

# **SOLOS, EROSÃO E METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE: UMA REVISÃO**

Bruno Ribeiro Rocha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro civil. Mestrando Profissional em Engenharia Hídrica. Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI – MG). E-mail: ribeiro.rocha.bruno@hotmail.com

## **RESUMO**

Apesar de fazer parte dos processos de formação do solo e de diversos outros processos naturais, a erosão pode ser danosa se ocorrer em ritmo elevado. A ação humana acelera a erosão ao influenciar direta e indiretamente nos seus diversos agentes. Dentre os desencadeadores da erosão, encontra-se o fator de erodibilidade do solo, definido como sua capacidade de ser erodido. Para avaliar esta característica, existem diversos métodos diretos e indiretos. Este trabalho busca apresentar um panorama sobre alguns destes métodos, assim como algumas vantagens e desvantagens dos mesmos.

Palavras chave: pedologia; erosão; erodibilidade do solo.

## **SOIL, EROSION AND METHODOLOGIES FOR ERODIBILITY EVALUATION: A REVIEW**

### **ABSTRACT**

Even though erosion is part of the soil formation process, it can be harmful if in high pace. Human action on the environment modify the speed of erosion through direct and indirect actions that affect erosion agents. One of the triggers of erosion is the soil erodibility factor, defined by its inclination to be eroded. There are many direct and indirect ways to evaluate this characteristic. This article focuses on presenting an outlook about some of these methods, as well as exposing some of their advantages and drawbacks.

Key words: pedology; erosion; soil erodibility.

## **1. HISTÓRIA DA PEDOLOGIA**

A Pedologia é um dos ramos da Ciência dos Solos, e trata de estudar a origem, morfologia, mapeamento e classificação do solo em seu habitat. (JOFFE, 1936<sup>1</sup>, apud BOCKHEIM, 2005)

No início dos primeiros grupos humanos, o solo fornecia argila para produção de objetos de cerâmica e pigmentos para pinturas, assim como alimento, recolhido de animais e plantas que nele cresciam e floresciam. A fixação destes grupos em determinados locais, a partir do século X AC, permitiu um maior contato e um crescente conhecimento sobre solo, clima e água, já que sua qualidade influenciava diretamente no crescimento dos recursos e da população do grupo. (LEPSCH, 2011)

A partir deste conhecimento, grandes civilizações puderam se desenvolver em locais com boa fertilidade do solo, como os egípcios ao longo do delta do rio Nilo e os indianos ao longo dos rios Indo e Ganges. Entretanto, graças ao período conhecido como Idade Média (séculos V DC ao XV DC), este de grande ênfase em costumes religiosos e muito difícil para o avanço das ciências, muito pouco deste conhecimento foi herdado ou aproveitado. (LEPSCH, 2011)

Já no século XVII, o químico alemão Justus von Liebig apresentou o primeiro esboço sobre a real importância do solo no desenvolvimento das plantas, onde até então se atribuía à água todo o “poder de criação”. Suas teorias, hoje conhecidas como Lei do Mínimo, afirmavam a necessidade de determinados nutrientes minerais em quantidade adequada para o desenvolvimento da vegetação, estabelecendo a base para o uso de fertilizantes minerais. (LEPSCH, 2011)

Enquanto os cientistas europeus analisavam o solo em frascos de laboratório, um naturalista russo de nome Vasily Dokuchaev o fazia em campo. Através de estudos realizados em estepes da Ucrânia e na taiga da região de Gorki, ele pode concluir a importância das diferenças climáticas na formação do solo, apresentando primeira classificação dos mesmos no ano de 1886. (LEPSCH, 2011 e SCHAEFER et al., 1997)

Em seu habitat natural os russos estudaram o solo e suas camadas, denominadas pelos mesmos como horizontes, terminologia utilizada até os dias atuais. São, por definição,

---

<sup>1</sup> JOFFE, JS. *Pedology*. Rutgers University Press. 1936.

porções de solo relativamente horizontais que se distinguem nas suas propriedades morfológicas, químicas e físicas, sendo possível interpretar o desenvolvimento do solo no tempo através deles. Assim se deu o início do que hoje conhecemos como Pedologia. (BOCKHEIM et al., 2005 e SCHAEFER et al., 1997)

Por fim, os primeiros encontros internacionais entre cientistas do solo se iniciaram em 1927, com o primeiro Congresso Internacional de Ciência do Solo sendo realizado em Washington, nos EUA. Esse evento foi um marco na história do estudo dos solos graças a troca de informações e experiências entre diversos estudiosos de diversos continentes, dentre eles russos e americanos. (LEPSCH, 2011)

## **2. FORMAÇÃO DO SOLO**

O solo pode ser definido como o material desprendido que cobre a superfície terrestre, variando em espessura, composição, porosidade, densidade, massa específica e outras diversas características físicas. Sobre o solo crescem a fauna e a flora, e se desenvolvem as civilizações. (MOREIRA et al., 2013)

Existem quatro principais ações de processos que podem ocorrer nos solos, sendo eles: adições, transformações, translocações e remoções. As adições são todo e qualquer material vindo de outro corpo que não seja o solo em si, comumente representado pela adição de carbono com a decomposição de folha e raízes. As transformações são alterações químicas e/ou físicas dos componentes do solo, gerando novos componentes e até mesmo extinguindo os predecessores. As remoções, por sua vez, envolvem a movimentação, podendo ocorrer na superfície através de processos erosivos, por exemplo, ou no interior do solo, através da percolação da água. Por fim, as translocações também são movimentações, porém de menor distância, ocorrendo no interior do solo e gerando diferenciações nos horizontes do mesmo. Movimentos de percolação que ocorram dentro do interior do solo também são fontes de translocações, por exemplo, ao gerar a migração de elementos dissolvidos na água. (LEPSCH, 2011)

O solo é gerado pelo desgaste das rochas ao longo do tempo, onde quatro principais fatores se mostram responsáveis: o clima (chuva e calor), os organismos vivos (plantas e animais), os tipos de rochas matrizes (mais ou menos resistentes) e o relevo (declividade do terreno). (SERRAT et al., 2002)

Dentre eles destaca-se o fator clima, responsável pela maior ou menor degradação da rocha matriz e pela grande diferenciação entre os solos, mesmo quando gerados a partir de rochas semelhantes. Além disso, o clima influi diretamente na presença dos organismos, composto por plantas e animais, considerada a segunda maior fonte de diferenciação. (LEPSCH, 2011)

O material de origem tem grande influência sobre o desenvolvimento dos solos, uma vez que sob semelhantes condições climáticas, de relevo, tempo e com a presença de organismos semelhantes, os mesmos podem diferir uns dos outros. Isso ocorre graças a rocha matriz geradora, que varia de local para local. O relevo influencia diretamente na formação dos solos, uma vez que a quantidade de água presente, o escoamento e até mesmo a quantidade de luz solar geram comportamentos e exposições diferentes, alterando a influência dos diversos outros fatores presentes. O tempo, por fim, em escala de dezenas a milhares de anos, influencia principalmente na espessura dos solos. Um estudo realizado em um forte abandonado em 1699 na Ucrânia estimou, dada as condições climáticas do local, um crescimento médio de 12cm de solo para cada século de intemperismo. (LEPSCH, 2011)

Os solos brasileiros, de forma geral, são considerados poligenéticos, ou seja, originários do retrabalho de solos já existentes no local. Isso ocorre geralmente através de diversos processos de erosão e depósitos. (LEPSCH, 2011)

### **3. O PROCESSO DE EROSÃO**

A erosão do solo é um fator considerado natural, mas que vem sendo acelerado por influência antrópica como o cultivo e pastoreio, resultando em uma alteração despreocupada, principalmente devido a vasta extensão de terras que geram uma sensação de menor urgência na recuperação do mesmo. (LEPSCH, 2010)

A erosão pode ser classificada como geológica ou antrópica. A primeira é considerada um processo lento, de suavização do solo, enquanto o segundo é acelerado e gerado pela interferência do homem. Em ambos os casos, o solo é desagregado, transportado e depositado em local diferente do original. A erosão antrópica, no entanto, é extremamente prejudicial se ocorrer em um período curto de tempo. (SILVA, 1995)

Dentre os possíveis agentes causadores da erosão, é possível citar o vento, a temperatura, a ação biológica e a água, sendo este último o mais representativo dos quatro, dando nome a chamada erosão hídrica. (SILVA, 1995)

A erosão hídrica pode ser dividida em três etapas: o processo de desagregação, o de transporte e a deposição. O primeiro ocorre principalmente em função das gotas da chuva ao encontrar o solo, gerando uma dissipação de energia que desagrega as partículas do mesmo. Em seguida, caso a capacidade de absorção seja menor do que a quantidade de chuva, ocorre o carregamento destas partículas pelo escoamento superficial. Por último, ocorre a deposição destes grãos em locais mais baixos, como rios e lagos. (BASTOS et al., 2001)

Por fim, a erosão hídrica pode se apresentar em diferentes níveis de degradação. Inicialmente, ocorre a erosão laminar ou superficial, onde uma fina cama do solo é removida e carregada pela água. Com a continuidade do processo, é possível notar a presença de sulcos que se ampliam culminando na formação de voçorocas, caso a erosão não seja controlada. (MENDES, 2006)

A erosão acarreta em uma perda de toneladas de sedimentos por ano, reduzindo a fertilidade do solo e a produtividade agrícola, assim como assoreando rios e lagos. Ela constitui, portanto, o principal impacto negativo gerado pelo uso inadequado do solo. (DEMARCHI et al., 2014)

Foi estimado que no ano de 2001 cerca de 1 bilhão de toneladas de material de solo foram erodidos, uma perda gerada em sua maioria pelo transporte eólico e pluvial, das áreas mais altas para as mais baixas, como fundos de rios e lagos. (LEPSCH, 2010)

A erosão, por si só, é um agente muito complexo. Ela envolve interações diretas e indiretas de diversos fatores, como características geológicas e geomorfológicas do solo, os tipos de solos, o clima, a vegetação de cobertura e as ações do homem, esta última interferindo diretamente nas condições naturais de cada um dos outros fatores. (ARAÚJO et al., 2013)

#### **4. METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DA ERODIBILIDADE DO SOLO**

Por definição, a erodibilidade é a menor ou maior inclinação com que as partículas do solo se desprendem e são transportadas por agentes erosivos, como a água e o vento. Ela

é um dos fatores mais significativos no estudo da erosão, e é diferente para cada solo. Diversos autores apontam o tamanho dos grãos como um dos fatores mais relevantes para a ocorrência dos efeitos da erosão. (COUTO, 2015)

Erosividade, diferentemente da erodibilidade, está relacionada diretamente ao agente erosivo, e é a capacidade do mesmo em desagregar e transportar os grãos do solo. No caso da chuva, esta é uma relação entre sua intensidade e duração. Uma chuva mais longa e com baixa intensidade pode conter o mesmo poder erosivo de uma chuva forte e com menor duração. (WISCHMEIER et al., 1978)

Existem descritos na literatura diversos métodos para compreender e avaliar o processo de erosão, sejam eles modelos determinísticos, probabilísticos ou qualitativos, ou ensaios laboratoriais. (LEMOS et al., 2007)

Os métodos de avaliação da erosão podem ser divididos em dois tipos. Os que executam análises obtendo diretamente a característica desejada – neste caso, o fator erodibilidade – são chamados de métodos diretos. As que utilizam o solo a ser analisado para, através de outros ensaios e características, obter o fator erodibilidade, são chamadas de análises indiretas.

## **4.1. ENSAIOS DIRETOS**

### **4.1.1. INDERBITZEN**

A concepção original do aparelho de Inderbitzen, também conhecido como Erosômetro, foi apresentada em 1961 pelo pesquisador de mesmo nome. Basicamente, o aparelho consistia de uma rampa metálica de 76,20cm de comprimento com inclinação ajustável onde, em sua parcela inferior final, possuía um orifício circular de 15,24cm de diâmetro para fixação da amostra de solo indeformada. A simulação do fluxo de água era feita por recipientes com líquido, mantidos em nível constante, que desembocava em um cano metálico na parcela superior inicial da rampa. Uma ilustração da rampa pode ser observada na figura 1. (INDERBITZEN, 1961<sup>2</sup>, apud LEMOS, 2002)

---

<sup>2</sup> INDERBITZEN, AL. An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*, vol. 1, n° 7, p. 553 – 554. 1961.

Com a fixação da superfície do corpo de prova coincidindo com o plano da rampa metálica, o ensaio permite simular o escoamento superficial gerado pela chuva sobre o solo. Além disso, graças a inclinação variável, é possível simular diversas inclinações de taludes, assim como a vazão do fluxo de água. Características do solo também podem ser modificadas, como umidade e compactação. (LEMOS, 2002)

O material erodido e carregado pelo fluxo de água é coletado por peneiras ao fim da rampa, em tempos pré-determinados, e levado à estufa ao fim do ensaio para secagem. Com as massas secas acumuladas obtidas nos respectivos tempos de coleta, a medida de erosão é calculada através da equação 1. Através dela, é possível analisar a erodibilidade do solo e compará-lo com outros ensaios de diferentes tipos de solo. (SILVA, 2016)

$$E = \frac{P_s}{A} \quad (1)$$

Onde:

E é a medida da erosão, em g/cm<sup>2</sup>

P<sub>s</sub> é a massa do solo seco, em g

A é a área superficial do corpo de prova, em cm<sup>2</sup>

O estudo de Inderbitzen foi de grande relevância para a análise da susceptibilidade dos solos à erosão no mundo e de grande valor para pesquisadores brasileiros, visto que a elevada pluviosidade torna recorrente o fenômeno nos solos no país. (SILVA, 2016)

A primeira utilização do ensaio de Inderbitzen no Brasil ocorreu entre os anos de 1975 a 1978, na pesquisa “Estabilidade de Taludes” pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias, em conjunto com a COPPE/UFRJ e TRAFECON, com o intuito de avaliar a erodibilidade dos solos. Foram executados ensaios em taludes da Via Dutra com diferentes teores de umidade e inclinação da rampa, com ensaios de duração de 5 minutos. (BASTOS, 1999)

Entretanto, os resultados deveriam ser considerados apenas uma estimativa do efeito da chuva sobre o solo testado, tendo em vista a imprecisão do ensaio. Da mesma forma, é recomendada a simulação de chuva sobre o corpo de prova com o uso de um irrigador tipo chuveiro. (INDERBITZEN, 1961<sup>3</sup>, apud LEMOS, 2002)

---

<sup>3</sup> INDERBITZEN, AL. An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*, vol. 1, n° 7, p. 553 – 554. 1961.

Por ser um método de fácil implementação, dada sua simplicidade e baixo custo, é um dos métodos com mais estudos realizados e com grande utilização no meio geotécnico. (BATOS, 1999, e TOMASI, 2015)

#### **4.1.2. INDERBITZEN ADAPTADO**

Graças a possibilidade de variação de diversos fatores envolvidos no ensaio, tanto do estado do solo como da configuração da rampa, e com o objetivo de ampliar o campo de pesquisa e adaptar o método as suas necessidades, diversos pesquisadores realizaram modificações no aparelho inicialmente apresentado por Inderbitzen em 1961. (SILVA, 2016)

Além da modificação do equipamento, o primeiro autor a propor uma padronização do ensaio foi Fácio (1991), sugerindo a fixação da vazão em 50ml/s, com declividade de 10° e tempo de ensaio de 20 minutos, além de outras sugestões. O equipamento foi refeito com três rampas paralelas para ensaios simultâneos, bacia de uniformização de fluxo e fixação roscável para as amostras, agora com 10cm de diâmetro. A rampa também foi reduzida para 33cm de largura e alongada 130cm de comprimento. A figura 2 ilustra o equipamento.

Dentre as modificações, destaca-se o método denominado Inderbitzen Adaptado, realizado por Freire (2001)<sup>4</sup> e ilustrado pela figura 3. Nesta nova metodologia, a rampa original foi substituída por uma grelha apoiada sobre uma estrutura tubular, agora com apenas duas possíveis inclinações. Neste modelo, a amostra utilizada não é mais do tipo indeformada e sim prismática não confinada. Ela é colocada sobre a grelha onde é simulado o impacto das gotas de chuva sobre o solo através de um “chuveiramento”, e a vazão é controlada por um manômetro. O material erodido é coletado por um recipiente localizado abaixo da grelha e utilizado posteriormente para pesagem. (SILVA, 2016)

Em estudos com dispositivos similares ao de Freire (2001)<sup>4</sup> o potencial de erodibilidade foi encontrado através da equação 1, utilizando a massa de material erodido coletado pelo equipamento e a área superficial da amostra. (SILVA, 2016)

---

<sup>4</sup> FREIRE, EP. Ensaio de Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia. 2001.



## 4.2. ENSAIOS INDIRETOS

### 4.2.1. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DOS SOLOS (USLE)

Dentre várias equações e modelos que tentam expressar a magnitude do processo erosivo, sobressai a Equação Universal de Perda dos Solos. Nela, a erosão é um produto de variados fatores, expressa pela equação 2. (NASCIMENTO et al., 1999)

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

Onde:

A é a perda de solo por unidade de área, em  $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$

R é a erosividade da chuva, em  $MJ \cdot mm \cdot há^{-1} \cdot h^{-1}$

K é a erodibilidade, em  $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$

L é o comprimento do declive, adimensional

S é o grau do declive, adimensional

C é o uso e manejo do solo, adimensional

P é a prática conservacionista, adimensional

O fator de erosividade da chuva (R) é estabelecida como o produto da intensidade máxima de uma precipitação de 30 minutos ( $I_{30}$ ) e o valor da energia cinética da chuva ( $E_c$ ), sendo esta última a somatória de todos os intervalos da precipitação. A erodibilidade dos solos (K) comumente é avaliada indiretamente através de outras propriedades, uma vez que medições diretas são praticamente inviáveis. O comprimento e grau do declive (LS) comumente são expressos por um único fator topográfico, de acordo com a equação 3. (CARVALHO, 2008<sup>5</sup>, apud COUTO, 2015)

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} (1,36 + 0,97 \cdot S + 0,1385 \cdot S^2) \quad (3)$$

Onde

L é o comprimento do declive, adimensional

S é o grau do declive, adimensional

---

<sup>5</sup> CARVALHO, NO. Hidrossedimentologia prática. Interciência, 2ª Ed, Rio de Janeiro. 2008.

A variável de uso e manejo do solo (C) é a relação do solo erodido entre uma cultura e manejo específicos e do local totalmente descoberto. Em locais sem vegetação, o valor de C se aproxima de 1, enquanto em locais com florestas virgens o valor se aproxima de  $10^{-3}$ . Por fim, a variável ligada a prática conservacionista (P) é a relação entre a perda de solo em um terreno cultivado com determinada prática conservacionista e a perda de solo ao se plantar no sentido do declive, permanecendo as condições padrão de relevo, uso e manejo. (CARVALHO, 2008<sup>6</sup>, apud COUTO, 2015)

Algumas das práticas conservacionistas mais comuns são a rotação de culturas, terraceamento, plantio em faixas de contorno, plantio em curvas de nível, canais escoadouros e cordões de vegetação permanente. (COUTO, 2015)

A Equação Universal de Perda dos Solos foi apresentada em 1954 pelo Serviço de Pesquisa Agrícola, com o maior propósito de guiar metodicamente as decisões no que toca o planejamento em um determinado local. A equação permite ao planejador prever a erosão média do solo para diversas combinações de plantações, técnicas de gerenciamento de solo e práticas de controle, escolhendo a melhor opção entre elas. (WISCHMEIER et al., 1978)

#### **4.2.2. OUTROS MODELOS DE PREDIÇÃO DE EROSÃO HÍDRICA**

Desenvolvida na década de 1990 com base na USLE, sua versão revisada (RUSLE) apresenta variações no cálculo dos coeficientes da equação original, a citar: informatização dos algoritmos; novos valores e correções da erosividade da chuva (R); criação de valores de erodibilidade do solo (K) adaptável às estações do ano; criação de subfatores para cálculo do uso e manejo do solo (C) com base em uso anterior do solo, plantação, cobertura da superfície e rugosidade do solo; novo algoritmo para o cálculo do comprimento (L) e grau (S) do declive e novos valores para a prática conservacionista (P). (RENARD, 1991)

Outro importante modelo de predição de erosão hídrica é chamado de WEPP, ou *Water Erosion Prediction Project* (Projeto de Predição de Erosão Hídrica, em tradução livre), baseado em fundamentos de infiltração e mecânica do solo, hidrologia, hidráulica e previsões de precipitação. Em comparação com outros modelos, como a USLE e RUSLE,

---

<sup>6</sup> CARVALHO, NO. Hidrossedimentologia prática. Interciência, 2ª Ed, Rio de Janeiro. 2008.

o WEPP possui a capacidade de estimar a perda de solo em diferentes escalas de espaço e tempo. Ou seja, é possível analisar tanto um declive completo, quanto uma pequena parcela dele, estimando em uma escala de dias, meses ou anos a quantidade de solo retirado ou depositado. (FLANAGAN, 1995)

Em uma comparação direta utilizando solos brasileiros entre USLE, RUSLE e WEPP, é possível notar que todos os três modelos superestimam a quantidade de solo erodido em comparação com o real valor do mesmo. Entretanto, quando se compara a eficiência dos três modelos, RUSLE e WEPP apresentam superioridade com relação a USLE. De uma forma geral, o modelo WEPP apresenta uma melhor precisão, seguida pela RUSLE, e em último lugar a USLE. Isso decorre da diferença da disponibilidade de dados para cada um dos diferentes modelos, que variam de local para local. (AMORIM et al., 2010)

#### **4.2.3. SORÇÃO E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO DO MÉTODO MCT**

O ensaio foi baseado no método MCT foi proposto inicialmente em 1979, visto a necessidade de testes desenvolvidos especificamente para solos brasileiros, mais especificamente solos do estado de São Paulo. Com ideologia simples e pouco onerosa, o ensaio se baseia em dois processos: sorção e perda de massa por imersão. Originalmente, ambos os métodos utilizam amostras não deformadas de 4cm de diâmetro interno e 2cm de altura. (NOGAMI et al., 1979)

O processo de sorção é realizado com a colocação da amostra sobre a superfície da água, com sua superfície inferior equivalente ao nível d'água. O resultado obtido é o coeficiente de sorção  $p$ , dado pela relação entre a altura de percolação da água pela raiz quadrada do tempo em minutos de ensaio. (NOGAMI et al., 1979)

O processo de perda de massa por imersão deve ser feito após o ensaio de sorção, com a fixação de uma pedra porosa na base da amostra, que deve ser imersa em água de forma que seu topo se mantenha a cerca de 2mm acima da superfície da água. Cessadas as aparentes modificações na superfície superior da amostra, a pedra porosa deve ser retirada evitando a inclinação do conjunto. O restante deve ser imergindo na água, mantendo a altura da superfície livre inferior da amostra ao menos 3cm acima da superfície do recipiente que contém o líquido. Após 24h de imersão, é calculado o coeficiente de perda de massa  $P$ , dado em porcentagem, pela relação entre a massa desprendida e o valor inicial da amostra seca. (NOGAMI et al., 1979)

Por fim, é possível encontrar o índice de erodibilidade do solo utilizando a relação expressa pela equação 4. Caso o índice de erodibilidade do solo seja inferior a um, o solo possui alta erodibilidade, sendo recomendadas medidas de proteção do mesmo. (NOGAMI et al., 1979)

$$E = \frac{52 \cdot p}{P} \quad (4)$$

Onde

$E$  é o índice de erodibilidade

$p$  é o coeficiente de sorção

$P$  é o coeficiente de perda de massa por imersão

De forma análoga, o mesmo critério foi apresentado de forma gráfica através da realização de um maior número de ensaios, como expresso pela figura 4. (MORAES, 2015)

#### **4.2.4. PENETRAÇÃO DE CONE DE LABORATÓRIO**

O ensaio de penetração de cone de laboratório tem como objetivo relacionar a penetração do equipamento em amostras em estados saturados e em condições naturais, utilizando para isso amostras indeformadas. As amostras são saturadas por capilaridade utilizando pedras porosas, sob as quais são colocados os corpos de prova até se notar a presença de água em sua face superior. (BURGOS, 1999)

O equipamento foi adaptado com base no instrumento empregado na determinação do limite de liquidez de argilas remoldadas. Em resumo, ele possui um conjunto de penetração com 300g de massa, composto por um cone com 30° de abertura e 35mm de altura, que cai de uma altura de 10mm, como ilustrado pela figura 5. O ensaio consiste em obter a média da penetração do cone em nove pontos da amostra, utilizando três amostras diferentes, todas com 10cm de diâmetro e 5cm de altura. Com os valores obtidos é possível calcular a variação de penetração natural (DP) e saturada (DPA) de acordo com as equações 5 e 6. (ALCÂNTARA, 1997<sup>7</sup>, apud MORAES, 2015)

---

<sup>7</sup> ALCÂNTARA, MAT. Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 128p. 1997.

$$DP (\%) = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{nat}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$DPA (\%) = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{sat}} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde

$P_{sat}$  é a penetração média da amostra saturada

$P_{nat}$  é a penetração média da amostra natural

Com base nos valores de DP e DPA, a classificação do solo é dada pelo quadro 1. Em conjunto com o ensaio da metodologia MCT, também é possível refinar os solos quanto à erodibilidade através dos critérios expressos no quadro 2. (ALCÂNTARA, 1997<sup>8</sup>, apud MORAES, 2015)

Quadro 1 - Critérios para erodibilidade para ensaio de penetração de cone de laboratório

$DP > 4,5 \cdot P_{nat}$	Solo com alta erodibilidade
$DP < 4,5 \cdot P_{nat}$	Solo com baixa a nenhuma erodibilidade

Quadro 2 - Critérios para erodibilidade para ensaio de penetração de cone de laboratório aliado a metodologia MCT

$DP > 46,4 \cdot S + 25$ ou $DPA > 21,4 \cdot S + 20$	Solo com alta erodibilidade
$DP < 46,4 \cdot S + 25$ ou $DPA < 21,4 \cdot S + 20$	Solo com baixa a nenhuma erodibilidade

<sup>8</sup> ALCÂNTARA, MAT. Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 128p. 1997.

## 5. AVALIAÇÃO FINAL E SUGESTÕES

Com a facilidade gerada pela presença dos computadores, as metodologias preditivas como a USLE, RUSLE e WEPP são extremamente versáteis e adaptáveis. Entretanto, existe a necessidade de dados para uma melhor localização do método ao território no qual está sendo aplicado. A falta de disponibilidade de dados de pluviosidade no Brasil demanda interpolações entre postos de coleta, gerando erros e interferindo na definição adequada do valor do fator erosividade da chuva (R), afetando tanto a USLE quanto a RUSLE. De fato, o modelo WEPP apresenta maior precisão no Brasil, o que não ocorre em determinados estudos nos EUA. Os modelos USLE e RUSLE possuem uma base de dados expressivamente superior nos EUA, uma vez que são métodos que lá se originaram e possuem mais tempo de utilização, como citado por Amorim (2010). Portanto, não se trata apenas do método mais preciso, mas primariamente na disponibilidade de dados para cada modelo que influencia diretamente nos resultados obtidos.

Por outro lado, a metodologia de Inderbitzen se mostra extremamente adaptável. Entretanto, a falta de um procedimento normatizado dificulta a comparação de estudos. Ensaios realizados em um aparelho, por mais semelhante que seja com outros, não permite a criação de uma base de dados sólida em nível nacional pela falta de padronização, já que é impossível garantir a homogeneidade dos processos.

Além disso, nota-se uma clara divisão na evolução dos ensaios baseados em Inderbitzen. Alguns aparelhos seguem a ideia original, proposta em 1961, e utilizam o escoamento superficial como fonte primária de erosão, enquanto outros se utilizam da energia das gotas de chuva para desencadear o processo. O ideal seria um método que combinasse ambas as ideias, já que cada uma possui sua parcela de participação no processo erosivo como um todo.

Como todos os métodos tratam de processos baseados em estimativas para a erosão, é possível afirmar que todas se mostram eficientes o suficiente para gerar análises que auxiliam em escolhas mais adequadas para controle da perda de solo, permitindo uma melhora expressiva nas políticas de preservação quando bem aplicadas.

Para futuros trabalhos, recomenda-se também aprofundar informações sobre outros métodos de predição de erosão hídrica, como o WEPP e a RUSLE, assim como apresentar técnicas de manutenção e manejo do solo para mitigação da erosão. A apresentação de

outros ensaios de análise de erodibilidade também são bem-vindos, como as metodologias baseadas em sucção e tração dos solos. Por fim, recomendam-se ensaios de diferentes metodologias sobre o mesmo solo para avaliar o mais adequado às características locais, principalmente envolvendo os diferentes ensaios de Inderbitzen existentes na bibliografia.

## ANEXO A

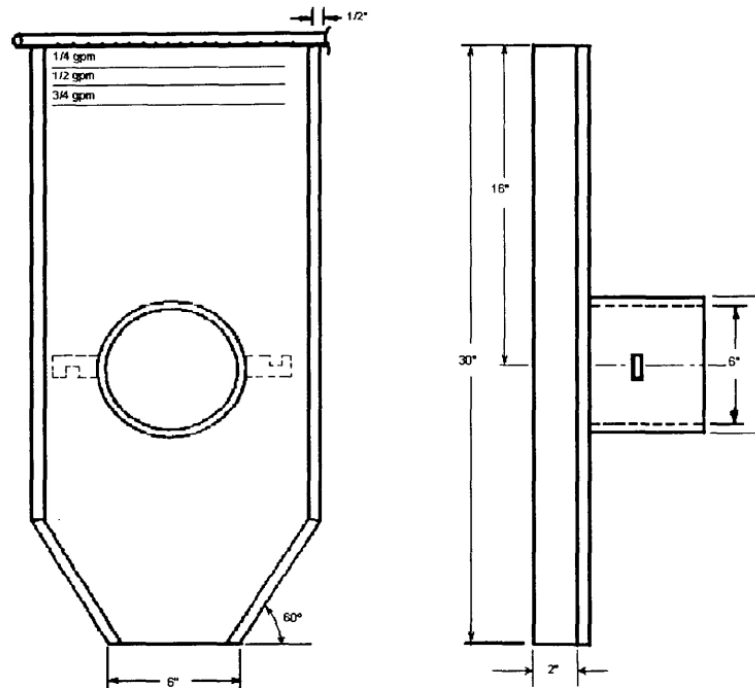


Figura 1 - Rampa de Inderbitzen (*Inderbitzen Ramp*) (1961)  
Fonte: Inderbitzen, 1961<sup>2</sup>, apud Lemos, 2002

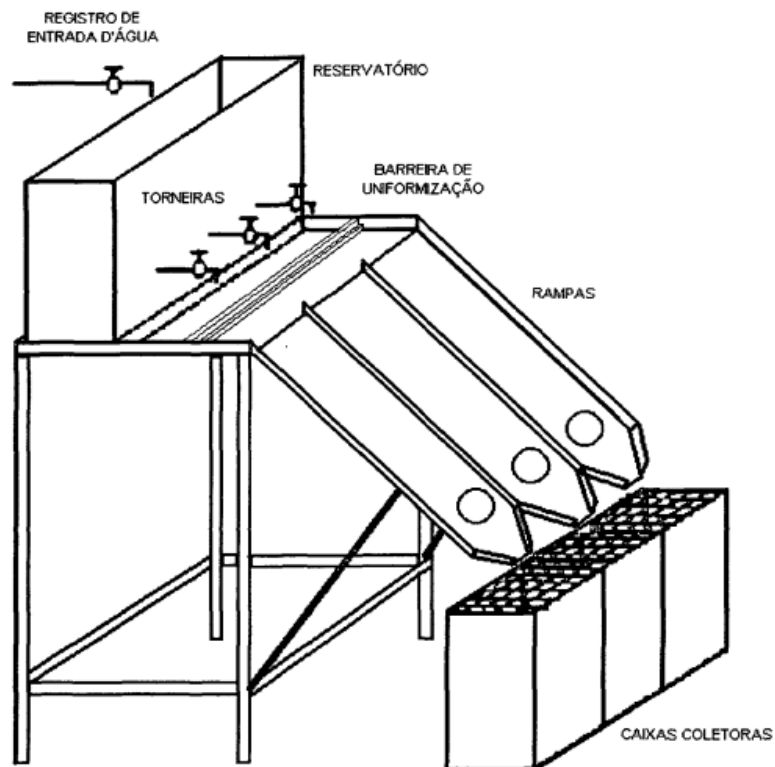


Figura 2 - Aparelho de Inderbitzen utilizado por Fácio (*Inderbitzen apparatus used by Fácio*)(1991)  
Fonte: Lemos, 2002



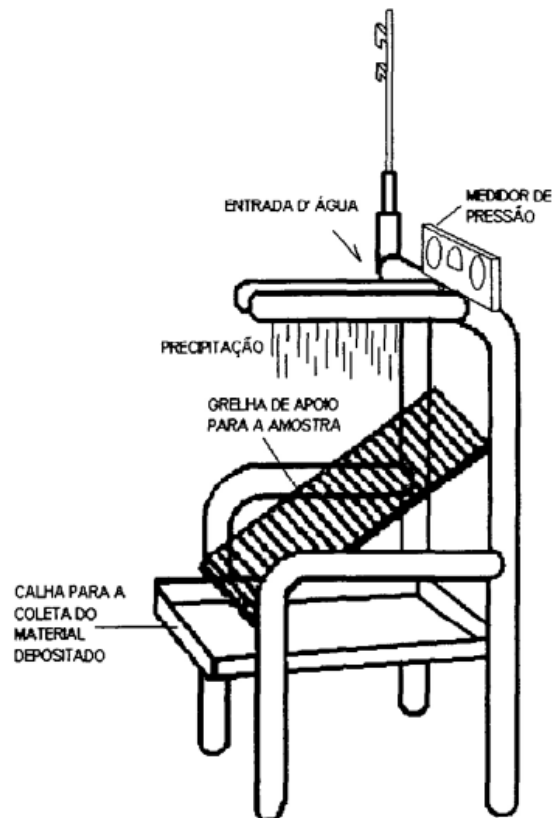


Figura 3 - Aparelho de Inderbitzen Modificado de Freire (*Inderbitzen apparatus modified by Freire*) (2001)

Fonte: Lemos, 2002

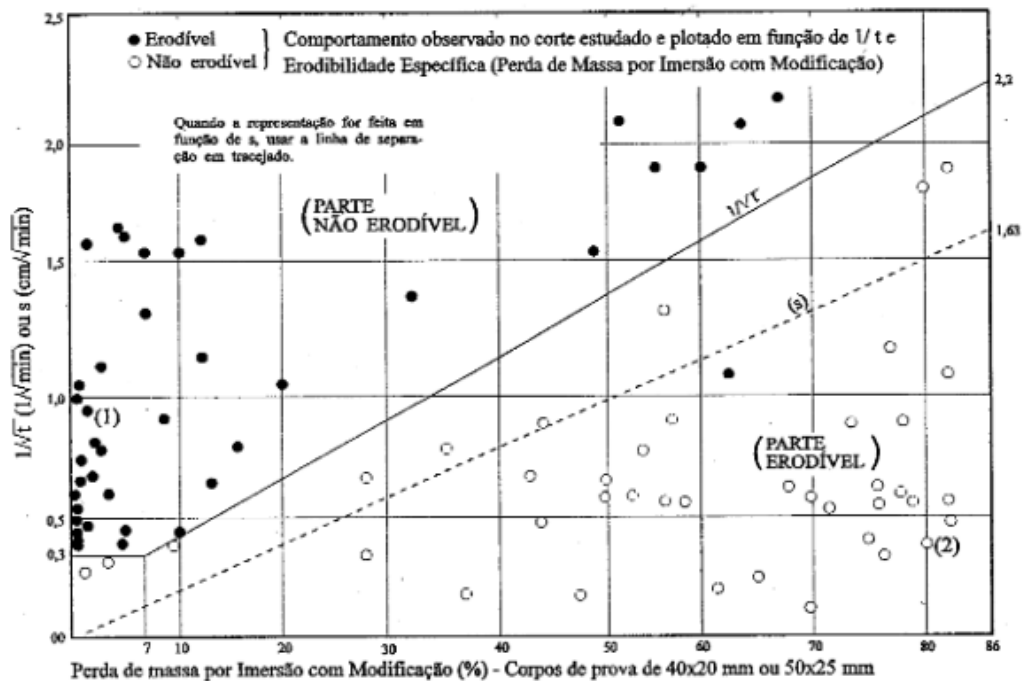


Figura 4 - Critério de classificação gráfica para a metodologia MCT (*Graphic classification criteria for the MCT methodology*)

Fonte: Nogami e Villibor, 1995<sup>9</sup>, apud Moraes, 2015

<sup>9</sup> NOGAMI, JS; VILLIBOR, DF. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Villibor, São Paulo, p. 169 – 196. 1995.

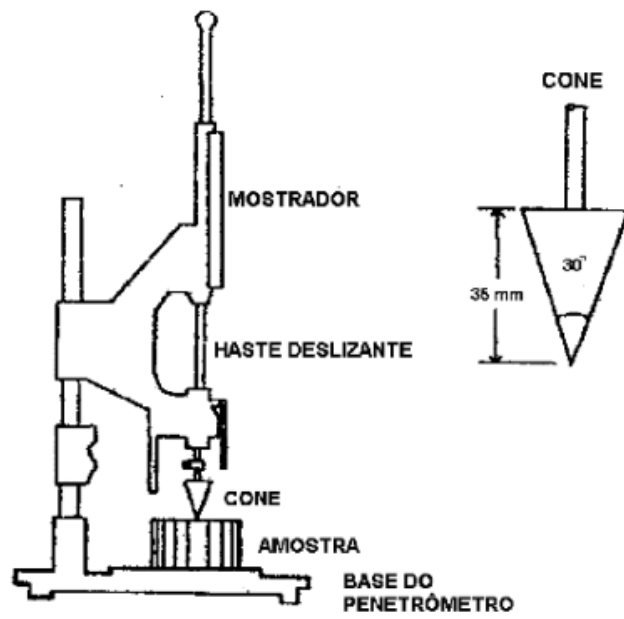


Figura 5 - Equipamento de penetração de cone de laboratório  
(*Laboratory cone penetration equipment*)  
Fonte: Alcântara, 1997, apud Moraes, 2015

## Referências

ANDRADE, AG; CHAVES, TA. Manejo contra a erosão. **Agro DBO**, vol. 9, nº 36, p. 42 – 46. 2012.

AMORIM, RSS; SILVA, DD; PRUSKI, FF; MATOS, AT. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, nº 6, vol. 30, p. 1046 – 1049. Nov./dez. 2010.

ARAÚJO, RC. CAMPOS, TMP. Uso dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração para avaliar a erodibilidade. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, nº128, p. 67-85. jul. 2013.

BASTOS, CAD. **Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 303p. 1999.

BASTOS, CAB; GEHLING, WYY; MILITITSKY, J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e prática na Engenharia Civil**, nº 2, p. 9 – 18. mai. 2001.

BURGOS, PC; VILAR, OM; ALCÂNTARA, MAT. Um estudo preliminar da erodibilidade de alguns solos da cidade de Salvador – BA. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO), 1999. **Anais...1999**.

COUTO, BOC. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 125p. 2015.

BOCKHEIM, JG; GENNADIYEV, AN; HAMMER, RD; TANDARICH, JP. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, nº 124, p. 23 – 36. 2005.

DEMARCHI, JC; ZIMBACK, CRL. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do ribeirão das perobas. **Energia na agricultura**, n. 2, vol. 29, p. 102 – 114. Abr/jun 2014.

FÁCIO, J. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 122p. 1991.

FLANAGAN, DC; ASCOUGH II, JC; NICKS, AD; NEARING, MA; LAFLEN, JM. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: USDA – Water Erosion Prediction Project (WEPP). **NSERL**, report n° 10. 1995.

LEMOS, CF. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 97p. 2002.

LEMOS, CF. SILVEIRA, CT. MILANI, JR. OKA-FIORI, C. FIORI, AP. Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do Rio da Bucha (PR), através do aparelho de Inderbitzen. **Revista eletrônica do programa de pós-graduação em Geografia – UFPR**, vol. 2, n° 2, pag. 156-171. Jul./dez 2007.

LEPSCH, IF. 19 lições de pedologia. São Paulo. **Oficina de Textos**, 456p. 2011.

LEPSCH, IF. Formação e conservação dos solos. **Oficina de Textos**, 2a ed., 216p. 2010.

MENDES, CAR. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ**. Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 236p. 2006.

MORAES, DVS. **Avaliação do uso do ensaio de cone de laboratório para estimativa da erodibilidade**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 66p. 2015.

MOREIRA, FMS; CARES, JE; ZANETTI, R; STUMER, SL. Solos: Tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas. In: O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal. **UFLA**, p. 45 – 62. 2013.

NASCIMENTO, PC; LOMBARDI NETO, F. Razão de perdas de solo sob cultivo de três leguminosas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n° 1, p. 121 – 125. 1999.

NOGAMI, JS; VILLIBOR, DF. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, n° 19, p.196 – 199. 1979.

RENARD, KG; FOSTER, GR; WEESIES, GA. PORTER, JP. Revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 1, n° 45, p. 30 – 33. 1991.

SCHAEFER, CRGR; MARQUES, AFSM; CAMPOS, JCF. Origens da Pedologia do Brasil: Resenha Histórica. **Geonomos**, 15p. 1997.

SERRAT, BM; LIMA, MR; GARCIAS, CE; FANTIN, ER; CARNIERI, IMRSA; PINTO, LS. Conhecendo o solo. **UFPR**, 32p. 2002.

SILVA, APN; MELO, MTS. SILVA. Análise do Histórico de Desenvolvimento de Modelos de Aparelho de Inderbitzen para a Confecção de Tabelas Comparativas. In: Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão. **Blucher**, p. 51 – 64. 2016.

SILVA, MSL. Estudos da erosão. **Embrapa**, 22p. 1995.

TOMASI, LF. **Ensaio de Inderbitzen para avaliação da erodibilidade dos solos e rochas: aplicação nas regiões de Santa Maria, São Francisco de Assis e Porto Alegre/RS**. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 83p. 2015.

WISCHMEIER, WH; SMITH, DD. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. **U.S. Department of Agriculture**, Agriculture Handbook, n° 537. 1978.