

Assunto Teórica 02: Erosão do solo

1. Conceito

Essencialmente é um processo de desgaste da superfície e/ou arrastamento das partículas do solo por agentes, tais como a água das chuvas (hídrica), ventos (eólica), gelo (mudanças de temperatura), ou outro agente geológico, incluindo processos como o arraste gravitacional.

2. Importância

Degradação de solos agrícolas;

Assoreamento de cursos e reservatórios de água;

Perda de produtividade dos solos agrícolas.

Exemplo: Degradação do solo nos estados do NE e especialmente o Ceará.

3. Erosão geológica X Erosão acelerada

Erosão geológica: processo lento, responsável pela modelagem do relevo da crosta terrestre com seus vales, rios, montanhas, planícies, planaltos e deltas. É um processo construtivo, não influenciado pelo homem, onde as taxas de formação superam as taxas de remoção do solo.

Erosão acelerada: processo rápido e destrutivo e iniciado pelo próprio homem, onde as taxas de remoção superam as taxas de formação ou gênese dos solos. Em escala mundial, a erosão promovida por atividades não-agrícolas, tais como a construção civil, mineração, etc é insignificante, interferindo em uma pequena parte da superfície terrestre. Por outro, a agricultura, por ser tão amplamente distribuída e potencialmente alterar a velocidade dos processos erosivos, torna-se muito mais importante. Quase todas as operações agrícolas são intensificadoras do processo erosivo. A retirada da cobertura vegetal expõe a superfície do solo e propicia condições para que os ventos e água atuem de forma mais direta pela não absorção dos impactos das gotas de chuva, eliminação de obstáculos à movimentação dos ventos e favorecimento do escoamento superficial formando enxurradas, acentuando ainda mais o processo erosivo. O cultivo do solo contribui ainda mais por desagregá-lo, favorecendo a individualização das partículas ou a diminuição do tamanho dos agregados, facilitando, a movimentação destes pelos ventos e água.

4. Agentes de erosão

Os principais agentes de erosão são a água e os ventos, contudo outros podem atuar:

Ventos: A ação dos ventos ocorre pela abrasão de partículas de rochas e solo em suspensão.

Água: É o mais importante agente de erosão atuando através das chuvas, riachos e rios pelo impacto ou carreamento do solo. As ondas também atuam erodindo as margens de da costa litorânea, de lagos e rios.

Mudanças de temperatura: Quando considerado como agente de erosão geológica é perceptível somente quando se considera longo período de tempo, como por exemplo, as fraturas geradas nas rochas. Estas fraturas tendem a ser superficiais nas variações de temperatura entre o dia e noite, enquanto são mais profundas quando originadas das alternâncias entre o verão e inverno.

Biológico: Alguma destruição pode ser causada por organismos tais como líquens e musgos sobre as rochas. Contudo os efeitos principais das alterações promovidas por organismos estão relacionados à aceleração da atuação de outros agentes como a água e os ventos.

5. Limites aceitáveis de erosão

A erosão geológica é um processo natural sendo qualitativa e quantitativamente aceitável. Porém, o que pode ser normal quando se considera o homem intervindo nos agroecossistemas, visando a produção sustentável de alimentos? O limite a ser considerado deve ser a não existência de processos erosivos, pois se entende que os sistemas agrícolas sejam tecnicamente conduzidos, permitindo a estabilidade física, química e biológica do solo, viabilizando a produção agrícola perpétua de alimentos.

Alguns autores estabelecem a possibilidade de se aceitar a erosão em níveis que não ultrapassem a taxa de formação de solos, o que, entretanto, pode ser questionável, pois a taxa pode não ser precisamente medida para as diferentes classes de solo. Estimativas gerais consideram a necessidade de 300 a 1.000 anos para a formação de 25 mm de solo, sendo esta estimativa reduzida para 100 anos quando se considera o revolvimento do solo pelo cultivo. Nos Estados Unidos adota-se como limite superior de perda de solo tolerável o valor de 11,2 ton.ha.ano, equivalente a uma taxa de formação de 25 mm em 30 anos.m.

Contudo estes limites podem ser muito mais restritivos quando se consideram os resultados obtidos por Galindo & Margolis (1989) para solo no estado de Pernambuco. Utilizando duas metodologias diferentes, estes autores encontraram valores variáveis entre 0,98 a 0,09 mm/ano, respectivamente para um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa e Luvisolo Vértico textura média/argilosa (Bruno não cálcico). Estes números tornam bastante evidente que os limites podem ser bastante restritivos, o que leva a necessidade de desenvolvimento real de sistemas que sejam eficientemente conservadores, sobretudo para solos da condição semi-árida.

6. Formas de erosão hídrica

As formas de erosão hídrica mais comuns relatadas na literatura são a laminar, em sulcos e voçorocas, todas definidas a partir da progressiva concentração de enxurrada na superfície. Outras formas devem ser comentadas, tidas como especializadas, uma vez que ocorrem associadas às principais comentadas, como por exemplo, a erosão por

salpicamento ou o efeito do impacto da gota de chuva, na verdade o primeiro e mais importante estágio do processo de erosão.

Erosão pelo impacto das gotas de chuva: É o primeiro passo no processo de erosão, pois destroem agregados, subdividindo-os em tamanhos menores, bem como contribuem para o processo de redução da velocidade de infiltração de água no perfil, favorecendo desta forma a formação de enxurradas.

Erosão laminar: É o tipo de erosão em que finas camadas de solo são removidas em toda uma área, sendo a menos notada visualmente. Pode ser percebida a partir da exposição de raízes de plantas perenes.

Erosão em sulcos: É uma forma de erosão resultante da concentração da enxurrada em alguns pontos do terreno, atingindo volume e velocidades suficientes para formar sulcos mais ou menos profundos. Na sua fase inicial, os sulcos podem ser desfeitos com as operações normais de preparo do solo, porém em estágio mais avançado, podem atingir profundidades que interrompem o trabalho de máquinas.

Erosão em voçorocas: É uma forma espetacular de erosão, ocasionada por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano, no mesmo sulco, o qual vai se ampliando pelo deslocamento de grandes massas de solo, formando grandes cavidades em extensão e profundidade.

Deslocamentos e escorregamentos de massas de solo: Ocasionalmente, as vezes, por cortes feitos nas bases dos morros bastante inclinados. Exemplos podem ser dados pelas quedas de barreiras, muito comuns no domínio pedobioclimático dos Mares de Morros.

Erosão em pedestal: Ocorre quando um solo de grande susceptibilidade a erosão encontra-se protegido da ação de salpicamento por uma pedra ou raízes de árvores, ou seja, material mais resistente à erosão. A erosão na vizinhança é principalmente por salpicamento, não havendo ação da enxurrada, evidente pelo não desgaste da base dos pedestais.

Erosão em pináculo: Caracterizada por deixar altos pináculos no fundo e nos lados das voçorocas, está geralmente associada a condições altamente erosionáveis de alguns solos. É um tipo de erosão sempre associado a sulcos verticais profundos nas voçorocas.

Erosão em túnel: Ocorre em solos sujeitos a erosão em pináculos, formando túneis contínuos ou canais subterrâneos. Ocorrem quando a água de superfície se movimenta dentro do solo até encontrar uma camada menos permeável, arrastando partículas mais finas da camada mais porosa.

A importância de uma ou de outra forma e tipo de erosão vai depender muito mais de condições específicas locais que reflitam condições e características e/ou propriedades susceptíveis de serem degradadas.

7. Fases no processo de erosão

Classicamente são definidas três fases para o processo erosivo:

Desagregação: O umedecimento dos agregados durante as chuvas ameniza as forças de coesão entre as partículas do solo, tornando os agregados mais susceptíveis a

fragmentação com o impacto continuado das gotas de chuva. Contribuem também nesta fase as enxurradas formadas pelo escoamento superficial.

Transporte: as partículas de solo desagregadas pelas gotas poderão ser transportadas pelo salpique, ou seja, junto com as gotículas de chuvas subdivididas e que se deslocam com o impacto das primeiras gotas. As enxurradas formadas pelo escoamento superficial são outro meio de transporte.

Deposição: Após diminuir ou cessar a velocidade e turbulência da enxurrada e encerradas as chuvas, as partículas de solo são então depositadas nas porções mais rebaixadas do relevo. Este processo pode ocasionar o assoreamento de cursos d'água ou reservatórios.

A intensidade com que cada uma destas ocorre pode variar com as características e/ou propriedades do solo.

8. Estimativas da quantidade de erosão

As primeiras estimativas numéricas da quantidade de erosão nas décadas de 20 e 30 não consideraram a definição e avaliação das causas e efeitos de um fenômeno natural. Este também é o caso da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), desenvolvida pelo Departamento de Agricultura dos EUA nos anos 60. Nesta época iniciaram-se os trabalhos que procuravam entender o processo erosivo, tentando entendê-lo e reproduzi-lo física e matematicamente. Uma grande quantidade de dados foi produzida com a aplicação e desenvolvimento dos modelos empíricos, dando condições para o desenvolvimento destes modelos. Exemplo de modelo com este enfoque são o Water Erosion Project Prediction (WEPP).

Contudo, os princípios qualitativos fundamentais para a estimativa da perda de solo consideram que a causa fundamental da erosão do solo é a atuação da chuva sobre a superfície do solo. Este fenômeno pode ser dividido em como a erosão do solo irá ser afetada pelos diferentes tipos de chuva e como variará com as diferentes condições de solo.

A quantidade de erosão depende da combinação do poder da chuva em causar erosão e da habilidade do solo em resistir aos efeitos da chuva. Em termos matemáticos a erosão é função da erosividade das chuvas e da erodibilidade do solo.

Erosividade pode ser definida como a habilidade potencial da chuva em provocar erosão. Para uma dada condição de solo, uma chuva pode ser comparada com outra quantitativamente, permitindo o estabelecimento de uma escala numérica de erosividade.

A susceptibilidade do solo ao processo erosivo define a erodibilidade do solo, podendo ser atribuída a três fatores básicos. O primeiro diz respeito às características mecânicas, químicas e físicas do solo as quais podem ser medidas em laboratório. O segundo está relacionado com a topografia, especialmente a declividade do terreno. Por último, a erodibilidade vai ser dependente do tratamento que está sendo dado ao solo e ao manejo das plantas sobre o mesmo, compondo, desta forma, dois outros componentes deste fator: a cultura (tipo, fertilização, produtividade esperada etc) e o tratamento dado ao solo (o uso ou não de práticas conservacionistas, tipo de preparo do solo, intensidade de cultivo etc.).

Sendo assim pode-se estabelecer que a erosão do solo é uma função da erosividade das chuvas, envolvendo a energia de todos componentes da chuva (gotas e enxurradas) (R) e da erodibilidade do solo. A erodibilidade do solo, por sua vez, pode ser decomposta em componentes associados às características e/ou propriedades do solo que o tornam mais ou menos susceptível a erosão, bem como componentes relacionados ao manejo da superfície do solo, minimizando os efeitos dos grandes comprimentos de rampa e elevadas declividades (*LS*), e, também, das condições em que a cultura está sendo conduzida (*C*), estabelecendo maiores ou menores perdas de solo pela cobertura proporcionada a superfície do solo.

9. Quantidade e intensidade de chuvas

Há uma relação óbvia entre quantidade de chuvas e perdas de solo, ou seja, chuvas de grandes proporções têm como consequência grandes perdas de solo e vice-versa. Contudo as correlações estatísticas entre estas variáveis são pequenas. A mesma quantidade de chuva em diferentes ocasiões pode levar a perdas de solo diferentes. Esta constatação leva à necessidade de medidas mais detalhadas e precisas para descrever a capacidade das chuvas em provocar erosão.

Qualquer medida da quantidade de chuvas vai ser sempre uma amostra com certa representatividade e precisão, o que pode ser bastante questionado. O número de pluviômetros e a área de representação e as diferenças entre eles, no que se refere às suas dimensões, posição, altura de instalação, proximidade de barreiras naturais ou não a estes equipamentos, etc são alguns dos fatores que podem afetar os valores quantitativos de chuva de determinada área.

Uma medida direta de determinada chuva não considera o relevo e/ou a declividade da superfície que atinge, pois se pressupõe que o valor determinado (por exemplo 60 mm de chuva) está uniformemente distribuído numa superfície, o que na grande maioria das vezes não acontece.

Outro aspecto a ser considerado refere-se a distribuição ao longo do ano de um total de chuva. Há uma tendência de maior uniformidade da distribuição das chuvas em áreas de clima temperado, enquanto que nos trópicos é mais usual a concentração em parte do ano, as vezes com um pequeno período de chuvas (veranicos), muito comum nos subtropicais (cerrados por exemplo). Estes padrões de distribuição de chuvas apresentam implicações diretas sobre as perdas de solo e água.

Por outro lado existem consideráveis evidências na literatura das relações entre erosão do solo e intensidade de chuvas (quantidade de chuvas por unidade de tempo), sendo considerado um potencial e importante parâmetro de medida da erosividade das chuvas. Esta é uma variável que, junto com a quantidade, pode ser perfeitamente obtida nas estações meteorológicas, sendo limitante para a aplicabilidade dos resultados dos experimentos de avaliação dos efeitos das práticas de manejo sobre as perdas de solo.

10. Tamanho e distribuição das gotas d'água

Os primeiros experimentos de determinação do tamanho das gotas de chuva foram feitos em 1892. Gotas de chuva foram coletadas utilizando-se placas de ardósia divididas em quadrados, sendo o tamanho das gotas obtido através do tamanho do salpico (impacto) das gotas de chuva.

Outra técnica para este tipo de determinação é o uso de papel absorvente juntamente com algum tipo de pó sobre a sua superfície, de tal forma que, após o impacto, teria-se a marca circular característica daquele tamanho de gota, medida pelo seu diâmetro. O tamanho das gotas de chuva seria obtido pela relação com o diâmetro da mancha no papel associado a constantes de calibração para o papel absorvente obtidas em laboratório ($D=aS^b$). Esta metodologia atualmente é facilitada pelo uso de escaneadores e programas computadorizados de determinação de área ou forma.

Uma técnica muito popular é o método de pelets de flocos. Gotas de chuva são coletadas em bandejas contendo farinha de trigo. Cada gota de chuva forma um pequeno glóbulo de farinha umedecido que, após secagem, pode ser separado do restante. Experimentos prévios de laboratório podem estabelecer uma relação entre o tamanho do glóbulo e da gota de chuva. Outras formas de avaliação do tamanho de gotas de chuva podem ser utilizados e estão associados também ao momento e a energia cinética das chuvas: sensores acústicos, sensores de medida de pressão, etc.

A variação dos tamanhos de gotas tem sido medida em vários países utilizando os métodos comentados, sendo identificado 5 mm como o limite superior. Experimentos em túnel de ventos indicam diâmetro de gotas estáveis em torno de 4,6 mm, sendo instáveis acima de 5,4 mm de, podendo desintegrar ou não em neste intervalo, dependendo da turbulência. Fotografias em alta velocidade mostram que a forma das gotas tendem a uma esfera achatada em função da resistência do ar. Experimentos de campo confirmam os diâmetros máximos referidos anteriormente. Normalmente não se encontram gotas maiores que 5 ou 6 mm, a não ser que em condições de colisão, quando podem ser formadas gotas de maior diâmetro.

As proporções de tamanhos de gotas e como se distribuem varia com as diferentes chuvas. A observação direta evidencia que chuvas de baixa intensidade e que podem durar dias são formadas por gotas de pequeno diâmetro, enquanto que em chuvas de alta intensidade, as gotas são de diâmetros muito maiores.

O melhor índice para a distribuição das gotas de chuva é o diâmetro-volume médio da gota (D_{50}), obtido pela plotagem do volume acumulado e diâmetro de gota, quando metade do volume das chuvas cai em gotas com diâmetro pequeno e a outra metade em gotas de diâmetro maior (Figura 3.6.). Estudos têm mostrado que há uma relação entre D_{50} e intensidade na forma de $D_{50}=aI^b$ (a e b são constantes). Com esta relação não há dúvidas de que aumentando a intensidade das chuvas há um correspondente aumento do tamanho das gotas, diminuindo também o tamanho quando a intensidade das chuvas reduz (figura 3.4). No entanto, sabe-se que existe um limite físico para o tamanho máximo de gotas, havendo um reversão nesta relação em chuvas de muito altas intensidades. Curvas de distribuição de tamanhos de gotas para intensidades crescentes mostram claramente que o valor modal do diâmetro de gota chega ao máximo até 80 a 100 mm de chuva por hora, decrescendo a intensidades maiores (Figura 3.4 e 3.5). A plotagem do D_{50} e intensidade (Figura 3.7) para esta condição mostra que a relação $D_{50}=aI^b$ não pode ser estabelecida, não

sendo possível extrapolá-la para altas intensidades de chuva. É de supor, portanto, que não há uma única relação, devendo variar com as diferentes chuvas.

11. Velocidade terminal

Um corpo em queda livre sob irá acelerar até que a resistência do ar se igual a força da gravidade, continuando em queda a uma dada velocidade e constante. Esta velocidade é conhecida como velocidade terminal e vai depender do tamanho e da forma deste corpo. A velocidade terminal das gotas de chuva aumenta com o aumento do tamanho. Gotas em torno de 5 mm de diâmetro apresentam uma velocidade terminal de 9 metros por segundo (Figura 3.8).

Muitas medidas da velocidade terminal foram feitas em laboratório no início do século, obtendo-se valores semelhantes, considerando aparato utilizado. Medidas posteriores, utilizando equipamentos mais modernos, obtiveram valores de velocidade terminal 15% superiores quando comparadas às medidas do início do século. A metodologia de determinação da velocidade terminal envolve a detecção dos impulsos elétricos gerados quando as gotas d'água passam por anéis de indução em função da carga elétrica presente nesta. Estes impulsos são amplificados em oscilógrafos, de tal forma que o tempo de queda entre dois anéis a distância conhecida pode ser determinado, possibilitando a estimativa da velocidade de queda das gotas com precisão. Em ambientes abertos a velocidade terminal também foi medida, sendo identificada uma velocidade em torno de 95% da estimada em ambientes fechados. Quando a chuva é acompanhada por ventos o componente resultante pode ser maior que a velocidade terminal. O efeito irá ser maior sobre gotas de pequeno diâmetro caindo vagarosamente do que em grandes gotas com alta velocidade.

12. Momentum e energia cinética

Existem evidências experimentais que o poder erosivo das chuvas está relacionado a parâmetros compostos derivados de combinações de mais de uma propriedade física. A energia cinética das chuvas e o seu momentum são exemplos. Se o tamanho das gotas é conhecido e também a sua velocidade terminal então é possível calcular o momentum da chuva caindo ou sua energia cinética pela soma dos valores individuais para cada gota d'água.

Alguns estudos indicam que a taxa de destacamento de partículas de solo está muito mais associada ao momentum que a energia. Entretanto tem sido visto que para chuvas naturais, as relações entre intensidade e momentum ou energia são similares.

O cálculo indireto da energia das chuvas proporcionou melhores resultados do que tentativas de medida direta do momentum das chuvas, pois as forças envolvidas são tão pequenas que alguns instrumentos não são suficientemente sensíveis para se fazer o registro da energia das chuvas diretamente. Sensores acústicos (ruído das chuvas obtido por um microfone e transformado em um sinal que pode ser medido) e piezoelétricos (mudanças de pressão sobre um cristal de quartzo gerando um sinal elétrico) e transdutores de pressão (registro da pressão do impacto das gotas d'água sobre um meio elástico) são algumas das

metodologias mais recentes para aplicação nestes casos, todos com vantagens e desvantagens.

Alguns dos primeiros resultados obtidos e conduzidos em vários países são mostrados na figura 3.9. Estes resultados, entretanto, apresentam poucas medidas em altas intensidades e também foram feitas por diferentes pesquisadores, não podendo ser identificado se as variações identificadas são devido às diferentes técnicas e qual a real diferença entre as chuvas nos vários países. Resultados de alguns destes estudos são apresentados na forma de equações matemáticas relacionado basicamente intensidade de chuva e energia cinética. Pesquisas sobre esta matéria estão sendo estimuladas pelo conhecimento que se tem da forte relação entre energia ou momentum e o poder de provocar erosão.

Equações relacionando energia cinética e intensidade de chuvas:

$E = 916 + 331 \log I$, sendo E = energia das chuvas em pé.ton/acre.polegadas e I = intensidade de chuva em pol/h;

$E = 210 + 89 \log I$, sendo E = energia das chuvas em ton.m/ha.cm e I = intensidade de chuva em cm/h;

$E = 11,9 + 8,7 \log I$, sendo E = energia das chuvas em $J/m^2.mm$ e I = intensidade de chuva em mm/h;

$E = 29,22 (1 - 0,894e^{-0,004771I})$, sendo E = energia das chuvas em $J/m^2.mm$ e I = intensidade de chuva em mm/h;

$E = 30 - 125/I$, sendo E = energia das chuvas em $J/m^2.mm$ e I = intensidade de chuva em mm/h;

$E = 9,81 + 11,25 \log I$, sendo E = energia das chuvas em $J/m^2.mm$ e I = intensidade de chuva em mm/h;

13. Impacto da gota d'água e escoamento superficial

A erosão do solo é um processo de trabalho e envolve o gasto de energia em todas as fases da erosão pelas chuvas, tais como a quebra e o salpicamento de agregados no ar, o aumento da turbulência das enxurradas e no transporte e carreamento (**scouring and carrying away soil particles**) de partículas de solo (Fig4.1.).

O impacto das gotas de d'água é vital para o processo erosivo e sua importância pode ser confirmada através da comparação da energia cinética disponível em uma chuva caindo e a existente nas enxurradas (quadro 4.1). **Observa-se que as quantidades de energia envolvidas em um e outro são muito grandes, sendo que a energia das chuvas é cerca de 256 vezes maior que a energia envolvida no escoamento superficial.**

Na prática os efeitos do impacto da gota d'água foi facilmente demonstrada no passado. Utilizaram duas parcelas (1,5 m x 27,5 m), sendo uma com a superfície do solo recoberta a certa altura por tela plástica com pequeno diâmetro de abertura, o suficiente para subdividir as gotas d'água em outras menores, atenuando a velocidade de queda,

enquanto a outra parcela não o foi. Observou-se que a perda de solo na parcela coberta não foi eliminada, mas reduzida a 1/100 da perda de solo observada na parcela desprotegida.

Quadro. Energia cinética ($EC = \frac{1}{2} \times m \times (V)^2$) das chuvas e o escoamento superficial

Variáveis	Chuvas	Escoamento superficial
Massa	Massa da chuva caindo = R	Massa do escoamento superficial = R/4
Velocidade	Velocidade terminal = 8m/s	Velocidade do escoamento na superfície = 1 m/s
Energia cinética	$\frac{1}{2} \times R \times (8)^2 = 32R$	$\frac{1}{2} \times R/8 \times (1)^2 = R/8$

O selamento da superfície do solo é outra consequência do impacto da gota d'água, reduzindo a velocidade de infiltração no solo, o que favorece o aumento do escoamento superficial. O aumento da turbulência nas enxurradas formadas pelo escoamento superficial, aumenta bastante capacidade de destacamento e carreamento de partículas do solo.

14. Estimativa da erosividade das chuvas

Vários estudos foram desenvolvidos no mundo buscando identificar a melhor associação entre as características das chuvas naturais e a quantidade de perda de solo, ou seja a erosividade das chuvas.

O melhor método para estimar a perda de solo é composto pelo produto da energia cinética de uma chuva nos 30 minutos consecutivos de sua duração total e que correspondam à maior intensidade de chuva. A intensidade de chuva é obtida a partir de registros de pluviógrafos, considerando-se o período de 30 minutos de maior intensidade e a quantidade de chuva ocorrida. **Obtem a intensidade máxima (mm/h) neste período (30 minutos) pela duplicação da quantidade de água encontrada (Figura 4.3).**

Esta proposta surgiu de um trabalho coordenado pelo Laboratório de Processamento de Dados de Pesquisa de Erosão, pertencente à Universidade de Purdue, envolvendo estações experimentais localizadas em todo o território americano. No total foram manipulados 8.250 gráficos anuais de chuva.

Figura .3. Método de obtenção da intensidade máxima em 30 minutos consecutivos de chuva. O período com maior quantidade de chuva, R, é encontrado de um registro de pluviógrafo. Duas vezes esta quantidade é a intensidade máxima nos 30 minutos.

Os autores que desenvolveram este método encontraram que as correlações podem ser melhoradas com a adição de outras informações, tais como: umidade do solo no início das chuvas, por exemplo. Porém, a acuracidade das estimativas não melhorou tanto, ressaltando o uso somente desta relação.

A medida da erosividade descrita é denominada de Índice IE. Esta medida pode ser computada para uma única chuva ou, então, de várias, propiciando valores de erosividade semanais, mensais ou anuais. Este índice apresenta restrições quanto a aplicação em estimativas de curto prazo, com elevadas variações (50% a 200%), sendo mais adequado para aplicações de longo prazo.

Tentativas de aplicação deste índice às condições de chuvas tropicais levaram a valores superestimados, porém, readequados com revisões vindas posteriormente. Vários estudos relacionados a aplicação do índice IE nos trópicos demonstram a pouca efetividade de aplicação como uma medida de erosividade das chuvas. Tais estudos expõem o caráter empírico da obtenção deste tipo de dado e a extrapolação para outras condições que aquelas em que foram gerados.

Métodos alternativos têm sido estudados. Um deles considera que as chuvas acima de 25 mm/h são consideradas erosivas, sendo o índice associado denominado de $KE > 25$. Este índice apresenta boas correlações com as perdas de solo e é definido por toda energia cinética da chuva que cai a mais de 25 mm/h. Para as condições temperadas um índice semelhante considera chuvas com intensidade superiores a 10 mm/h.

Na Nigéria foram testados os índices IE_{30} , $KE > 25$ e outros possíveis parâmetros e encontrou a melhor correlação com a perda de solo em pequenas parcelas com um novo índice, muito similar ao EI. Este índice AI_m , onde A é a quantidade de chuva e I_m a máxima intensidade em um período de 7,5 minutos. Como em outros índices, a correlação pode ser melhorada com a adição de outros fatores, como a velocidade dos ventos, o qual aumenta a velocidade de impacto e por sua vez a energia.

Por se tratar de um índice empírico este deve ser tratado com reservas, principalmente com relação a base de dados que lhes deram origem. O IE_{30} foi obtido a partir de uma base de dados de 10.000 parcelas e 22 anos de estudo, enquanto que o, $KE > 25$ originou-se a partir de 2.500 parcelas e 13 anos de informações. Sendo assim a comparação entre quaisquer índices empíricos tem que considerar a base de dados.

Outro erro comum é afirmar que um índice é melhor que outro sem uma comparação própria. Vários estudos ignoram o fato de que altos coeficientes de correlação podem gerar diferenças insignificantes.

Os cálculos de EI e $KE > 25$ são apresentados no exemplo abaixo utilizando dados de um pluviógrafo:

Tempo (min)	Quantidade (mm)	Intensidade (mm/h)	Energia ($J/m^2/mm$)	Total
0-5	0			
5-10	10	120		
10-15	15	180		
15-20	15	180		
20-25	18	216		

25-30	15	180
30-35	20	240
35-40	20	240
40-45	25	300
45-50	15	180
50-55	10	120
55-60	5	60

15. Aplicações de um índice de erosividade

A habilidade de avaliar numericamente o poder erosivo das chuvas têm duas aplicações principais: a definição de práticas conservacionistas e a pesquisa para ajudar a melhorar o conhecimento e o entendimento a respeito da erosão.

No primeiro caso, o conhecimento da erosividade das chuvas em determinada área pode auxiliar na definição de quais práticas de conservação do solo a serem adotadas, permitindo também um dimensionamento mais adequado destas. Diferentes características de chuva nos vários ambientes de um país irão condicionar valores de erosividade também distintos, pois as chuvas predominantes nesta região são típicas e diferenciadas de outra região.

Mapas de erosividade de chuvas podem ser confeccionados, permitindo, assim, uma melhor preditividade da erosão do solo e a definição da aplicação ou não de uma ou outra prática. A eficiência da aplicação destes índices torna-se maior a medida que são mais detalhados, ou seja, se se tem índices para as várias épocas do ano, ou mesmo mensais, pode-se estabelecer critérios muito mais discriminatórios para a aplicação das práticas conservacionistas.

A implantação de determinada prática conservacionista que requer o estabelecimento prévio de uma cobertura vegetal protetora, a qual necessita de certa umidade de solo, como os canais escoadouros nos sistemas de terraceamento, pode ser melhor definida ao se conhecer a erosividade das primeiras chuvas. O estabelecimento da cobertura vegetal deve ocorrer nas condições de menor erosividade, pois estas chuvas vão propiciar a umidade necessária para o desenvolvimento de plantas e não necessariamente deverão provocar erosão.

A pesquisa da erosão do solo utiliza tanto chuvas naturais quanto simuladas. Índices de erosividade são essenciais, pois permitem a distinção criteriosa do teste de diferentes práticas ou táticas de manejo ao longo dos anos, uma vez que certamente se têm variações quanto às chuvas de um ano para o outro. Quando se utilizam estes índices, pode-se avaliar se a erosão de uma determinada prática em relação a outras é devida à mesma ou às diferenças entre chuvas nos anos de estudo. O mesmo pode ser aplicado a uma estação de cultivo. O início ou fim desta estação pode levar a perdas de solo diferenciadas dependendo das características das chuvas predominantes no início ou fim da mesma.

16. O poder erosivo das chuvas tropicais

Os índices de erosividade podem explicar as diferenças entre o poder mais erosivo das chuvas nos trópicos comparados às de clima temperado. A diferença vital é que 95%

das chuvas que caem nas regiões de clima temperado não são erosivas, enquanto que nos trópicos 40% das chuvas que caem com intensidade > 25 mm/h são erosivas, ou seja, 60% destas chuvas contribuem para a erosão.

Outros dois fatores que caracterizam esse maior poder erosivo nas chuvas nos trópicos são a maior quantidade de chuvas e da intensidade média das chuvas distribuídas nos trópicos, em torno de 1.500 mm ou 60 mm/h, quando comparado a 750 mm e 35 mm/h das regiões de clima temperado, respectivamente. O poder erosivo das chuvas tropicais é 16 vezes maior que as de clima temperado.

Os valores de erosividade anual podem ser equivalentes a 900 J/m^2 {(5% de 750 mm/ano X $24 \text{ J/m}^2/\text{mm}$ (índice de erosividade das chuvas temperadas))} e 14.400 J/m^2 {(40% de 1.500 mm/ano X $28 \text{ J/m}^2/\text{mm}$ (índice de erosividade das chuvas tropicais))}, respectivamente para as chuvas das regiões temperadas e tropicais. Este simples cálculo torna evidente o poder erosivo das chuvas tropicais.

Chuvas

17. Erodibilidade do solo

Como já definido, a erodibilidade do solo é a sua vulnerabilidade ou susceptibilidade a erosão, sendo a sua recíproca resistência. Enquanto a erosividade pode ser avaliada diretamente através de propriedades físicas das chuvas, a erodibilidade é mais complicada, pois depende de uma série de variáveis. De forma mais ampla a erodibilidade do solo pode ser aplicada a todas as demais variáveis envolvidas na perda de solo, exceto a erosividade das chuvas. É também utilizada mais especificamente como uma medida única da do efeito das características/propriedades do solo, sendo os fatores associados ao manejo do solo e da cultura avaliados separadamente.

Três grandes grupos de fatores afetam a erodibilidade do solo: as características/propriedades físicas e químicas do solo, as características associadas associadas a topografia e o manejo da terra.

As características/propriedades do solo que influenciam a erodibilidade do solo são as que afetam a velocidade de infiltração de água do solo, a permeabilidade e a capacidade de absorção da água e aquelas que resistem à dispersão, ao salpicamento, à abrasão e às forças de transporte de chuva e enxurrada. A infiltração é o movimento da água dentro da superfície do solo. Quanto maior sua velocidade, menor a intensidade de enxurrada na superfície, reduzindo, conseqüentemente, a erosão.

Durante uma chuva, a velocidade máxima de infiltração ocorre no começo, e usualmente decresce muito rapidamente, de acordo com alterações na estrutura da superfície do solo. Se a chuva continua, a velocidade de infiltração gradualmente aproxima de um valor mínimo, determinado pela velocidade com que a água pode entrar na camada superficial e pela velocidade com que ela pode penetrar através do perfil do solo.

Por muitos anos os cientistas de solo têm tentado relacionar vulnerabilidade do solo a características/propriedades do solo e que possam ser medidas em laboratório ou no campo. As primeiras tentativas relacionam as perdas de desolo com a textura, suas variações de composição e as mudanças no perfil, sendo que alguns autores propuseram índices de erodibilidade a partir das classes granulométricas principais. o grau de agregação, quantificado por diferentes metodologias, é considerado um bom indicador da

erodibilidade. A avaliação da estabilidade de agregados (solos bem agregados, poros maiores, maior infiltração) pode ser feita através do peneiramento úmido e agitação (com certa tendência a subestimar), utilizando-se como referência a porcentagem de agregados estáveis ou instáveis em água ou determinada classe de diâmetro de agregados. Outra forma considerada na literatura é a resistência ao impacto das gotas d'água, sendo considerado, por alguns autores, como o melhor indicador, permitindo também a avaliação do efeito do selamento do solo por partículas finas. A literatura relata que alguns autores, avaliando diversas metodologias, que a estimativa da erodibilidade do solo não é afetada pelo uso de parâmetros fáceis e simples de serem medidos, sendo considerados como os mais importantes a porcentagem de agregados instáveis e a porção das partículas em suspensão (basicamente a quantidade de argila dispersa em água). É relatado também que em alguma extensão, a erodibilidade é dependente da do material de origem.

Como rotineiramente a estabilidade de agregados não é facilmente medida, alternativas de estimativa da erodibilidade a partir de parâmetros que tenham um efeito similar. Já foram propostas, entre as medidas a serem utilizadas, a percolação e a infiltração, incluindo ou não os teores de matéria orgânica, a estrutura, a permeabilidade. Estas propostas foram transcodificadas em nomógrafos como os apresentados na **figura**

Estudos de laboratório tentam simular as condições reais do processo erosivo, submetendo amostras de solo a ação de gotas de chuva, utilizando desde uma simples bureta até simuladores de chuva sofisticados. Neste último caso, observou-se que pequenas variações nos desenhos de simuladores são perceptíveis quando estes solos possuem altos conteúdos de areia ou agregação fraca, sendo que para os demais tipos de solos, estes testes de laboratório tendem a ser válidos. Estes estudos indicam também que estas observações tendem a ser mais reais a medida que um maior número de solos são avaliados e há uma tendência de confirmação da agregação do solo na estimativa da erodibilidade do solo, com uma preferência para a porcentagem de agregados estáveis em água para as classes de diâmetro acima de 0,5 mm.

Avaliações da erodibilidade do solo em condições de campo são conduzidos sob chuvas naturais ou com o uso de simuladores. Poucos estudos tem sido relatados em função das dificuldades de instalação e condução no campo, além das dificuldades de se eliminar as variações provocadas pelas características de chuva de diferentes lugares. No entanto, o uso de simuladores de chuva viabilizou a condução de estudos visando a estimativa, tornando-se uma poderosa ferramenta. A extrapolação de estimativas de uma região para outra é sempre limitante em função das variações de solo existentes, bem como o uso de medidas fáceis de serem obtidas e o seu uso de forma indireta para tal, ainda mais quando estes métodos foram desenvolvidos em condições distintas da situação de aplicação, como são os casos das regiões temperadas e tropicais. Mesmo assim, os métodos indiretos vão ser sempre a segunda melhor estimativa em relação às medidas diretas de erodibilidade do solo.

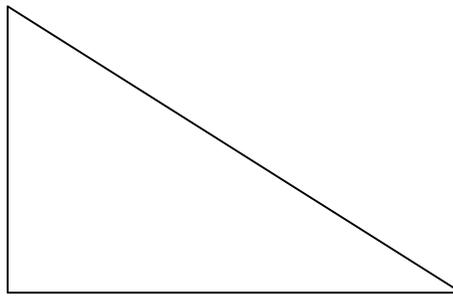
Em alguns modelos de estimativa da perda de solo, a erodibilidade do solo tem sido considerada como um único fator. Entretanto é simplesmente uma aproximação e existem duas razões para isto. A erodibilidade varia com os diferentes processos de erosão do solo, podem estar interagindo com a erosividade, além de variar com o tempo e com as práticas de manejo do solo e da cultura.

Há uma mudança sazonal da erodibilidade a semelhança das variações de temperatura e umidade do solo. A erodibilidade do solo pode ser maior quando o solo é cultivado, uma vez que agregados são fragmentados pelo cultivo e a conseqüente redução dos teores de matéria orgânica do solo. De forma semelhante, mas em sentido contrário, práticas que favoreçam o aporte de matéria orgânica irão levar a redução da erodibilidade.

18. Topografia

É obvio que as terras de relevo irregular são mais vulneráveis a erosão hídrica, uma vez que o salpico, o escoamento superficial e o transporte, todos têm seus efeitos acentuados em declividades acentuadas. A maior ou menor declividade altera o movimento no sentido do declive, sendo sugerida a seguinte expressão: salpico no sentido do declive como uma % do salpico total = $50 + \text{declividade (\%)}$. O poder erosivo das enxurradas superficiais é sempre maior em declividades acentuadas (Figura 5.2)

No entanto, a influência da topografia na erosão do solo depende do efeito integrado da declividade e do comprimento do declive, sendo diretamente proporcionais a estes fatores. E isto pode ser demonstrado fisicamente, associando-se o movimento da enxurrada ao de um corpo em plano inclinado (Figura 1):



Num corpo (enxurrada) inclinado atuam duas forças: o seu peso P e a reação normal do plano N . Como essas duas forças não atuam na mesma direção, elas não se equilibram, admitindo uma resultante que, na ausência de atrito, faz com que o bloco desça o plano com aceleração constante a .

Para determinar esta aceleração é necessário conhecer a força resultante que atua neste corpo. Decompõe-se, para isso o peso P em dois componentes, um perpendicular ao plano (P_y) e outro paralelo (P_x). Substituindo o peso P por seus componentes, pode-se verificar que P_y e N se equilibram, pois N é a reação normal ao plano a esse componente do peso. Logo a força resultante que atua sobre o bloco é P_x . Veja a Figura 2.

Analisando a Figura 3 abaixo:

Têm-se:

$$P_y = N$$

$$\text{Sen } \alpha = P_x/P \implies P_x = P \cdot \text{Sen } \alpha; e$$

$$\text{Cos } \alpha = P_y/P \implies P_y = P \cdot \text{Cos } \alpha.$$

Aplicando-se a segunda lei de Newton em módulo e considerando que P_x é a força resultante responsável pelo movimento que atua sobre o corpo, têm-se que:

$$F_R = m \cdot a, \text{ sendo } F_R = P_x$$

$$P_x = P \cdot \text{sen } \alpha; e$$

$$m \cdot a = P \cdot \text{sen } \alpha$$

$$P = m \cdot g$$

$$\cancel{m} \cdot a = \cancel{m} \cdot g \cdot \text{sen } \alpha$$

$$a = g \cdot \text{sen } \alpha.$$

Essa é a expressão da aceleração adquirida por um corpo (enxurrada) que desliza, sem atrito, sobre um plano inclinado com ângulo α em relação ao horizontal. Assim, quanto maior o ângulo α , maior a aceleração deste corpo.

Sendo assim, quanto maior a declividade, maior a aceleração no movimento do corpo e, conseqüentemente, maior a velocidade deste corpo, uma vez que:

$$V_f^2 = V_i^2 \pm 2 a \cdot S$$

Considerando:

$$E_c = MV^2/2$$

Quanto maior a velocidade maior a energia cinética deste corpo, conseqüentemente quanto maior o poder erosivo da enxurrada (o corpo em movimento num plano inclinado). Além disso, considerando as equações anteriores, quanto maior o espaço a ser percorrido pelo corpo maior a velocidade deste corpo, considerando os demais fatores constantes. Sendo assim, quanto maior o comprimento dos declives, maior tende a ser a distância a ser percorrida pela enxurrada e o seu poder erosivo, bem como existem condições para o aumento do volume da enxurrada, sua massa e sua velocidade, conseqüentemente.

19. Manejo do solo

As variações na perda de solo provocada pelos diferentes tipos de manejo num mesmo solo são muito maiores que a erosão em diferentes solos com um mesmo tipo de

manejo. É comprovado que a erosão é muito mais influenciada pelo manejo que por outro fator, incluindo uma detalhada discussão relativa ao manejo do solo e da cultura.

O melhor manejo pode ser definido como o mais intensivo e produtivo uso pelo qual a terra é capaz de produzir sem causar erosão, ou seja, o uso em acordo com a sua aptidão. Para a identificação desta aptidão existem ferramentas já vistas nesta disciplina e incluem os sistemas de Capacidade de Uso das Terras e o FAO/Brasileiro.

20. Manejo da cultura

Semelhante ao item anterior, a erosão é grandemente afetada pelos diferentes tipos de uso do solo. No entanto um uso particular pode ter também grandes variações na quantidade de perda de solo dependendo do conhecimento detalhado dos cultivos. E mesmo para uma mesma cultura, porém quando não manejado racionalmente pode provocar erosão de forma acentuada sendo função, porém, da efetiva cobertura vegetal proporcionada ao solo.

A cobertura vegetal atua na redução do processo erosivo por meio dos seguintes mecanismos: proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo; decomposição das raízes das plantas, formando canalículos, aumentando a infiltração da água; melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica, aumentando a capacidade de retenção de água; e diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície. Mesmo culturas com tendência de exposição da superfície do solo, como por exemplo, a mamona e o algodão, se manejadas adequadamente poderão proporcionar uma efetiva minimização das perdas de solo.

A vegetação é importante também na erosão eólica pela redução da velocidade do vento na superfície do solo e absorção da maior parte da força exercida sobre o solo. O efeito da cobertura vegetal vai depender do tipo, estágio de desenvolvimento e produtividade.

21. Necessidade de medidas de controle da erosão

A análise dos fatores que influenciam no processo erosivo considerando o uso agrícola, analisando pelos aspectos relativos a erosividade das chuvas e a erodibilidade do solo leva a discussão de como a erosão pode ser controlada. No primeiro caso, o poder erosivo das chuvas está fora do controle, restando atuar em fatores que podem ser modificados por uma intervenção técnica. As propriedades intrínsecas do solo que o caracterizam ser mais ou menos susceptível a ação do processo erosivo também apresentam caráter limitado de ação, restando, em maior extensão o uso do solo e o manejo a ser dado às culturas existentes em sua superfície, as quais estão mais efetivamente sobre o controle humano. Tal quadro leva a discussão de quais seriam as práticas ou alterações no manejo do solo e da cultura que levam a menores perdas de solo e água. Este será assunto de aula prática.

22. Estimativa do escoamento superficial

10. Bibliografia

HUDSON, N. Soil conservation. Ames, Iowa State University Press, 1995. 391p.

GALINDO, I.C. & MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do estado de Pernambuco. R. Brás.Ci. Solo, 13:95-100.1989.