

# BRAGANTIA

*Boletim Técnico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo*

Vol. 18

Outubro de 1959

N.º 13

## DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO, POR MEIO DE DIAGRAMAS DE PLUVIÓGRAFOS E LIMNÍGRAFOS (\*)

Dr. JOSÉ BERTONI

*Engenheiro-agrônomo, Seção de Conservação do Solo, Instituto Agrônomo*

### RESUMO

Neste trabalho são apresentados os valores da velocidade de infiltração, obtidos com os dados de perdas por erosão dos talhões de comprimento de rampa, da Estação Experimental de Conservação do Solo, em Clarinda, Iowa, nos Estados Unidos.

Usando os dados de intensidades de chuva e enxurrada, a velocidade de infiltração foi determinada pelo método gráfico de Sharp e Holtan para as 10 maiores chuvas, com apreciável enxurrada, que ocorreram durante um período de cinco anos. As 10 chuvas foram selecionadas com base na sua duração, intensidade e época do ano.

Os problemas do cálculo da velocidade de infiltração com os dados de talhões de perdas por erosão e algumas das limitações dos valores determinados são apresentados.

### 1 — INTRODUÇÃO

A infiltração da água no solo é de importância para um grande grupo de pessoas com os mais variados interesses. A velocidade e quantidade de água que infiltra no solo é importante na produção de culturas, porque

(\*) Tradução da tese submetida à Graduate Faculty, Iowa State College, U.S.A., como parte dos requisitos para a obtenção do título de Master of Science.

O autor é sinceramente grato ao Dr. W. D. Shrader, do Iowa State College, e ao Dr. W. E. Larson, do Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, pela orientação e interesse no decorrer das investigações e por suas valiosas sugestões na preparação do manuscrito original. Agradecimentos são devidos à Fundação Rockefeller, pela bolsa de estudos recebida, e também ao Conselho Nacional de Pesquisas e Campanha Nacional de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior, pelos auxílios recebidos, que deram ao autor a oportunidade de realizar este trabalho.

O autor justifica a tradução deste trabalho pela necessidade de dar divulgação a um assunto inédito no país. Foi sua preocupação, ao realizar o estudo, que ele pudesse ser utilizado posteriormente no Brasil. Procurou também ser o mais fiel possível na tradução, tendo apenas transformado para o sistema métrico os dados do sistema em uso nos Estados Unidos.

Recebido para publicação em 13 de agosto de 1958.

êsse único fator muitas vêzes determina se haverá ou não suficiente umidade para as plantas. O conhecimento das características da infiltração de uma área determinada é necessário para o cálculo correto das estruturas de contrôlle das enchentes, reservatórios, disposição dos sistemas de esgotos, pontes e bueiros, assim como uma série de outros projetos públicos ou particulares.

A despeito da grande importância da infiltração, somente uma quantidade limitada de informações está disponível. Fontes de dados em que as características de infiltração de um tipo particular de solo ou área podem ser determinadas são muito limitadas. É, por isso, desejável que tôdas as fontes de dados que possam ser usados na avaliação da velocidade de infiltração sejam examinadas e utilizadas em qualquer lugar que seja possível.

Uma fonte de tais dados são os talhões com sistemas coletores, para determinação das perdas de terra e água, que foram instalados em muitos Estados nos últimos 20 a 30 anos para o estudo dos vários aspectos da erosão. Um grupo desses talhões foi instalado em 1932 pelo Serviço de Conservação do Solo, em Clarinda, Iowa, no solo "Marshall silt loam".

Diagramas das intensidades de chuva e enxurrada são disponíveis para o período 1938 a 1942, inclusive, e foram utilizados neste estudo. Êsses diagramas foram usados para determinar uma curva de velocidade de infiltração sobre o tempo para o solo "Marshall silt loam". Uma tentativa foi feita para determinar os efeitos da umidade do solo, comprimento de rampa e estação do ano na velocidade de infiltração.

Os problemas do cálculo da velocidade de infiltração, com dados de talhões de perdas por erosão e algumas das limitações dos valores determinados são apresentados. Os valores obtidos, ainda que provavelmente sujeitos a um erro relativamente grande, parecem ser a medida de mais segurança da capacidade de infiltração deste solo do que a disponível no passado. Êste estudo indica o caminho para uma utilização mais completa dos diagramas de outros talhões de determinação de perdas por erosão, em Iowa.

## 2 — REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 — ESTUDOS FUNDAMENTAIS

O conceito de infiltração, ou movimento da água no solo, é um pouco antigo, datando de cêrca do fim do século 19. De acôrdo com Brakensiek (6), Perrault e Mariotte foram, aparentemente, os primeiros a apreciar a grande capacidade que o solo tem para a infiltração da água.

É também citado que John Dalton, em 1802, publicou os resultados de experiências com lisímetros, em que ele determinou as quantidades de água que percolariam em diferentes tipos de solos (6).

Entre 1817 e 1920 consideráveis pesquisas hidrológicas foram iniciadas em órgãos governamentais e vários compêndios de hidrologia foram publicados (20, 21).

O desenvolvimento do conceito de infiltração pode ser acompanhado nos Transactions da American Geophysical Union assim como nos Transactions e Proceedings da Soil Science Society of America.

Houk (17), estudando pequenos talhões, calculou a velocidade de infiltração subtraindo a intensidade de enxurrada da intensidade da chuva. Dessas experiências ele tirou relevantes conclusões e, entre outras, as duas seguintes são intimamente relacionadas com êste estudo:

a) em um dado talhão, quanto mais sêco o solo maior será a velocidade de infiltração e menor a intensidade de enxurrada, correspondendo a uma determinada intensidade de chuva;

b) para a enxurrada começar de um talhão são necessárias duas condições: primeira, a precipitação deve ocorrer numa intensidade maior do que a velocidade com que ela pode ser absorvida pelo solo; segunda, a intensidade em excesso deve ser maior que o suficiente para abastecer o armazenamento superficial disponível em razão das pequenas depressões na superfície, acumulações de capins ou fôlhas sêcas e a vegetação.

Horton (14) definiu a capacidade de infiltração como a velocidade máxima com que uma chuva pode ser absorvida por um dado solo, em uma determinada condição.

Com os dados experimentais de Neal (26), Horton (15) descreveu o conceito de infiltração sob o princípio de que ela diminui durante a duração da chuva.

## 2.2 — DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO

De acôrdo com Brakensiek (6), sete métodos gerais têm sido usados ou estão em uso na determinação da capacidade de infiltração:

- a) experimentos de laboratório, usando chuva artificial;
- b) experimentos de laboratório, usando altura constante da superfície de água;
- c) experimentos de campo, usando altura constante da superfície de água;
- d) experimentos de campo, usando chuva artificial;

- e) experimentos de campo, utilizando chuva natural em talhões isolados, de determinação de perdas por erosão;
- f) determinações de campo, em bacias hidrográficas pequenas e homogêneas, sob condições naturais;
- g) determinações de campo, em bacias hidrográficas pequenas e heterogêneas, sob condições naturais.

Por meio de dados obtidos pelo método e foi determinada a velocidade de infiltração citada neste trabalho.

A velocidade de infiltração tem sido determinada de numerosas maneiras. Ela tem sido determinada diretamente por meio de lisímetros (11) que são, essencialmente, cilindros de solo no qual uma quantidade conhecida de água é aplicada e a infiltração é determinada.

Recentemente, outros métodos têm sido desenvolvidos num esforço para obter a velocidade de infiltração para um solo, em sua condição natural. Para obter mais dados do que é possível quando se está na dependência de chuvas naturais têm sido projetados equipamentos, que fornecerão chuva artificial uniforme em intensidade e em grande quantidade. O equipamento pode ser mudado de um solo ou tipo de vegetação para outro e, assim, determinações são feitas em diferentes condições (23). Esse equipamento fornece gotas suficientemente grandes para se assemelhar ao impacto das chuvas naturais na superfície. A chuva é aplicada a uma intensidade conhecida, e a intensidade de enxurrada é determinada; por elas é calculada a velocidade de infiltração. Comparações de diferentes tipos de equipamento operando lado a lado têm mostrado que comparações relativas de solos e vegetação podem ser obtidas com qualquer dêles (23).

Vários tipos de infiltrômetros foram projetados e têm, de acôrdo com Wilm (41), vários graus de precisão. Wilm concluiu que a velocidade de infiltração varia com o método usado na sua determinação, e dos instrumentos espera-se obter somente uma estimativa aproximada da verdadeira infiltração. Todavia, a despeito de tal conclusão, o infiltrômetro é o único instrumento que até esta data pode dar uma idéia aproximada de como se opera a infiltração.

As velocidades de infiltração inicial e final, assim como o tempo para atingir a última, variam grandemente, dependendo de vários fatores que afetam tais velocidades. Resultados obtidos por Beutner, Gaebe e Norton (4) mostram curvas típicas de infiltração que exibem uma larga variação, dependendo da umidade antecedente, condição da superfície e outros fatores.

Horton (16) desenvolveu um tipo de equação, para ajustar a uma grande variedade de curvas-padrão de infiltração. Esta equação é

$$f = f_{\infty} - (f_0 - f_{\infty})e^{-kt}$$

em que  $f$  é a velocidade de infiltração,  $f_{\infty}$  é o valor constante de  $f$  para o qual a curva fica assintótica com o tempo,  $f_0$  é a alta velocidade inicial ou valor de  $f$  para  $t = 0$ ,  $k$  é uma constante,  $t$  é o tempo decorrido desde o início da chuva, e  $e$  é a base dos logaritmos naturais, com o valor aproximado de 2,718.

Alguns pesquisadores, tal como Wilm (41), têm usado a teoria estatística para analisar dados de infiltração. Em geral não há dados suficientes de infiltração que tornem eficiente o uso da análise estatística, uma vez que tais métodos necessitam de grande quantidade de dados (11).

Vários pesquisadores têm analisado diagramas de limnógrafos e de pluviógrafos, com o propósito de determinar com razoável precisão a velocidade de infiltração e a forma da curva de infiltração. O processo tem variado entre os diferentes investigadores. Sherman e Mayer (35) começaram pela velocidade média de perda, que é calculada dividindo-se a diferença entre a chuva total e a enxurrada total pelo tempo entre o começo da enxurrada e o fim da chuva.

A velocidade de infiltração não pode ser determinada subtraindo-se a enxurrada, da chuva (33), sem que uma apropriada correção para a retenção no solo superficial tenha sido feita (8, 12).

Sharp e Holtan (31) conseguiram a determinação diferentemente, sendo o método baseado nos seus experimentos em talhões com aspersão (30). Dos seus estudos nesses talhões eles desenvolveram um processo para separar os efeitos da retenção no solo superficial, da interceptação da cobertura vegetativa, do armazenamento das depressões do terreno e da infiltração.

Sharp e Holtan (31) verificaram estar a retenção na superfície do solo, ou carga hidráulica, correlacionada com a intensidade de enxurrada. Em seu método, uma estimativa do armazenamento das depressões do terreno é obtida de uma análise do intervalo de tempo entre a cessação da chuva e da enxurrada e sua prova da quantidade conferida com a intensidade de enxurrada.

O armazenamento das depressões do terreno e a interceptação da cobertura vegetativa não podem ser separados e não há meios de determiná-los. Entretanto, Sharp e Holtan (31) calculam que próximo ao fim da chuva esses fatores não mudam com o tempo e, por conseguinte, não têm efeito na velocidade de infiltração. Sua análise passa do fim da chuva, quando condições estáveis prevalecem, para voltar ao início, onde condições instáveis e rapidamente modificáveis prevaleceram. Fundamentalmente seu

processo é colocar curvas somatórias de chuva **P** e enxurrada **Q**, e assim calcular uma terceira curva da diferença **P-Q** entre as duas curvas precedentes. Uma linha reta é traçada de um ponto tangente à curva **P-Q** no começo da enxurrada a um ponto que converge com a curva **P-Q** próximo ao fim da enxurrada. A base para essa linha reta é o experimento em talhões com aspersão. A intercepção da cobertura vegetativa e o armazenamento das depressões do terreno são em seguida subtraídos desta reta, para dar uma linha que representa a massa de infiltração, **F**. Diferenças nas ordenadas entre as curvas **F** e **P-Q** são causadas pela retenção no solo superficial. Se forem boas as correlações encontradas entre a retenção no solo superficial,  $D_s$ , e a intensidade de enxurrada,  $q$ , a curva **F** está estabelecida uma vez que nos estudos dos talhões com aspersão esses valores foram intimamente relacionados. Se não fôr encontrada uma boa correlação a curva **F** pode ser mudada ligeiramente a fim de encontrar uma melhor relação. A posição da curva de velocidade de infiltração é determinada colocando valores de  $f$  determinados da inclinação da curva **F**.

Nos talhões de determinações de perdas por erosão, como aqueles usados neste estudo, onde profundas perdas por percolação durante qualquer chuva são mínimas, esse método, ainda que um pouco arbitrário, parece ser mais conveniente que qualquer outro até agora conhecido. Neste trabalho as curvas de velocidade de infiltração foram obtidas pelo método gráfico de Sharp e Holtan.

Alguns pesquisadores, tais como Kidder e Holtan (18), Sherman (34), Sharp, Holtan e Musgrave (32), e Zingg (42) aplicaram e testaram a praticabilidade deste método gráfico.

Em todos os dados hidrológicos há um grande número de fatores operando para causar uma variação na velocidade de infiltração. O mais importante é o próprio solo. Musgrave e Norton (25) estabeleceram que a infiltração no "Marshall silt loam" é 7 a 10 vezes a do "Shelby silt loam". A condição do cultivo é importante, mas o efeito é transitório. Duléy e Kelley (10) observaram em seus experimentos que relva nativa com boa cobertura de grama e solo com uma cobertura de palha tinham uma velocidade de infiltração várias vezes maior que a do solo descoberto. A presença de umidade no solo parece reduzir a infiltração, na proporção da sua quantidade (3, 14, 26).

Borst e outros (5) encontraram que a velocidade de infiltração não era constante para o mesmo solo nos diferentes períodos do ano. Foi verificado ser menor no período de inverno e começo da primavera, aumentar durante o fim da primavera e meio do verão, e diminuir no fim do verão e no outono.

### 3 — MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1 — REGIÃO

A Estação Experimental de Conservação do Solo e Água, em Clarinda, Iowa, representa os solos da região sedimentar do Vale do Missouri. Estes solos incluem alguns dos mais férteis dos Estados Unidos e suas principais áreas ocupam partes dos Estados de Missouri, Kansas, Iowa, Nebraska, Illinois, Minnesota e South Dakota. Esta é a área onde o milho é mais intensamente cultivado (7).

#### 3.2 — CHUVA

A precipitação média anual na Estação Experimental, para o período 1932-42, foi de 719,6mm, i. é, 58,6 milímetros inferior à média, para o mesmo período, na cidade de Clarinda, a 16 km a leste da Estação Experimental, e 136,9 mm inferior à média de 71 anos, segundo dados do U.S. Weather Bureau em Clarinda (7).

#### 3.3 — SOLO

O panorama da região é expresso principalmente por uma topografia ondulada, com grandes e arredondados espigões e pequenos vales. Em geral a diferença em relêvo não é muito grande. O alto dos principais cumes usualmente encontra-se de 6 a 24 metros acima do nível geral dos vales. Topografia plana ou depressões são menos comuns que topografia ondulada. Por outro lado, declives muito fortes são os menos comuns.

A região é coberta, principalmente, por uma camada de sedimentos eólicos (loess) que se assenta nos depósitos glaciais. Em alguns lugares das partes inferiores dos declives mais pronunciados os depósitos glaciais estão expostos na superfície (36).

A maior parte dos solos desta região desenvolveu-se sob a vegetação de planícies; a camada arável do solo é geralmente de cor bruno-escuro e os subsolos são sombreados de bruno. As drenagens interna e externa são, geralmente, boas.

O solo "Marshall silt loam", dos talhões de determinação de perdas usados neste estudo, tem uma camada superficial bruno-escuro de 18 a 23 cm de espessura; depois de uma zona de transição bruno-clara, de cerca de 5 a 10 cm de espessura, vem um subsolo de cor bruno-média até bruno-amarelada. Este subsolo alcança o máximo de argilosidade na profundidade aproximada de 60 a 75 cm. Abaixo desta profundidade o subsolo fica mais friável em consistência e a coloração passa para bruno-amarelada clara ou bruno-pálida, na profundidade de 1,00 m.

Poucos contrastes de mosqueamento são encontrados abaixo da profundidade de 75 cm.

Os solos "Marshall" ocorrem na declividade de cerca de 2 a 12%. Têm uma boa capacidade de retenção da água e são permeáveis. Terraços em nível são comumente usados e parecem ser satisfatórios se forem convenientemente construídos e mantidos.

Os principais problemas de manéjo do solo são o contróle de erosão e a manutenção de alto nível de nitrogênio disponível (28).

#### 3.4 — TALHÕES EXPERIMENTAIS

O interêsse no contróle da erosão, e a necessidade de obter informações básicas de pesquisas referentes aos métodos de contróle da erosão, levaram ao estabelecimento de uma série de Estações Experimentais de Conservação do Solo, em todo o país, no comêço de 1930. Uma dessas Estações foi localizada perto de Clarinda, Iowa, em solo "Marshall silt loam". Nos experimentos da Estação de Clarinda, incluiu-se uma série de pequenos talhões, chamados "talhões de contróle". Nesse experimento as perdas de terra e água eram medidas, tanto as influenciadas pelos tratamentos culturais e comprimentos de rampa como as outras devidas às características das plantas. Em Clarinda o experimento consistia de nove talhões. Entretanto, sòmente os dados dos três talhões de comprimento de rampa foram usados neste estudo.

Os talhões tinham 10,90, 21,80 e 43,60 m de comprimento e 1,80 m de largura, com a média de declive do terreno de 9%, fazendo face para o sul. Os três talhões foram plantados com milho, continuamente.

Nos talhões todo o preparo de solo foi feito com equipamento manual; entretanto, o trabalho era feito de tal modo que podia simular o feito com cavalo ou trator puxando implementos. Assim, as operações de preparo do solo eram feitas da seguintes maneira. Primeiro a palha de milho era cortada com uma pá reta. Em seguida todo o talhão era batido com a enxada na profundidade de 18 cm aproximadamente (isso era feito usualmente no dia 1.º de maio). Antes do plantio era passado um ancinho para assemelhar à gradagem e o milho era plantado fazendo-se covas com a enxada e colocando a semente a cerca de 6 cm de profundidade. Usualmente o milho era plantado em 15 de maio, mantendo-se um "stand" de três plantas por cova. As ruas eram espaçadas de 90 cm e as covas, de 1,05 m, nas ruas (7); estas eram plantadas morro-abaixo. Os talhões eram deixados limpos, capinando-se três vèzes durante o cultivo. Em cada capina o solo era amontoado na rua do milho para se assemelhar às condições normais do campo. Os restos da cultura eram deixados de pé durante o inverno.

As determinações de perdas de terra e água desses talhões eram baseadas na coleta total da enxurrada, em tanques grandes de concreto. No início do experimento nenhuma provisão foi feita para a determinação da intensidade de enxurrada. Entretanto, em 1938 tanques menores, de metal, foram colocados dentro dos tanques de concreto. Esses tanques de metal eram de forma triangular no fundo e construídos com um vertedouro de seção em "V" na parte de cima. Conduzindo a água dentro do tanque de metal e instalando um limnógrafo Friez FW-1, a velocidade com que a água subia no tanque podia ser registrada. O fundo do tanque, de forma triangular, fornecia acurada determinação inicial de pequenas quantidades de água. Com o vertedouro de seção em "V" determinava-se a água que transbordava do tanque de metal para o tanque de concreto.

Depois de cada chuva o diagrama era removido e as intensidades de enxurrada eram calculadas.

As determinações de intensidade de enxurrada foram feitas para o período de cinco anos, de 1938 a 1942 inclusive.

### 3.5 — MÉTODO

A determinação da velocidade de infiltração foi feita pelo método desenvolvido por Sharp e Holtan (31), para a análise de diagramas de chuvas naturais em talhões experimentais ou em bacias hidrográficas pequenas e homogêneas.

A característica de uma chuva pode ser inteiramente variada. A chuva pode começar com alta ou baixa intensidade, ser intermitente ou contínua, terminar bruscamente ou diminuir gradualmente. Ela pode mostrar vários ou somente um pico, e pode seguir-se a outras chuvas ou a um período de seca.

De acôrdo com Sharp e Holtan (31), durante a chuva os seguintes fenômenos podem ser esperados: a) a água é fornecida em várias intensidades e quantidades; b) a vegetação pode interceptar uma parte ou toda a chuva; c) uma parte da chuva pode evaporar antes ou depois de alcançar a vegetação ou o solo; d) poderá haver alguma perda por transpiração das plantas; e) parte ou toda a chuva que alcança o solo pode ser absorvida por infiltração a várias velocidades, iguais ou menores que a intensidade de chuva efetiva<sup>(1)</sup>; f) quando a intensidade de chuva efetiva excede a velocidade de infiltração, uma parte do excesso da chuva pode ser coletada nas depressões e parte adere à superfície do solo; g) depois que inicia o excesso de chuva, a retenção (armazenamento na superfície, armazenamento

(1) Chuva efetiva é aquela porção que alcança o solo.

nas depressões e adesão) principia a acumular; h) simultâneamente com a acumulação da retenção, principia a enxurrada superficial; i) a água infiltrada no solo pode reaparecer nas superfícies ou nas correntes, como enxurrada; j) a enxurrada superficial de certas porções da área pode ser absorvida pelas porções mais baixas, antes de alcançar o vertedouro; l) finalmente, o excesso de fornecimento sôbre as perdas aparecerão como enxurrada, no vertedouro da área em estudo.

Dos 11 fenômenos relacionados, que podem ocorrer mais ou menos simultâneamente, sòmente dois, a chuva e a enxurrada, podem ser medidos diretamente. Dois dêles, a água interceptada pela vegetação e o armazenamento nas depressões, podem ser estimados com relativa aproximação, mas não tanto como a intensidade de acumulação. A quantidade total de infiltração obtida por êste método poderá ser afetada por erros ocorridos durante a estimativa dêesses dois valores; entretanto, a exatidão da velocidade de infiltração determinada não será afetada por êstes erros durante qualquer parte da chuva, com exceção da primeira parte ou aquelas partes imediatamente seguintes a longos períodos com pouca ou nenhuma chuva. Dois outros fenômenos, evaporação e transpiração, podem ser ignorados, nas condições mais comuns em chuvas relativamente curtas e em pequenas áreas.

Medições diretas podem ser feitas com a chuva e enxurrada, mas a interceção e o armazenamento das depressões devem ser estimados, e determinadas a retenção e a infiltração. A retenção e infiltração não podem ser medidas diretamente. Uma determinação aproximada de um valor deve ser feita para isolar o outro.

Os seguintes símbolos, do método de Sharp e Holtan, foram usados: **i** — intensidade de chuva, em milímetros por hora; **P** — massa ou chuva acumulada, em milímetros; **q** — intensidade de enxurrada, em milímetros por hora; **Q** — massa ou enxurrada acumulada, em milímetros; **f** — velocidade de infiltração, em milímetros por hora; **F** — massa ou infiltração acumulada, em milímetros; **D<sub>a</sub>** — retenção na superfície, em milímetros; **C** — interceção pela vegetação, em milímetros; **IA** — abstração inicial: armazenamento das depressões + interceção pela vegetação, em milímetros; **t** — tempo, em horas e minutos.

O método varia um pouco com o tipo de chuva. As chuvas são classificadas, de acôrdo com Sharp e Holtan (31), em três tipos, dependendo de suas características:

**A** — 1) chuva de duração suficientemente longa e intensidade fixa, de modo que a velocidade de infiltração permanece sensivelmente constante para a última parte da chuva;

2) chuva caracterizada por intermitência de tal natureza que a enxurrada prosseguirá intermitentemente;

**B** — chuva suficientemente longa para  $f$  ter ficado sensivelmente constante e com um período final de alta intensidade de chuva terminando bruscamente;

**C** — todos os outros tipos de chuva produzindo enxurrada em apreciáveis quantidades.

Usando o tipo **A** de chuva, de 11 de março de 1939, no talhão de 21,80 m de comprimento, como um exemplo para o desenvolvimento da análise, o primeiro passo é reduzir os dados de  $P$ ,  $Q$ ,  $i$  e  $q$  para a forma gráfica (fig. 1). O próximo passo é subtrair e mapear os valores  $P-Q$ . Para obter as diferenças entre as curvas  $P$  e  $Q$  para colocar no gráfico, a curva  $P-Q$  pode ser melhor conseguida com compasso, sendo os pontos tomados em intervalos de tempo suficientemente próximos.

Desprezando a evaporação,  $P = Q + F + IA + D.$  e  $P-Q = F + IA + D.$  Nesta análise a curva  $P-Q$  pode ser considerada como tendo somente duas partes, massa de infiltração + abstração inicial consideradas como uma variável, e a retenção como a outra. O problema então se transforma na separação de  $P-Q$  nestas duas partes componentes, isto é, retenção e  $F + IA$  (infiltração acumulada mais armazenamento das depressões e interceção da vegetação). Uma tentativa de curva  $F + IA$  pode agora ser traçada abaixo da curva  $P - Q$ . No início do excesso de chuva a curva  $F + IA$  deve ser tangente à curva  $P - Q$  e deve convergir com a curva  $P - Q$ . Quando esta curva  $F + IA$  é uma linha reta, indica uma velocidade de infiltração constante entre os pontos de tangência.

Como foi descrito, a curva  $P-Q$  é dividida em duas partes componentes  $F + IA$  e retenção; e, portanto, as ordenadas abaixo da curva  $F + IA$  representam o  $F + IA$  enquanto que as ordenadas entre  $F + IA$  e  $P-Q$  representam a retenção,  $D.$  Usando compasso, os pontos para os valores de  $D.$  podem ser locados pela obtenção das diferenças entre a curva  $P-Q$  e a curva  $F + IA$  e colocando esses valores acima da linha base do gráfico. Esta curva  $D.$  terá picos e vales correspondentes àqueles da curva  $q$ , mas estes picos e vales antecederão àqueles da curva  $q$  pelo tempo decorrido entre as curvas  $q$  e  $i$ .

Pares de valores são obtidos para  $D.$  e  $q$  e podem ser convenientemente colocados em papel logarítmico para obtenção de uma curva de  $q$  versus  $D.$  Qualquer valor de  $D.$  encontrado na curva  $D.$  será emparelhado com um de  $q$  obtido da curva  $q$  ocorrido ao mais próximo intervalo de tempo seguinte. Os valores de mais confiança a serem colocados no papel logarítmico são os picos e vales das curvas  $D.$  e  $q$ .

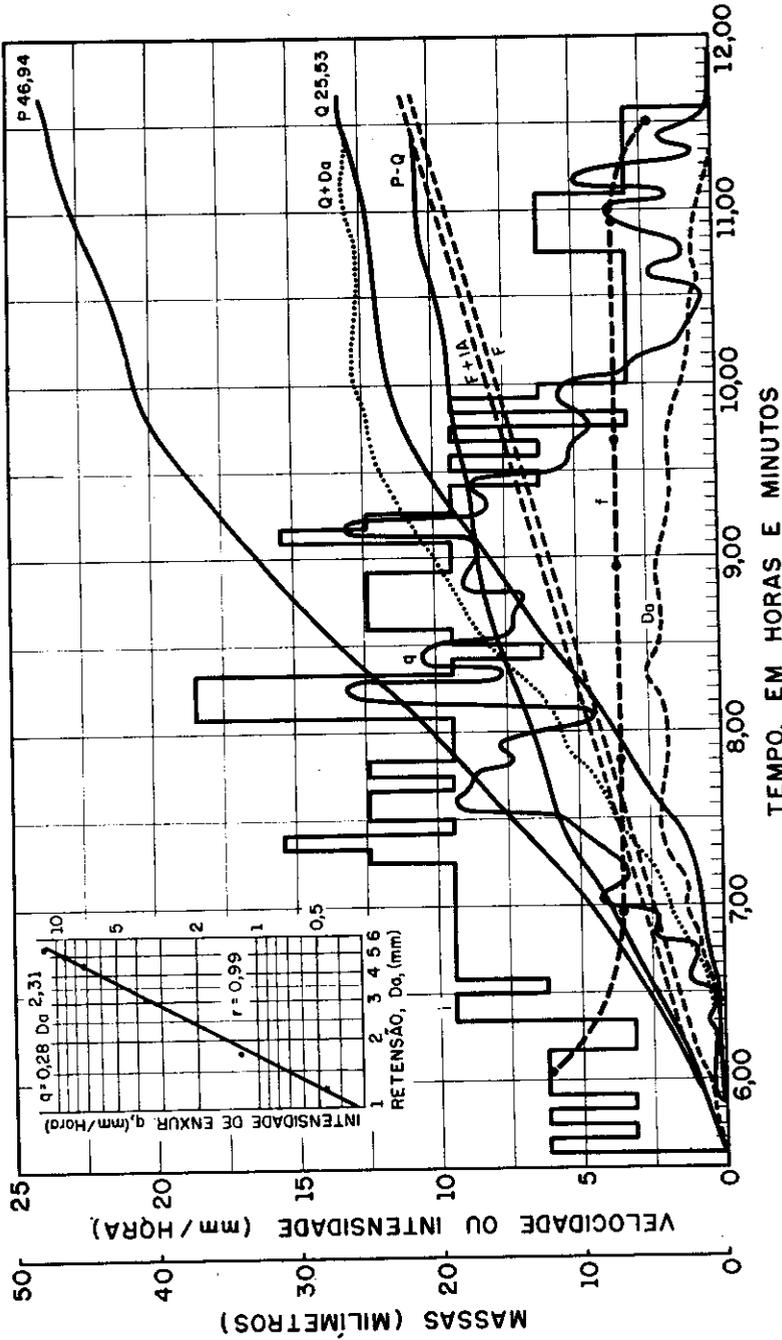


FIGURA 1. — Ilustração do método gráfico usado para determinação da velocidade de infiltração. Chuva de 11 de março de 1939. Talhão de 21,80m.

Em seguida, os valores de  $D_s$  são adicionados na curva  $Q$ , nos pontos que antecedem os valores  $q$ , nos intervalos de tempo entre picos de chuva e enxurrada, e a curva  $Q + D_s$  é obtida. Pontos para uma tentativa da curva  $F + IA$  podem ser obtidos em seguida, tirando-se a diferença entre as curvas  $P$  e  $Q + D_s$  e colocando-se essas diferenças da linha base do gráfico para cima. Se esses pontos assim obtidos não caem na linha  $F + IA$ , ou próximo dela, uma nova tentativa de curva  $F + IA$  deve ser feita até que a nova curva dos valores de  $q$  e  $D_s$  apresentem uma curva  $F + IA$  satisfatória.

No exemplo, a relação exponencial mais provável da intensidade de enxurrada  $q$  para a quantidade de retenção no solo superficial,  $D_s$ , foi determinada pelo método dos quadrados mínimos (29), depois de tabular os correspondentes picos e vales de ambas as curvas. A equação resultante é  $q = 0,28 D_s^{2,31}$ , onde o valor do coeficiente de correlação é 0,99. Este valor está acima do valor 0,81, requerido para significância (37).

A relação exponencial da intensidade de enxurrada para a quantidade da retenção no solo superficial,  $D_s$ , para cada chuva e cada comprimento de rampa é dada no quadro 1. Em todos os casos esta relação foi significativa e em muitos casos foi altamente significativa. Isso verifica a posição da curva  $F$ . Estes dados foram usados para encontrar as curvas de velocidade de infiltração nas figuras 2 a 4 e indicam a íntima relação entre a retenção superficial e as intensidades de enxurrada.

Pela subtração de uma estimativa da abstração inicial da curva  $F + IA$ , a posição da curva  $F$  é agora estabelecida em áreas de excesso de chuva. O valor da abstração inicial é variável e pode oscilar entre 0,25 e 1,25 milímetros (18, 31). A abstração inicial pode ser calculada por  $IA = 0,2 S$ , em que  $S$  é a diferença potencial máxima entre  $P$  e  $Q$ , em milímetros, no momento do início da chuva (40). A posição da curva  $F$ , mais do que a sua inclinação, seria afetada por erros de estimativa da abstração inicial, pois que esta quantidade é obtida no começo das chuvas, e por conseguinte o valor derivado não afetaria a posição da curva de velocidade de infiltração.

A posição da curva de velocidade de infiltração pode ser conseguida colocando os valores de  $f$  determinados pela inclinação da curva  $F$ .

Uma dificuldade que pode ser encontrada ao usar este método gráfico para a análise é que pequenos erros na inclinação da curva de massa de infiltração podem causar erros relativamente grandes na velocidade de infiltração determinada. Entretanto, é inteiramente possível que as velocidades de infiltração assim determinadas sejam tão seguras como aquelas determinadas dos mesmos dados, mas por outros métodos.

QUADRO 1. — Relação exponencial da intensidade de enxurrada  $q$ , para a quantidade de retenção na superfície  $D_a$ , para cada chuva e cada comprimento de rampa

Data da chuva	Comprimento de rampa	Valores de $\alpha$ e $n$ na equação $q = a D_a^n$		Coeficiente de correlação $r$	Significância $P$
		$\alpha$	$n$		
28-8-1938	10,90	4,58	2,23	0,98	<0,01
	21,80	3,27	2,98	0,99	<0,01
	43,60	3,15	2,14	0,99	<0,01
11-3-1939	10,90	0,18	1,68	0,98	<0,01
	21,80	0,28	2,31	0,99	<0,01
	43,60	6,73	1,29	0,99	<0,01
8-6-1939	10,90	5,26	1,82	0,99	<0,01
	21,80	5,21	1,40	0,99	<0,01
	43,60	0,08	3,35	0,98	<0,05
27-7-1940	10,90	7,03	1,22	0,96	<0,01
	21,80	5,51	1,46	0,99	<0,01
	43,60	4,44	0,73	0,99	<0,01
27-8-1940	10,90	12,27	1,70	0,99	<0,01
	21,80	15,07	0,95	0,99	<0,01
	43,60	0,01	4,15	0,97	<0,05
2-6-1941	10,90	2,82	1,26	0,96	<0,01
	(*)21,80				
	43,60	2,60	1,43	0,95	<0,05
14-9-1941	10,90	23,96	0,58	0,97	<0,01
	(*)21,80				
	43,60	9,22	0,26	0,99	<0,01
4-10-1941	10,90	4,46	1,46	0,99	<0,01
	21,80	4,29	1,28	0,98	<0,05
	43,60	9,15	1,17	0,98	<0,05
21-10-1941	10,90	11,79	1,09	0,99	<0,01
	21,80	8,93	0,76	0,99	<0,01
	43,60	10,95	1,07	0,99	<0,01
20-6-1942	10,90	24,28	0,89	0,94	<0,05
	21,80	0,001	2,22	0,99	<0,01
	43,60	10,71	0,83	0,99	<0,01

\*) Não registrado

## 4 — RESULTADOS

### 4.1 — RESULTADOS GERAIS

As curvas de velocidade de infiltração foram determinadas pelo método gráfico, para 10 chuvas selecionadas de um total de 82 que ocorreram, com apreciável enxurrada, durante um período de cinco anos. As 10 chuvas foram selecionadas com base nos seguintes fatores: a) longa duração; b) alta intensidade; c) diferentes estações do ano. As velocidades de infiltração para os talhões de comprimento de rampa foram determinadas para cada chuva. Oito dessas chuvas são do tipo definido em 3.5 como **A**, uma é do tipo **B** e outra do tipo **C**.

Curvas de massa de infiltração e velocidade de infiltração para cada chuva e para os três comprimentos de rampa foram desenhadas com as correspondentes massas de chuva, e são apresentadas nas figuras 2 a 4.

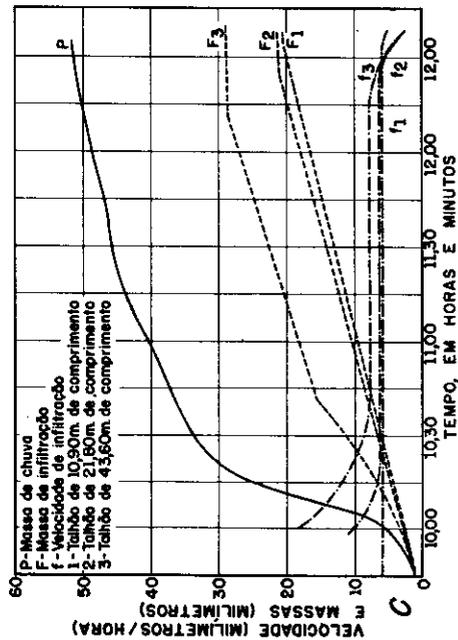
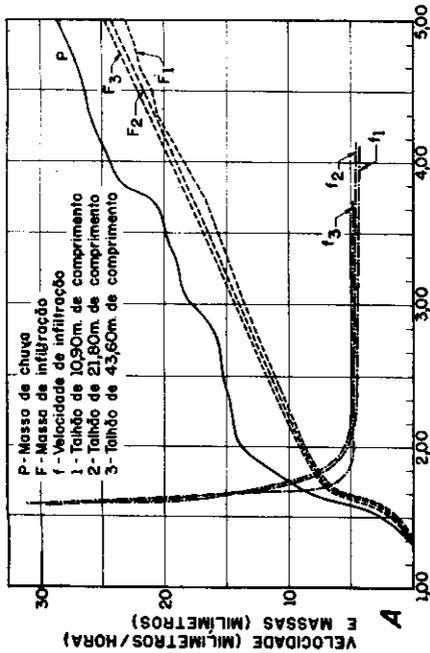
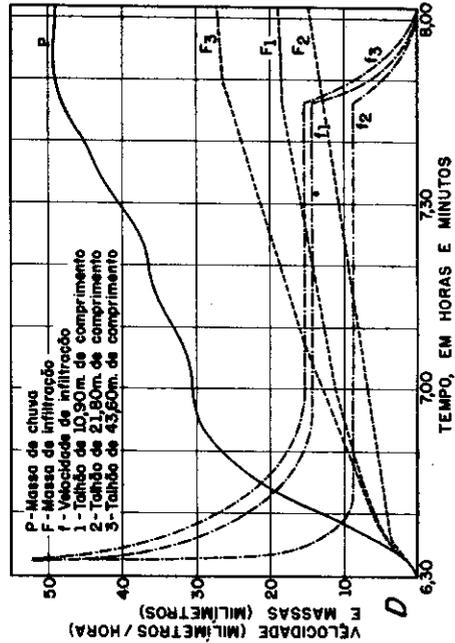
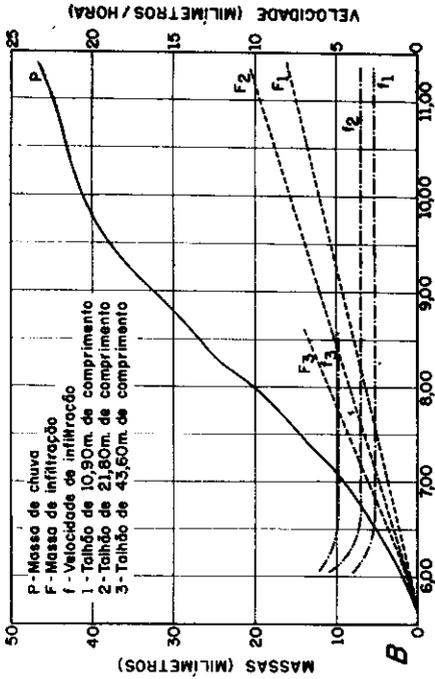


FIGURA 2. — Massa de chuva, massa de infiltração e velocidade de infiltração nos três talhões de comprimento de rampa. A — chuva de 28 de agosto de 1938; B — chuva de 11 de março de 1939; C — chuva de 8 de junho de 1939; D — chuva de 27 de julho de 1940.

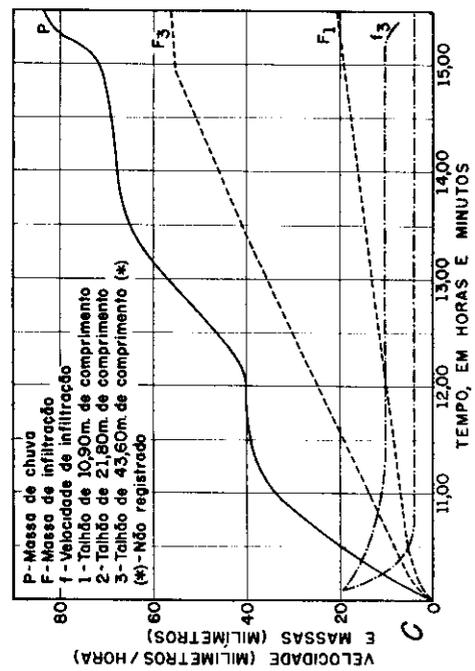
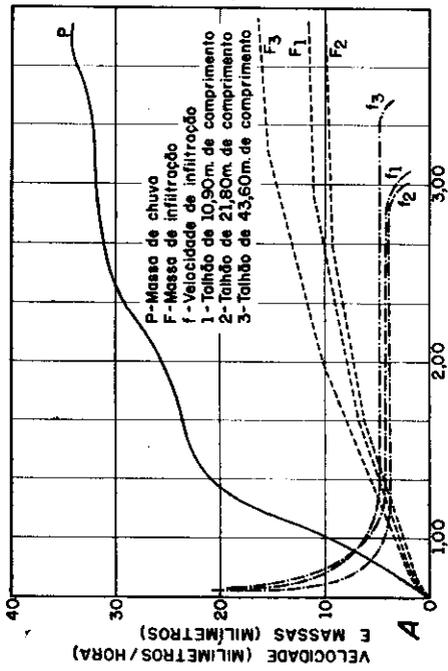
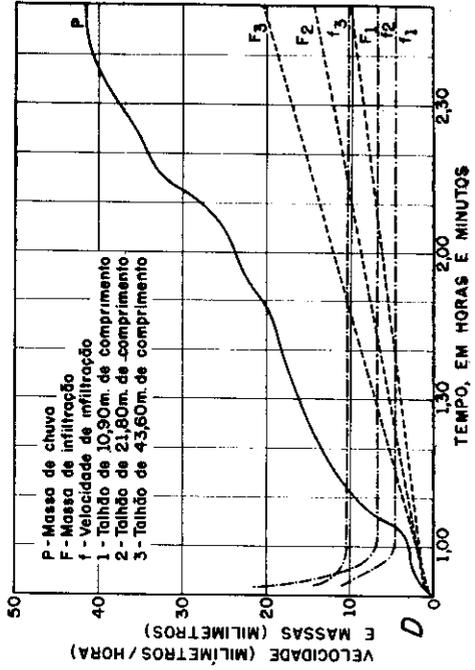
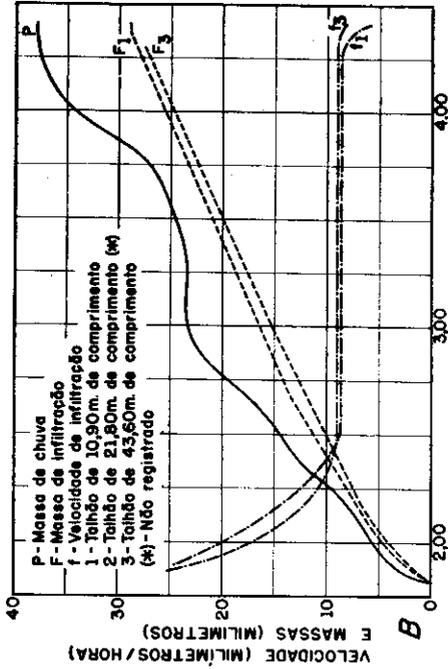


FIGURA 3. — Massa de chuva, massa de infiltração e velocidade de infiltração nos três talhões de comprimento de rampa: A — chuva de 27 de agosto de 1940; B — chuva de 2 de junho de 1941; C — chuva de 14 de setembro de 1941; D — chuva de 4 de outubro de 1941.

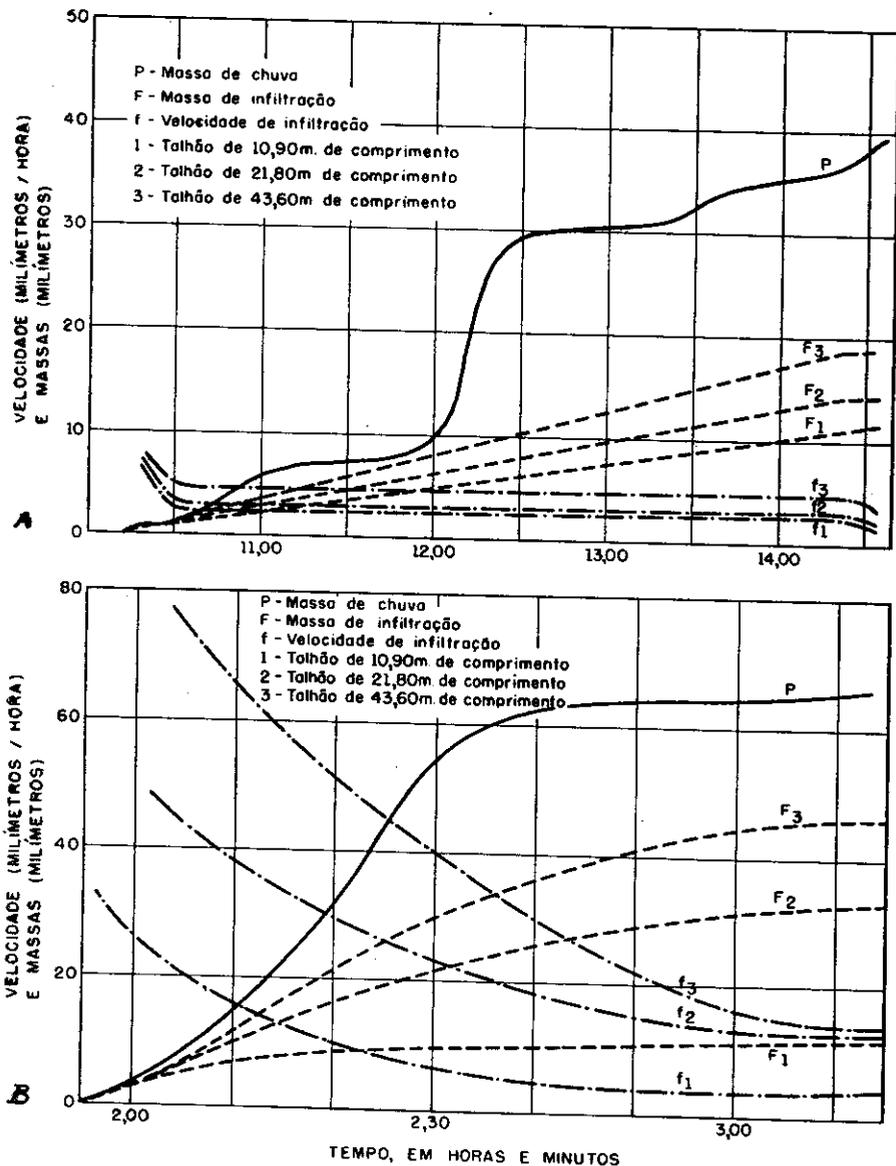


FIGURA 4. — Massa de chuva, massa de infiltração e velocidade de infiltração nos três talhões de comprimento de rampa: A — chuva de 21 de outubro de 1941; B — chuva de 20 de junho de 1942.

A velocidade de infiltração nos vários intervalos de tempo depois que a chuva iniciou, e determinada da análise gráfica, é apresentada no quadro 2.



A velocidade de infiltração inicial no fim de 10 minutos depois de começada a chuva foi maior na chuva de 20 de junho de 1942. As velocidades de infiltração foram 27,4, 43,9 e 80,5 mm/h nos talhões com comprimentos de rampa de 10,90, 21,80 e 43,60 metros, respectivamente. Por outro lado a velocidade de infiltração inicial foi a menor durante a chuva de 11 de março de 1939 e de 4,8, 8,4 e 6,6 mm/h para os comprimentos de rampa de 10,90, 21,80 e 43,60 m, respectivamente. A média da velocidade de infiltração inicial para tôdas as chuvas e todos os comprimentos de rampa foi de 20,1 mm/h.

A velocidade de infiltração final variou de 15,2 a 2,5 mm/h quando tôdas as chuvas e todos os comprimentos de rampa foram considerados. A média da velocidade de infiltração final foi de 5,3 mm/h.

Com exceção das chuvas de 11 de março de 1939, 27 de julho de 1940 e 27 de agosto de 1940, a massa de infiltração aumentou com o aumento do comprimento de rampa. Como a infiltração é essencialmente a diferença entre a massa de chuva e a massa de enxurrada, êsses resultados estão em concordância com os dados de enxurrada obtidos nos talhões de vários comprimentos de rampa dos Estados Unidos (7, 25, 38) assim como os do Brasil (19), que mostram que a enxurrada diminui com o aumento do comprimento de rampa. Inversamente, a infiltração aumenta com o aumento do comprimento de rampa.

A figura 5 apresenta a curva de infiltração, calculada da média de tôdas as velocidades de infiltração para todos os comprimentos de rampa. Êstes dados aparecem no quadro 2.

A equação

$$f = 5,35 + 25,89 e^{-0,056t}$$

que é da mesma forma da equação desenvolvida por Horton, ajusta-se bem à curva calculada dos valores apresentados, cujos detalhes do cálculo são dados no Apêndice. Na equação acima  $f$  é a velocidade de infiltração, em mm/h. O símbolo  $e$  é a base dos logarítmos naturais com o valor aproximado de 2,718, o valor 0,056 é uma constante, e  $t$  é o tempo, em minutos, decorrido desde o início da chuva. A velocidade constante ou o valor da velocidade de infiltração para o qual a curva fica assintótica com o tempo é 5,35. O valor obtido por  $f_0 - f_0$ , ou o valor inicial de infiltração menos o valor constante é 25,89.

Êste valor de 5,35 mm/h para a média da velocidade de infiltração final obtida sob chuva natural, é um pouco baixo quando comparado com os resultados obtidos de condições artificiais tais como a de simuladores de chuvas. Adams (1) usando um tipo diferente de simulador de chuva

encontrou que a média da velocidade de infiltração final no solo "Marshall silt loam" era de 7,11 mm/h. Brakensiek (6), trabalhando com condições artificiais (e em solos de textura um pouco mais grossa), encontrou uma média de velocidade de infiltração final de 13,72 a 17,78 mm/h, quando o API variou de 1,2 a 0,0, respectivamente.

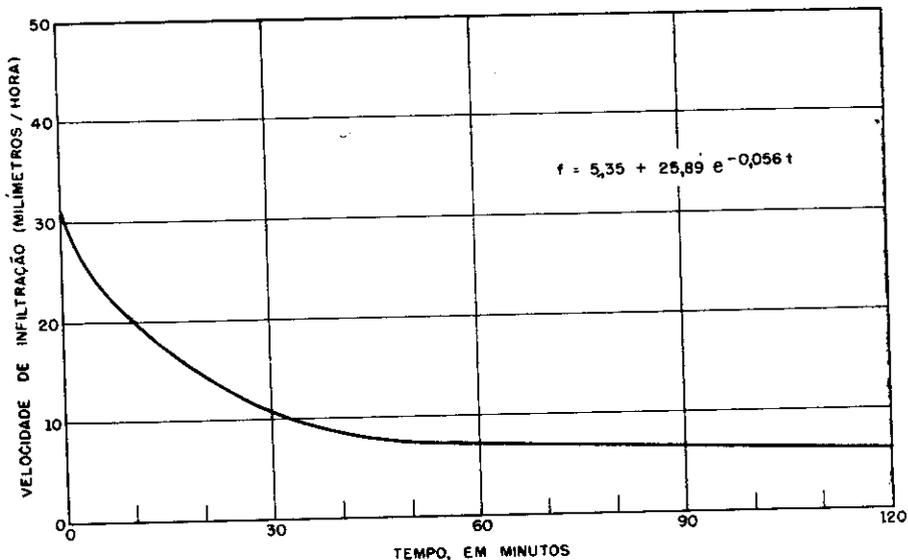


FIGURA 5. — Curva da média da velocidade de infiltração para os três comprimentos de rampa, em dez chuvas.

#### 4.2 — EFEITO DO COMPRIMENTO DE RAMPA

As determinações da infiltração nos talhões de 21,80 m de comprimento de rampa são baseadas em oito chuvas. Em todos os casos, entretanto, suficientes chuvas foram analisadas de tal modo que alguma tentativa de conclusão, referente ao efeito do comprimento de rampa, pôde ser tirada.

Como é apresentado no quadro 2, as médias de velocidades de infiltração são 15,57, 19,97 e 24,84 mm/h nos comprimentos de rampa de 10,90, 21,80 e 43,60 m, respectivamente. Por isso, parece que algum aumento na infiltração inicial e no total da infiltração decorreu do aumento do comprimento de rampa.

#### 4.3 — EFEITO DA ÉPOCA DO ANO

A velocidade de infiltração final, nas várias épocas do ano, dos talhões com vários comprimentos de rampa é apresentada na figura 6. Nesta

figura a velocidade de infiltração na época do ano é dada como pontos e uma curva melhor ajustada foi traçada entre os pontos. Evidentemente os pontos são muito variados e os dados muito escassos para uma correlação precisa. Entretanto, uma interessante relação parece existir. A velocidade de infiltração final parece aumentar até junho e julho e em seguida diminuir um pouco bruscamente, durante agosto e setembro.

Provavelmente a alta velocidade de infiltração durante junho e julho, quando comparada com as estações da primavera e outono, é devida ao aumento da cobertura vegetal que protege a superfície do solo contra o impacto da chuva, dos cultivos mecânicos que quebram a crosta do solo e uma mais alta temperatura do solo e da água.

Êstes resultados estão em concordância com aquêles encontrados por Borst e outros (5).

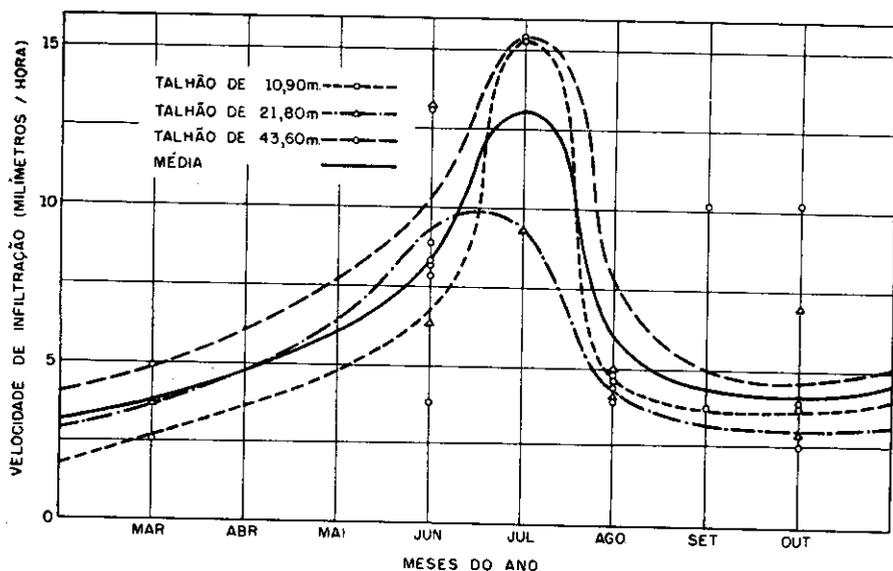


FIGURA 6. — Influência da época do ano na velocidade de infiltração.

#### 4.4 — EFEITO DA UMIDADE ANTECEDENTE

É sabido que a umidade do solo no momento do início de uma chuva influencia a velocidade com que a água entra no solo (2, 29, 39). Entretanto, geralmente, valores exatos da umidade do solo não são disponíveis e assim numerosas tentativas têm sido feitas para relacionar a chuva antecedente com a velocidade de infiltração (13). Brakensiek (6) acredita num Índice de Precipitação Antecedente, API, que pode realmente ser mais

intimamente relacionado com a velocidade de infiltração do que os valores usuais de umidade do solo dos 15 a 30 cm de profundidade, tal que o **API** pode dar um melhor índice de umidade nos primeiros centímetros do solo. Em adição, um **API** pode dar alguma medida de como a superfície do solo foi batida pela ação da chuva.

Neste estudo o Índice de Precipitação Antecedente foi calculado da fórmula

$$\text{API} = \sum_{i=1}^7 (0,8)^i I_i$$

onde  $I_i$  é a chuva total no  $i^{\text{o}}$  dia do período antecedente (6).

O **API** das 10 chuvas estudadas nesta tese é dado no quadro 3.

QUADRO 3. — Índice de Precipitação Antecedente **API**, das dez chuvas mais intensas na Estação Experimental de Conservação do Solo, em Clarinda, Iowa, durante o período de 1938 a 1942, inclusive

DATA DA CHUVA	A P I
28 de agosto de 1938	0,00
11 de março de 1939	5,08
8 de junho de 1939	16,74
27 de julho de 1940	26,01
27 de agosto de 1940	36,19
2 de junho de 1941	4,06
14 de setembro de 1941	15,26
4 de outubro de 1941	13,44
21 de outubro de 1941	16,33
20 de junho de 1942	8,88

Numerosas tentativas foram feitas para relacionar **API**, com significação, com a velocidade de infiltração. Dessas, a relação entre **API** e a massa de infiltração, **F**, em por cento da massa de chuva, **P**, parece ser a melhor. Os coeficientes de correlação, sua significância e os coeficientes de regressão desta correlação nos vários intervalos de tempo, depois do início da chuva, são dados no quadro 4.

Neste estudo as médias de velocidade de infiltração para os três comprimentos de rampa foram usadas para cada chuva.

Como mostra o quadro 4 a relação entre **API** e **F** em por cento de **P** é estatisticamente significativa em todos os tempos depois do início da chuva, com exceção do de 10 minutos.

A relação entre **API** e **f** juntamente com os valores estatísticos são dados no quadro 5. Neste caso a probabilidade de significância foi muito baixa. Realmente, quando se considera a natureza de uma curva de infiltração deve-se esperar uma relação muito íntima entre **API** e **f**, no início

da chuva. Entretanto, como a curva de infiltração torna-se assintótica com o tempo, nenhuma relação seria esperada.

QUADRO 4. — Relação entre o Índice de Precipitação Antecedente **API**, e a massa de infiltração **F**, em por cento da massa de chuva **P**

Tempo em minutos, depois de começada a chuva	Coeficiente de Correlação r	Significância P	Coeficientes de regressão	
			a	b
10	- 0,325	N. S. < 0,05 < 0,01 < 0,01 < 0,05 < 0,05 < 0,05 < 0,05 < 0,05 < 0,05 < 0,05		
15	- 0,704			
20	- 0,802		16,1057	- 0,2630
30	- 0,787		18,3642	- 0,3670
45	- 0,739		15,7429	- 0,3647
60	- 0,759		16,0477	- 0,3324
90	- 0,652		15,8877	- 0,2933
120	- 0,689		17,5208	- 0,3346
			17,0231	- 0,3343

Ainda que fôsse observado que os dados eram um pouco frágeis e que a velocidade de infiltração inicial não era intimamente relacionada com **f**, a relação entre a velocidade de infiltração e o tempo nos vários **API** é dada na figura 7. Para obter os valores que foram usados na figura, o seguinte processo foi utilizado. O **API** para cada chuva foi colocado contra a média de **f**, de todos os comprimentos de rampa, nos vários tempos depois de iniciada a chuva, e as linhas de regressão foram calculadas. Estas equações de regressão são dadas no quadro 5. Para obter os pontos na figura 7 os valores de **f** para uma série de **API** escolhidos foram lidos para um dado período de tempo. Pontos semelhantes puderam ser assim obtidos para outros períodos de tempo e finalmente uma linha bem ajustada foi traçada através dos pontos de um dado **API**. As curvas apresentadas na figura 7 mostram que a velocidade de infiltração de um baixo **API** tem um **f** inicial maior do que os de mais alto **API**. Entretanto, com o passar do tempo a curva de velocidade de infiltração fica menos diferente e as curvas

QUADRO 5. — Relação entre o Índice de Precipitação Antecedente **API**, e a velocidade de infiltração **f**

Tempo em minutos, depois de começada a chuva	Coeficiente de Correlação r	Significância P	Coeficientes de regressão	
			a	b
10	- 0,275	< 0,40 < 0,02 < 0,50 < 0,70 < 0,90 < 0,90		
15	- 0,449			
20	- 0,220		24,7853	- 0,3360
30	- 0,100		21,4198	- 0,3085
45	- 0,031		16,5887	- 0,1833
60	0,022		11,2700	- 0,0627
			8,5014	- 0,0218
			7,0663	0,0073

convergem no fim de 60 minutos. As curvas que aparecem na figura 7 têm, no geral, aparência semelhante com àquelas dadas por Brakensiek (6) para a velocidade de infiltração feita sob condições de chuva artificial.

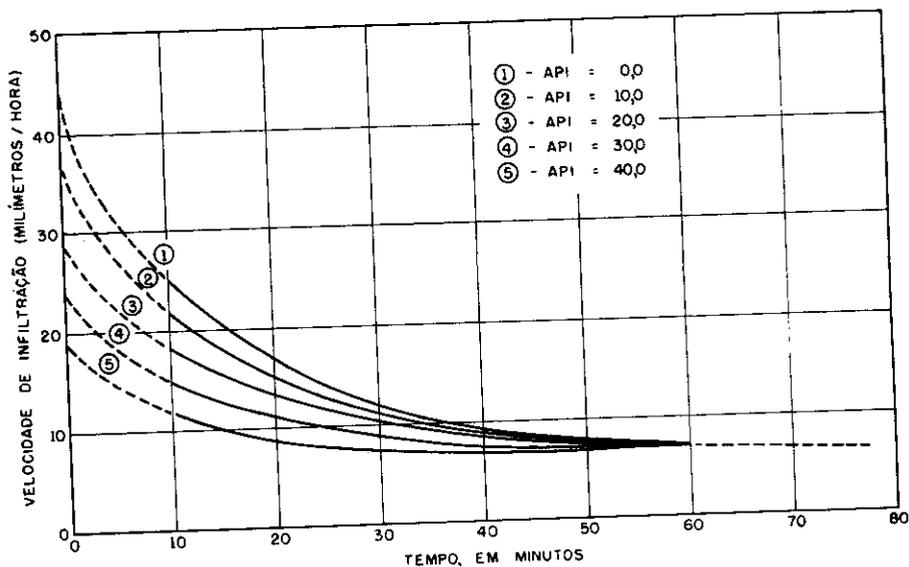


FIGURA 7. — Efeito do Índice de Precipitação Antecedente, API, na velocidade de infiltração.

## 5 — CONCLUSÕES

a) Em geral, a massa de infiltração aumentou com o aumento do comprimento de rampa.

b) A média da velocidade de infiltração inicial para tôdas as chuvas e todos os comprimentos de rampa foi de 20,14 mm/h e a velocidade de infiltração final foi de 5,35 mm/h. A velocidade de infiltração final variou com as chuvas e os comprimentos de rampa de 15,24 a 2,54 mm/h.

c) A curva média da velocidade de infiltração calculada da média de tôdas as chuvas e todos os comprimentos de rampa foi expressa pela equação

$$f = 5,35 + 25,89 e^{-0,056t}$$

Esta equação é do mesmo tipo daquela de Horton (16).

d) A velocidade de infiltração foi levemente influenciada pelo aumento do comprimento de rampa. A média da velocidade de infiltração final foi um pouco maior no comprimento de rampa de 43,60 que no de 10,90 m.

e) Ainda que os dados não sejam conclusivos, uma interessante relação parece existir entre a velocidade de infiltração final e a estação do ano. A velocidade de infiltração final parece crescer em junho e julho e em seguida decrescer um pouco bruscamente durante agosto e setembro. Êsses resultados estão em concordância com aqueles encontrados por Borst e outros (5).

f) Uma tentativa foi feita para relacionar o Índice de Precipitação Antecedente com a velocidade de infiltração. Os Índices de Precipitação Antecedente são usados como expressões de umidade do solo. A relação entre API e massa de infiltração como porcentagem da chuva total pareceu ser o melhor dos vários testados. Curvas foram preparadas apresentando a relação entre API e a velocidade de infiltração nos vários tempos depois que a chuva começou. A velocidade de infiltração é maior, quando diminui o API, no início da chuva. Depois de 60 minutos de excesso de chuva, entretanto, as curvas de velocidade de infiltração, para todos API, convergem.

## 6 — APÊNDICE

### DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DA CURVA DE VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO

A determinação da equação que se ajusta à curva da velocidade de infiltração da figura 5, pelos dados do quadro 2, foi calculada do seguinte modo:

$$\text{Modêlo: } f = k_0 + k_1 e^{-k_2 t}$$

.I) Se  $t \rightarrow \infty$ , então  $e^{-k_2 t} \rightarrow 0$ , portanto,  $f_\infty = k_0 = 5,35$

II) Se  $t = 0$ , então  $e^{-k_2 t} = 1$ , portanto,  $f_0 = k_0 + k_1 = 31,24$

$$k_1 = f_0 - k_0 = 31,24 - 5,35 = 25,89$$

$$f = 5,35 + 25,89 e^{-k_2 t} \quad (1)$$

$$g = \frac{f - 5,35}{25,89} = e^{-k_2 t} \quad g = e^{-k_2 t} \log_{10} g = -0,4343 k_2 t$$

Se,

$$-0,4343 k_2 = k'_2; \quad \log_{10} g = k'_2 t$$

$$\frac{\log_{10} g}{t} = k'_2 \quad g_{t=10} = \frac{20,14 - 5,35}{25,89} = 0,5711$$

$$\log_{10} 0,5711 = \bar{1},7567 = -0,2433; \quad k'_2 = \frac{-0,2433}{10} = -0,02433$$

$$-0,02433 = -0,4343 k_2$$

$k_2 = -0,056$ , que, substituindo na equação (1), resultará

$$f = 5,35 + 25,89 e^{-0,056 t}$$

A comparação dos dados de velocidade de infiltração com os obtidos pela equação é dada na tabela seguinte.

*Comparação da velocidade de infiltração  $f$ , com os valores obtidos pela equação*

Tempo, depois de começada a chuva	Velocidade de infiltração	
	Calculada	Observada
<i>min.</i>	<i>mm/h</i>	<i>mm/h</i>
0	31,24	31,24
10	20,12	20,14
20	13,80	13,97
30	10,18	10,28
40	8,11	8,64
50	6,92	7,67
60	6,25	7,09
70	5,86	6,83
80	5,64	6,70
90	5,52	6,60
100	5,45	5,35
110	5,40	5,35
120	5,38	5,35

#### DETERMINATION OF INFILTRATION RATES FROM RAINFALL AND RUNOFF RECORDS

##### SUMMARY

The Soil Conservation Experiment Station located near Clarinda, Iowa, was established in 1931 to study erosion problems on Marshall silt loam. One of the original experiment started in 1932 contained plots comparing slope lengths of 36.3, 72.6 and 145.2 feet. These plots were 6 feet wide with an average land slope of 9 percent. The plots were planted to continuous corn. Originally provision was made only for measurement of total runoff and erosion. However, during the years 1938 to 1942, devices were installed for measurement of rates of runoff.

Using rainfall intensity rates and runoff rate measurements, infiltration rates were determined by the graphical method of Sharp and Holtan for 10 of the largest storms selected from a total of 82 storms, with appreciable runoff, that occurred during the 5-year period. The ten storms were selected on the basis of long duration, high intensity and different times of the year. On the basis of this study the following conclusions were drawn.

- a) In general, mass infiltration increased with increased slope length;

b) The average initial infiltration rate for all storms and all slope lengths was 0.79 inch per hour and the final infiltration rate was 0.21 inch per hour. The final infiltration rate varied with storms and slope lengths from 0.60 to 0.10 inch per hour.

c) The average infiltration rate curve calculated from the mean of all curves for all storms and all slope lengths was expressed by the equation  $f = 0.211 + 1.019 e^{-0.065t}$ . This equation is in the same form as that of Horton.

d) The infiltration rate was influenced slightly by increasing the slope length. The mean final infiltration rate was slightly greater from the 145.2 feet length slope than from 36.3 feet slope length.

e) Although the data are not conclusive, an interesting relationship appears to exist between the final infiltration rate and the season of the year. Final infiltration rate appears to increase up to June and July and then decrease rather sharply during August and September. The results are in agreement with those found by Borst et al.

f) An attempt was made to relate Antecedent Precipitation Index to infiltration rates. Antecedent Precipitation Indices are used as expression of the wetness of the soil. The relation between API and mass infiltration as percent of the total rainfall appeared to be the best of several tested. Curves have been prepared presenting the relationship between API and infiltration rate at various times after rainfall started. Infiltration rate is greater with decreasing API's at the start of a storm. After 60 minutes of excess rainfall, however, the infiltration rate curves for all API's converge.

#### LITERATURA CITADA

1. ADAMS, J. E. A rainfall simulator and the erodibility of some Iowa soils. Ames, Iowa, Iowa State College Library, 1956. [Tese, não publicada]
2. ANDREWS, R. G. Runoff estimates based on infiltration capacity, antecedent moisture conditions, and precipitations. *Agric. Engng, Michigan* 31:26-28. 1950.
3. BAYER, L. D. Soil physics. 2nd. ed., N. York, John Wiley and Sons, Inc., 1948. 398 p.
4. BEUTNER, E. L., GAEBE, R. R. & NORTON, R. E. Sprinkled plot runoff and infiltration experiments on Arizona desert soils. *Trans. Amer. geophys. Un.* 21:530-558. 1940.
5. BORST, H. L., MCCALL, A. G. & BELL, F. G. Investigations in erosion control and the reclamation of eroded land. Washington, D.C., U.S.A. Department of Agriculture, 1949. (Tech. Bul. 656)
6. BRAKENSIEK, D. L. Estimation of surface runoff volumes from agricultural watersheds by infiltration theory. Ames, Iowa, Iowa State College Library, 1955. [Tese, não publicada]
7. BROWNING, G. M., NORTON, R. A., MCCALL, A. G. & BELL, F. G. Investigation in erosion control and the reclamation of eroded land. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, 1948. (Tech. Bul. 959)
8. COOK, HOWARD L. The infiltration approach to the calculation of surface runoff. *Trans. Amer. geophys. Un.* 27:726-743. 1946.
9. DREIBELBIS, F. R. & HARROLD, L. L. The role of soil in the hydrologic cycle. *Trans. int. Cong. Soil Sci.* 5th. 3:371-375. 1954.

10. DULEY, F. L. & KELLEY, L. L. Effect of soil type, slope, and surface conditions on intake of water. Lincoln, Univ. of Nebraska, 1939. 16 p. (Res. Bul. 112)
11. FOSTER, E. E. Rainfall and runoff. N. York, Macmillan Co. 1948. 487p.
12. FREVERT, R. K., SCHWAB, G. O., EDMINSTER, T. W. & BARNES, K. K. Soil and water conservation engineering. N. York, John Wiley and Sons, Inc., 1955. 479p.
13. HORNER, W. W. Role of the land during flood periods. Trans. Amer. Soc. civ. Engrs 109:1269-1320. 1940.
14. HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Amer. geophys. Un. 14:446-460. 1933.
15. ————— Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. Trans. Amer. geophys. Un. 20:693-711. 1939.
16. ————— An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Proc. Soil Sci. Soc. Amer., Ann Arbor 5:399-417. 1940.
17. HOUK, I. E. Rainfall and runoff in the Miami Valley State of Ohio. Dayton, Ohio. Miami Conservancy District, 1931. (Tech. Rept.)
18. KIDDER, E. M. & HOLTAN, H. N. Application of a graphic method of analysis to hydrographs of runoff plots of various lengths. Trans. Amer. geophys. Un. 24:487-493. 1943.
19. MARQUES, J. Q. A., BERTONI, J. & GROHMANN, F. Determinação de perdas por erosão em São Paulo, de 1943 a 1953. Trabalho apresentado no II Congresso Panamericano de Agronomia. Piracicaba, São Paulo, março de 1954. 33p. [Mimeografado]
20. MEAD, D. W. Hydrology. N. York, McGraw-Hill Book Co. 1919. 647 p.
21. MEYER, A. F. The elements of hydrology. N. York, John Wiley and Sons, Inc., 1917. 522 p.
22. MUSGRAVE, G. W. The infiltration capacity of soils in relation to the control of surface runoff and erosion. J. Amer. Soc. Agron. 27:336-345. 1935.
23. ————— How much of the rain enters the soil? In U.S. Department of Agriculture Yearbook. Water. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, 1955. p. 151-159.
24. ————— & FREE, G. R. Some factors which modify the rate and total amount of infiltration of field soils. J. Amer. Soc. Agron. 28:727-739. 1936.
25. ————— & NORTON, R. A. Soil and water conservation investigations. Washington, D.C., U. S. Department of Agriculture, 1937. 182 p. (Tech. Bul. 558)
26. NEAL, J. H. The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion. Mo. agric. Exp. Sta., 1938. (Re. Bul. 280)
27. OSTLE, BERNARD, Statistics in research. Ames, Iowa, Iowa State College Press. 1954.
28. RIECKEN, F. F. & SMITH, G. D. Principal upland soils of Iowa. Iowa agric. Exp. Sta., 1949. [Mimeografado]
29. SCHIFF, L. & DREIBELBIS, F. R. Preliminary studies on soil permeability and its application. Trans. Amer. geophys. Un. 30:759-766. 1949.
30. SHARP, A. L. & HOLTAN, H. N. A graphical method of analysis of sprinkled-plot hydrographs. Trans. Amer. geophys. Un. 21:558-570. 1940.

31. SHARP, A. L. & HOLTAN, H. N. Extension of graphic methods of analysis of sprinkled-plot hydrographs to the analysis of hydrographs of control-plots and small homogeneous watersheds. *Trans. Amer. geophys. Un.* 23:578-593. 1942.
32. ————— & MUSGRAVE, G. W. Infiltration in relation to runoff on small watersheds. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, 1949. (SCS. TP-81)
33. SHERMAN, L. K. Determinations of infiltrations-rates from surface runoff. *Trans. Amer. geophys. Un.* 19:430-434. 1938.
34. ————— Comparisons of f-curves derived by the methods of Sharp and Holtan and Sherman and Meyer. *Trans. Amer. geophys. Un.* 24:465-467. 1943.
35. ————— & MAYER, L. C. Application of the infiltration-theory to engineering practice. *Trans. Amer. geophys. Un.* 22:666-677. 1941.
36. SIMONSEN, R. W., RIECKEN, F. F. & SMITH, G. D. Understanding Iowa soils. Dubuque, Iowa, Wm. C. Brown. Co. 1952.
37. SNEDECOR, G. W. Statistical methods. 5th ed. Ames, Iowa, Iowa State College Press. 1956. 534p.
38. THOMPSON, L. M. Soils and soil fertility. N. York, McGraw-Hill Book Co. 1952. 339p
39. TISDALL, A. L. Antecedent soil moisture and its relation to infiltration. *Aust. J. agric. Res.* 11:342-348. 1951.
40. U. S. Department of Agriculture, Engineering Division, Soil Conservation Service Hydrologic Guide. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, 1956 [Mimeografado]
41. WILM, H. G. Methods for the measurement of infiltration. *Trans. Amer. geophys. Un.* 22:678-686. 1941.
42. ZINGG, A. W. The determination of infiltration-rates on small agricultural watersheds. *Trans. Amer. geophys. Un.* 24:475-480. 1943.