes dentro da delimitação da parcela, mantendo-se neste tratamento todas a palha da cana de açúcar; As superfícies das parcelas experimentais foram aplainadas no sentido do declive para obtenção das máximas taxas de erosão.



Figura 3.2. Vista geral do simulador de chuva e da parcela experimental no campo com a cultura da cana de açúcar no 3º mês de estágio fenológico.

3.3.2. Experimento de campo – 2 parte

Numa pendente do talhão dois, com uma declividade média da área de 8,4% e cultivadas com cana de açúcar variedade RB – 83102 (Figura 3.3), foram instaladas sete parcelas experimentais conforme descrição do item 3.3.1. O solo onde se montou o experimento é um Argissolo Amarelo segundo a nova classificação da (EMBRAPA, 1999), conforme perfil descrito por (Alves, 1994), com as parcelas de 4,29 m² (3,3 x 1,3m) para os testes com cobertura do dossel da cana, de acordo com a área de cobertura das folhas da cana de açúcar, e 3 m² (3 x 1m) para os testes com resíduo da palha da cana de açúcar, divididas em três blocos. A cultura da cana de açúcar estava no seu 12º mês de estágio fenológico e plantadas segundo as curvas de nível. As parcelas experimentais receberam os seguintes tratamentos: D2. Efeito isolado do dossel da cana-de-açúcar; D+R2. Efeito do dossel da cana de açúcar + resíduo em contato direto com a superfície do solo; R2. Efeito isolado do resíduo em contato direto com a superfície do solo. Os tratamentos receberam os mesmos preparos do item 3.3.1. As superfícies das parcelas experimentais foram aplainadas no sentido do declive para obtenção das máximas taxas de erosão.



Figura 3.3. – Vista da Parcela experimental aos 12 meses de estágio fenológico da cultura – Avaliação do efeito isolado da palha da cana de açúcar.

3.4. Características da chuva simulada

As chuvas simuladas tiveram duração de 1 hora e foram realizadas: 1ª etapa experimental no mês de março/2002 e 2ª etapa experimental em setembro/2002. O simulador de chuva utilizado foi desenvolvido no laboratório de Uso, Manejo e Conservação do Solo do Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, equipado com um bico aspersor tipo Veejet 80-150 com diâmetro interno de $\frac{1}{2}$ polegada. O bico ficou a 3,1m acima da superfície do solo na 1ª etapa de realização dos testes e a 5,7m de altura na 2ª etapa de realização dos testes, operando a uma pressão de saída de 41 KPa na saída da água no bico, verificada com o auxílio de um manômetro. O abastecimento do sistema foi realizado através de uma bomba submersa colocada em um reservatório de água de 1000L. A intensidade média das chuvas foi de 103 mm h^{-1} para a 1ª etapa e 100 mm h^{-1} para a 2ª etapa, aferidas através de um conjunto de 10 pluviômetros colocados ao acaso ao lado da área útil das parcelas experimentais.

3.5. Determinação das características hidráulicas

A descarga líquida (q) por unidade de largura foi determinada a partir das coletas de enxurradas em potes plásticos na extremidade da calha coletora, com duração de 10 segundos a cada 5 minutos, sendo expressa em ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). A velocidade superficial (V_s) do escoamento gerado a partir da chuva simulada foi determinada através da tomada de tempo gasto, por meio de um cronômetro, para o

corante (azul de metileno) percorrer a distância entre dois pontos fixos na parcela sendo expresso em m s^{-1} . Essas determinações foram realizadas em intervalos de 5 (cinco) minutos, a partir da formação e deslocamento da lâmina de escoamento. As velocidades médias do escoamento (V) foram determinadas pelo produto das velocidades superficiais do escoamento por um fator de correção ($\alpha = 2/3$), conforme (Cantalice, 2002; Farenhorst & Bryan, 1995 e Katz, 1995).

A altura da lâmina do escoamento (h) foi obtida pela equação (6), derivada por Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para solução cinemática das equações de Saint-Venant:

$$h = \frac{q}{V} \quad (6)$$

onde q = descarga líquida por unidade de largura em ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}) e h = altura da lâmina de escoamento (m). O número de Reynolds (Re) foi obtido pela equação (7) segundo (Simons & Senturk, 1992):

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (7)$$

onde Re = número de Reynolds, adimensional; ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). A viscosidade cinemática foi determinada pela utilização da equação (8) segundo (Julien, 1995), sendo a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) aferida por meio de um termômetro em cada teste.

$$\nu = [1,14 - 0,031 (T - 15) + 0,00068 (T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (8)$$

onde ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e T = temperatura da água em $^{\circ}\text{C}$. O número de Froude (Fr) foi obtido pela expressão (9) de acordo com (Simons & Senturk, 1992):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (9)$$

onde Fr = número de Froude, adimensional; e g = aceleração da gravidade (m s^{-2}). A partir de então, dos números de Reynolds e Froude, obteve-se dos regimes de escoamento gerados a partir das chuvas simuladas de acordo com o esquema da Figura 3.4 (Simons & Senturk, 1992):



Figura 3.4. Esquema de classificação dos regimes de escoamentos gerados durante as simulações de chuva.

A rugosidade foi determinada pelo coeficiente de Fricção de Darcy-Weisbach na forma da expressão (1).

3.6 Determinação das taxas de infiltração

As taxas de infiltração de água no solo foram obtidas nas duas etapas experimentais do trabalho pelo método do Infiltrômetro Aspensor, onde as taxas de infiltração foram determinadas pelas diferenças entre as taxas de precipitação e as de escoamento superficial produzidos nos tratamentos nas parcelas experimentais.

3.7. Determinação das taxas de desagregação do solo e de perdas de solo

As taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos foram determinadas pela pesagem do material coletado nos potes plásticos. Aos potes, após a pesagem, adicionou-se 5mL de alúmen de potássio a 5%, para deposição das partículas (Cantalice, 2002). 24 horas depois, o sobrenadante foi succionado e os potes levados para secagem em estufa a 65°C, após secar, os potes foram pesados com o solo. A relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água-sedimento expressa a concentração de sedimentos em (kg L⁻¹).

As taxas de desagregação do solo (D) foram determinadas conforme a expressão abaixo:

$$D = \frac{M_{ss}}{A \cdot D_c} \quad (10)$$

onde M_{ss} = massa do solo seco desagregado (Kg), A = área da parcela (m²) e D_c = duração da coleta em (s).

As perdas de solo foram obtidas através da seguinte equação:

$$P_s = \frac{\sum(Q \cdot C_s \cdot t)}{A} \quad (11)$$

onde P_s = perdas de solo (kg m^{-2}); Q = vazão (L s^{-1}); C_s = concentração de sedimentos (kg L^{-1}) e t = intervalo entre as coletas (300 s).

3.8. Determinação da porcentagem de cobertura do solo pelo método fotográfico

A porcentagem de cobertura do solo foi determinada através do método de Mannering descrito por Bezerra et al. (2002), que utiliza a projeção fotográfica de uma moldura com a cobertura vegetal da área. Inicialmente construiu-se uma moldura de madeira nas dimensões de 76cm de largura por 51cm de comprimento, a qual foi então, montada sobre uma área representativa das parcelas (Figura 3.5 e 3.6). Em seguida foi feita a fotografia enquadrando-se a moldura no visor da câmara digital. Com o auxílio de um computador e um Data Show, projetou-se as molduras fotografadas em um quadro padrão (APÊNDICE 10), fixado numa tela. Com a soma da contagem das intersecções entre as linhas retas horizontais e verticais, com os pontos de cobertura vegetal da superfície (copa e/ou resíduo) projetados, tem-se a porcentagem total de cobertura vegetal, sendo que cada ponto de intersecção representa 2%, pois 50 são os pontos de intersecção.



Figura 3.5. Vista aérea da moldura de madeira utilizada para determinação da taxa de cobertura do solo pelo método de Mannering (efeito isolado do dossel).

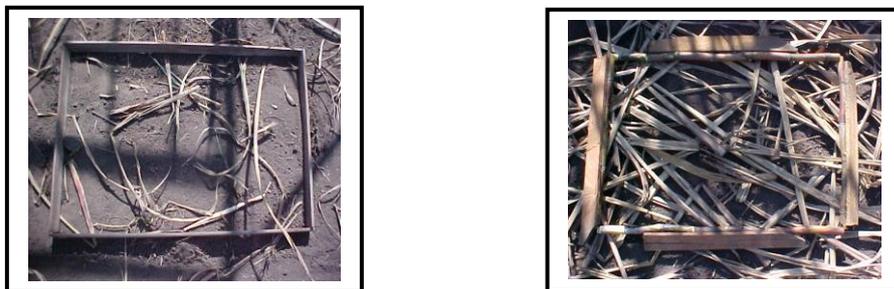


Figura 3.6. Vista aérea da moldura de madeira utilizada para determinação da taxa de cobertura do solo pelo método de Mannering, à esquerda efeito isolado do resíduo em contato com o solo aos três meses de desenvolvimento, e à direita aos 12 meses de desenvolvimento.

3.9. Análise textural do solo

Foi realizada a análise textural do solo no Laboratório de Física do Solo da UFRPE, seguindo-se a metodologia recomendada pela EMBRAPA (1997), através do uso do densímetro para o Argissolo Vermelho Amarelo do talhão nove. As características granulométricas da camada superficial do solo utilizado foram: Argila - 0,228 kg kg⁻¹; Silte - 0,097 kg kg⁻¹; Areia – 0,678 kg kg⁻¹

3.10. Análise estatística

A análise estatística foi realizada utilizando-se o programa SAS – Statistical Analytical System (SAS Institute, 1998). A análise dos resultados de descarga líquida, velocidade média do escoamento, altura da lâmina de escoamento e a rugosidade hidráulica do coeficiente de Darcy-Weisbach, foram arranjados através de um delineamento em três blocos casualizados com quatro tratamentos cada para realização da análise de variância do experimento, totalizando 12 observações na 1ª etapa de realização dos testes. Na 2ª etapa dos testes, foram realizadas em três blocos e três tratamentos, com um total de nove observações, sendo que nesta 2ª etapa foram perdidas duas parcelas. A comparação entre as médias de tratamento foi realizada pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% (SAS Institute, 1998). A análise de comparação entre as médias dos resultados de perdas de solos e fator de fricção de perda de carga foram realizadas através do teste de Duncan ao nível de significância de 5% (Benzatto & Kronka, 1995).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização hidráulica do escoamento gerado pela chuva simulada

Constam na tabela 4.1.1 as condições hidráulicas médias do escoamento, na presença das diferentes condições de cobertura criadas pela cultura da cana-de-açúcar, aos 3 meses de estágio fenológico, após a estabilização da lâmina que aconteceu em torno dos 40 minutos de teste. Observa-se pelos valores de $Re < 500$ e $Fr < 1$ que o regime de escoamento para todos os tratamentos trabalhados foi laminar lento. Os valores de descarga líquida (q) na ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e altura de lâmina de 10^{-3} m , juntamente com o regime de escoamento caracterizado por baixos Reynolds, estão em acordo com a magnitude de lâminas de escoamento obtidas por Farenhorst & Bryan (1995); Guy et al. (1990); Guy et al. (1987) e Cantalice (2002), permitindo inferir que ocorreu um escoamento característico de erosão em entressulcos. No trabalho de Guy et al. (1990) realizado a partir de chuvas simuladas, obteve-se descargas líquidas de $9,07 \times 10^{-6}$ a $4,04 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e altura da lâmina de $2,51 \times 10^{-4}$ e $5,94 \times 10^{-4} \text{ m}$. Da mesma forma Farenhorst & Bryan (1995) obtiveram lâminas de $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ de altura e descargas líquidas de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e Cantalice (2002), que obteve descargas líquidas de $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e altura da lâmina de $2,26 \times 10^{-4} \text{ m}$, em experimento de campo.

Ainda na tabela 4.1.1, percebe-se reduções na velocidade média do escoamento promovida pelos efeitos isolados do dossel da cana-de-açúcar e do resíduo constituído de palha, como também, pelo efeito conjunto dos mesmos. Reduções na velocidade do escoamento também foram observadas por Cantalice (2002), na presença de diferentes doses de palha de soja, essa redução pode ser explicada através da elevação da resistência ao escoamento, retratada pela equação do coeficiente de rugosidade hidráulica f de Darcy-Weisbach.

Tabela 4.1.1. Características hidráulicas do escoamento ocasionado pela chuva simulada na presença de cobertura vegetal aos três meses de desenvolvimento: Cobertura do solo (CS), descarga líquida por unidade de largura (q), velocidade média do escoamento (V), altura da lâmina (h), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), viscosidade cinemática (ν), declividade (S) e coeficiente de rugosidade do solo – Darcy-Weisbach (f). Valores médios de três repetições.

Trat	CS		q	V	h	ν	Re	Fr	S	f
	$m^2 m^{-2}$	$m^2 s^{-1}$	$m^2 s^{-1}$	$m s^{-1}$	m	$m^2 s^{-1}$			$m m^{-1}$	
SD	0,00	$8,7050 \times 10^{-5}$	0,06689	$1,301 \times 10^{-3}$	$8,28 \times 10^{-7}$	$105,13$	0,5921	0,127	2,91	
R	0,185	$8,8178 \times 10^{-5}$	0,05518	$1,598 \times 10^{-3}$	$8,28 \times 10^{-7}$	106,50	0,4407	0,090	3,69	
D	0,30	$5,7053 \times 10^{-5}$	0,05573	$1,024 \times 10^{-3}$	$8,21 \times 10^{-7}$	69,42	0,5561	0,085	2,21	
D + R	0,51	$5,7233 \times 10^{-5}$	0,04538	$1,261 \times 10^{-3}$	$8,28 \times 10^{-7}$	69,12	0,4080	0,104	5,01	

SD = solo recém preparado e descoberto; D = efeito isolado do dossel da cana-de-açúcar; D+R = efeito do dossel da cana-de-açúcar + resíduo na forma de palha; R = resíduo na forma de palha da cana-de-açúcar. Os valores de q, V, h, não diferiram significativamente ao nível de 5% de probabilidade, e f não difere estatisticamente pelo teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade.

O f foi pouco maior para o efeito isolado da palha da cana em comparação com o efeito isolado do dossel da cana-de-açúcar, enquanto os efeitos somados destes dois fatores apresentaram a maior rugosidade hidráulica. Observa-se que o solo descoberto apresentou um valor de 2,91 para o coeficiente de Darcy-Weisbach maior que a rugosidade criada pelo efeito do dossel. Essa rugosidade do solo descoberto ocorreu por conta das operações de preparo (uma aração e uma gradagem), que ao revolverem o solo acabaram por originar torrões e grandes agregados na superfície do solo, portanto, essa é uma rugosidade de forma. Tal rugosidade decresce no decorrer do tempo (Allmaras, 1966), pelo efeito de impactos sucessivos das gotas de chuva sobre a superfície do solo (Johnson, 1979), o que a caracteriza como uma rugosidade de forma transitória.

Observa-se também que apesar da cobertura de solo promovida pelo dossel da cana-de-açúcar ter sido superior a cobertura promovida pela palha da cana-de-açúcar, a sua rugosidade foi menor, devido ao fato da palha da cana estar em contato direto com a superfície do solo proporcionando uma resistência maior ao livre escoamento do fluxo. Naturalmente o maior valor do coeficiente de Darcy-Weisbach (5,01) foi apresentado pelo tratamento do efeito somado do dossel e do resíduo em contato direto com o solo. A ordem de grandeza dos valores de rugosidade de Darcy-Weisbach (f) para os baixos valores de números de Reynolds, na condição de solo descoberto e sob chuva simulada da tabela 4.1.1 representados na figura 4.1.1 abaixo, estão em concordância com os valores de Radojkovic & Maksimovic (1987), constantes da figura 2.6.1 como demonstrado abaixo:

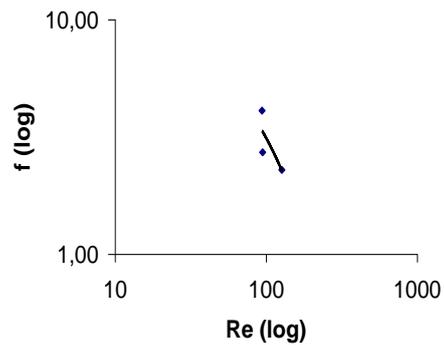


Figura 4.1.1 – Relação do Número de Reynolds com o fator perda de carga de Darcy-Weisbach (f), para o escoamento laminar do tratamento com solo descoberto sob chuva simulada.

Os valores da altura da lâmina de escoamento (h), constantes na tabela 4.1.1, determinados no experimento de campo, foram obtidas a partir da equação (6). Nota-se na figura 4.1.2.a, que a altura da lâmina de escoamento do experimento aos 3 meses de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, apresentou uma tendência de estabilidade em torno dos 40 minutos de testes para todos os tratamentos.

Observa-se ainda na figura 4.1.2.a, que o efeito isolado do resíduo em contato direto com a superfície do solo apresentou a maior altura da lâmina de escoamento, apesar de ter proporcionado apenas 19% de cobertura do solo (tabela 4.1.1), enquanto o efeito somado do dossel + resíduo e o efeito isolado do dossel com 51% e 30% de cobertura do solo, respectivamente, apresentaram menores alturas de lamina. Essa diferenciação na altura do escoamento está relacionada ao tipo da cobertura vegetal, pois o resíduo em contato direto com o solo também está em contato direto com o escoamento e, por isso interfere mais no mesmo, enquanto o dossel não. Esse fato é comprovado pelo maior valor de rugosidade para o efeito isolado do resíduo. Para o caso do efeito somado do dossel + o resíduo com 51% de cobertura, novamente o efeito do contato direto do resíduo se sobrepôs, pois descontando-se a percentagem de cobertura do dossel (30%), fica-se com 21% para o efeito do resíduo, embora o valor de f ter sido o mais elevado. Esse elevado valor de f deve-se também ao efeito do dossel que promove uma maior interceptação com conseqüente maior infiltração (figura 4.1.2.b), retardando assim, o início do escoamento e diminuindo a altura da lamina e a descarga líquida (tabela 4.1.1). Ainda na figura 4.1.2.b, observa-se que o resíduo em contato direto com o solo apresentou taxa de infiltração comparáveis com as taxas do solo descoberto,

sugerindo uma espécie de impermeabilização da superfície do solo pelo contato do resíduo.

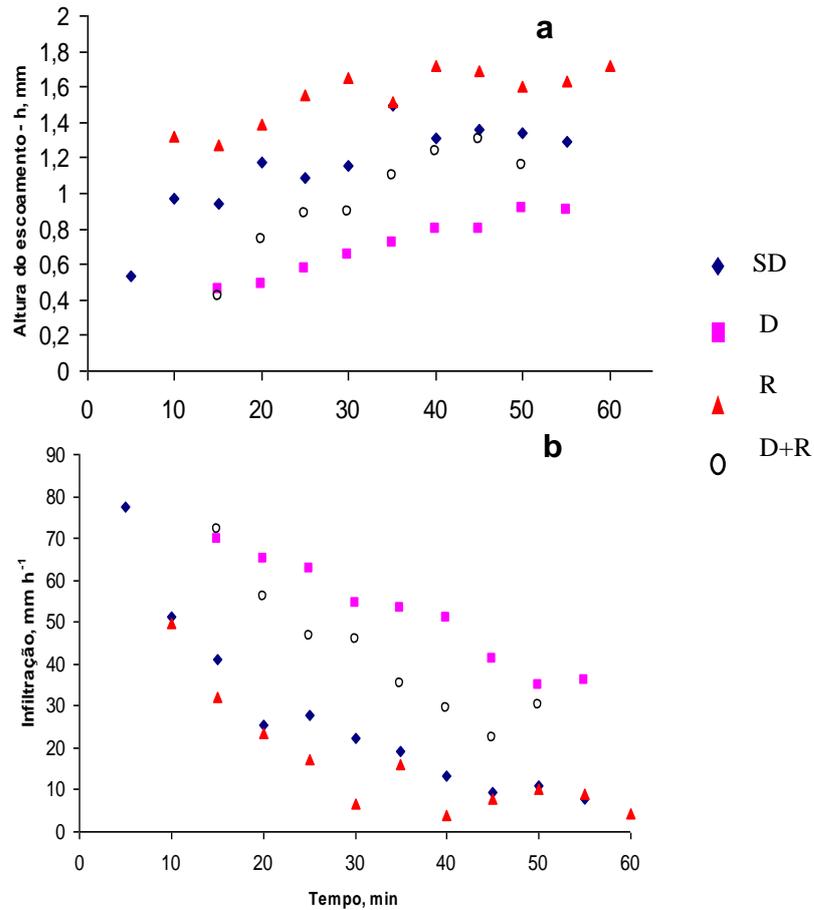


Figura 4.1.2 – Valores da altura da lâmina de escoamento (a), determinados pela equação (6), e da taxa de infiltração (b), no tempo, obtidas pelo método do infiltrômetro aspersor, para o 3º mês de desenvolvimento.

Na figura 4.1.3, pode-se perceber claramente a existência de uma lâmina de escoamento distribuída em toda a parcela no tratamento com o efeito somado do dossel + resíduo em contato direto com o solo, apesar da mesma ser perpassada pelos resíduos vegetais da cana, que tem uma dimensão de altura visivelmente maior que a lâmina, superficial validando dessa forma, a utilização da equação (6),



Figura 4.1.3 Aspecto do escoamento pouco espesso em regime laminar lento na cultura da cana-de-açúcar.

O fluxo superficial produzido pela chuva é um exemplo de fluxo do solo gradualmente variado, instável e não uniforme sobre uma superfície livre, sendo governado pelas leis da conservação de massa e momento (Chow, 1959), freqüentemente chamadas das equações de Saint-Venant, ou simplesmente equações do movimento. Embora o fluxo superficial seja idealmente representado pelas equações de Saint-venant, a solução da onda cinemática tem produzido os mais acurados resultados para maioria dos casos hidrológicos (Gerits, et al, 1990). O mesmo autor reporta que o termo “cinemática” refere-se ao movimento onde os termos de aceleração e pressão são negligenciáveis, e o termo de fricção do declive iguala-se ao declive da superfície, ou seja, os termos de pressão e aceleração da equação de momento são tomados como zero. Essa condição de aplicação da aproximação cinemática, que produziu a equação (6), pode ser vista e validada em Woolhiser & Liggett (1967) e, em Singh (1983), na condição da erosão em um plano para uma chuva de duração finita.

Observa-se na tabela 4.1.2, as condições hidráulicas médias do escoamento, na presença de diferentes condições de cobertura do solo criadas pela cultura da cana-de-açúcar aos 12 meses do estágio de desenvolvimento fenológico. Nota-se que após a estabilização da lâmina de escoamento que ocorreu em torno dos 30 minutos de teste, os valores de Reynolds obtidos < 500 e Números de Froude < 1 , determinaram regimes de escoamento para todos os tratamentos, laminar lento. Os valores obtidos com a descarga líquida de ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e altura da lâmina de 10^{-4} a 10^{-3} m , com o regime de escoamento caracterizado por baixos Reynolds, estão de acordo com a magnitude de lâminas de escoamento obtidas por

Guy et al (1990); Farenhorst & Bryan (1995); Cantalice (2002), relatados no início do item 4.1, para erosão em entressulcos.

Tabela 4.1.2. Características hidráulicas do escoamento ocasionado pela chuva simulada na presença de cobertura vegetal aos 12 meses de estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar: Cobertura do solo (CS), descarga líquida por unidade de largura (q), velocidade média do escoamento (V), altura da lâmina (h), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), viscosidade cinemática (ν), declividade (S) e coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f). Valores médios de três repetições.

	CS	q	V	h	ν	Re	Fr	S	f
Trat	$m^2 m^{-2}$	$m^2 s^{-1}$	$m s^{-1}$	m	$m^2 s^{-1}$			$m m^{-1}$	
R	0,83	$9,3762 \times 10^{-5}$	0,0516	$1,818 \times 10^{-3}$	$8,181 \times 10^{-7}$	114,61	0,3862	0,075	4,07a
D*	0,48	$6,2019 \times 10^{-5}$	0,0741	$8,373 \times 10^{-4}$	$8,420 \times 10^{-7}$	73,66	0,8173	0,087	1,04a
D + R*	0,85	$2,9808 \times 10^{-5}$	0,0468	$6,369 \times 10^{-4}$	$8,181 \times 10^{-7}$	36,44	0,5921	0,091	4,77a

D = efeito isolado do dossel da cana-de-açúcar; D+R = efeito do dossel da cana-de-açúcar + resíduo na forma de palha; R = resíduo na forma de palha da cana-de-açúcar. *Valores médios de duas repetições. Os valores de h, V, q, não diferiram significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, e f também não difere ao nível de 5%, pelo teste de Duncan.

Ainda percebe-se na tabela 4.1.2, reduções na velocidade média do escoamento para as maiores porcentagens de cobertura observadas, promovidas pelo efeito isolado do resíduo (palha) em contato direto com o solo, como também, pelo efeito somado do dossel e do resíduo da cana em contato direto com o solo. Essa redução pode ser explicada através da elevação da resistência hidráulica ao escoamento, retratada pelo coeficiente de Darcy-Weisbach. Por fim o efeito do dossel apresentou o menor coeficiente de rugosidade, devido ao mesmo não estar em contato direto nem com o solo e nem com a lamina de escoamento, como já discutido anteriormente.

Observou-se também na tabela 4.1.2 e na figura 4.1.4.a para 2ª etapa do trabalho, diferenciação das alturas de lamina em função do tipo de cobertura vegetal, como já discutido anteriormente na figura 4.1.2. Novamente observa-se que o efeito somado do dossel + resíduo em contato com o solo (tabela 4.1.2), apresentou uma descarga líquida diferenciada devida sua maior interceptação vegetal, o que retardou o início do escoamento superficial e aumentou a infiltração durante o teste como se observa na figura 4.1.4.b que para uma mesma intensidade de chuva ($100,53 mm h^{-1}$). Também, observa-se nesta figura que o resíduo em contato direto com o solo que a pesar de proporcionar 83% de cobertura da superfície do solo (Tabela 4.1.3), apresentou baixas taxas de infiltração do solo, como se esse contato impermeabiliza-se o solo.

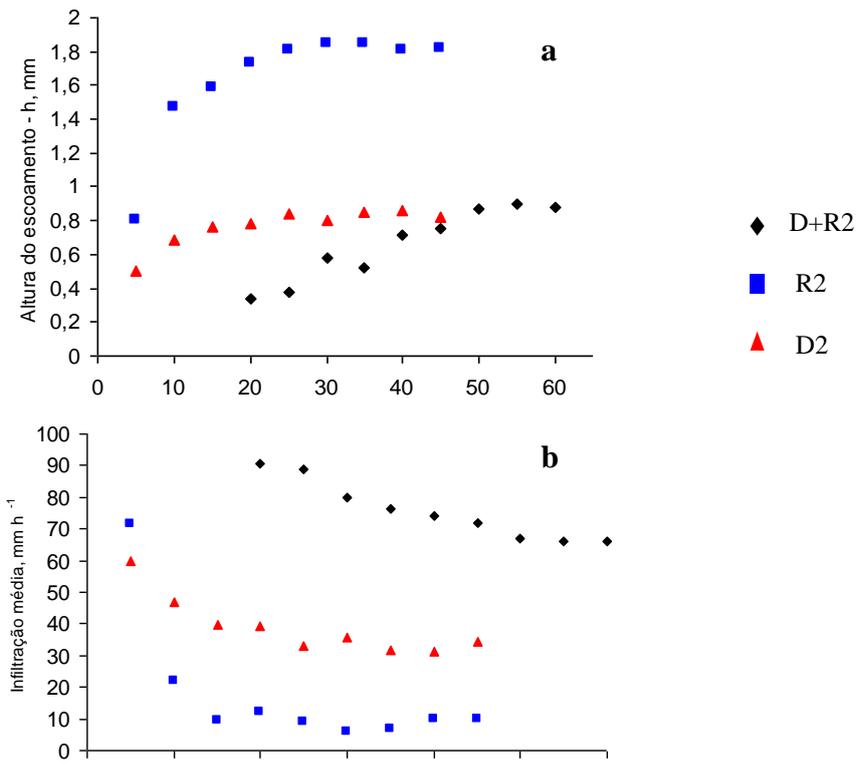


Figura 4.1.4 – Valores da altura da lâmina de escoamento (a), determinados pela equação (6) e, taxas de infiltração (b), no tempo obtidas pelo método do infiltrômetro aspersor, para o 12^o mês de desenvolvimento.

4.2 Taxas de Erosão do Solo

Encontram-se na tabela 4.2.1 os valores de cobertura do solo, as taxas de desagregação e as perdas de solo observadas com as diferentes formas de cobertura vegetal, proporcionadas pela cultura da cana-de-açúcar. Observa-se que as menores taxas de desagregação e de perdas de solo foram obtidas para o efeito somado do dossel da cana-de-açúcar + o resíduo em contato direto com o solo, com valores da ordem de grandeza de $10^{-5} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $2,21 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, para uma cobertura de solo proporcionada de 51%. Em seguida tem-se o efeito do dossel da cana-de-açúcar com a taxa de desagregação de $10^{-4} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $7,34 \text{ t ha}^{-1}$ de solo perdido, com uma porcentagem de cobertura do solo proporcionada de 30%.

Tabela 4.2.1. Cobertura do solo (CS), Taxas de Desagregação (D), perdas de solo (Ps) e coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f), observadas na presença de cobertura vegetal proporcionada pela cana-de-açúcar aos três meses de desenvolvimento da cultura. Valores médios de três repetições.

Tratamento	Cobertura (CS)	<i>f</i>	D*	Ps
	m ² m ⁻²		Kg m ⁻² s ⁻¹	t ha ⁻¹
SD	0,00	2,91 ^a	8,496x 10 ⁻⁴	23,61 a
R	0,185	3,69 ^a	3,449 x 10 ⁻⁴	12,02 a b
D	0,30	2,21 ^a	3,013 x 10 ⁻⁴	7,34 b
D + R	0,51	5,01 ^a	9,381 x 10 ⁻⁵	2,21 b

SD = solo recém preparado e descoberto; D = efeito isolado do dossel da cana-de-açúcar; D + R = efeito do dossel da cana-de-açúcar + resíduo na forma de palha; R = resíduo na forma de palha da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Duncan a 5 % de probabilidade. * foi significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Estes resultados demonstram que quanto maiores as porcentagens de cobertura do solo proporcionada pela cana-de-açúcar menores serão as taxas de desagregação e perdas de solo, devido a um menor impacto das gotas de chuva direto na superfície do solo, diminuindo assim, a desagregação das partículas da camada superficial do solo. Ressalta-se que esse efeito foi diferenciado pelo tipo de cobertura vegetal, pois como se observa na figura 4.2.1., o contato direto do resíduo com o solo, traduzido na maior rugosidade para tipo isolado de cobertura, proporcionou as maiores taxas de escoamento superficial equivalentes as taxas de escoamento para o solo descoberto. Já que o efeito do dossel foi no retardamento do início do escoamento superficial, pela interceptação vegetal proporcionada, demonstrada pelas maiores taxas de infiltração de água no solo, figura 4.1.1 para a cana aos 3 meses, e figura 4.1.4 para a cana aos 12 meses, vistas anteriormente.

Ainda na tabela 4.2.1, bem como na tabela 4.2.2 mais adiante, tem-se taxas de desagregação de solo na ordem de 10⁻⁶ a 10⁻⁴ kg m⁻² s⁻¹, equivalentes aos dados obtidos por Farenhorst & Bryan (1995); Guy et al. (1990); Guy et al. (1987) e Cantalice (2002), o que conjuntamente com a hidráulica dos escoamentos ensaiados, permitem concluir que ocorreu erosão em entressulcos.

Na tabela 4.2.2, percebe-se também taxas de desagregação de solo decrescentes com o aumento da porcentagem de cobertura do solo, evidenciando que o efeito da cobertura do solo é importante para a redução do efeito das perdas de solo, pois evita a desagregação das partículas e com isso o seu transporte. O mesmo foi evidenciado no trabalho de Cantalice (2002), que com o aumento das doses de palha (aumento da cobertura), as taxas de desagregação tenderam a

decrecer, chegando a uma grandeza de $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Nota-se também que o tratamento que apresentou menores taxas de perdas de solo foi o efeito somado do dossel + resíduo (palha) em contato direto com a superfície do solo, teve uma redução em torno de 90% de perdas de solo quando comparado com o solo descoberto (tabela 4.2.1), isso para os três tratamentos (R; D e D + R), o que demonstra que o uso cobertura do solo como prática conservacionista, deixa o solo mais protegido contra os agentes erosivos da natureza.

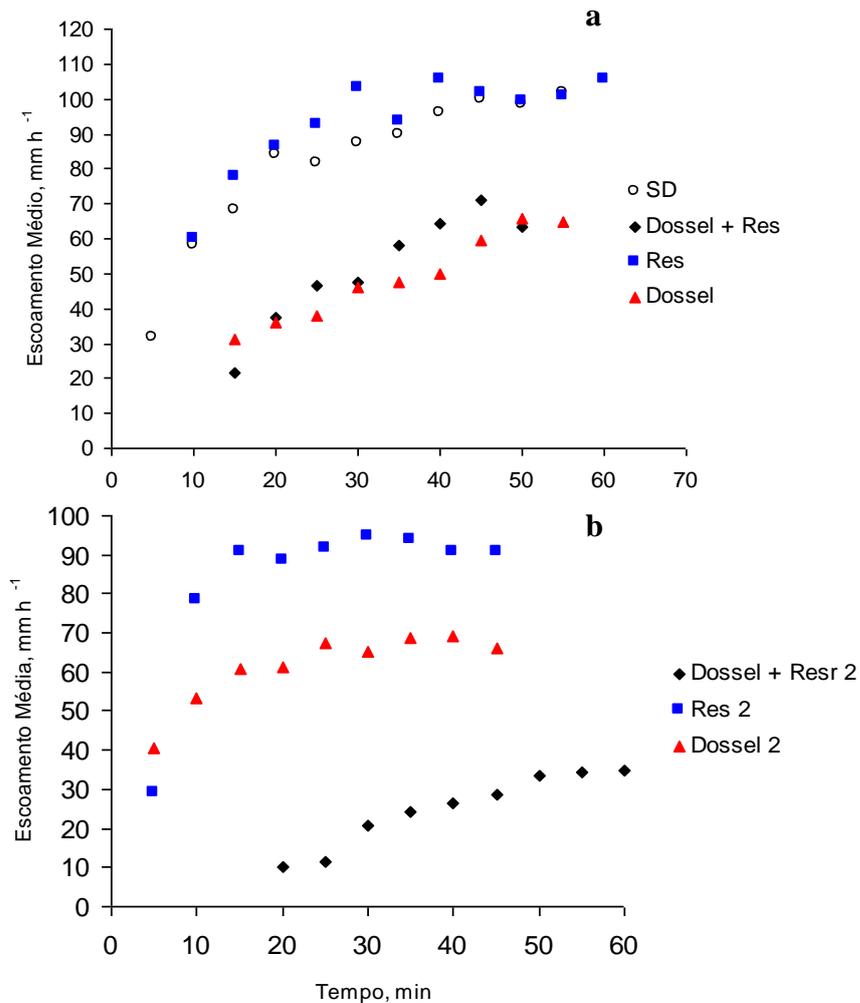


Figura 4.2.1 – Taxas de escoamento médio superficial para a cultura da cana-de-açúcar: (a) 3° mês de estágio fenológico (b) 12° mês de estágio fenológico, evidenciando o aumento da descarga líquida nos tratamentos estudados.

Tabela 4.2.2. Cobertura do solo (CS), Taxas de Desagregação (D), perdas de solo (Ps) e coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f) observadas na presença de cobertura vegetal proporcionada pela cana-de-açúcar aos 12 meses de estágio fenológico da cultura. Valores médios de três repetições.

Tratamento	Cobertura (CS)	<i>f</i>	<i>D_i</i>	<i>Ps</i>
	m ² m ⁻²		Kg m ⁻² s ⁻¹	t ha ⁻¹
R	0,83	4,07 ^a	4,856 x 10 ⁻⁵	2,083a
D*	0,48	1,04 ^a	1,481 x 10 ⁻⁴	1,364a
D + R*	0,85	4,77 ^a	6,923 x 10 ⁻⁶	0,213a

SD = solo recém preparado e descoberto; C = efeito isolado do dossel da cana-de-açúcar; C+R = efeito do dossel da cana-de-açúcar + resíduo na forma de palha; R = resíduo na forma de palha da cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Duncan a 5 % de probabilidade. Cs e *D_i* foi significativos ao nível de 5% de probabilidade segundo SAS. * valores médios de duas repetições.

Temos na figura 4.2.2 o comportamento das taxas de desagregação do solo para as duas fases experimentais representadas no tempo. Verifica-se, que a parcela sem cobertura do solo apresentou as maiores taxas de desagregação, quando atingiram o pico máximo de desagregação do solo, e depois tenderam a se estabilizar, variando os pontos de crescimento e queda de desagregação. Esse crescimento inicial das taxas de desagregação do solo está relacionado com o das taxas de descarga líquida (figura 4.2.3), que no início da chuva é muito pequena devido a infiltração ser mais elevada, e assim o fluxo superficial é relativamente pequeno, não tendo capacidade para transportar todo o material desagregado pela ação do impacto das gotas de chuva. À medida que o fluxo cresce, com o transcorrer do tempo de chuva, torna-se capaz de transportar todo o material desagregado instantaneamente e aquele remanescente do período inicial, quando havia limitação da capacidade de transporte (Braida & Cassol, 1999).

O efeito somado do dossel mais a palha apresentou as menores taxas de desagregação do solo, como já discutido, mas com uma variação menor, quase uniforme durante todo o teste, o que se justifica pelo efeito do tipo de cobertura, pois o resíduo em contato direto com o solo e o escoamento superficial aumenta a rugosidade e diminui o impacto das gotas de chuva, enquanto o dossel, aumenta a infiltração de água no solo pela interceptação proporcionada.

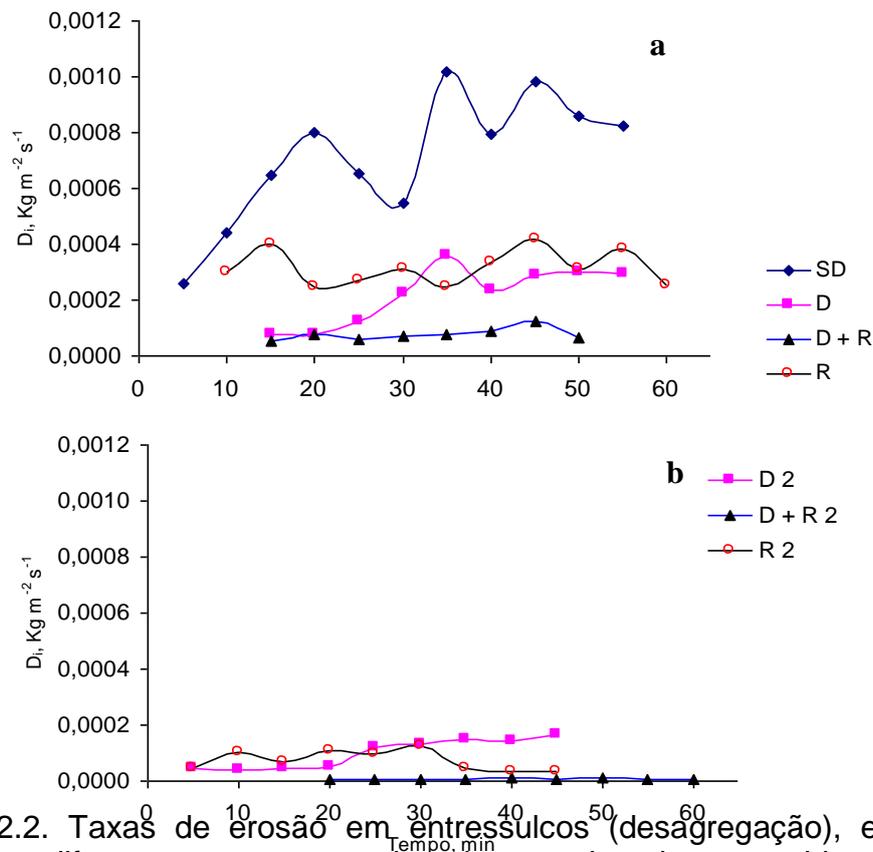


Figura 4.2.2. Taxas de erosão em entressulcos (desagregação), em função do tempo, para diferentes tratamentos de cobertura do solo promovidos pela cana-de-açúcar. (a) cana aos 3 meses de estágio fenológico e (b) cana aos 12 meses de estágio fenológico.

Na figura 4.2.3 que relaciona as taxas de descarga líquida apresentadas por todos os tratamentos nos dois períodos estudados, percebe-se que os tratamentos com solo descoberto e efeito isolado do resíduo (palha), apresentaram as maiores taxas de escoamento (maiores perdas de água), o que foi atestado pelas menores taxas médias de infiltração de água no solo, 31,80 e 23,44 mm h⁻¹, respectivamente, como visto na figura 4.1.2.b e 4.1.4.b. O valor de 31,80 mm h⁻¹, para o solo descoberto mostra que o uso de maquinário agrícola para revolver o solo pode aumentar a infiltração de água no solo como relata Tucci (1997), no entanto esse efeito é temporário.

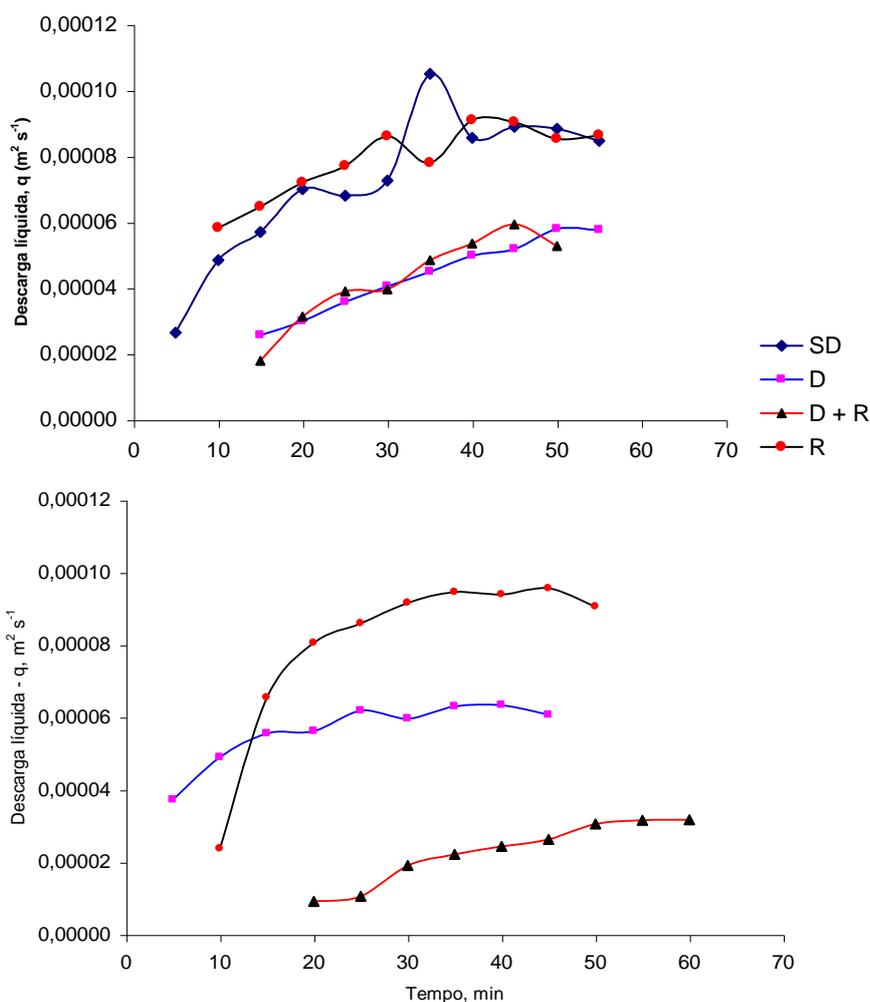


Figura 4.2.3. Taxas de descarga líquida nos entressulcos, em função do tempo, para diferentes tratamentos de cobertura do solo promovido pela cana-de-açúcar. (a) cana aos três meses e (b) cana aos 12 meses.

Na figura 4.2.4 tem-se representada, de forma global para todo o ciclo fenológico da cana-de-açúcar, a redução nas perdas de solo com o aumento das percentagens de cobertura vegetal. Essa figura mostra, embora mais empiricamente, o efeito conjunto de todos os tratamentos em dois períodos do ciclo fenológico, evidenciando o controle das perdas de solo proporcionadas pelas diferentes formas da cobertura vegetal da cana-de-açúcar, na forma de uma equação de regressão do tipo exponencial, descrita abaixo:

$$P_s = 22,893e^{-4,4256(Cs)} \quad r^2 = 0,79 \quad \text{equação (13)}$$

onde P_s perdas de solo em $t\ ha^{-1}$, C_s = cobertura do solo em $m\ m^{-1}$ e, e = base dos logaritmos naturais.

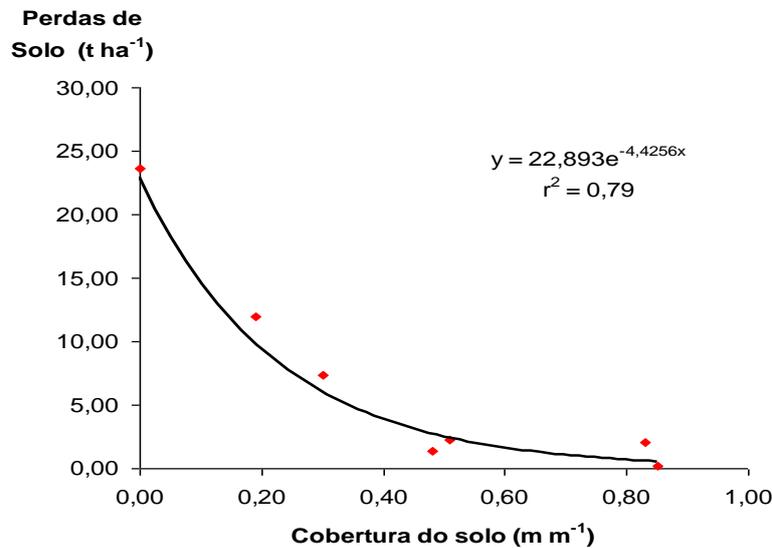


Figura 4.2.4 – Taxas de perdas de solo obtidas em função das taxas de cobertura do solo proporcionadas pelos tratamentos aos 3º e 12º meses de estágio fenológico da cultura da cana-de-açúcar.

4.3. Erodibilidade do solo na erosão em entressulcos

A erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) foi determinada de acordo com a equação (2): $K_i = D_i / (I^2 \cdot S_f)$, utilizando-se as taxas máximas de desagregação do solo observadas nos últimos 30 minutos de teste de acordo com Elliot et al. (1989), para cada uma das repetições do tratamento com o solo descoberto. Na tabela 4.3 são apresentados os valores de erodibilidade do solo em entressulcos para cada um dos ensaios realizados para o Argissolo vermelho Amarelo Tb Distrófico.

Considerou-se, portanto, as 3 repetições para a determinação da erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) deste Argissolo, que foi de $1,87 \times 10^6\ kg\ s\ m^{-4}$.

Tabela 4.3 Valores médios de erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}), para todos os testes realizados em condições de solo descoberto (ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Tb Distrófico).

Declividade	D_i	I	S_f	K_i	Média
m m^{-1}	$\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	m s^{-1}		Kg s m^{-4}	
0,134	$1,16 \times 10^{-3}$	$3,146 \times 10^{-5}$	0,5519	$2,12 \times 10^6$	
0,157	$1,07 \times 10^{-3}$	$2,916 \times 10^{-5}$	0,5952	$2,11 \times 10^6$	
0,0906	$5,94 \times 10^{-4}$	$3,050 \times 10^{-5}$	0,4581	$1,39 \times 10^6$	$1,87 \times 10^6$

Os valores médios de erodibilidade do solo em entressulcos K_i determinados em campo variaram entre $1,39 \times 10^6$ a $2,12 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, conforme tabela 4,3. Cantalice (2002), determinou em condições de laboratório e campo, para um Argissolo Vermelho distrófico típico um valor de K_i de $2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, e para o mesmo solo, porém em campo, Rockenbach (1992) determinou o valor de $3,35 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Esses valores foram mais elevados que o valor obtido neste trabalho, o que se justifica pelo menor teor de argila para o Argissolo utilizado por Cantalice (2002) e Rockenbach (1992), que teve $0,2065 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, $0,198 \text{ kg kg}^{-1}$ de silte e $0,5955 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia. Braida & Cassol (1996), encontraram um valor de erodibilidade em entressulcos de $5,10 \times 10^6 \text{ Kg s m}^{-4}$, também em condições de campo, para um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, ainda mais elevado que o valor obtido neste trabalho, justificado também, pelo baixo teor de argila de $0,145 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, além de $0,101 \text{ kg kg}^{-1}$ de silte e $0,755 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia, enquanto que o solo ora estudado teve-se $0,228 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, $0,094 \text{ kg kg}^{-1}$ de silte e $0,678 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia. Portanto maior a porcentagem de argila do presente trabalho conferiu a este Argissolo, uma erodibilidade pouco menor do Argissolo utilizado por Cantalice (2002) e bem menor que o solo utilizado por Braida & Cassol (1996).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que:

1. O escoamento superficial gerado através de chuva simulada nestas áreas cultivadas com cana de açúcar, com altura da lâmina de escoamento de 10^{-3} m de espessura, descargas líquidas de $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, e os baixos valores do número de Reynolds produziram regimes de escoamento laminar lento;
2. As taxas de desagregação do solo da ordem de grandeza de 10^{-6} a $10^{-4} \text{ Kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, a magnitude das laminas ensaiadas e, os respectivos regimes de escoamento atestam a ocorrência da erosão em entressulcos;
3. A cobertura vegetal promovida pela cultura da cana de açúcar promoveu redução nas taxas de desagregação e perdas de solo, no entanto esse efeito foi diferenciado em função do tipo de cobertura:
 - a) o resíduo em contato direto com solo e com o escoamento foi responsável pelo incremento da rugosidade da superfície hidráulica, no entanto o mesmo proporcionou baixas taxas de infiltração de água no solo com conseqüente aumento das descargas líquidas, por constituir-se em uma camada vegetal entre o solo e a lâmina de escoamento que dificultou a infiltração,
 - b) o dossel da cana de açúcar promoveu uma maior interceptação da chuva, causando retardamento ao início do escoamento e as menores taxas de descarga líquidas por unidade de largura, que são atestadas pelas maiores taxas de infiltração obtidas.
4. De forma global para todo o ciclo fenológico da cultura da cana de açúcar, observou-se diminuição das perdas de solo com o aumento das taxas de cobertura vegetal, evidenciando o efeito conjunto de todos os tratamentos em dois períodos do ciclo fenológico;
5. Para as condições em estudo a erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) do Argissolo Vermelho Amarelo Tb Distrófico foi de $1,87 \times 10^6 \text{ Kg s m}^{-4}$.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHMS, A. D. ; LI, G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 23, p. 953-960, 1998.

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

ALLMARAS, R. R. et al. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. **Conservation Research Report**. Washington, nº7, p. 22, 1966.

ALVES, A.J.O. **Caracterização e potencialidade dos solos da Estação Experimental de Cana de Açúcar de Carpina**. 1994. 154f., Dissertação (mestrado em Agronomia Ciência do Solo). UFRPE, Recife, 1994.

BENZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação agrícola**. 3. ed. Jaboticabal: 1995. 247p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, Livroceres, 1985. 392p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo, Ícone, 1990. 355p.

BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B.; TARQUI, J.L.Z.. Características do escoamento superficial e taxas de erosão em uma área sob cultivo agrícola In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. 5 ,2002. **Anais...** São Paulo, p. 403-411, 2002.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Relações da erosão em entressulcos com o tipo e com a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, vol. 23, p.711-721, 1999.

BRAIDA, J.A.; CASSOL, E.A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um podzólico vermelho-escuro franco-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, vol. 20, n. 1, p.127-134. 1996.

BRAIDA, J.A. **Relações da erosão em entressulcos com resíduos vegetais em cobertura e erosão em sulcos em um solo podzólico vermelho escuro**. 1994, 152f., Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). UFRGS, Porto Alegre, 1994.

BROOKS, K.N. et al. **Hydrology and the management of watersheds**. 2 ed.Ames; Iowa State University, 1997, 502p.

CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2002, 141f., Tese (Doutorado em Ciência do Solo). UFRGS, Porto Alegre, 2002.

CANTALICE, J.R.B. & CASSOL, E.A. Hidráulica do escoamento e desagregação do solo na erosão em entressulcos na presença de resíduos vegetais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Ed. Universitária da UFMT, 2002. p.9.

CASSOL, E. A. **Erosão do solo** – influência do uso agrícola do manejo e preparo do solo. Porto Alegre/RS. Instituto de Pesquisas de Recursos Naturais Renováveis “Ataliba Paz”, 1984, 49p.

CHAVES, H.M.L.; ORLOWSKI, E.; ROLOF, G. Previsão da infiltração sob condições dinâmicas de selamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, vol. 17, n. 2, p. 141-147, 1993.

CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**. New York: Mcgraw-hill, 1959.680p.

EINSTEIN, H.A. **The bed-load function for sediment transportation in open channel flows**. Washington: USDA, 1950. 65p. (Technical Bulletin, 1026).

ELLISON, W.D. Soil erosion studies. Part II: soil detachment hazard by raindrop splash. **Agricultural Engineer**, Bedford, vol. 28, p.197-201,1947.

ELLIOT, W.J.; LIEBNOW, A.M.; LAFLEN, J.M.; KOHL, K.D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88**. West Lafayette : The Ohio State University, 1989. (NSERL – National Soil Erosion Research Laboratory Report, 3)

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF, 1999. 412p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro. 1997. 212p.

EVERAERT, W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 16, p. 513-532, 1991

FARENHORST, A.; BRYAN, R.B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, v. 25, p. 47-62, 1995.

FONSECA, E.O. da. **Taxas de enxurrada, infiltração de água e perdas de solo por erosão em um latossolo vermelho em sistema de manejo do solo**. 2001. 107f., Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). UFRGS, Porto Alegre, 2001.

FOSTER, G.R.; JOHNSON, C.B.; MOLDENHAUER, W.C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, vol. 25, p.940-947, 1982.

GERITS, J.J.P.; LIMA, J.L.P.D; BROEK, T.M.W.V.D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. **Process studies in hill slope hydrology**. Chichester : Jonh Wiley & Sons, 1990. p. 173-214.

GOVERS, G. **Soil erosion process** research a state of the art. Brussel: Paleis der Academien, 1996. 53 p. (Klasse der Wetenschappen, Jaargang 58, n.1)

GUY, B. T. et al. The roles of rainfall end runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, vol. 30, p.1378-1386p. 1987.

GUY, B.T.; DICKINSON, W.T.; RUDRA, R.P. Hydraulics of sediment-landen sheet flow and the influence of simulated rainfall. **Earth Surface Processes and Landforms**. Sussex, vol. 15, p.101-118, 1990.

HUDSON, N. **Soil conservation**. 3 ed. Iowa, Iowa State University Press, 1995. 391p.

JACOMINE, P.K.T. et al. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: MA/DNPEA – SUDENE/DRN, 1973. vol. 1, (Boletim técnico, 26).

JOHNSON, C.B. et al. Influence of surface roughness and clod size stability na soil and water losses. **Soil Society of America Journal**. Madison, v. 43, n.4, p.772-777. 1979.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Milbourne: Cambridge Univ. Press, 1995. 280p.

KATZ, D.M.; WATTS, F.J.; BURROUGHS, E.R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 121, p. 547-553, 1995.

KINNELL, P. I. A. The effects of flow on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, p.161-168, 1991.

KITAHARA, H. et al. **Effects of revegetation for surface erosion**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1995, Tokyo, **Proceeding...** Tokio, 1995. p. 521-524.

KITAHARA, H. et al. **Erosion control function of vegetation**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1994, Tokyo, **Proceeding...** Tokio, 1994.

KOFFLER, N.F.; et al. **Caracterização edafo-climática das regiões canavieira do Brasil: Pernambuco**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1986. 78p.

LIMA, V. S. de. **Erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes tipos de preparo do solo e manejo de resíduos culturais**. 1997. 124f., Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo).UFRGS, Porto Alegre, 1997.

MANNERING, J.V.; MEYER, L.D. The effects of various rates of surface mulch on infiltration and erosion. **Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison**, v. 27, n. 1, 1963, p. 84-86.

MEYER, L. D. Rainfall simulators for soil erosion research. **Soil Erosion research methods**, 2. ed, 1994. 340p.

MEYER. L. D.; FOSTER, G. R.; RÔMKENS, M. J. M. **Source of soil eroded by water from upland slopes**. In: PRESENT and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington, USDA, 1975. p.177-189.

MEYER. L. D.; HARMON, W. C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 1979. p.100-103.

MONDARDO, A. et al. Calibração de simuladores de chuva para uso em pesquisa sobre manejo e conservação do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 1977, São Luiz, **Anais...** São Luiz, 1977.

+

MUTCHLER, C.K.; MURPHREE, C.E. & MCGREGOR, K.C. Laboratory and field plots for erosion research *In: Soil Erosion research methods*, 2. ed., 1994. 340p.

MUTCHLER, C. K.; YOUNG, R. A. **Soil detachment by raindrops**. IN: PRESENT and prospective technology for predicting sediment yields and sources. Washington, USDA, 1975. p.113-117.

NASCIMENTO, C.W.A.; CHAVES, I.B. Erosividade e características da chuvas correlacionadas com perdas de solo em Alagoinha – PB. **Ciência Rural**. Santa Maria, RS, v.. 26, n. 3, p.407-412, 1996.

NASCIMENTO, P.C.; LOMBARDE NETO, F. Razão de perdas de solo sob cultivo de três leguminosas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p.121-125, 1999.

OLIVEIRA, J.B.; SILVA, J.R.C. Efeito do manejo do solo na erosão do Podzólico Vermelho-amarelo equivalente Eutrófico e Planossolo Solódico da microregião homogênea 68 do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, SP, v. 6, n. 2, p.231-235. 1982.

PAIVA, E. M. C. D. de; et al. Evolução de processo erosivo acelerado em trecho do Arroio Vacacaí Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, v. 6, n. 2, p.129-135, 2001.

PHELPS, H. O. Shallow laminar flows over rough granular surfaces. **Journal of the Hydraulics Division** – ASCE., New York, p 367–384. 1975.

ROCKENBACH, C. A. **Erosão em entressulcos sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um solo podzólico vermelho amarelo sob chuva simulada**. 1992. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). UFRGS, Porto Alegre, 1992.

RODOJKOVIC, M; MAKSIMOVIC, C. On standardization of computational models for overland flow. In: GERITS, J. J. P.; LIMA, J. L. P. D; BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. **Process studies in hill slope hydrology**. Chichester : Jonh Wiley & Sons, 1990. p. 173-214

SAS Institute, Inc. The SAS System for windows: Releasa ver. 6.8, Cary, 1998. CD-ROM.

SAVAT, J. Resistence to flow in rough supercritical sheet flow. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 5, p.103-122, 1980.

SAVAT, J. The hydraulics of sheet flow on a smoot surface and the effect of simulated rainfall. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 2, p. 125 – 140, 1977.

SILVA, J.R.C.; CARVALHO, R.J.T. Métodos de determinação do salpico e influência da cobertura do solo em condições de chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v. 26, p.473-481, 2002.

SILVA, I.F. et al. Efeito de diferentes coberturas vegetais e de práticas conservacionistas no controle da erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP. v. 10, n. 3, p.289-292, 1986.

SIRIDAS, N.; et al. Efeito da intensidade de chuva na desagregação por impacto de gotas em três sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP. v. 8, n.2, p.251-254, 1984.

SIMONS, D.B.; SENTURK, F. **Sediment Transport Technology: water and sediment dynamics**. In: WATER Resources Publications. [Colorado] : [s.n.], 1992. 897p.

SINGH, V.P. Analytical solutions of kinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Advances in Water Resources**, Billerica, v. 6, p.88-95, 1983.

SUDENE. **Dados pluviométricos mensais do Nordeste**: Estação de Pernambuco: Recife, 1990. 363p. (Série pluviométrica, 6).

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, v. 2. n.1. p.135-152. 1997.

UBARANA, V. N. 1996. Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia. In: TUCCI, C. E.M. & CLARKE, R. T. Impacto das

mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 2. n.1. p.135-152. 1997.

YANG, C.T.; RANDLE, T.J. Surface erosion, sediment transport, and reservoir sedimentation. In: SUMMER, W.; KLAGHOFER E. & ZHANG W. **Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes**. IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford. 3-12p. 1998.

YOUNG, R. A. & WIERSMA, J.W. the role of rainfall impact on soil detachment and transport. **Water Resources Research**, v.9, p.1629-1636,1973.

YOON, Y.N.; WENZEL, H.G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. **Journal of the Hydraulics Division** – ASCE, New York, v. 97, p. 1367-1386, 1971.

WOOLHISER. D.A.; LIGGETT, J.A. Unsteady one-dimensional flow over a plane – the rising hydrograph. **Water Resources Research**. New York, v. 3, n. 3, p.753-771p. 1967.

APÊNDICE

APÊNDICE 1. Classificação dos solos segundo Alves, 1994.

Talhão 9. ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Tb Distrófico A Proeminente textura média argilosa fase subcaducifólia relevo ondulado e forte ondulado.

Talhão 2. ARGISSOLO AMARELO DISTRÓFICO com fragipã A Proeminente textura média argilosa fase subcaducifólia relevo plano.

APÊNDICE 2. Intensidade das chuvas simuladas (mm h^{-1}) dos experimentos da erosão em entressulcos

Repetição	Intensidades das chuvas (mm h^{-1})						
	Cana aos 3 meses				Cana aos 12 meses		
	SD	R	D	D + R	R	D	D + R
1	113,28	106,27	111,36	90,05	104,07	--	--
2	105,00	119,54	91,83	100,54	94,74	--	--
3	109,81	103,40	98,92	89,49	102,77	--	--
Média	109,36	109,73	100,70	93,36	100,53	100,53	100,53

SD – solo descoberto; R – efeito isolado do resíduo em contato direto com a palha; D – efeito isolado do dossel da cana de açúcar e D + R – efeito somado do dossel + resíduo em contato direto com o solo

APÊNDICE 3. Declividade (m m^{-1}) das parcelas experimentais para as duas etapas do experimento.

Repetição	Declividade das parcelas experimentais (m m^{-1})						
	Cana aos 3 meses				Cana aos 12 meses		
	SD	R	D	D + R	R	D	D + R
1	0,134	0,076	0,105	0,105	0,08	0,087	0,11
2	0,157	0,116	0,046	0,109	0,078	0,087	0,072
3	0,0906	0,076	0,105	0,099	0,067	--	--

SD – solo descoberto; R – efeito isolado do resíduo em contato direto com a palha; D – efeito isolado do dossel da cana de açúcar e D + R – efeito somado do dossel + resíduo em contato direto com o solo

APÊNDICE 4. Cobertura ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) das parcelas experimentais para as duas etapas do experimento.

Repetição	Cobertura das parcelas experimentais ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)						
	Cana aos 3 meses				Cana aos 12 meses		
	SD	R	D	D + R	R	D	D + R
1	0	0,18	0,38	0,50	0,86	0,48	0,82
2	0	0,18	0,32	0,52	0,80	0,48	0,88
3	0	0,20	0,20	0,52	0,82	--	--
Média	0	0,19	0,30	0,51	0,83	0,48	0,85

SD – solo descoberto; R – efeito isolado do resíduo em contato direto com a palha; D – efeito isolado do dossel da cana de açúcar e D + R – efeito somado do dossel + resíduo em contato direto com o solo

APÊNDICE 5. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) em ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para todos os testes realizados.

Tratamento	-----(D_i) ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)-----			Média
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
Aos 3 meses				
SD	$1,0632 \times 10^{-3}$	$1,1514 \times 10^{-3}$	$3,342 \times 10^{-4}$	$8,496 \times 10^{-4}$
R	$1,861 \times 10^{-4}$	$4,404 \times 10^{-4}$	$4,084 \times 10^{-4}$	$3,449 \times 10^{-4}$
D	$1,732 \times 10^{-4}$	$1,839 \times 10^{-4}$	$5,467 \times 10^{-4}$	$3,013 \times 10^{-4}$
D + R	$8,833 \times 10^{-5}$	$7,588 \times 10^{-5}$	$1,172 \times 10^{-4}$	$9,381 \times 10^{-5}$
Aos 12 meses				
R	$9,276 \times 10^{-5}$	$1,720 \times 10^{-5}$	$3,573 \times 10^{-5}$	$4,857 \times 10^{-5}$
D	$2,521 \times 10^{-4}$	$4,420 \times 10^{-5}$	--	$1,481 \times 10^{-4}$
D + R	$8,531 \times 10^{-6}$	$5,315 \times 10^{-6}$	--	$6,923 \times 10^{-6}$

SD – solo descoberto; R – efeito isolado do resíduo em contato direto com a palha; D – efeito isolado do dossel da cana de açúcar e D + R – efeito somado do dossel + resíduo em contato direto com o solo

APÊNDICE 6. Resumo das análises estatísticas do experimento da erosão em entressulcos, para as duas etapas do experimento.

Variável	GL	GL resíduo	F calc.
Aos 3 meses			
Taxas de desagregação	5	6	6,07
Perdas de solo	5	6	4,13
Velocidade média	5	6	1,81
Cobertura do solo	5	6	34,02
Altura da lâmina	5	6	3,58
Descarga líquida	5	6	3,03
Aos 12 meses			
Taxas de desagregação	4	2	1,64
Perdas de solo	4	2	1,01
Velocidade média	4	2	1,15
Cobertura do solo	4	2	25,25
Altura da lâmina	4	2	2,30
Descarga líquida	4	2	1,17

APÊNDICE 7. Temperatura (C°) e viscosidade cinemática (ν) da água nos experimentos em entressulcos em todos os testes realizados com chuva simulada.

Tratamento	T (C°)			ν ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
Aos 3 meses						
SD	30	30	30	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$
R	30	30	30	$8,18 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$
D	30	30	32	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,09 \times 10^{-7}$
D + R	30	30	30	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$
Aos 12 meses						
R	31	31	31	$8,18 \times 10^{-7}$	$8,18 \times 10^{-7}$	$8,18 \times 10^{-7}$
D	31	27	--	$8,18 \times 10^{-7}$	$8,66 \times 10^{-7}$	--
D + R	31	31	--	$8,18 \times 10^{-7}$	$8,18 \times 10^{-7}$	--

APÊNDICE 9. Valores médios das taxas de infiltração dos ensaios realizados com chuva simulada.

Tratamento	Infiltração (mm h ⁻¹)			Média
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
Aos 3 meses				
SD	22,05	33,20	40,13	31,80
R	17,52	33,11	19,68	23,44
D	87,99	53,63	20,64	54,09
D + R	47,48	30,50	56,52	44,83
Aos 12 meses				
R	23,12	15,45	22,46	20,35
D	55,16	32,12	--	43,64
D + R	85,37	70,45	--	77,91

SD – solo descoberto; R – efeito isolado do resíduo em contato direto com a palha; D – efeito isolado do dossel da cana de açúcar e D + R – efeito somado do dossel + resíduo em contato direto com o solo

APÊNDICE 10. Quadro padrão utilizado para determina a porcentagem de cobertura do solo, com a projeção fotográfica sobre o mesmo. (Fonte: Lopes, 1984).

