

Capítulo 24

EROSÃO

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
Claudio Mahler
Kalinny P. V. Lafayette
Mario G. G. Nacinovic
Ana Patrícia Nunes Bandeira
João Guilherme Rassi Almeida

1. INTRODUÇÃO

Erosão é um processo de desgaste da superfície terrestre causado pela ação de agentes externos, principalmente, a água e o vento. É uma forma natural de modelagem do relevo e atua de modo conjugado aos processos de formação dos solos. Contudo, o uso e a ocupação desordenada do solo pelo ser humano aumentam a intensidade com que esse processo ocorre, causando desequilíbrio, o que acarreta problemas ambientais, sociais e econômicos, tais como: perda de fertilidade dos solos com consequente redução na produção de alimentos; assoreamentos de rios e lagos; deslizamentos em áreas de risco; e comprometimentos de serviços públicos, como a interdição de estradas e a exposição ou ruptura de canalizações e dutos enterrados.

Em ambientes de clima tropical, de média a elevada precipitação anual, os processos erosivos devido à ação da água em movimento são mais intensos. Condicionantes como o clima, o relevo, o tipo, o uso e a ocupação do solo pelo homem são determinantes no entendimento da suscetibilidade de um terreno aos processos erosivos hídricos. Dessa forma, esses condicionantes necessitam ser verificados para analisar a influência de cada um deles no processo erosivo. Para a análise da erodibilidade do material, as características de: tipo de solo, textura, estrutura e a permeabilidade são as mais relevantes. No entanto, alguns estudos mostram a importância do teor de umidade e, consequentemente, da sucção na resistência do solo à perda de massa e à desestruturação devido aos processos erosivos.

Em regiões de clima tropical ocorrem, naturalmente, solos na situação não saturada, na região denominada de zona ativa, que é um perfil de solo compreendido entre a superfície terrestre e a zona freática. No domínio da zona ativa ocorre variação constante de grau de saturação e sucção do solo, ou seja, grande parte dos processos erosivos tem início em solos não saturados. Portanto, para a realização de um estudo sobre o comporta-

mento e a previsão de erosões em uma determinada região, é necessário verificar como as características dos solos não saturados influenciam o processo erosivo.

Tentando auxiliar nesse entendimento, o presente capítulo irá abordar conceitos gerais de erodibilidade dos solos, bem como explicar as características geotécnicas que a influenciam e apresentar estudos laboratoriais e de campo para monitoramento de processos erosivos. Essas informações iniciais são importantes para fornecer uma visão mais ampla do fenômeno independente da saturação. Posteriormente, será dada ênfase aos processos erosivos em solos não saturados, especificando-se a influência da sucção tanto na perda de massa quanto na estabilidade estrutural do solo. Para isso, serão identificadas as metodologias utilizadas para os ensaios geotécnicos aplicados ao estudo de erodibilidade de solos tropicais não saturados.

2. PROCESSOS EROSIVOS

Os processos erosivos podem ser definidos como o destacamento e o carregamento de partículas dos solos devido à ação dos agentes erosivos (vento, neve, gelo, água, plantas, animais e o homem). Esse processo é considerado um dos mais importantes e também complexos quando se refere à degradação do solo, e que atinge diversas áreas, (Luetzenburg *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020). Tal degradação é um desafio enfrentado há muitos anos, e alguns resultados na análise de sustentabilidade do solo indicam que a erosão, a contaminação do solo, a salinização e a desertificação são mais evidentes e mais duradouras e, em algumas situações, são irreversíveis, tornando-se a principal ameaça as condições saudáveis do solo em todo o mundo (Mohanmed *et al.*, 2020; Guerra *et al.*, 2020; Borrelli *et al.*, 2017; Lal, 2001). Em regiões áridas e semiáridas, por exemplo, o vento é um dos principais agentes erosivos, provocando abrasividade nas rochas, principalmente pelo carregamento de partículas de areia. Em regiões temperadas, podem existir, ainda, as erosões glaciais, que, devido ao congelamento e degelo da água, são responsáveis pelo fraturamento das rochas e a formação do relevo. As regiões tropicais e subtropicais, devido ao alto índice pluviométrico, são os locais mais afetados pela erosão hídrica, sendo a concentração do escoamento das águas das chuvas uns dos principais agentes desencadeadores desse processo erosivo. As erosões hídricas podem ser classificadas, em função da forma de ocorrência, em erosões internas e superficiais.

As erosões internas ocorrem, principalmente, devido ao elevado gradiente hidráulico e ao grau de dispersibilidade dos solos, podendo ser caracterizadas como *piping*, quando há formação de túneis a partir do arraste de partículas de argila ou esqueletização, quando há transporte difuso de partículas ou de compostos ou elementos químicos solubilizados. O *piping* ocorre, geralmente, em terrenos estratificados ou em horizontes de solo com permeabilidades distintas, onde haverá concentração de percolação em zonas de maior permeabilidade (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006). Pode-se citar como exemplo a concentração de fluxo em camadas acima de horizontes B textural em argissolos ou em camadas acima de horizontes B plínticos no caso de plintossolos. As erosões superficiais ocorrem devido ao impacto e ao escoamento da água e compreendem três subprocessos: destacamento de partículas dos solos por meio do impacto da gota de chuva na superfície

do solo; destacamento de partículas dos solos por meio das tensões de atrito do deflúvio superficial; e transporte de partículas pelo deflúvio superficial, que ocorre nas áreas de contribuição e nos microcanais que alimentam os canais d'água.

O impacto da gota da chuva é a fase inicial do processo erosivo hídrico, quando as partículas na camada superficial do solo são desprendidas e transportadas por salpicamento (Figura 1). Bertoni e Lombardi Neto (2005) citam que o poder erosivo da gota de chuva está diretamente relacionado com a intensidade e a duração da precipitação, o diâmetro da gota, a direção e a velocidade de impacto e a qualidade da água da chuva. Teixeira (2019) descreve que as gotas de chuva possuem uma determinada velocidade terminal, correlacionada com a intensidade de chuva e que isso levou à elaboração de uma grande quantidade de equações consideradas empíricas. Cabe destacar o estado/fase da água em que ocorre a precipitação (chuva, granizo ou neve), aspecto que pode intensificar ou minimizar o efeito da precipitação.

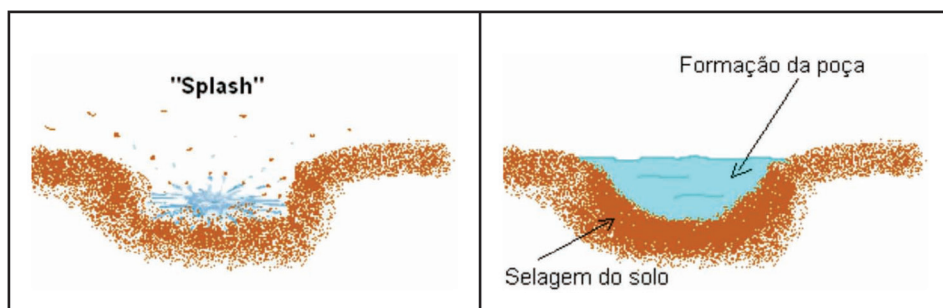


Figura 1 – *Splashing* ou salpicamento e formação de poça (Nacinovic, 2009)

Após o impacto da gota de chuva, ocorre o processo de formação de crostas (selagem do solo), que antecede o escoamento superficial e, consequentemente, influencia o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*). O processo ocorre nos primeiros 5 a 10 minutos de chuva e depende das características do solo e da intensidade da chuva. A água é inicialmente absorvida pelo agregado do solo, que pode promover uma expansão da argila. O ar contido nos microporos do agregado é expulso pela água. Esses dois processos reunidos causam a dispersão e a ruptura dos agregados em microagregados. Esse material disperso será erodido pelo salpicamento ou será lixiviado para os espaços intergranulares. A iluviação (Processo de deslocamento de materiais como argilas, carbonatos, etc. ao longo de um perfil de solo) desse material disperso será interrompida pelos agregados situados logo abaixo da superfície e/ou pela fase ar, que atuam como uma barreira. A partir desses fenômenos, os macroporos poderão ser preenchidos e selados, acarretando a formação de crostas. Os agregados situados logo abaixo das crostas ficam protegidos do impacto da gota de chuva, e a erosão por salpicamento fica reduzida. A selagem dos poros diminui a porosidade e, consequentemente, aumenta a massa específica seca, dando início ao processo erosivo pela diminuição da infiltração de água no solo, formando poças que se interligam e originando o escoamento superficial e os processos erosivos laminares e lineares (Farres, 1978).

As erosões superficiais podem ser classificadas em função do desenvolvimento do processo erosivo, classificando-se em erosões laminares (Figura 2) e lineares (Figura 3). Quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo e a microrrugosidade do terreno é preenchida e extravasada, inicia-se o escoamento superficial. O escoamento superficial ao longo de uma encosta/talude com partículas de solo dissolvidas e em suspensão possui um potencial de arraste capaz de desagregar maiores porções de solo, resultando em uma erosão laminar. O volume de escoamento superficial depende da razão precipitação/infiltração, da declividade do terreno e do tempo de duração e intensidade da chuva.



Figura 2 – Erosão laminar na margem de reservatório
(Acervo pessoal de Mauricio Sales)

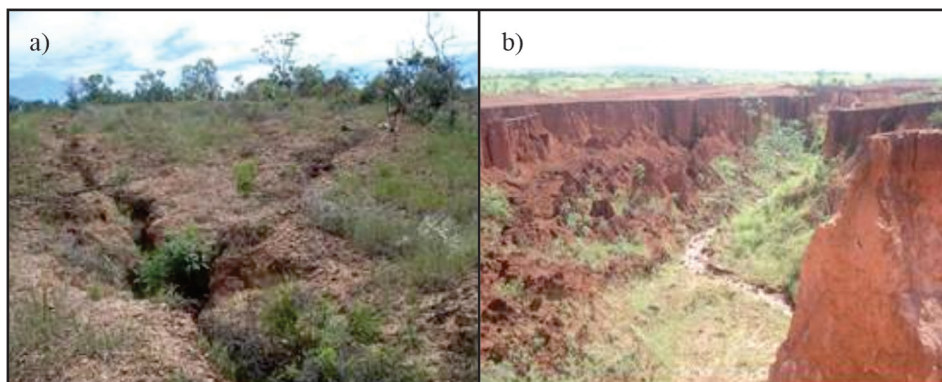


Figura 3 – Erosões lineares: a) sulcos e ravinas; b) voçoroca em área de empréstimo para construção de barragem (Acervo pessoal de Mauricio Sales)

O cálculo do escoamento superficial em uma área de vegetação rasteira ou pastagem pode ser obtido por meio da Equação 1.

$$E_s = P - (I + A_{cv} + A_s + E) \quad (\text{Eq. 1})$$

onde: E_s é o escoamento superficial (mm), P é a precipitação (mm), I é a infiltração (mm), A_{cv} é o armazenamento na cobertura vegetal (mm), A_s é o armazenamento pela serrapilheira (mm) e E é a evaporação (mm).

O cálculo do escoamento superficial em uma área de floresta é dado pela Equação 2.

$$E_s = P + F_t - (I + A_c + A_s + E) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: E_s é o escoamento superficial (mm), P é a precipitação medida abaixo das copas (mm), F_t é o fluxo de tronco (mm), I é a infiltração (mm), A_c é o armazenamento das copas (mm), A_s é o armazenamento pela serrapilheira (mm) e E é a evaporação (mm).

A velocidade do deflúvio (Volume de água que escoar da superfície de uma determinada área devido a uma chuva torrencial) relaciona-se não somente com a declividade, mas também com o comprimento da vertente e a rugosidade da superfície. A infiltração é influenciada por: propriedades do solo (textura, teor de matéria orgânica, estrutura, porosidade, teor de umidade, estabilidade dos agregados, atividade da argila e permeabilidade), características das chuvas, tipo de cobertura vegetal, uso e manejo do solo, características de declividade e rugosidade do terreno. Em resumo, as erosões laminares ocorrem devido ao escoamento difuso das águas de chuva, resultando na remoção relativamente uniforme das partículas do solo nos horizontes superficiais. Por outro lado, as erosões lineares ou erosão em sulcos, ocorrem devido ao fluxo concentrado de água por caminhos preferenciais.

As erosões lineares são subclassificadas em função de geometria, tamanho ou aspectos geomecânicos e de fluxo nos processos erosivos. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2011), os sulcos são pequenas incisões na superfície do terreno, de até 10 cm de profundidade (Figura 3a). A erosão em sulcos é um fenômeno de pequena escala, mas de ocorrência universal (OU *et al.*, 2021). Os materiais que são transportados, principalmente os nutrientes faz com que ocorra uma diminuição na fertilidade do solo. Já o aumento da concentração de água nos sulcos e da erodibilidade do solo faz com que estes evoluam para ravinas (Figura 3a), que são canais com profundidade máxima de 50 cm caso não ocorra instabilidade dos taludes por deficiência de coesão real e de cimentação em profundidades inferiores. A ravina poderá evoluir para uma voçoroca (Figura 3b), que é um processo erosivo complexo, que envolve erosão laminar concentrada, movimentos de massa e *piping*, podendo chegar a vários metros de profundidade (Lima, 1999; Guerra, 2001; Augustin e Aranha, 2006). As voçorocas correspondem ao estágio mais avançado e complexo do processo erosivo, resultando em um difícil controle do processo erosivo e elevado custo de recuperação da área degradada.

De forma geral, os processos erosivos podem ser compreendidos conforme o fluxograma da Figura 4.

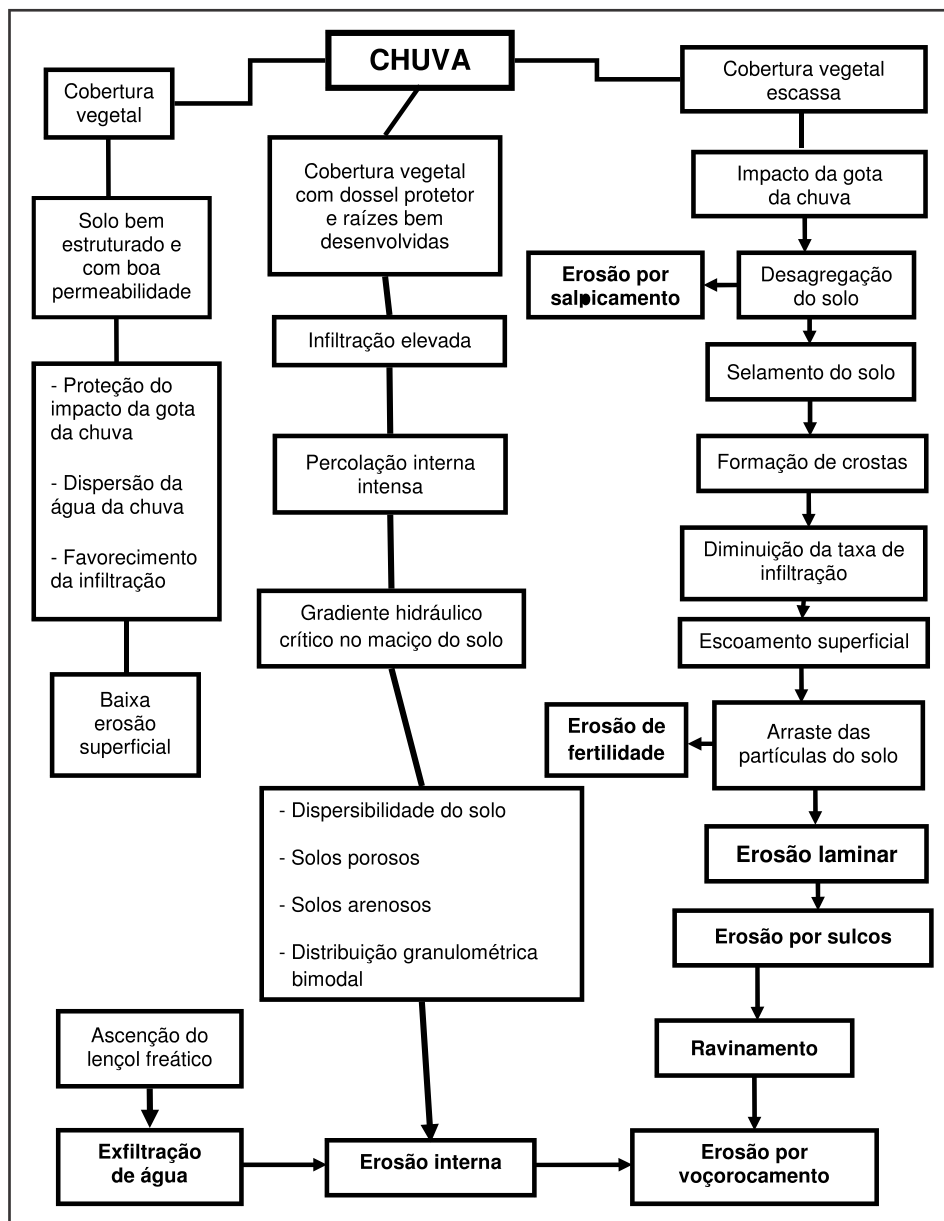


Figura 4 – Fluxograma do processo erosivo (Nacinovic, 2013)

2.1 Erodibilidade dos solos

O termo Erodibilidade está relacionado aos fatores de resistência do solo perante os processos erosivos, sendo dependentes das características intrínsecas do solo. Como a erosão resulta do destacamento de partículas dos solos pela força hidráulica, a erodibilidade está diretamente relacionada à resistência ao cisalhamento e à tração dos solos. No escoamento superficial, a resistência mobilizada é a da camada superficial, na qual apenas a coesão é considerada, visto que o ângulo de atrito tem sua influência acoplada à tensão efetiva, que, nesse caso, é mínima. A alta erodibilidade em algumas regiões resulta na degradação do ecossistema, podendo também contribuir para um processo de desertificação (YU *et al.*, 2019). As características do solo que influenciam sua susceptibilidade à erosão são textura, estruturação do solo, estabilidade dos agregados, teor de matéria orgânica, mineralogia, constituição química, permeabilidade, compactação, pedologia e sucção. A seguir, serão explicados como essas características influenciam a resistência do solo aos processos erosivos, excetuando-se a sucção, que será destacada no item 4.

Segundo Guerra (1999), a estabilidade dos agregados (união das partículas sólidas do solo) possui papel fundamental na erodibilidade dos solos, pois aumenta a resistência ao impacto da gota da chuva e reduz a formação de crostas no topo do solo. A estruturação do solo (a estrutura do solo é a forma como se arranjam as partículas do solo. Ela descreve a maneira como as partículas são agregadas) com agregados maiores e mais estáveis proporciona maior porosidade e, conseqüentemente, maiores taxas de infiltração, acarretando a diminuição do escoamento superficial. Em relação à granulometria, os solos arenosos tendem a ser mais suscetíveis à erosão devido à ausência de coesão em sua parcela de resistência ao cisalhamento. Ross (1992) estabeleceu uma hierarquização da suscetibilidade à erosão para horizontes diagnósticos de subsuperfície e classes de textura (Tabela 1 e Tabela 2).

Em geral, considerando-se apenas a textura dos grãos do solo, a suscetibilidade à erosão hídrica dos solos cresce na seguinte sequência: pedregulho bem graduado, pedregulho mal graduado, areia bem graduada, pedregulho siltoso, argila de alta plasticidade, argila de baixa plasticidade, solo orgânico de baixa plasticidade, silte de alta plasticidade, areia argilosa, areia siltosa, silte de baixa plasticidade.

Tabela 1 – Hierarquização da suscetibilidade por horizontes diagnósticos (Ross, 1992)

NEOSSOLO (lítolico e quartzarênico)	Muito alta
ARGISSOLO (solos com gradiente textural – B textural – podzólicos)	Intermediária
CAMBISSOLO (solos intermediários entre argissolos e latossolos)	Intermediária
ESPODOSSOLO (solos com B nátrico)	Muito alta
GLEISSOLO (solos hidromórficos com horizonte glei)	Muito alta
LATOSSOLO (solos geralmente distófcos, profundos, bem drenados e estruturados)	Muito baixa
NITOSSOLO (solos geralmente eutróficos, profundos, bem drenados e bem estruturados – terra roxa estruturada)	Baixa
ORGANOSSOLO (solos orgânicos)	Muito alta

Tabela 2 – Hierarquização da suscetibilidade por textura (Ross, 1992)

Argilosa	Muito baixa
Argilosa / Média	Baixa
Média / Siltosa	Intermediária
Arenosa / Média	Muito alta
Arenosa	Muito alta

A permeabilidade irá influenciar a capacidade de infiltração do solo, que é inversamente proporcional à suscetibilidade do solo de sofrer erosão. Quanto mais permeável o solo, maior sua capacidade de infiltração e menor o escoamento superficial e, consequentemente, menor será sua erodibilidade (Conciane, 2008). Vale ressaltar que maiores permeabilidades ocorrem para solos com maiores teores de vazios, o que, normalmente, ocorre em areias. No entanto, solos evoluídos pedologicamente (por exemplo, Latossolos e Nitossolos), embora constituídos de partículas finas, apresentam boa estruturação com boa porosidade, nos quais a água percola com mais facilidade. Dessa forma, solos bem estruturados, profundos e bem drenados podem apresentar baixa suscetibilidade à erosão.

Em relação à compactação do solo, duas situações contraditórias devem ser levadas em consideração. Solos compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento do que amostras não compactadas, o que favorece a resistência à erosão (Conciani, 2008), por outro lado, possuem menores índices de vazios, resultando em maior escoamento superficial. No entanto, o aumento da resistência ao cisalhamento tem maior influência na suscetibilidade do solo aos processos erosivos.

Quanto à constituição química do solo, esta pode influenciar bastante as erosões internas quanto à dissolução em água ou qualquer outro líquido que possa estar em contato com o solo. Os cátions de sódio presentes nos solos ou na água intersticial são os principais fatores de dispersibilidade, pois o sódio age no sentido de aumentar a espessura da camada de água difusa, reduzindo, assim, as forças de atração entre as partículas.

2.2 Ensaios geotécnicos para análise de erodibilidade dos solos

Alguns ensaios geotécnicos são realizados para estudar a suscetibilidade dos solos aos processos erosivos, sendo que alguns desses são qualitativos, pois não permitem a obtenção de coeficientes que ajudem a prever a quantidade de massa de solo erodida em condições de campo. Dentre esses ensaios, tem-se: *crumb test*, ensaio sedimentométrico comparativo, *pinhole test*, ensaios de desagregação, ensaios de adsorção e perda de massa por imersão, ensaio de estabilidade de agregado, ensaio de compressão diametral. Os ensaios quantitativos, com medição direta de perda de massa, serão mais bem explicados no item 3.

Os ensaios *crumb test*, sedimentométrico comparativo e *pinhole test* são executados para analisar a dispersibilidade das amostras. A dispersão ocorre quando as forças de repulsão entre as partículas da argila são superiores às forças de atração, formando uma suspensão quando em contato com a água ou erodindo internamente (carreamento de partículas dispersas) na presença de fluxo de água.

2.2.1 *Crumb test*

O *crumb test* é um método prático e rápido para identificar a dispersibilidade do solo e é normatizado pela ASTM D6572 (2012) e pela NBR 13601 (ABNT, 2020a). A classificação da dispersibilidade de um solo deve ser feita em conjunto com outros ensaios, como o *pinhole test* e o de desagregação. A metodologia, segundo a ASTM D6572 (2012), consiste na submersão de um torrão de solo em forma equivalente a um cubo de 15 mm de aresta em 250 mL de água destilada, observando-se o estado de turbidez da água por períodos de 2 min, 1h e 6h. Avalia-se, também, o grau de dispersão em solução de NaOH 0,01 N. O sódio (Na^+) age no sentido de aumentar a espessura da camada de água difusa (envolve as partículas individuais de argila), reduzindo, assim, as forças de atração entre as partículas.

A relação entre a quantidade de cátions de sódio e a quantidade de cátions de potássio, cálcio e magnésio dissolvidos na água intersticial definirá a suscetibilidade de ocorrer erosão interna por difusão, pois o sódio age no sentido de aumentar a espessura da camada de água difusa (envolve as partículas individuais de argila), reduzindo as forças de atração entre as partículas (ABNT, 2020a).

O grau de dispersão relativo à turbidez da água consiste em:

- **Grau 1 – não dispersivo** – Não há reação. O torrão pode fraturar ou desmoronar, mas sem haver turbidez devido aos colóides suspensos na água. A sedimentação das partículas é determinada logo na primeira hora de ensaio.
- **Grau 2 – levemente dispersivo** – Pequena reação com leve turbidez devido a uma suspensão coloidal quase imperceptível ao redor da superfície do torrão.
- **Grau 3 – moderadamente dispersivo** – Reação moderada com uma nuvem de suspensão coloidal nitidamente visível ao redor do torrão.
- **Grau 4 – altamente dispersivo** – Reação forte com uma densa nuvem de suspensão coloidal (Figura 5).



Figura 5 – Resultados do *crumb test*: levemente dispersivo (a) e não dispersivo (b) (Bezerra, 2022)

Vale destacar que, quando o ensaio indica a ocorrência de dispersão, provavelmente, trata-se de um solo facilmente erodível, sendo que o inverso não é necessariamente verdadeiro, ou seja, um solo erodível pode ser classificado como não dispersivo.

2.2.2 Ensaio sedimentométrico comparativo

A NBR 13602 (ABNT, 2020b) é a norma que fornece a metodologia recomendada para a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo. Esse ensaio deve ser utilizado em solos que apresentam mais de 12% de fração argilosa (partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm) e consiste, basicamente, na comparação entre curvas granulométricas com e sem defloculante. A porcentagem de dispersão é obtida pela relação da porcentagem, em massa, de partículas com diâmetro menor que 0,002 mm, de acordo com a curva granulométrica realizada sem e com defloculante. A porcentagem de dispersão igual a 100% indica uma fração argila completamente dispersiva, e uma porcentagem de dispersão igual a zero indica argila completamente não dispersiva.

Esse ensaio permite, também, analisar o estado de agregação dos solos. Nota-se a presença marcante de agregados no solo, demonstrada pelas menores porcentagens de fração argila nas curvas granulométricas executadas sem defloculante (Figura 6). O uso do defloculante leva a um aumento das porcentagens de partículas finas retidas, ou seja, das frações silte e argila, o que demonstra que o solo do local de estudo tem um potencial significativo de partículas agregadas.

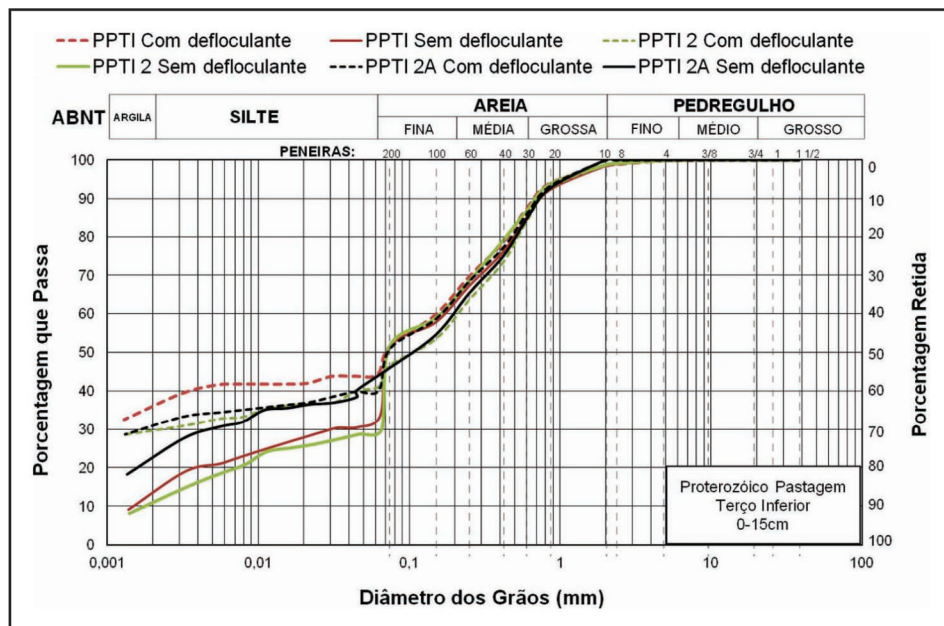


Figura 6 – Curvas granulométricas com e sem defloculante de amostras de solos em um mesmo local (Nacinovic, 2013)

2.2.3 Pinhole test

O ensaio denominado furo de agulha ou *pinhole test* também é uma das formas de se entender o mecanismo da erosão localizada em solos dispersivos, sendo normatizado pela NBR 14114 (ABNT, 1998). Santos (1997) propôs uma modificação na metodologia de análise dos resultados, observando-se os gráficos de vazão *versus* a carga hidráulica tanto no processo de acréscimo de carga hidráulica quanto no processo de descarregamento. Em caso de a fase de descarga apresentar maior vazão do que a fase de carga, isso significa que o solo está sendo erodido internamente. Essa metodologia é adequada para solos mais intemperizados.

O *pinhole test* determina direta e qualitativamente a dispersibilidade de solos argilosos pelo fluxo de água destilada por meio de um pequeno furo axial em um corpo de prova moldado a partir de um bloco de amostra indeformada, contido em um cilindro. Esse ensaio foi desenvolvido como um método de medição direta da erodibilidade de solos de textura fina. A turbidez do efluente, a vazão e as dimensões finais do furo darão a classificação da dispersibilidade do solo, discriminada em seis categorias, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do solo quanto à dispersibilidade

Categoria	Classificação	Turbidez relativa à carga hidráulica	Carga hidráulica (mm)	Maior vazão admitida em relação à carga hidráulica (mL s^{-1})	Furo final ($\varnothing_f$) em relação ao furo original ($\varnothing_o$)
ND1	Não dispersivo	Clara	1020	4,0	$\varnothing_f = \varnothing_o$
ND2	Incipientemente dispersivo	Suave	1020	5,0	$\varnothing_f = \varnothing_o$
ND3	Levemente dispersivo	Levemente escuro	380	3,5	$\varnothing_f = \varnothing_o$
		Levemente escuro	180	2,5	$\varnothing_f > 2 \varnothing_o$
ND4	Medianamente dispersivo	Suave	50	0,8	$\varnothing_f < 1,5 \varnothing_o$
D2	Dispersivo	Suave	50	1,0	$\varnothing_f > 2 \varnothing_o$
D1	Altamente dispersivo	Fortemente Colorida	50	1,5 a 2,0	$\varnothing_f > 2 \varnothing_o$

Na Figura 7a são apresentados todos os utensílios necessários para a execução do ensaio. De início, é feito um furo no corpo de prova com uma agulha hipodérmica com $\varnothing$ de 1 mm e 10 cm de comprimento por onde passa o fluxo de água (Figura 7b). Posteriormente, é colocada uma tela e pedregulhos de 2 mm para preencher os vazios em ambos os lados do corpo de prova. Após a montagem do permeâmetro, é instalado o sistema hidráulico para a aplicação de carga hidráulica de 50 mm e, depois, sucessivas cargas de 180, 380 e 900 mm (Figura 7c). Para cada carga hidráulica, é analisada, quantitativamente, a vazão e,

qualitativamente, a turbidez do fluxo de água no final de cada aplicação de carga. Essa análise em conjunto com a avaliação do diâmetro do furo na amostra no final do ensaio em relação ao furo original fornece a classificação do solo quanto à dispersibilidade (Figura 7d).



Figura 7 – Pinhole test: a) utensílios necessários para o ensaio; b) inserção de agulha na amostra para perfazer o furo; c) vazão do fluxo sendo medida; d) aferição das dimensões do furo na amostra no final do ensaio (adaptado de Nacinovic, 2013)

2.2.4 Ensaio de desagregação

Um dos ensaios bastante realizados em amostras de taludes para a análise qualitativa do comportamento de um solo frente ao processo de imersão é o ensaio de desagregação. Por meio desse ensaio, pode-se prever a influência da água no solo quando submerso, verificando, assim, a estabilidade do corpo de prova (Figura 8a).

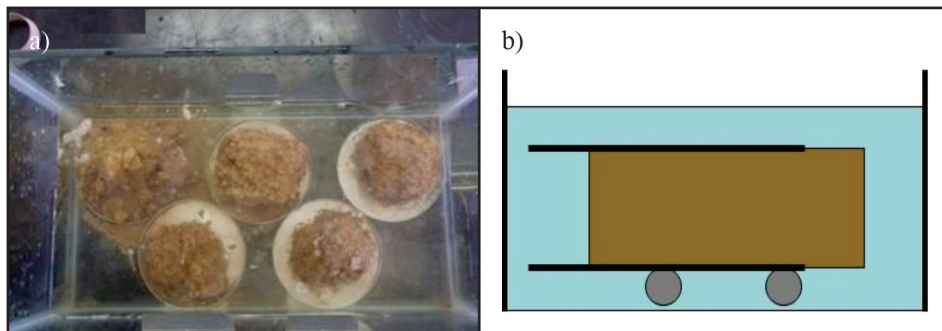


Figura 8 – Ensaios para análise de erodibilidade de solos: a) ensaio de desagregação (Almeida, 2014); b) ensaio de perda de massa por imersão

O ensaio pode ser executado com inundação total ou parcial de amostras indeformadas de solo, no formato de cubos com 60 mm de aresta. No ensaio de imersão total, inunda-se o corpo de prova totalmente, permanecendo assim por 24h. Já para o ensaio de imersão parcial, a amostra é disposta em uma pedra porosa inundada por 30 minutos. Em seguida, adiciona-se água para um terço (1/3), dois terços (2/3) e completa imersão do corpo de prova, aguardando-se 15 minutos em cada etapa, sendo que, após a completa imersão, mantém-se o solo inundado por 24h.

A resposta do corpo de prova à inundação é observada e descrita como: sem resposta (a amostra mantém sua forma), abatimento (desintegração da amostra formando uma pilha), faturamento (quebra da amostra em pedaços mantendo a forma das faces externas) e dispersão (paredes da amostra difusas ocorrendo densa suspensão coloidal), de acordo com Holmoren e Flanagan (1977). O ensaio com imersão total representa a situação em que o talude é inundado de forma abrupta, e o ensaio com imersão parcial representa a situação em que ocorre ascensão lenta do lençol freático e a água ascende por capilaridade.

No ensaio com imersão total é importante que se analise a sucção atuante no momento da imersão; caso não se tenha essa informação, pode-se recorrer à análise do grau de saturação, pois, com a imersão total, a fase ar é colocada sob pressão positiva, podendo ser a causa maior ou menor da desagregação. Quando da inundação parcial ou progressiva, tem-se a desagregação pela simples redução da sucção com o umedecimento do solo. Sendo assim, deve-se entender esses ensaios como complementares.

2.2.5 Ensaio de absorção de água e perda de massa por imersão

Nogami e Villibor (1979) propuseram a execução de ensaios de absorção de água e perda de massa por imersão para estudar o potencial de erodibilidade dos solos. O ensaio de absorção é executado em amostras cilíndricas com 40 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Essas amostras são colocadas em contato com a água para que saturam por capilaridade. Após alguns intervalos de tempo, a amostra é pesada. O índice de absorção (S) é o coeficiente angular da reta, que é dado pelo volume de água adsorvido pela área da seção transversal da amostra dividido pela raiz quadrada do tempo.

O ensaio de perda de massa por imersão é executado em amostra imersa em água, com 40 mm de diâmetro e 80 mm de altura, posicionada em um anteparo, ficando com parte da amostra para o lado de fora (Figura 9b). Após 24h, a massa perdida é levada à estufa para se determinar a massa seca. O valor de perda de massa (P) é a porcentagem da massa de solo seco perdida em relação à massa de solo seco inicial. O índice de erodibilidade (E) é obtido a partir da Equação 3.

$$e = 52 \frac{S}{P} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde: E é o índice de erodibilidade (adimensional), S é o índice de absorção (adimensional), P é a porcentagem de massa de solo seco perdida em relação à massa de solo seco inicial (%).

Na avaliação do ensaio de perda de massa por imersão, sempre que possível, é relevante que se considere a sucção inicial atuante no solo, pois, com a imersão, a fase ar é submetida à pressão neutra positiva, interferindo na perda de massa por imersão sem que reflita ou refletindo pouco a influência do próprio solo nessa perda. Outro aspecto a ser considerado é a eventual ocorrência da queda da bastilha de solo extraída do molde, pois ocorrendo, ela está ligada à expansibilidade do solo, seja estrutural ou mineralógica. Se estrutural, ela pode ser resolvida ou minimizada alterando-se a condição de compactação e, se mineralógica, por meio de tratamento químico, cabendo esclarecer que a expansão pode ser fruto, ao mesmo tempo, da natureza mineralógica e da estrutura presente. Cabe aqui um esclarecimento sobre a razão do tombamento da pastilha externa ao molde: com a imersão, o solo extraído do molde está livre para expandir e o confinado não, com isso, gera-se, no plano de contato entre eles, uma tensão cisalhante que leva à ruptura no caso de atuação da expansão.

2.2.6 Ensaio de estabilidade de agregado

Esse ensaio consiste em mensurar a quantidade e a distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água. A metodologia é descrita abaixo:

- Coleta no campo de monólitos de dimensões aproximadas de um cubo de 15 cm de lado na superfície. Os monólitos são envoltos em papel filme e condicionados em caixa de isopor com serpillha para não danificar a estrutura durante o transporte para o laboratório.
- Destorroamento do bloco de solo de forma cuidadosa para não quebrar os agregados de solo, em cima de um conjunto de peneiras de malha 4,75 e 2 mm. Retirada de três amostras de 25 g do solo retido na peneira de 2 mm em placas de Petri.
- Determinação do teor de umidade do solo por meio de uma das amostras de 25 g em placa de Petri colocada em estufa por um período mínimo de 24 h.
- Umidificação das outras duas amostras de 25 g (Figura 9a) e, após período de 2h, disposição em dois conjuntos de cinco peneiras, com 13 cm de diâmetro, de malha: 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,125 mm (Figura 9b).
- Colocação do conjunto de peneiras em aparelho de Yoder, com nível de água até atingir a base da peneira de cima de 2 mm, tomando cuidado para não se submergir as amostras na água (Figura 9c e Figura 9d).

- Ajuste do aparelho de Yoder para uma frequência de 32 oscilações por minuto por um período de 15 min, com a água encostando na malha da peneira de 2 mm.
- Após os 15 min, retiram-se os dois jogos de peneiras, constituídos de cinco peneiras de malhas diferentes, totalizando-se dez peneiras. O conteúdo de cada peneira é transferido para uma placa de Petri devidamente identificada e tarada, e posto em estufa por um dia para determinar a massa seca de cada fração desagregada.



Figura 9 – Ensaio de estabilidade do agregado: a) borrifação da amostra de 25 g com água destilada; b) disposição da amostra em 05 peneiras; c) Aparelho de Yoder; d) peneiras no aparelho de Yoder.

O diâmetro médio ponderado e o índice de estabilidade dos agregados são obtidos pelas Equações 4 e 5, segundo Castro Filho *et al.* (1998):

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (\text{Eq. 4})$$

onde: DMP é o diâmetro médio ponderado (mm), x_i é o diâmetro médio das classes (mm) e w_i é a proporção de cada classe em relação ao total.

$$IEA = \frac{MS - w_{p0,25}}{MS} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde: IEA é o índice de estabilidade de agregados (%), MS é a massa seca da amostra (g), $w_{p\ 0,25}$ é a massa dos agregados da classe < 0,25 mm (g).

Resultados de um ensaio de estabilidade de agregado de amostras de solo em duas áreas experimentais de mata secundária e pastagem são mostrados na Figura 10 e na Figura 11. Nota-se que os solos da área de pastagem apresentaram maior agregação do que os solos da área da mata secundária, conforme se pode constatar pelos maiores índices de estabilidade de agregado e de diâmetro médio ponderado apresentados. Esse resultado pode ser devido ao fato de que os solos da parcela da pastagem tinham maior teor de carbono orgânico do que na mata, o que acarretou maior agregação.

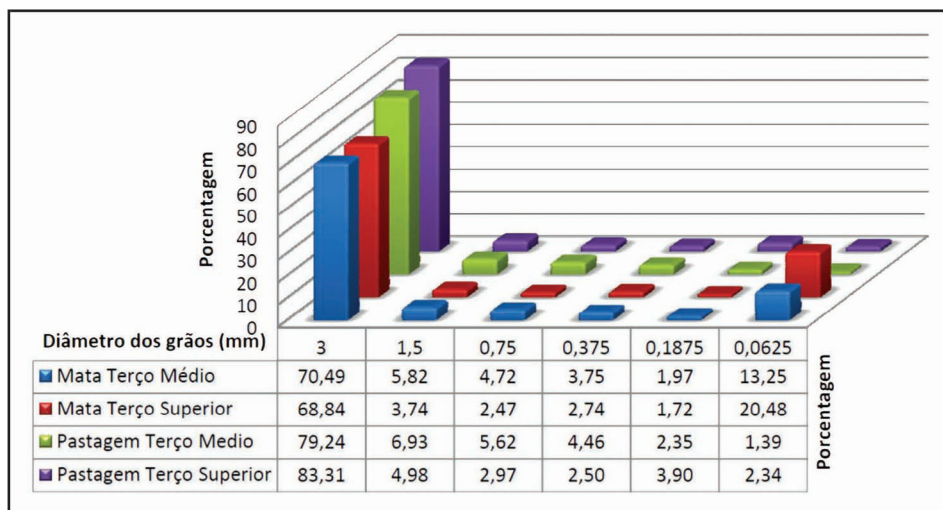


Figura 10 – Gráfico comparativo de estabilidade de agregado entre um solo de área de mata secundária e pastagem (Nacionovic, 2013)

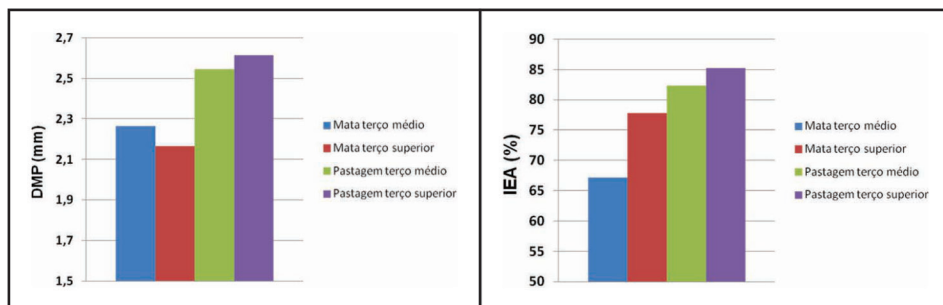


Figura 11 – Diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregado (IEA) de solos de área de mata secundária e pastagem (Nacinovic, 2013)

2.2.7 Ensaio de compressão diametral

O ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro foi desenvolvido pelo Professor Francisco Luiz Lobo Carneiro em 1943 (Figura 12). O ensaio brasileiro (Lobo Carneiro e Barcellos, 1949) é um método indireto de medir a resistência à tração, dado pela Equação 6.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde: σ_t é a tensão de tração, P é a força aplicada por unidade de espessura do cilindro (Figura 12) e D é o diâmetro do cilindro.

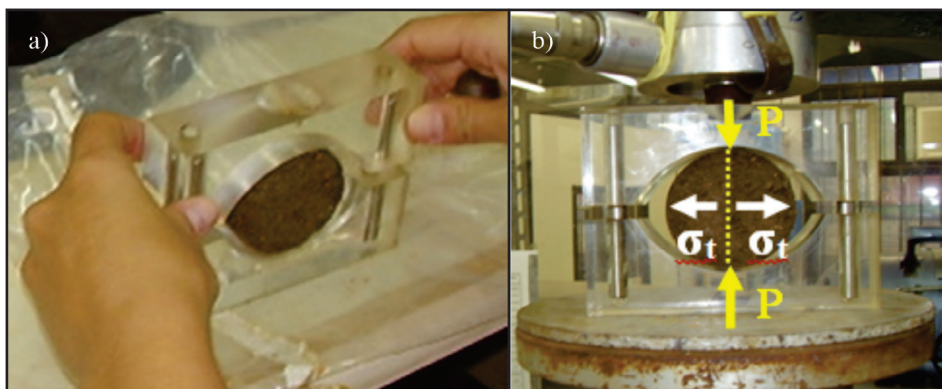


Figura 12 – Disposição do corpo de prova no molde (esquerda) e colocação na prensa (direita).

3. ENSAIOS DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE EROSÃO DO SOLO

A determinação das taxas de erosão tem um grande significado para o planejamento dos recursos e o desenvolvimento do meio ambiente. Altas taxas de erosão removem grandes quantidades de solo, impactando a preservação dos recursos naturais, as áreas urbanas e reduzindo a produtividade em áreas agrícolas.

A intensidade da erosão do solo é afetada por dois principais fatores: a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo, sendo a erodibilidade do solo o fator de maior interesse no meio geotécnico. A realização de experimentos para quantificar esses fatores é de fundamental importância para a previsão da erosão e para o planejamento do uso do solo, tendo em vista que a respectiva análise possibilita avaliar o grau de energia e a suscetibilidade de ocorrência dos processos erosivos, além de fornecer dados quantitativos para modelos matemáticos, criados para compreender a formação e a evolução de processos erosivos.

Existem diversas técnicas para se determinar a evolução das erosões laminar e linear (sulcos, ravinas e voçorocas), porém, a escolha vai depender das condições locais, tais como: posição geográfica, tipo de solo, clima, recursos econômicos disponíveis e outras características físicos-ambientais consideradas relevantes para o tema. Este item descreve sobre ensaios de campo e de laboratório para a estimativa da erosividade da chuva e da erodibilidade do solo superficial.

3.1 Ensaio de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen foi originalmente proposto por Anton L. Inderbitzen, em 1961, em sua publicação *An erosion test for soils* para estudar a erosão superficial do solo. A forma mais frequente para se analisar a erosão dos solos é por meio das propriedades físicas e químicas e de agentes condicionantes externos; nesse sentido, o ensaio busca simular situações de campo para quantificar a erodibilidade, sendo conhecido, no meio geotécnico, como ensaio de Inderbitzen (erosômetro ou ainda ensaio de erosão). A Figura 13a apresenta uma ilustração do aparelho Inderbitzen.

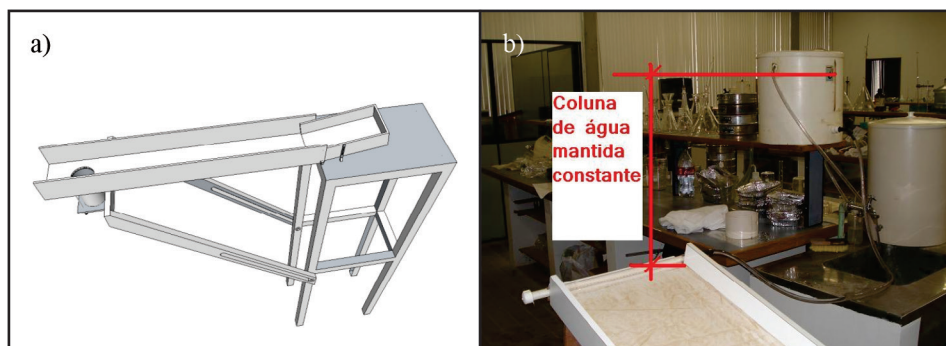


Figura 13 – Inderbitzen: a) Desenho esquemático do aparelho;
b) Controle de Vazão (Nacinovic, 2009)

O ensaio de Inderbitzen é realizado em laboratório e ainda não é normatizado, no entanto, tem sido considerado bastante promissor por diversos pesquisadores. No Brasil, o ensaio foi realizado, pela primeira vez, por Rego, em 1978, com o objetivo de estudar a erosão superficial em taludes no Rio de Janeiro. Depois da experiência, o ensaio de Inderbitzen foi realizado por Rodrigues, em 1982, para estudos de voçorocas da região centro-leste do estado de São Paulo (Jacintho *et al.*, 2006).

O ensaio de Inderbitzen simula um escoamento superficial sobre um corpo de prova, em que a perda de solo é quantificada em intervalos de tempo pré-determinados, porém, não simula o fenômeno da desagregação por salpicamento de partículas, por exemplo, devido ao impacto da água da chuva. O equipamento é composto por uma rampa hidráulica com inclinação variável, com um porta amostra no centro ou no final da rampa, onde deve ser colocada uma amostra de solo que será submetida a um fluxo superficial. A amostra de solo pode ser ensaiada na condição indeformada ou deformada e em solo na umidade

natural, seco ao ar ou saturado (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006). Os ensaios podem ser executados com a medição da sucção do solo ao longo do tempo e ao longo da altura do corpo-de-prova, conforme proposto por Oliveira *et al.* (2021). Durante o ensaio, deve ser controlada a vazão do fluxo e verificada a duração do escoamento. Um esquema básico de controle de vazão é apresentado na Figura 13b.

Na erosão superficial, o poder erosivo da água e sua capacidade de transporte dependem da densidade e velocidade do escoamento da água, da espessura da lâmina d'água e da inclinação da vertente; o ensaio de Inderbitzen busca considerar esses fatores. Ao longo dos anos, alguns pesquisadores propuseram mudanças no aparelho Inderbitzen na tentativa de simular o efeito do escoamento superficial sobre o solo (Fácio, 1991; Santos, 1997; Lafayette, 2006; Aguiar, 2009; Gonçalves e Silva (2019); Oliveira *et al.* (2021) e Bezerra (2022). As mudanças são em relação a: largura e comprimento da rampa, formato dos corpos de prova e metodologia de ensaio na definição de vazão, utilização de grelha para apoio e contato da água com os corpos de prova, intervalos de tempo de medição de perdas de massa e inclinação, medição de sucção ao longo do ensaio.

A limitação do ensaio original consiste em não considerar o efeito da erosão por salpicamento. No entanto, para solos com uma eficiente cobertura vegetal, o efeito do impacto das gotas de chuva não é tão relevante, e a limitação supracitada não é significativa. Um cuidado importante é com relação à profundidade de coleta da amostra, recomendando-se não ser superior a 25 cm para o estudo do escoamento superficial, pois há alguma influência da profundidade de coleta da amostra, cujo efeito ainda deve ser pesquisado.

Quanto ao material da rampa, tem sido normalmente utilizada uma chapa metálica, porém, rampa de policloreto de polivinila (PVC) e com revestimento de fórmica também já foram utilizadas. Ensaios em rampa revestida com borracha de etil vinil acetato (EVA) estão sendo realizados em pesquisas incipientes na Universidade Federal do Cariri, interior do Ceará, com o objetivo de proporcionar à rampa um coeficiente de rugosidade mais próximo do solo. O diâmetro do molde onde é posicionada a amostra de solo normalmente tem sido utilizado com 10 cm de diâmetro ou 10 cm de largura. O cilindro que recebe a amostra para posicioná-la no orifício da rampa pode ter uma base ajustável, permitindo utilizar o mesmo corpo de prova para vários ensaios. Vale ressaltar que alterações no diâmetro do molde, assim como mudanças no seu formato, vão impactar no resultado do ensaio devido ao efeito de bordo, que aliás interfere nos próprios resultados obtidos quando se utiliza o orifício convencional com 10 cm de diâmetro.

3.1.1 Procedimentos metodológicos de execução do ensaio

Inicialmente, molda-se o corpo de prova e coloca-se o material no cilindro, submetendo-se a uma inundação prévia ou saturação por capilaridade, para o caso de ensaio em amostra saturada. O intervalo de tempo de inundação dependerá do tipo de solo. Para solos de textura predominantemente arenosa, o tempo de saturação normalmente ocorre em menos de uma hora. Para a avaliação da erodibilidade em solos não saturados, recomenda-se o controle da sucção do solo, simulando-se as condições de campo, visto que esse fenômeno interfere nos resultados obtidos. O item 4.1 apresenta a metodologia utilizada para considerar a influência da sucção inicial do solo nos ensaios de Inderbitzen.

Após a preparação do corpo de prova, acopla-se o cilindro na rampa do aparelho, introduzindo-se a amostra no orifício de forma a coincidir a superfície do corpo de prova com a superfície da rampa. Em seguida, o corpo de prova é submetido a um escoamento superficial por meio de um fluxo de água constante, que pode ser alimentado por meio de uma rede hidráulica e controlado por meio de um registro. Medindo-se previamente o volume de água em um intervalo de tempo, obtém-se a vazão estimada para realização do ensaio.

Fácio (1991) propôs uma padronização para o ensaio de Inderbitzen, objetivando comparar a erodibilidade do solo saturado da seguinte forma: vazão do escoamento de 50 ml/s; inclinação da rampa de 10°; tempo mínimo de ensaio de 20 minutos; amostra saturada por 15 minutos.

Apesar da proposta de Fácio (1991), algumas pesquisas foram realizadas com fatos distintos. Lima (1999) e Santos (1997) realizaram ensaios de Inderbitzen com tempo de 30 minutos e Almeida (2014) usou tempo de 1 hora, visto que alguns solos demandam mais tempo para estabilizar a perda do solo. Bastos (1999) e Lafayette (2006) realizaram ensaios em diferentes vazões e inclinações de rampa na tentativa de simular as condições do campo. Apesar das variações dos fatores, as pesquisas mostraram que a maior taxa de erodibilidade do solo ocorre nos primeiros 5 minutos do ensaio.

Segundo Bastos (1999), os resultados obtidos nesse tipo de experimento se diferem muito quando executados em diferentes durações, uma vez que essa condição está intimamente ligada à variação das propriedades do escoamento sobre a amostra, devido à mudança constante da superfície do corpo de prova como consequência do processo de destacamento. Dessa forma, Oliveira *et al.* (2021) verificaram que o tempo ideal para obtenção dos parâmetros de erodibilidade do solo está situado no trecho inicial aproximadamente retilíneo da curva de erosão acumulada ao longo do tempo, visto que, nesse trecho, o ensaio é representativo e segue condições homogêneas.

No início do escoamento superficial, registra-se o tempo inicial do ensaio, e, em intervalos de tempo pré-determinados, recolhem-se os materiais erodidos por meio de um conjunto de baldes e peneiras ou geossintéticos, conforme executado por Alves (2019). Esses materiais são peneirados numa malha de 0,075 mm (#200) e obtidos seus pesos úmidos. Em seguida, os materiais são colocados para secagem em estufa, por um período de 24h, para a posterior determinação dos pesos secos. Após a realização do ensaio com uma determinada vazão, a superfície do corpo de prova é regularizada e realiza-se o ensaio com outras vazões. Para considerar o material fino que não é retido na #200, Nacinovic (2009) determinou o peso dos sedimentos em suspensão utilizando um densímetro.

Outra forma de estimativa dos sedimentos passantes na #200 foi proposta por Almeida (2014), que realizou a lavagem dos grãos retidos na #200 e em seguida comparou os resultados com a curva granulométrica sem defloculante, estimando a porcentagem de finos carregados menores do que 0,075 mm.

3.1.2 Estimativa da taxa de erodibilidade

A taxa de erodibilidade (K) e a tensão cisalhante hidráulica crítica (τ_c) podem ser obtidas utilizando-se o modelo *Water Erosion Process Project* (WEPP), iniciado nos estudos de Foster (1982). Nesse modelo, plota-se um gráfico Tensão Cisalhante Hidráulica

(τ_h) *versus* taxa de erosão do solo (por unidade de área e tempo de ensaio), em que K será o valor do coeficiente angular da equação da reta que melhor ajuste os pontos desse gráfico, como mostra a Figura 14, e τ_c é a tensão máxima na qual a perda de massa do solo é zero. Bryan (2000) cita que a erodibilidade apresenta variabilidade temporal e espacial e, por isso, foi definida como uma variável de longo prazo em vez de um índice de resposta em eventos específicos de precipitação.

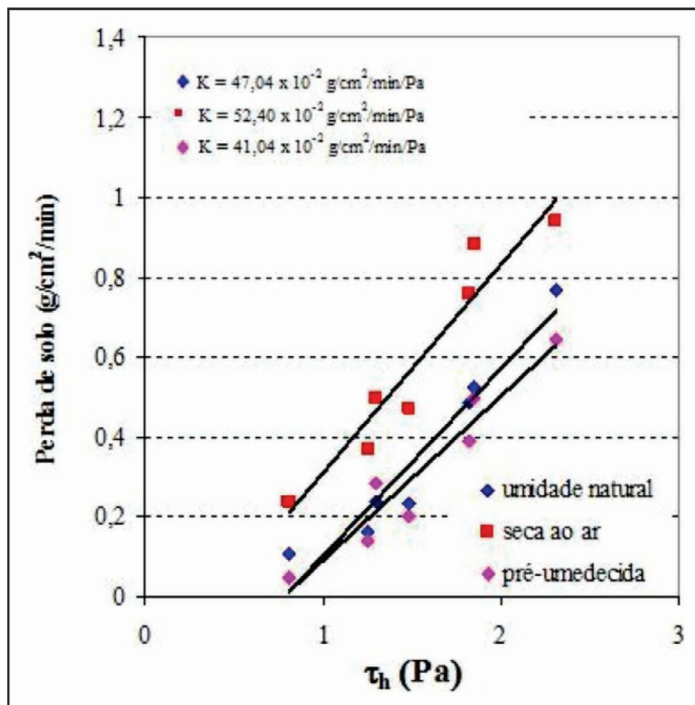


Figura 14 – Tensão Cisalhante Hidráulica (τ_h) *versus* Perda do Solo (Lafayette, 2006)

Com relação à classificação da erodibilidade, Bastos (1999) propôs uma divisão em três principais classes:

- Alta erodibilidade ($K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$);
- Média erodibilidade ($0,1 \geq K \geq 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$);
- Baixa erodibilidade ($K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$).

Os valores da perda do solo são obtidos diretamente do ensaio de Inderbitzen, e os valores das tensões cisalhantes hidráulicas podem ser obtidos conforme a Equação 7.

$$\tau_h = \gamma_w \times h \times d \quad (\text{Eq. 7})$$

onde: γ_w é o peso específico da água (kN/m^3), h é a altura da lâmina de fluxo (m) e d é a declividade da rampa ($^\circ$).

No ensaio de Inderbitzen, a altura da lâmina de água pode ser estimada a partir da velocidade de escoamento do fluxo hídrico. Essa velocidade é facilmente obtida utilizando-se um corante no líquido e medindo-se o tempo necessário para que ele percorra um determinado trecho da rampa. Conhecendo-se a vazão de escoamento, a velocidade e a largura do canal e aplicando-se a Equação da Continuidade de um fluido, pode-se encontrar a altura da lâmina do fluxo (m). Matematicamente, a expressão está apresentada na Equação 8.

$$Q = (l \times h) \times v \quad (\text{Eq. 8})$$

onde: Q é a vazão (m^3/s), l é a largura do canal (m), h é a altura da lâmina de fluxo (m) e v é a velocidade do escoamento (m/s).

3.2 Parcelas hidroerosivas

A parcela hidroerosiva ou parcela de erosão é uma parcela experimental utilizada em estudos de processos erosivos para medir o escoamento superficial e a produção de sedimentos. A parcela hidroerosiva consiste, basicamente, de uma área experimental delimitada por folhas de flandres cravadas a uma profundidade de 10 cm com o objetivo de reter a água da chuva dentro dos limites da parcela e evitar o respingo de gotas de fora para dentro. O escoamento superficial é recolhido em uma calha e conduzido a um recipiente ou um amostrador tipo roda Coshocton para ser mensurado (Figura 15 e Figura 16). É fundamental equipar a parcela de erosão com uma estação meteorológica com capacidade de medição em intervalos de 5 minutos para se avaliar a intensidade máxima de precipitação em 30 min (I_{30}).

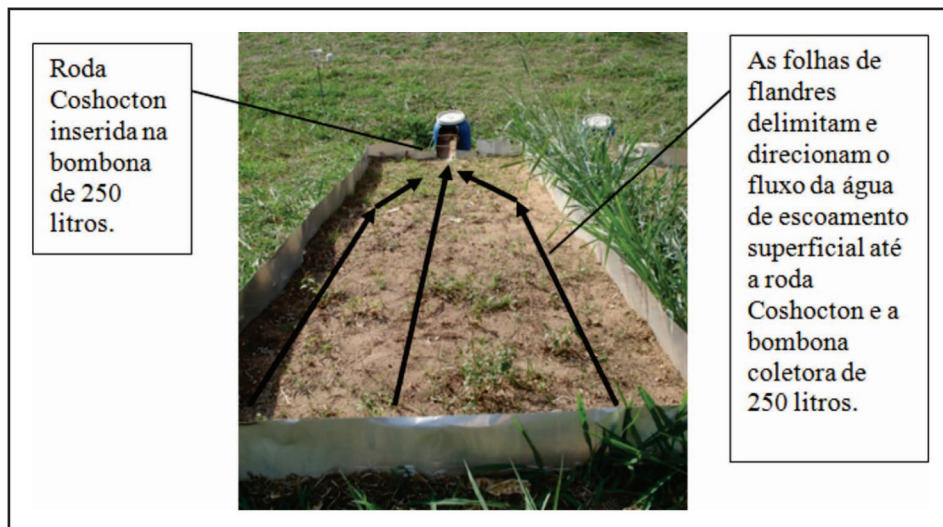


Figura 15 – Direcionamento da água de escoamento superficial na parcela hidroerosiva (Nacinovic, 2013)

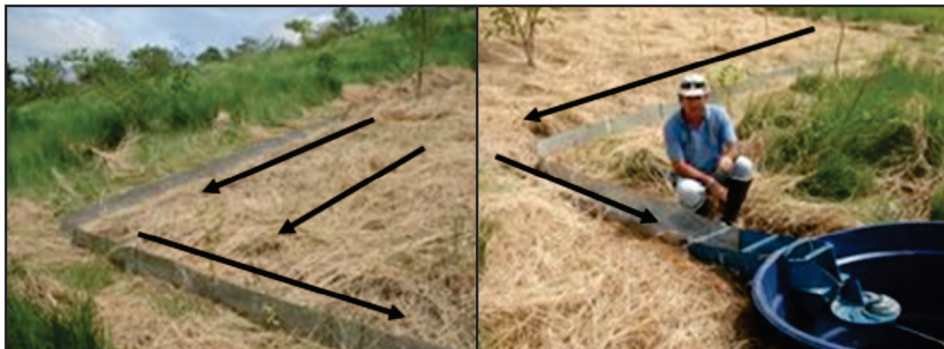


Figura 16 – Folhas de flandres usadas para o direcionamento do fluxo da enxurrada (Nacinovic, 2013)

Pesquisas relativas à erosão e ao escoamento superficial requerem amostradores para quantificar o volume escoado devido ao coeficiente de *runoff* e a produção de sedimentos. A captação de toda a água de escoamento superficial, mediante tempestades, em parcelas hidroerosivas acima de 40 m² é inviável pelo grande volume de água gerado. Por isso, equipamentos que colem apenas alíquotas do escoamento superficial foram projetados, como a roda Coshocton e o sistema divisor tipo Geib. A roda Coshocton, também denominada de roda amostradora de enxurrada, consiste em um vertedouro que conduz e controla a vazão da água de escoamento superficial para uma roda, com uma abertura elevada, apoiada em um eixo levemente inclinado. O jato de água preenche lacunas em espiral na roda, que propulsiona um movimento giratório. Toda vez que a ranhura da roda intercepta o jato de água, uma porção de água de escoamento superficial é coletada. A roda e a abertura foram confeccionadas de forma a coletar uma alíquota da água de escoamento superficial (0,5% ou 1%) (Figura 17).



Figura 17 – Roda Coshocton (Nacinovic, 2013)

O sistema divisor tipo Geib consiste no arranjo de duas caixas receptoras de escoamento superficial, em que a segunda caixa coleta uma fração alíquota do vazamento da

primeira. Nesse sistema, a primeira caixa receptora serve como tanque de sedimentação. Nessa caixa, é instalado o divisor tipo Geib, por meio da confecção de uma janela, por exemplo, de 15 x 30 cm, com um receptor com 1 cm de abertura acoplado ao segundo reservatório por um tubo de aproximadamente (1 1/2"). Por causa da abertura da janela, o primeiro reservatório fica com sua capacidade de armazenamento reduzida. A segunda caixa recebe uma alíquota da água que transborda da primeira (Figura 18 e Figura 19). O cálculo da quantidade total de volume de enxurrada é dado pela Equação 9:

$$Es = \frac{\left[V_1 + \left(\frac{1}{a} * V_2 \right) \right]}{A_p} \quad (\text{Eq. 9})$$

onde: E_s é o escoamento superficial (mm), V_1 é o volume reduzido da primeira caixa receptora (L), a é a alíquota da água que transborda da primeira caixa receptora, V_2 é o volume medido na segunda caixa receptora (L) e A_p é a área da parcela hidroerosiva (m^2).

Por exemplo, no caso de uma parcela erosiva com área (A_p) de 1.000 m^2 , em que o volume reduzido da primeira caixa (V_1) seja de 270 L e a alíquota da água que transborda da primeira caixa receptora (a) seja de 1/30 e o volume mensurado de escoamento superficial na segunda caixa receptora (V_2) tenha sido de 100 L, o escoamento superficial seria de 3,27 mm.



Figura 18 – Roda Coshocton inserida na 1ª caixa de sedimentação cheia e transbordando para a 2ª caixa (Nacinovic, 2013)

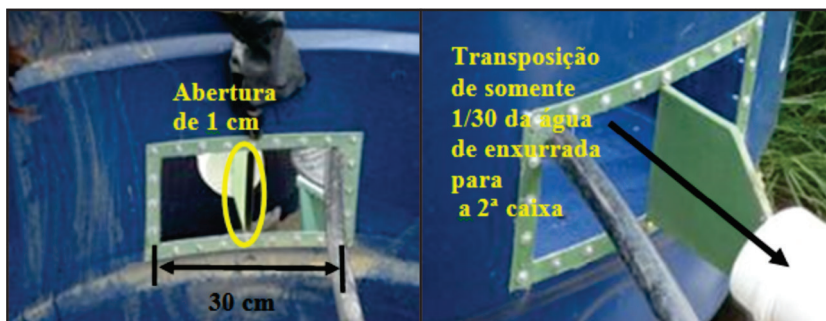


Figura 19 – Coleta de enxurrada com sistema divisor tipo Geib com adaptações (Nacinovic, 2013)

A produção de sedimentos é quantificada em laboratório por amostras dessas alíquotas. A análise de sedimentos segue a Standard Methods 2540 B (APHA (2005a) para amostras de água de escoamento superficial com concentração de sedimentos acima de 200 mg L^{-1} (Método de Evaporação) com ajustes – por exemplo, podem-se utilizar potes plásticos de 250 mL por serem mais fáceis de se manusear e transportar e, nesse caso, evaporar a 60°C , para não avariar os plásticos. As amostras são coletadas diretamente nos receptores da roda Coshocron e nas caixas de sedimentação, evitando-se, assim, mais uma etapa de amostragem (técnica de pipetagem), que está sujeita a erro. No caso de concentrações menores do que 200 mg L^{-1} , adota-se a Standard Methods 2540 D (APHA 2005b), que preconiza a filtração da amostra – Método de Filtração (Figura 20). A metodologia da filtração da amostra está discriminada em detalhes por Nacinovic (2013).

A análise granulométrica dos sedimentos pode ser realizada por meio de um granulômetro a laser. A análise da água de escoamento superficial no granulômetro tem duração de 15 min e o procedimento é dado em Nacinovic (2013).



Figura 20 – Kitassato com bomba a vácuo e papel filtro P40 no processo de filtração da amostra de água de escoamento superficial (Nacinovic, 2013)

Mendes (2006) cita a importância de se padronizar os métodos de medição de erosão em escoamento superficial com a finalidade de se correlacionar os resultados com outras pesquisas. As dimensões de parcelas hidroerosivas mais utilizadas são:

- $2 \times 5 \text{ m} = 10 \text{ m}^2$ – tipo Gerlach
- $1,8 \times 22 \text{ m} = 40 \text{ m}^2$
- $4 \times 25 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$

Experimentos com parcelas hidroerosivas permitem realizar vários estudos comparativos de diferentes manejos de solo e coberturas vegetativas em relação ao processo erosivo (Figura 21). Mendes *et al.* (2011) obtiveram produções de sedimentos elevados de 30 a 40 $\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ e escoamentos superficiais de 250 a 300 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ em uma parcela hidroerosiva em uma região montanhosa com olericultura, devido a pouca cobertura vegetal do solo nesse tipo de cultivo. Os menores valores de produção de sedimentos foram em parcelas hidroerosivas de pousio de um ano e meio (1,32 ton ha^{-1} em Jan/2003) e três anos de pousio (0,9 ton ha^{-1} em Mar/2004). Pode-se concluir, nesse trabalho com parcelas hidroerosivas, que a forma de produção agrícola sustentável na região montanhosa é o sistema agroflorestal de pousio.



Figura 21 – Três parcelas hidroerosivas instaladas com coberturas de solo diversificadas (Nacinovic, 2013)

Embora os resultados mostrados na Figura 21 possam parecer contraditórios com o esperado, pois a resistência do solo tende a aumentar com o aumento da sucção, dois fatores conduzem a tais resultados: a perda de coesão aparente, tornando o solo não resistente às forças trativas oriundas do fluxo superficial, e o surgimento de pressão neutra positiva na fase ar, pressão que ao ultrapassar a resistência ao cisalhamento do solo libera os grãos, possibilitando o seu arraste pela água que flui na superfície.

Nacinovic *et al.* (2014) compararam a produção de sedimentos em diferentes manejos de solo e cobertura vegetativas na região serrana do Rio de Janeiro, em quatro parcelas de erosão com os seguintes tratamentos: olericultura, pastagem, área de recuperação florestal e floresta.

A erosão em um período de 11 meses atingiu valores de $14.779 \text{ kg ha}^{-1}$ na parcela com olericultura; $4,55 \text{ kg ha}^{-1}$ na pastagem; $25,01 \text{ kg ha}^{-1}$ na área de recuperação florestal; e $0,61 \text{ kg ha}^{-1}$ na floresta. Esse trabalho permite uma reflexão sobre a sustentabilidade do atual sistema de produção olerícola nessa região.

3.3 Ensaio com simulador de chuva

A utilização de simuladores de chuva no campo ou laboratório permite determinar as perdas de solo, água e nutrientes, formação do encrostamento, infiltração de água e lixiviação de compostos ou metais em solos. Em campo, podem ser montadas parcelas cercadas por chapas de aço galvanizado ou folhas de flandres, o que possibilita o estudo de diferentes classes de solo, coberturas vegetais e sistemas de manejo. Em campo, usa-se, com frequência, uma estação meteorológica instalada próxima às parcelas. Em laboratório, podem ser construídas parcelas móveis, onde podem ser verificadas perdas de solo, além de nutrientes, amostras de lixiviados e metais pesados.

Esse método tem sido muito utilizado na área da agronomia, em estudos de conservação e manejo do solo e da água. No entanto, pesquisadores da área de geotecnia têm realizado algumas experiências, pois esse procedimento traz algumas vantagens, estando, entre elas: a) redução do tempo do experimento, quando comparado com os realizados com a chuva natural; b) redução do custo do experimento; c) maior controle das condições do experimento – quando se realiza com chuvas naturais, há grande variabilidade temporal e espacial na distribuição das gotas dentro do mesmo evento de chuva; d) possibilidade de repetição do ensaio sob condições idênticas – a repetição dos vários eventos de chuva de diferentes intensidades e energia cinética é uma das principais vantagens do ensaio. A principal desvantagem dos simuladores em campo está na dificuldade de transporte, operação, controle do vento, da chuva natural e do suprimento de água (Morgan, 2005; Guerra, 1991).

As dimensões do simulador de chuva dependem das características locais onde será realizado o experimento; por esse motivo, elas podem diferir de equipamento para equipamento, mas a forma de execução é bem semelhante. O estudo das chuvas naturais e simuladas deve ser realizado de forma conjunta, pois as características da chuva natural são de grande importância na escolha do tipo de simulador.

Bezerra Neto (2014) utilizou um simulador de chuva capaz de reproduzir tamanhos de gotas e níveis de energia cinética semelhantes às da chuva natural (Figura 22). Esse simulador é constituído por uma estrutura metálica retangular apoiada em quatro hastes de alturas reguláveis, ficando a uma distância 3,1m da superfície do solo.

As parcelas possuem uma área de 3 m^2 , com dimensões de $1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, com maior dimensão no sentido do declive. As parcelas são construídas com chapas metálicas com 20 cm de altura, dos quais 10 cm ficam cravadas no solo e, na parte inferior, é colocada uma calha para coletar o material. Essa calha é composta por um tubo de PVC com diâmetro de 100 mm e comprimento de 1 m, instalado no mesmo nível da superfície do solo.

A intensidade de chuva para cada simulação pode ser determinada pela relação entre a lâmina média de água obtida pelo monitoramento do volume de água coletado em pluviômetros dispostos ao redor da parcela. Após cada simulação, o conteúdo de cada

pluviômetro pode ser medido em uma proveta graduada de 1000 ml. Com os resultados de cada ponto, é possível obter a intensidade pluviométrica média na parcela a partir da Equação 10.



Figura 22 – Estrutura do simulador de chuva (Bezerra Neto, 2014)

$$I = \frac{\frac{V_{pl}}{A_{pl}}}{t_e} \quad (\text{Eq. 10})$$

onde: I é a intensidade pluviométrica (mm/h), V_{pl} é o volume captado em cada pluviômetro (ml), A_{pl} é a área da seção transversal dos pluviômetros (cm²) e t_e é o tempo total de duração do evento (h).

A perda de solo para cada evento é determinada pela pesagem do material coletado durante 10 s, a cada 5 min. O material coletado é armazenado em potes plásticos; em seguida, é pesado e deixado em repouso durante 24 horas. Posteriormente, o sobrenadante é succionado, e os potes são levados para secagem em estufa a 65° C, durante 72 horas. Em seguida, os potes são pesados com o solo seco. As taxas de perdas de solo são obtidas pela Equação 11.

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

onde: P_s é a taxa de perda de solo (kg/ha), Q é a vazão (l/s), obtida a partir da divisão do volume coletado (l) pelo tempo de duração da coleta (10 s), C_s é a concentração de sedi-

mento (kg/l), obtida a partir da divisão da massa de solo seco pelo volume da enxurrada (l); t é o intervalo entre as coletas (300 s) e A é a área da parcela (ha).

Por fim, a taxa de desagregação do solo é determinada pela Equação 12.

$$D = \frac{M_{ss}}{A_p \cdot D_c} \quad (\text{Eq. 12})$$

onde: D é a taxa de desagregação do solo ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), M_{ss} é a massa do solo seco desagregado (kg), obtida a partir da diferença entre a massa do pote com solo seco e a massa do pote vazio, A_p é a área da parcela em m^2 e D_c é a duração da coleta (10 s).

Na agronomia, Bagatini *et al.* (2011) conduziram experimentos utilizando simuladores de chuva do tipo braços rotativos em Eldorado do Sul (RS), com intensidade de chuva constante, com o objetivo de avaliar o efeito da mudança no tipo de uso da terra (pastagem nativa para culturas em fileiras). Santos (2013) utilizou o simulador de chuva, no qual as taxas de erosão em entressulcos foram determinadas considerando-se os seguintes tratamentos: caatinga semiarbastiva, resíduos herbáceos (serrapilheira) e solo descoberto.

Mendes *et al.* (2021) desenvolveram um simulador de chuva instrumentado com sensores de umidade e sucção para estudos do processo de infiltração e geração de escoamento em solos não saturados. O equipamento é composto por estrutura metálica, caixa de acrílico, sistema hidráulico e sistema de automação. O equipamento possui a opção de regulação para inclinações de 0° , 2° , 5° , 14° , 25° e 45° . O sistema hidráulico consiste em uma bomba d'água centrífuga que bombeia a água de um reservatório de plástico para o aspersor por meio de uma tubulação de PVC, possuindo manômetros e sensores para a automação do sistema. Para a aquisição dos dados são utilizados sensores de pressão absoluta (0 a 10 bar), microcontrolador do tipo Arduino e inversor de frequência. Nesse equipamento, os ensaios são realizados em amostras compactadas entre duas a quatro camadas, e os sedimentos carregados pela ação da chuva simulada serão captados em intervalo de tempo pré-determinados. Ao longo do ensaio, a variação de sucção e umidade são medidos por meio de sensores de umidade e tensiômetros, e a água escoada coletada nos baldes é pesada por meio de uma balança. Após o ensaio, os baldes com o material coletado ficam em repouso por cerca de 24 a 48 horas, para que o material carregado sedimente e seja transferido para bandejas metálicas e levado para secar em estufa. Dessa forma, tem-se a variação de produção de sedimentos e do escoamento/ infiltração da água ao longo do tempo.

4. PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS NÃO SATURADOS

Em regiões tropicais, o processo erosivo inicia-se em solo não saturado, passando à condição saturada apenas em estágios avançados de evolução. A sucção exerce papel importante no comportamento mecânico dos solos não saturados e na resistência ao processo de erosão. Em geral, observa-se que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e a inundação, sendo mais vulneráveis ao destacamento de partículas por cisalhamento hidráulico (Bastos, 1999).

Além disso, segundo Jacintho *et al.* (2006), em um perfil de solo, caso a fase ar seja contínua, a lâmina de água superficial impedirá a saída de ar do solo, aumentando significativamente a pressão positiva, consequentemente, resistindo à infiltração da água e aumentando o escoamento superficial. Tal fato é evidenciado no início do período chuvoso sob as condições climáticas reinantes na região do Cerrado, que apresenta duas estações quentes bem definidas, uma seca e outra chuvosa. Esse fato foi observado nos ensaios de Inderbitzen realizados em amostras de solos do sul do Ceará, região do semiárido nordestino, descrito no trabalho de Bandeira *et al.* (2021). Os autores relatam que os ensaios realizados em corpos de prova de solo, na condição de umidade natural, apresentaram maior perda de massa quando comparados aos ensaios realizados em corpos de prova previamente inundados, e concluíram que o baixo grau de saturação dos solos dificulta o processo de infiltração da água, aumentando, consequentemente, o escoamento superficial. Além da perda de massa, que pode ocorrer no caso do escoamento superficial, um fator importante a ser observado é a possibilidade de solapamento de bases de taludes devido a sua ruptura estrutural. Segundo Jacintho *et al.* (2006), eventos pluviométricos intensos em encostas e taludes podem provocar rápido aumento de pressões positivas de ar. Nesse caso, a ruptura é provocada por causa do fluxo d'água desenvolvido aproximadamente paralelo à superfície da encosta devido à ocorrência de uma camada que pode ser instabilizada, situada sobre um horizonte menos permeável (por exemplo, horizonte B textural em argissolos), o que provoca, dessa forma, um brusco aumento de poropressões positivas.

A ruptura estrutural do corpo de prova ocorre se a fase ar for contínua, pois o efeito da sucção envolve todo o corpo de prova, reduzindo seu volume. Essa redução de volume aumenta, consequentemente, a poropressão positiva de ar, tornando-a superior à coesão do solo. Esse fenômeno de ruptura estrutural não tende a ocorrer quando a fase ar é descontínua nem quando a inundação é parcial, pois a variação da sucção é mínima para o primeiro caso, e, no segundo caso, há tempo de o ar ser expulso do solo à medida que ocorre a ascensão capilar.

A seguir, são discutidos como a sucção influencia a perda de massa dos solos e a sua estabilidade estrutural quando inundado por meio de resultados de ensaios para estudo de erodibilidade. Para isso são apresentadas as metodologias utilizadas para usá-los em estudos em solos não saturados.

4.1 Ensaios geotécnicos aplicados ao estudo da erodibilidade de solos tropicais não saturados

Conforme comentado nos itens 2.2 e 3, diversos ensaios geotécnicos são utilizados para analisar a erodibilidade dos solos. No entanto, para considerar o efeito da sucção, esses ensaios são adaptados. Em geral, para o estudo de erodibilidade de solos não saturados, são realizados ensaios de Inderbitzen, ensaios de desagregação, ensaios de absorção de água e perda de massa por imersão, ensaio de compressão diametral e cisalhamento direto. A seguir, são apresentadas as modificações necessárias na execução desses ensaios quando se pretende considerar a influência da sucção.

A principal alteração consiste na preparação do corpo de prova. As amostras não são ensaiadas apenas saturadas ou inundadas, mas em diferentes condições de umidade e sucção. Os valores de umidade e sucção são definidos a partir de dados de campo.

Para a obtenção dos diferentes valores de teores de umidade, a amostra inderformada retirada em campo é submetida a umedecimento ou secagem. Para a obtenção de valores inferiores à umidade de campo, as amostras são dessaturadas ao ar. Para a obtenção de valores superiores à umidade de campo, as amostras são umedecidas por gotejamento de água, infiltração por carga hidráulica, ou por ascensão capilar. Tanto na secagem quanto no umedecimento, os teores de umidade são controlados pela pesagem do corpo de prova.

Os ensaios podem ser executados em equipamentos instrumentados com tensiômetros, conforme apresentado por Oliveira *et al.* (2021). Quando os ensaios são feitos com teores de umidade distintos, é necessária a construção da curva de retenção do solo para poder estimar os valores de sucção a partir dos valores de umidade. Os métodos de construção da curva de retenção são descritos no Capítulo 10.

Outra alternativa é a preparação dos corpos de prova em distintos valores de sucção. Nesse caso, faz-se uso da Câmara de Pressão de Richards. Essa câmara é hermeticamente fechada e contém, em seu interior, uma placa porosa que possui alto valor de entrada de ar (geralmente, de 5 a 15 bar). A essas placas, são acoplados canos por onde a água escoa para fora do compartimento por meio de imposição de pressão de ar. A pressão de ar imposta é o valor de sucção desejado. Assim, as amostras nas quais serão executados os ensaios são levadas previamente à câmara para atingir o valor de sucção de ensaio.

Com a preparação das amostras com distintos teores de umidade e sucção, são executados os ensaios de erodibilidade (Indebitzen, desagregação e ensaios de absorção de água e perda de massa por imersão), utilizando-se as metodologias de ensaios descritas nos itens 2.2 e 3.1. O primeiro ensaio permite verificar como a sucção altera os valores de perdas de massa do solo, e os dois últimos ensaios mostram a influência da sucção na estabilidade estrutural das amostras quando submetidas à imersão em água.

Segundo Bastos (1999), a perda de massa de solo está relacionada à variação da coesão (Δc), que é um parâmetro que indica a suscetibilidade à redução da coesão durante um evento pluviométrico que provoque a saturação do solo. Essa condição é suposta ocorrer na superfície do terreno quando estabelecida a condição de fluxo superficial. Esse parâmetro é obtido por meio da Equação 13.

$$\Delta c = \frac{c - c'}{c} \quad (\text{Eq. 13})$$

onde: c é a coesão do solo no teor de umidade/sucção do solo e c' é a coesão saturada.

Esse parâmetro pode ser estimado ao longo da faixa de sucção verificada em campo antes de um evento chuvoso, em função dos dados de resistência obtidos em ensaios com controle de sucção. Ele pode, ainda, ser estimado a partir de situações pontuais de umidade/sucção de campo anteriores a um evento chuvoso, referentes aos ensaios de cisalhamento direto convencionais realizados na condição de umidade/sucção natural.

As metodologias de preparação das amostras com distintos teores de umidade e sucção são descritas acima. Nesses casos, a realização dos ensaios segue a norma internacio-

nal da ASTM D3080 (2004) *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.

Ao se fazer o ensaio com controle de sucção, utiliza-se um equipamento constituído de uma câmara de compressão por ar comprimido que tem instalado, no seu interior, uma caixa de cisalhamento bipartida, movimentada pelo controle externo de um motor elétrico. A câmara de compressão permite a imposição da sucção ($u_a - u_w$) pela técnica de translação de eixo. A técnica de translação de eixos consiste em mudar a referência da pressão atmosférica por meio da imposição artificial de pressão de ar nos contornos do solo. Dessa forma, a pressão negativa de água no solo aumenta de igual valor da pressão de ar imposta, admitindo-se a incompressibilidade da água e das partículas sólidas.

4.2 Influência da sucção na perda de massa de solos

Para analisar a influência da sucção na perda de massa de solos, Almeida *et al.* (2015) executaram ensaios de Inderbitzen em amostras de latossolo e cambissolo situados em regiões próximas ao município de Goiânia. Os ensaios foram realizados com corpos de provas com distintos teores de umidade, e a sucção foi determinada por meio do uso da curva de retenção de água dos solos. Em geral, observou-se o aumento de massa total erodida com o aumento da sucção inicial do solo e uma posterior redução, quando o valor de sucção se encontra no trecho referente à microestrutura da curva de retenção, ou seja, quando o valor da sucção ocorre devido ao fenômeno de adsorção e, portanto, não há meniscos capilares atuando nas interfaces interagregados. Dessa forma, o processo de escoamento não rompe meniscos, ou seja, não há alteração na coesão do solo.

Bastos (1999) apresentou valores das taxas de erodibilidade (K) de solos arenosos e siltosos da Região Metropolitana de Porto Alegre para amostras secas ao ar na umidade natural de campo e pré-umedecidas. Os resultados mostram, exceto para duas amostras, um aumento do parâmetro K com a diminuição do teor de umidade do solo. O autor também apresentou a relação entre Δc (parâmetro que retrata a variação da coesão pelo fluxo de água superficial) e a taxa de erodibilidade dos solos. Os resultados indicam que os solos cuja coesão reduz-se significativamente com o umedecimento pela ação do fluxo superficial ($> 85\%$) são aqueles mais suscetíveis à erosão e associados a processos de erosão hídrica acelerada. Segundo o autor, os solos mais erodíveis são aqueles que, no intervalo entre dois eventos pluviométricos, apresentam como mais importante parcela de resistência ao cisalhamento, capaz de garantir a estabilidade na superfície da encosta ou do talude, o ganho de coesão pela sucção matricial.

4.3 Influência da sucção na estabilidade estrutural de solos

Para analisar a influência da sucção na estabilidade estrutural de solos, Almeida *et al.* (2015) executou ensaios de desagregação em amostras de latossolo e cambissolo situados em regiões próximas ao município de Goiânia. Os ensaios foram realizados com corpos de provas com distintos teores de umidade, e a sucção foi determinada por meio do uso da curva de retenção de água dos solos. A Figura 23 e 24 ilustram a evolução dos resul-

tados dos ensaios de desagregação por imersão total e parcial, respectivamente, em cinco corpos de prova, apresentando diferentes suções iniciais para uma determinada amostra de cambissolo.



Figura 23 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total da amostra de Cambissolo; (a) CPs pré-ensaio; (b) CPs submergidos; (c) término do ensaio após 24h (Almeida, 2014)

Em relação aos resultados dos ensaios de desagregação com imersão total no cambissolo (Figura 23c), devido ao grau de saturação inferior a 61%, é possível afirmar que os corpos de prova CT-1 ($S_0 = 25\%$), CT-2 ($S_0 = 43\%$) e CT-3 ($S_0 = 61\%$) possuem a fase ar contínua, o que gera pressões positivas no interior das amostras, desestruturando-as. Vale ressaltar que quanto menor o grau de saturação inicial, maior a desestruturação, pois quanto maior a quantidade de ar ocluso, maior é a tendência da amostra à ruptura. Os corpos de prova CT-4 ($S = 74\%$) e CT-5 ($S = 98\%$), devido ao reduzido valor de sucção inicial, praticamente mantiveram suas formas e tamanhos originais.

Quando imersas totalmente, as amostras referentes ao latossolo mantiveram sua estrutura coesa, mas houve desprendimentos de solos na base dos corpos de prova. Esses desprendimentos foram maiores nos corpos de prova com maiores valores de sucção inicial.



Figura 24 – Etapas do ensaio de desagregação por imersão parcial nas amostras de Cambissolo: (a) nível de água mantido na altura da base das amostras até umedecimento por ascensão capilar; (b) nível de água em 1/3 da altura das amostras por 15 min; (c) nível de água em 2/3 da altura das amostras; (d) submersão total das amostras; (e) final do ensaio após 24h (Almeida, 2014)

Por outro lado, não houve desagregação nas amostras de latossolo quando imersas em etapas, independentemente do valor da sucção inicial. Isso ocorreu por causa da imersão gradual no ensaio, ou seja, as amostras passam por processos intermediários de satu-

ração por capilaridade. Tal fato permite que, ao longo do ensaio ocorra um preenchimento também gradual dos vazios com água, com a consequente expulsão da fase ar do solo, resultando em quase nenhuma desagregação.

No caso da imersão parcial realizada com as amostras referentes ao cambissolo (Figura 24e), as amostras CG-1 ($S = 25\%$), CG-2 ($S = 43\%$) e CG-3 ($S = 61\%$) sofreram abatimento, e as amostras CG-4 ($S = 74\%$) e CG-5 ($S = 98\%$) praticamente conservaram suas formas e tamanhos originais. Esse comportamento mostrou-se semelhante ao observado no ensaio com imersão total. Isso ocorre porque a heterogeneidade da amostra resulta em vazios não interligados, o que impossibilita a completa saturação do solo no decorrer do ensaio e, consequentemente, gera poropressão positiva.

Menezes (2010) realizou ensaios de absorção de água e perda de massa por imersão para estudar o potencial de erodibilidade de solos areno-argilosos e argilo-siltosos situados no interior paulista. O valor do índice de erodibilidade (E) foi obtido a partir dos resultados de S (índice de absorção) e P (perda de massa) por meio da Equação 3. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de índice de absorção (S), perda de massa (P) e índice de erodibilidade (E) (adaptado de Menezes, 2010)

Sucção (kPa)	Solo 1			Solo 2		
	S	P	E	S	P	E
2	0,1	0,92	5,65	0,07	0,43	8,47
5	0,20	4,39	2,37	0,58	0,83	36,34
10	0,44	20,55	1,11	1,01	25,4	2,07
20	0,42	7,66	2,85	1,22	76,27	0,83
100	0,93	39,18	1,23	0,97	51,98	0,97
200	1,01	42,81	1,23	1,40	14,39	5,06
800	1,00	22,12	2,35	1,62	56,25	1,50
Seco ao ar	2,18	39,81	2,85	2,80	21,73	6,70

Os resultados mostram a relevante influência que a secagem e o consequente aumento da sucção têm no desprendimento das partículas do solo. Em geral, o aumento de sucção resultou em maiores perdas de massa por imersão. Como a perda de massa por imersão é um importante indicativo de desagregabilidade do solo, infere-se que a sucção pode contribuir para o aumento da susceptibilidade à erosão, concordando com o verificado por Almeida *et al.* (2015).

É importante ressaltar que a maioria dos estudos realizados para estudar a influência da sucção na erodibilidade de solos, referem-se somente a perdas de massa e não fazem menção à estabilidade estrutural dos solos.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Os problemas decorrentes da erosão despertam, na comunidade geotécnica, a necessidade de entender os processos erosivos dos solos. Em regiões tropicais, esses proces-

sos iniciam-se em solos não saturados e, apenas quando em estados avançados, atingem a condição saturada. Dessa forma, é importante compreender a erodibilidade de solos não saturados.

Para isso, foram necessárias algumas alterações nas metodologias de ensaios de erodibilidade tradicionalmente executadas no meio geotécnico a fim de se considerar a influência da sucção. A partir dessas alterações, algumas pesquisas foram executadas com o intuito de se verificar como a sucção influencia a perda de massa e estabilidade estrutural dos solos. Em suma, verifica-se que a sucção, em determinados intervalos, aumenta a taxa de erodibilidade dos solos devido ao escoamento superficial da água ou inundação abrupta.

Dessa forma, fazendo-se um paralelo com a prática, a erodibilidade dos solos aumenta no início do período chuvoso devido à ação das chuvas intensas e do baixo grau de saturação do solo. Portanto, o conceito de erodibilidade, tradicionalmente associado às propriedades físicas e mineralógicas do solo, também depende da forma e da intensidade do umedecimento, que estão relacionadas ao ciclo pluviométrico da região.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2020a). Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*) - NBR 13601. Rio de Janeiro, Brasil, 2 p.
- ABNT (2020b). Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS - NBR 13602. Rio de Janeiro, Brasil, 5 p.
- ABNT (1998). Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio de furo de agulha (*pinhole test*) - NBR 14114. Rio de Janeiro, Brasil, 8 p.
- AGUIAR, de V.G. (2009). Bacia hidrográfica do córrego granada – Aparecida de Goiânia - GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil - PPG-GECON, Universidade Federal de Goiás, 97 pp.
- ALMEIDA, J.G.R. (2014). Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil - PPG-GECON, Universidade Federal de Goiás, 128 pp.
- ALMEIDA, J. G. R.; ROMÃO, P. de A.; MASCARENHA, M. M. dos A.; SALES, M. M. (2015). Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis (GO). Revista Geociências. v. 34, p. 441-451.
- ALVES, E. C. (2019). Estimativa da erodibilidade de solos com diferentes densidades. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia (GO).

APHA (2005a). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC, (2012). – Total Solids Dried at 103-105°C. 2540 B, Washington D.C., USA, Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation, 21 ed., 256p.

APHA (2005b). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater., (2012). – Total Suspended Solids Dried at 103 – 105°C. 2540 D, Washington D.C., USA, Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation, Washington DC, 21 ed., 258p.

ASTM (2004). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions – D3080. New York, 9 p.

ASTM (2012). Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test – D6572. New York, 8 p.

AUGUSTIN, C.H.R. R. e ARANHA, P.R.A. (2006). Piping em área de voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. Revista Brasileira de Geomorfologiaano 7(1): 9-18.

BAGATINI, T.; COGO, N.P.; GILLES, L.; PORTELA, J.C.; PORTZ, G.; QUEIROZ, H.T. (2011). Perdas de solo e água por erosão hídrica após mudança no tipo de uso da terra, em dois métodos de preparo do solo e dois tipos de adubação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35: 999-1011.

BANDEIRA, A. P. N.; MACEDO, C. C. A.; CLARINDO, G. S.; LIMA, M. G. DE S.; SOUZA NETO, J. B. DE (2021). Assessment of potential surface degradation resulting from erosion processes in environmentally protected area. Soils & Rocks, v. 44, p. 1-10, 2021.

BASTOS, C.A.B. (1999). Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Tese de Doutorado. UFRGS, 266 pp.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (2005). Conservação do solo. 7 ed. Ícone, São Paulo, 355p.

BEZERRA NETO, C.A. (2014). Desenvolvimento de um equipamento para avaliação do desempenho de geomantas. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 104 pp.

BEZERRA, J. DA S., (2022), Análise do processo erosivo de uma encosta no bairro de Bom Jesus- Ilha de Itamaracá/PE. Tese de Doutorado, UFPE, 267 pp.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D.A.; FLEISCHER, L.R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; MEUSBURGER, K.; MODUGNO, S.; SCHÜTT, B.; FERRO, V.; BA-

GARELLO, V.; VAN OOST, K. MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* 2017, 8, 1-13.

BRYAN, R.B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32: 385-415.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J.A.; MORTA, da N.O. & FRANCISCO, R.A. (2006). Processos erosivos. CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. (orgs.), *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. FINATEC, Brasília, pp. 39-88.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. Os solos não saturados no contexto de alguns problemas socioambientais no Brasil. (2011). VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Pirenópolis, 419-429.

CASTRO FILHO, C., MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. (1998). Estabilidade dos Agregados e sua Relação com o Teor de Carbono Orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em Função de Sistemas de Plantio, Rotações de Culturas e Métodos de Preparo das Amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 220: 527-538.

CONCIANI, W. (2008) *Processos Erosivos: conceitos e ações de controle*. Editora CEFET/MT, Cuiabá, 148p.

FÁCIO, J.A. (1991). Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado. UnB, 122 pp.

FARRES, P. (1978). The Role of Time and Aggregate Size in the Crusting Process. *Earth Surface Processes*, 3: 243-254.

FOSTER, G. R (1982). Modeling the Erosion Process. In: *Hydrologic modeling of small watersheds*. St. Joseph: ASAE, p. 297-380.

GONÇALVES, L. G.; SILVA, P. B (2019). Proposta de desenvolvimento e execução de equipamento Inderbitzen Modificado para avaliação de erodibilidade do solo. *Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia*. 2019.

GUERRA, A.J.T. (1991). Soil characteristics and erosion, with particular reference to organic matter content. Tese de Doutorado, Universidade de Londres, 441 pp.

GUERRA, A.J.T. (2001). Processos Erosivos nas Encostas. GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. (eds), *Geomorfologia Uma Atualização de Bases e Conceitos*, 4º ed, Rio de Janeiro, 149-197.

GUERRA, A.J.T. (1999). O Início do Processo Erosivo. GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. & BOTELHO, R.G.M. (eds), Erosão e Conservação dos Solos, Rio de Janeiro, p. 17-55.

GUERRA, C. A.; ROSA, I. M. D.; VALENTINI, E.; WOLF, F.; FILIPPONI, F.; KARGER, D. N.; XUAN A. N.; MATHIEU, J.; LAVELLE, P.; EISENHauer, N (2020). Global vulnerability of soil ecosystems to erosion. *Landsc. Ecol.* 35, 823-842.

HOLMOREN, G.G.S. & FLANAGAN, C.P. (1977). Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the *crumb test*. In Sherard and R.S. Decker (ed.). *Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects*, p 218-239.

JACINTHO, E.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F.B.F.; SANTOS, R.M. M.; GUIMARÃES, R.C. & LIMA, M.C.G. (2006). Solos Tropicais e o Processo Erosivo. CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M. & MELO, M.T.S. (orgs), *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. FINATEC, Brasília, pp. 93-147.

LAFAYETTE, K.P.V. (2006). Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti - Cabo de Santo Agostinho/PE. Tese de Doutorado.. Universidade Federal de Pernambuco, 358p.

LAL, R. (2011). Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Dev.* 12, 519-539.

LI, J.; MA, X.; ZHANG, C. (2020). Predicting the spatiotemporal variation in soil wind erosion across Central Asia in response to climate change in the 21st century. *Sci. Total Environ.* 709, 136060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136060>.

LIMA, M.C. (1999). Contribuição ao estudo do processo evolutivo de Boçorocas na área urbana de Manaus. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UnB, 336 p.

LOBO CARNEIRO, F.L. & BARCELLOS, A. (1949). Résistance à La Traction des Bétons. Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 37 p.

LUETZENBURG, G.; BITTNER, M.J.; CALSAMIGLIA, A.; RENSCHLER, C.S.; ESTRANY, J.; POEPPL, R.(2020). Climate and land use change effects on soil erosion in two small agricultural catchment systems Fugnitz-Austria. Can Revull-Spain. *Sci. Total Environ.* 704, 135389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135389>.

MENDES, C.A.R. (2006). Erosão Superficial em Encosta Íngreme sob Cultivo Perene e com Pousio no Município de Bom Jardim. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 237 p.

MENDES, C.A.R.; MAHLER, C.F. & ANDRADE, A.G. (2011). Erosão Superficial em Argissolo Amarelo sob Cultivo Perene e com Pousio Florestal em Área de Relevo Montanhoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 1387-1396.

MENDES, T. A.; PEREIRA, S. A. D. S.; REBOLLEDO, J. F. R.; GITIRANA, G. de F. N.; MELO, M. T. da S.; da LUZ, M. P (2021). Development of a rainfall and runoff simulator for performing hydrological and geotechnical tests. Sustainability, MPDI, Basel, Switzerland, 13(6).. DOI: 10.3390/su13063060

MENEZES, M.B.M. (2010). Análise da influência do teor de umidade na absorção de água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 139 pp.

MORGAN, R.P.C. (2005). Soil erosion and conservation. Blackwell Publishing, Inglaterra, 304 p.

MOHAMED, S.; ALSAFADI, K.; TALUKDAR,S.; KIWAN,S.; HENNAWI, S.; AL-SHIHABI, O.; SHARAF,M.; HARSANYIE, E. (2020). Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using RUSLE integrating geo informatics approach. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 20.

NACINOVIC, M.G.G. (2009). Estudo de erosão pela análise de sucção e escoamento superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis-RJ). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 167 pp.

NACINOVIC, M.G.G. (2013). Avaliação de erosão hídrica superficial em parcelas experimentais. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 135 pp.

NACINOVIC, M.G.G.; MAHLER, C.F. & AVELAR, A.S. (2014). Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. Soil Tillage Research, 144: 164-173.

NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1979). Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. Bulletin of Engineering. Geology and the Environment, 19: p. 196-199.

OLIVEIRA, V. N.; GITIRANA, G. F. N.; MASCARENHA, M. M.A; SALES, M. M.; VARRONE, L. F. R.; DA LUZ, M; P (20221). An Enhanced Flume Testing Procedure for the Study of Rill Erosion. Water, 13(21), 2956; <https://doi.org/10.3390/w13212956>

REGO, J.J.V. (1978). Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaiss. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 125p.

OU, X.; HUA, Y.; LIC, X.; GUOB, S.; LIU, B. (2021). Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling Catena. v. 196, 104932, p. 1-12.

ROSS, J.L.S. (1992). O Registro Cartográfico dos Fatos Geomórficos e a Questão da Taxonomia do Relevo. Revista do Departamento de Geografia, (6): 63-74.

SANTOS, dos R.M.M. (1997). Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, 138 p.

SANTOS, C. G. dos (2013) Erosão hídrica e taxa de entrega de sedimentos na bacia hidrográfica semi-árida do rio Exu/PE. 109p. Departamento de agronomia. Tese Universidade Federal Rural de Pernambuco.

TEIXEIRA, D. B. S. Erosividade da chuva no estado de São Paulo com base em séries sintéticas de dados pluviográficos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2019.

YU, H.; LI, Y.; OSHUNSANYA, S. O.; ARE, K. S.; GENG, Y.; SAGGAR, S.; LIU, W (2019). Re-introduction of light grazing reduces soil erosion and soil respiration converted grassland on the loess plateau, China. Agriculture, Ecosystems and Environment. 280, 43-52.

