

MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM PARCELA EXPERIMENTAL INSTALADA EM TALUDE DE CORTE

AUTOMATIC RUNOFF MONITORING ON EXPERIMENTAL PLOT INSTALLED IN CUT-SLOPE

Hugo Portocarrero¹, Aluísio Granato de Andrade², Tácio Mauro Pereira de Campos³

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Solos (Embrapa Solos), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

³ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Correspondência para: Hugo Portocarrero (hportocarrero@gmail.com)

doi: 10.12957/geouerj.2017.18523

Recebido em: 11 set. 2015 | Aceito em: 8 mai. 2017



RESUMO

O monitoramento do escoamento superficial constitui tema abordado em diversos estudos recentes, mas em parcelas experimentais as avaliações têm se limitado ao armazenamento das enxurradas em tanques visando à determinação do volume diário num procedimento trabalhoso. Neste trabalho foi desenvolvido sistema automatizado para monitoramento do escoamento superficial em parcela experimental mediante a instalação de calha Parshall instrumentada com transmissor de nível ultrassônico. O volume escoado passa pela calha e segue para a caixa coletora permitindo a execução das medições pelo método convencional. No experimento uma parcela com 11 m por 4 m foi instalada em um talude de corte com 60 m por 15 m e inclinação 66%. A vazão máxima instantânea no período avaliado foi de 8.35 m³/h em resposta a uma precipitação pluvial que chegou a 30.98mm/15min de intensidade. Os resultados comprovaram a eficiência do sistema, e mostraram que o volume escoado altera-se em poucos minutos respondendo às alterações na intensidade da precipitação. A deposição de sedimentos no sistema ocorreu, indicando a necessidade de manutenção periódica da calha após um período prolongado de chuvas intensas, porém não houve problemas na medição dos níveis no decorrer do período avaliado.

Palavras-chave: calha Parshall; transmissor de nível ultrassônico; escoamento superficial; monitoramento automatizado.

ABSTRACT

Surface runoff monitoring on cut-slopes has been an issue addressed in several recent studies, but in experimental plots assessments have been limited to the storage of runoff in tanks and measurement of daily volumes in a laborious and time consuming process. In this study an automatic system for monitoring runoff on an experimental plot was developed using a Parshall type weir instrumented with an ultrasonic level transmitter. The runoff volume passes through the weir and then is stored on tanks where measurements by the conventional method were conducted. A plot of 11 m by 4 m was installed in a cut slope (60 m x 15 m and slope 66%). The maximum instantaneous flow rate during the study period was 8.35m³/h, in response to a 30.98mm/15min intensity rainfall. The results proved the efficiency of the system, and showed that runoff volume will change in a few minutes responding to changes in rainfall intensities. Deposition of sediments occurred in the system, indicating the need for periodic maintenance of the weir after a prolonged period of heavy rainfall, but there were no problems in measuring the levels during the monitored period.

Keywords: Parshall type weir; ultrasonic level transmitter; runoff; automatic monitoring.

INTRODUÇÃO

O monitoramento do escoamento superficial em taludes de corte constitui um tema abordado em diversos estudos recentes (Babcock & McLaughlin, 2011; Fernandes et. al., 2009, entre outros), entretanto, em parcelas experimentais estas avaliações têm se limitado a mensurações com tanques ou recipientes de coleta, o que envolve o armazenamento das enxurradas visando à determinação do volume diário acumulado, num procedimento trabalhoso e demorado. Intepretações mais realistas da dinâmica do fenômeno do escoamento superficial mediante a utilização destes procedimentos são inviáveis devido ao caráter dinâmico da precipitação pluvial, fenômeno que o desencadeia.

Dentro desta problemática, estudos recentes têm se concentrado no desenvolvimento de sistemas automatizados para medição do escoamento superficial, preenchendo uma grande lacuna, na medida em que possibilitam compatibilizar os intervalos de coletas de dados das demais medições automatizadas já disponíveis para o monitoramento hidrossedimentológico em campo. Qu et. al. (2007) testaram um sistema automatizado para medição do escoamento superficial em um vertedor na presença de fluxos com elevada concentração de sedimentos. As maiores limitações encontradas se relacionaram à manutenção das condições de fluxo no corpo dos dispositivos, diante da dinâmica reológica, onde o assoreamento, obstrução e entupimento são problemas recorrentes. Segundo os autores, as condições hidrológicas presentes na grande maioria das parcelas experimentais de controle de erosão reportadas na literatura, como carga hidráulica e taxas de descarga muito inferiores às encontradas em canais fluviais, impõem limitações no que diz respeito à adaptação direta de dispositivos automatizados desenvolvidos para estes últimos.

Visando contornar estes problemas, Bonta (2008) realizou estudos na Bacia Hidrográfica Experimental do Norte dos Apalaches, expandindo a utilização de caixas de turbilhonamento e amostradores Coshocton para parcelas experimentais de controle de erosão, tendo sido possível mensurar o escoamento superficial e a erosão dos solos nas parcelas experimentais mediante a implantação de um aparato complexo.

Em parcelas instaladas em talude de corte chama a atenção a carga hidráulica, que é consideravelmente maior do que a encontrada em encostas e campos de cultivares, viabilizando

possivelmente a aplicação de dispositivos de medição de vazão em canal aberto. Tais dispositivos vêm sendo utilizados recentemente em situações semelhantes. Almeida et. al. (2012) avaliaram o impacto da recuperação de uma área de encosta degradada em relevo suave sobre as respostas hidrossedimentológicas em ambiente semiárido com a utilização de parcelas de controle de erosão instrumentadas com calhas Parshall. No experimento foram monitorados somente os níveis máximos alcançados e a duração dos eventos através de aferições manuais, mas o desempenho da calha se mostrou satisfatório indicando a possibilidade de sua adaptação em situações análogas.

No presente trabalho foi desenvolvido um sistema automatizado para o monitoramento do escoamento superficial em uma parcela experimental instalada em um talude de corte. O sistema foi montado mediante a instalação de uma calha Parshall instrumentada com um transmissor de nível ultrassônico, permitindo o monitoramento automatizado dos eventos de escoamento ocorridos na calha. O volume escoado passa pela calha e segue por um conduto para a caixa coletora a partir da qual foi utilizada a metodologia convencional padrão para medição do escoamento.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da Área Experimental e Clima Regional

O experimento foi conduzido dentro da área patrimonial do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Tom Jobim, localizado na Ilha do Governador, Rio de Janeiro, RJ, em um talude de corte com 60 m de largura e 15 m de comprimento de rampa e inclinação 66%. O local específico situa-se nas coordenadas 22°47'53"S, 43°13'16"O ao lado direito da pista de pouso e decolagem.

O clima regional é o Aw (Köppen), com uma estação seca definida, em geral de junho até o final de novembro. A área encontra-se inserida no contexto da Baía de Guanabara, na região da baixada, que se encontra quase sob domínio permanente da Massa Tropical Atlântica, particularmente exposta à influência do mar. Com temperaturas superiores a 22°C e umidade relativa do ar superior a 78% na

maior parte do ano, a área apresenta um pluviosidade média anual de 1200 mm, concentradas nos meses de verão e com precipitações podendo chegar a 200 mm/24hs.

Substrato Geológico e Cobertura Pedológica

O substrato geológico local se insere na Formação Macacú, correspondente aos depósitos sedimentares Terciários do Grupo Barreiras na região da Baía de Guanabara. Exposições da formação são localmente conhecidas como barreiros, por serem locais utilizados para extração de material terroso. Sua ocorrência na região é bastante significativa, jazendo em geral originalmente subjacente a capeamentos mais recentes e que dão origem a coberturas pedológicas. Sua abrangência inclui os municípios de Itaboraí, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, São Gonçalo e Rio de Janeiro.

A Formação Macacú é constituída de sequências deposicionais de camadas de poucos metros de espessura entrecruzadas de arenitos e argilitos com baixo grau de diagênese, sendo conhecida por apresentar sempre casos extremos de voçorocamentos, ravinamentos e degradação por processos erosivos, o que vem acarretando o entupimento das drenagens e obras de arte em taludes e no comprometimento da segurança de rodovias, ferrovias e aeroportos. As camadas de arenitos e argilitos foram caracterizadas neste trabalho utilizando metodologias aplicadas a solos uma vez que os materiais apresentam um comportamento hidrossedimentológico correspondente.

A cobertura pedológica original do local, formada a partir de capeamentos sobrejacentes aos depósitos terciários, é composta de Latossolo Amarelo Distrófico argissólico, foi completamente removida durante sua exploração como área de empréstimo para a construção do aeroporto. Encontram-se expostas na face do talude, devido a estes processos, duas camadas diferentes da formação Macacú, conforme será detalhado nos itens que seguem. Deste modo, a caracterização geotécnica e os ensaios de permeabilidade realizados para as camadas expostas, bem como a caracterização do material seco proveniente das enxurradas, seguiram os mesmos critérios e técnicas adotadas para solos. Os ensaios foram conduzidos individualmente em cada tipo de material presente no talude, sendo as propriedades

extrapoladas posteriormente para a parcela em função da área de exposição de cada material dentro da área delimitada por folhas de zinco.

Os ensaios de caracterização geotécnica seguiram as metodologias preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios de permeabilidade saturada foram executados *in situ* com uso do Permeâmetro de Guelph, que é um permeâmetro de carga constante que mede a condutividade hidráulica saturada ou permeabilidade saturada acima do lençol freático. O objetivo dos ensaios foi estimar a capacidade de infiltração na face do talude. O equipamento é composto de um cilindro de Mariotte que controla a carga constante de água dentro do furo de sondagem, em tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares. O ensaio consiste em estabelecer um fluxo de água de regime permanente em solos não saturados, através de furos de trado nos quais uma lâmina d'água, com pequena altura, é mantida constante.

Monitoramento da Precipitação Pluvial

Para a medição da precipitação pluvial foi utilizada uma estação micrometeorológica (Campbell SCI) instalada no topo do talude em um abrigo meteorológico. Os dados foram adquiridos em intervalos de 15 minutos, sendo aferido o volume de precipitação pluvial com três casas decimais de resolução (resolução de saída de 0.254mm, precisão 4% e faixa de medição de 0 a 500 mm). Outros parâmetros micrometeorológicos foram adquiridos através deste equipamento durante o período de monitoramento, entretanto estes não serão abordados neste trabalho.

Foi instalado também neste mesmo abrigo um pluviômetro tipo *Ville de Paris* visando a verificação e calibração dos dados das caixas coletoras e da estação (tanto a estação quanto o pluviômetro podem ser visualizados na Figura 1).



Figura 1. Estação meteorológica instalada no topo do talude de corte em abrigo meteorológico com o pluviômetro Ville de Paris ao fundo.

Instalação e Operação da Parcela Experimental

No talude de corte ao todo foram instaladas quatro parcelas experimentais, de 11 m por 4 m (44 m²), delimitadas com folhas de Zn no18, providas de sistemas de coleta com dois tanques de 1000L conectados por tubulação PVC e quarteador para redução do volume coletado na segunda caixa (fracionamento de 1/5). São apresentados neste estudo os resultados referentes a uma destas parcelas, uma vez que nas demais foram implantadas técnicas de bioengenharia e controle de erosão, minimizando as enxurradas nestas ultimas (Figura 2).



Figura 2. Parcela experimental (11x4m) instalada em talude de corte com 15m de rampa e inclinação 66%.

Na parcela instalada foi aplicada a metodologia padrão para medição do volume de enxurradas (efetuada neste estudo em intervalos de 24 horas), que foi tomada como controle do experimento. Isto foi possível graças à instalação de um sistema onde a enxurrada passa pelo vertedor seguindo posteriormente para os tanques de coleta convencionais (caixas d'água de 1000 litros), conforme será detalhado mais adiante. O monitoramento ocorreu entre os dias 4/2/2009 e 13/3/2009.

Caracterização das Enxurradas

O conhecimento das características dos sólidos presentes nas enxurradas é imprescindível para o desenvolvimento de sistemas automatizados mesmo quando as medições se restringem aos volumes, uma vez que, conforme já discutido, problemas de entupimento e obstrução são recorrentes. Com o objetivo de caracterizar os materiais presentes nas enxurradas coletadas na caixa d'água, foram conduzidas análises *in situ* para determinação do total da concentração de sólidos suspensos (SSC, *ASTM D3977-97*).

Para a medição foi utilizada a sonda multiparamétrica *SC-100* Instrutherm Ltda., que quando conectada ao medidor de pH (modelo *PH-1500* do mesmo fabricante) torna-o um medidor de concentração de sólidos suspensos. A sonda possui 22 mm de diâmetro x 120 mm de comprimento, sendo constituída por um eletrodo de haste de carbono de longa vida, permitindo a aquisição de dados de concentração de sólidos suspensos em duas faixas de concentração: de 132 a 1320 PPM, com resolução de 1 PPM e precisão de 3%; e de 1320 a 13.200 PPM, com resolução de 10 PPM e a mesma precisão.

As leituras foram todas realizadas após a homogeneização do material na caixa durante a coleta diária uma vez a cada dia em que foi coletado material para as medições pelo método convencional. Posteriormente, o material foi seco em estufa no laboratório para execução de análises de Distribuição Granulométrica e Densidade Relativa dos Grãos.

Adaptação da calha Parshall na parcela experimental

Para o registro automatizado do volume de escoamento superficial foi utilizada a Calha Parshall. A calha é um vertedor que funciona mediante estrangulamentos e ressaltos que estabelecem para uma determinada seção vertical a montante uma relação entre a vazão e a lâmina de fluido. O sistema foi desenvolvido pelo engenheiro Ralph L. Parshall em cooperação com o Departamento de Irrigação dos Estados Unidos na década de 1920, sendo considerado um modelo aprimorado da Calha de Venturi.

A Calha Parshall possui uma estrutura com paredes verticais com três partes: uma seção convergente, uma seção estrangulada (garganta) e uma seção divergente. O nível do fundo do canal na seção convergente deve ser mais alto do que o nível na seção divergente. A Seção Convergente tem por função reduzir e/ou adequar a velocidade do fluido em sua entrada, diminuindo a possibilidade de turbulências e aumentando a capacidade de precisão de mensuração do equipamento. Na garganta o líquido é submetido a uma concentração produzida pelo estreitamento das laterais e/ou pela elevação do fundo do canal. A Seção Divergente ou de Alargamento, posicionada na parte final do equipamento, tem por objetivo propiciar a normalização do fluxo do canal. As dimensões de projeto variam de acordo com o tamanho da calha, que é determinado de acordo com a largura da garganta (W). O estrangulamento existente após o trecho convergente produz um nível no líquido que é diretamente relacionado à vazão, ou seja, a partir das medições deste nível são obtidas leituras de vazão.

A norma vigente no Brasil para dimensionamento das Calhas Parshall é a NBR/ ISSO 9826:2008. Porém, tendo em vista que esta é relativamente nova, a grande maioria dos modelos existentes obedece à *ASTM 1941:1975*. O dimensionamento da Calha Parshall utilizada neste experimento foi feito visando cobrir eventos no maior espectro de intensidades possível, desde baixos valores. Deste modo optou-se pelo menor modelo existente, com $W = 1''$. No experimento foi utilizada a calha do fabricante Contech Ltda., que possui amplitude de medição de 0.4 a 20.41 m³/h. A mesma é fabricada em fibra de vidro e moldada em peça única. Com valores de n e K para largura de garganta $W = 1''$ de 1,550 e 217.29 mm obtêm-se a equação de descarga específica (m³/h) da Calha:

$$Q = 217.29 * (H)^{1.55} \quad [\text{Equação 1}]$$

Onde H é a altura da lâmina do fluido na seção convergente. As Calhas Parshall, como qualquer tipo de vertedor, apresentam tipicamente uma precisão de ± 2 a 4% (v.i.).

Registro automatizado do nível na calha Parshall

Para o registro automatizado dos níveis na calha Parshall foi instalado um transmissor de nível ultrassônico; a escolha deste se deu em função de seu princípio de funcionamento acústico, onde o parâmetro medido, que é o tempo de reflexão da onda, não é influenciado pela concentração de sedimentos no fluido. Atualmente, os medidores de nível mais utilizados em situações do gênero são de fato os ultrassônicos, devido à precisão ($\pm 0.25\%$ F.E.) e praticidade, pois, como o sensor não entra em contato direto com o fluido, não há problemas de incrustações.

Nos transmissores de nível ultrassônicos, uma onda ultrassônica é pulsada a uma frequência de 50 kHz da base do transdutor. A onda reflete contra o fluido e retorna ao transdutor. O microprocessador converte a velocidade de propagação do transdutor ao fluido e do retorno em distância entre o transmissor e o fluido, medindo oito pulsos por segundo. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o transmissor ultrassônico do modelo LU-20 5001, de fabricação nacional (Contech Ltda.). O modelo possui uma saída de corrente (4 a 20 mA), mede numa faixa de 0,1 a 5 metros com resolução de 3 mm com compensação automática de temperatura. A alimentação necessária é de 12 a 36 VDC.

Para a correta instalação do LU-20 foi importante verificar o seu campo de atuação para que o mesmo não entrasse em contato com as bordas da calha. O feixe possui um ângulo de abertura de em torno de 5° . A altura preconizada pelo fabricante para instalação dos LU-20 na Calha Parshall de 1" de W é de pelo menos 6" (150 mm), tendo sido necessário atentar para interferências com as paredes. O sensor foi instalado na seção convergente a uma distância de 2/3B. Para acoplar o transmissor LU-20 na Calha foi utilizado um suporte composto de quatro hastes de latão (178.5 mm de altura), fixadas em tirantes de alumínio (6.4 mm espessura), sustentando uma plataforma de PVC quadrada com 151 mm

de lado (228 cm^2) e 15 mm de espessura, onde foi feita uma rosca com $\Phi=51.4 \text{ mm}$ para a instalação do transmissor (detalhes na Figura 3).

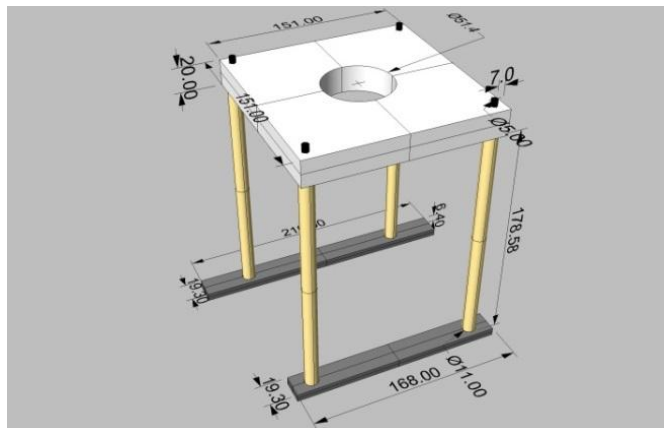


Figura 3. Suporte utilizado para o posicionamento do transmissor de nível LU-20 na calha Parshall.

Na parcela instalada foi aplicada a metodologia padrão para medição do volume de enxurradas (efetuada neste estudo em intervalos de 24 horas), que foi tomada como controle do experimento. Isto foi possível graças à instalação de um sistema onde a enxurrada passa pelo vertedor seguindo posteriormente para os tanques de coleta convencionais (caixas d'água de 1000 litros), conforme será detalhado mais adiante. O monitoramento ocorreu entre os dias 4/2/2009 e 13/3/2009.

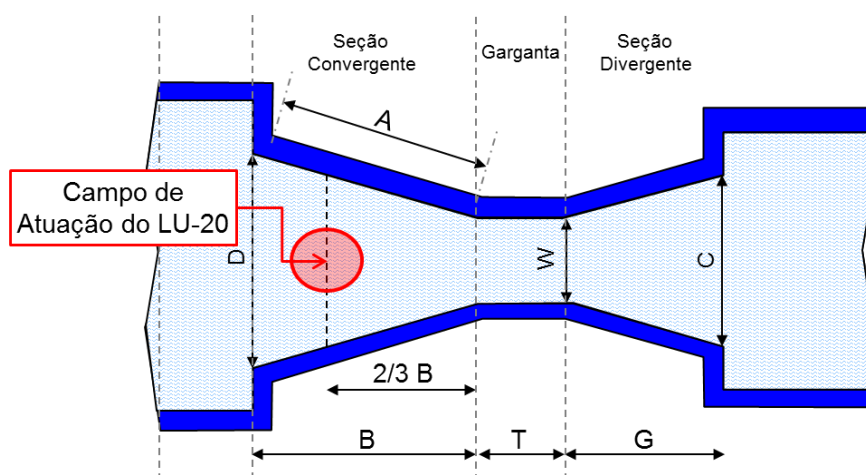


Figura 4. Campo de atuação do LU-20 de 50mm no piso da calha Parshall após a sua montagem junto ao suporte.

Para a obtenção dos dados do transmissor de nível foi utilizada uma estação hidrossedimentológica (modelo SL2000 E8C, Solar Ltda.), que foi adaptada visando fornecer em campo a alimentação de 9-

12 V necessária para o funcionamento do primeiro. No processo, o transmissor foi acoplado ao *Datalogger* da estação através de um módulo corrente, desenvolvido para este propósito (Figura 5).

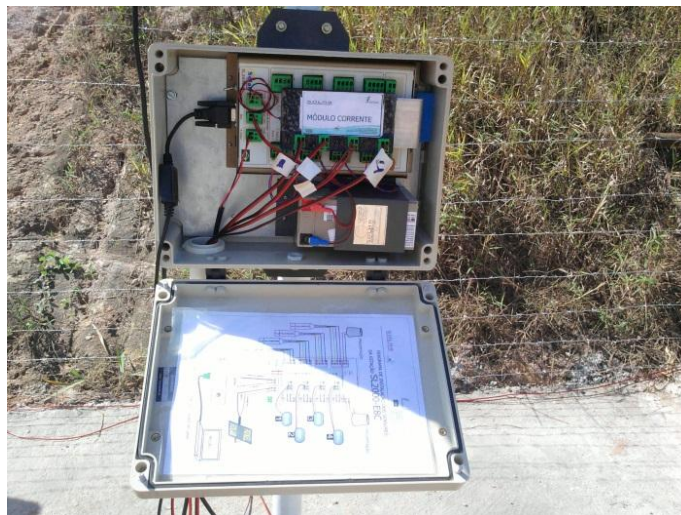


Figura 5. Painel da estação SL2000 E8C observando-se o módulo corrente fornecendo alimentação de 9-12 V necessária para o funcionamento do LU-20.

A estação foi instalada em um cercado localizado na base do talude com o objetivo de minimizar o comprimento dos fios. Visando adequar o sistema aos critérios estabelecidos na norma NBR/ ISSO 9826:2008 foi ainda necessário construir um canal de aproximação de 500 mm, sendo que o volume escoado nas calhas segue para as caixas coletoras através de um conduto projetado de forma a evitar a ocorrência de regime afogado (Figura 6 a Figura 8).



Figura 6. Visão frontal do dispositivo finalizado.



Figura 7. Nivelamento da calha com o LU-20 visando atingir os valores exatos dos registros obtidos em laboratório.



Figura 8. Visão superior do dispositivo finalizado, sendo possível observar o canal de aproximação de 500 mm entre a calha e a saída da parcela.

Para o monitoramento automatizado do escoamento superficial os dados de nível das calhas Parshall foram adquiridos através dos transmissores de nível ultrassônicos em intervalos de 1 minuto, sendo estes dados discutidos em conjunto com dados de precipitação pluvial obtidos em intervalos de 15 minutos. Foram discutidos quatro eventos de escoamento mensurados na calha durante o período de avaliação, nos dias 4/2, 8/2, 12/3 e 13/3. Foram gerados gráficos com a variabilidade da vazão instantânea em função da precipitação pluvial, e, com base nos dados de precipitação pluvial acumulada e vazão acumulada na calha foi possível gerar estimativas de balanços hídricos mediante a

interpretação de hidrogramas com a variabilidade do escoamento superficial e da precipitação acumulados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização Geotécnica e Hidráulica dos Materiais em Avaliação

A Figura 9 mostra a distribuição dos materiais expostos na face do talude dentro da área delimitada pela parcela experimental.

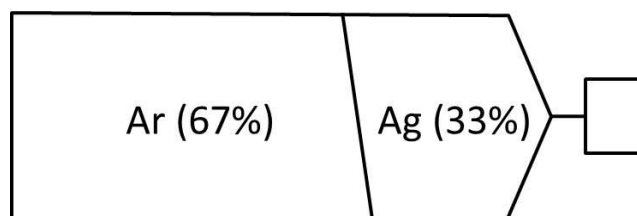


Figura 9. Distribuição dos diferentes materiais expostos (Ar – arenito; Ag – argilito) na face do talude dentro da área delimitada pela parcela experimental.

Conforme a Figura 9, a camada de arenito (Ar) ocupa a parte superior e média da parcela (67% da área total), enquanto a camada de argilito (Ag) na parte inferior ocupa 33% da parcela.

A Tabela 1 apresenta resultados das avaliações da distribuição granulométrica; densidade relativa dos grãos sólidos, massa específica seca e porosidade, individualizadas por material e valor médio para os materiais expostos na superfície na parcela.

	Pedr.	Areia	Silte	Argila	G_s	ρ_d	n
Ar	4.0	55.2	18.4	22.4	2.653	1.637	38.3
Ag	0.0	16.8	26.9	56.4	2.702	1.561	42.2

Tabela 1. Distribuição granulométrica (valores em percentagem de pedregulho (Pedr.), areia, silte e argila); Densidade relativa dos grãos sólidos (G_s), massa específica seca (ρ_d) e porosidade (n), individualizadas por material e valor médio para a parcela.

Os materiais que compõem o talude são bastante heterogêneos, acarretando em diferentes erodibilidades ao longo da face exposta da parcela. A camada que ocupa o terço superior e o médio do talude (Ar) apresenta 4% de pedregulhos, 55.2% de areia, 18.4% de silte e 22.4% de argila. A camada representativa do terço inferior (Ag) possui 16.8% de areia, 26.9% de silte e 56.4% de argila. A densidade relativa dos grãos sólidos varia entre 2.653 (Ar) e 2.702 (Ag), refletindo o maior percentual de quartzo existente no terço superior devido à textura mais arenosa. A massa específica seca varia entre 1.637 g/cm³ (Ar) a 1.561 g/cm³ (Ag), com um valor médio de 1.599 para a superfície exposta da parcela em avaliação considerando a distribuição percentual das camadas expostas no talude. A porosidade varia entre 38.3% (Ar) e 42.2% (Ar), com um valor médio de 40.3% considerando a distribuição percentual das camadas expostas no talude.

A permeabilidade saturada da face exposta do talude, obtida por meio dos ensaios com Permeâmetro de Guelph, foi de 1.04E-05 cm/s para a camada argilosa, e de 2.11E-04 cm/s para a camada arenosa. Se forem considerados os percentuais referentes à área exposta de cada camada dentro da parcela pode-se dizer que a parcela, como um todo, apresenta uma permeabilidade equivalente de 1.11E-04 cm/s, ou seja, uma capacidade de infiltração reduzida, favorecendo a ocorrência de fortes enxurradas em presença de chuvas intensas.

Os resultados das avaliações da concentração de sólidos suspensos nas enxurradas acumuladas na caixa coletora com a utilização da sonda multiparamétrica encontram-se na Tabela 2.

Dia	CSS (PPM)
4/2	490
8/2	430
13/3	1080

Tabela 2. resultado das avaliações da concentração de sólidos suspensos (CSS) encontrados nas enxurradas acumuladas nas caixas coletoras.

O valor médio da concentração de sólidos em suspensão para as enxurradas ao longo do período avaliado foi de 667 PPM, tendo havido uma oscilação muito pequena entre os dias 4/2 (490 PPM) e 8/2 (430 PPM). No dia 13/3 a concentração medida foi de 1080 PPM, sensivelmente maior que a ocorrida nos eventos anteriores. Isto se deve à maior intensidade e magnitude do evento, mas o importante nestes ensaios foi tentar delimitar a faixa de concentração de sólidos suspensos encontrada no material em avaliação, que no caso foi de 430 a 1080 PPM para o período de monitoramento.

Os dados das avaliações das enxurradas após a secagem do material sólido das enxurradas em estufa mostraram uma distribuição granulométrica com 30.9% de argila, 20% de silte e 49.1% de areia. A densidade relativa dos grãos é de 1.661. O material coletado nas enxurradas é argilo siltoso, tendo predominado a erosão do material argiloso.

Medições do Volume de Enxurradas pelo Método Convencional

Na Tabela 3 são detalhados os dados obtidos através da caixa coletora utilizando-se a metodologia convencional para determinação dos volumes de escoamento superficial. Os dados se encontram confrontados com a precipitação pluvial medida para os três dias em que houve registros de volumes de escoamento entre 4 de fevereiro e 13 de março de 2009.

Data	IM	P	ESx	ESx
d/m	mm/15min	mm/24hs		%
4/2	2.28	6.35	5.88	92.6
8/2	3.30	7.00	3.88	55.4
12/3	30.98	64.00	45.99	71.86

Tabela 3. Intensidade Máxima da Precipitação (IM), em mm/15min, Volume precipitado (P) em mm/24hs e Escoamento Superficial Acumulado na caixa coletora (ESx) em mm/24hs e em porcentagem.

Os resultados indicam para os dias 4 e 8 de fevereiro registros de eventos de escoamento resultantes de chuvas de menor intensidade, não tendo excedido 3.5 mm/15 mm, em relação ao dia 12 de março, no qual foi registrado um valor máximo de intensidade de 30.98 mm/15min. Os volumes totais precipitados foram proporcionais (6.35; 7.00 e 64.00mm, respectivamente).

O percentual do escoamento superficial acumulado na caixa coletora não teve relação direta com a intensidade das precipitações. No dia 4/2 o escoamento representou 92.6% do total precipitado, no dia 8/2 este percentual foi reduzido para 55.4, o que possivelmente aponta para a importância das condições de umidade antecedente como condicionantes deste processo.

O percentual escoado medido no dia 12/3 em relação ao total precipitado foi de 71.86, porém, como será discutido a seguir, este dado, resultado de avaliações em intervalos de 24 horas, é representativo de dois eventos de escoamento principais que ocorreram ao longo do período, com diferentes intensidades e envolvendo um volume de enxurradas consideravelmente maior em relação aos eventos anteriores.

Monitoramento Automatizado do Escoamento Superficial

Os dados gráficos mostrando a variabilidade da vazão instantânea na parcela experimental em função da precipitação pluvial durante os quatro eventos monitorados, nos dias 4/2, 8/2, 12/3 e 13/3 de 2009, quando foram registradas enxurradas, encontram-se nas Figura 10 a Figura 13. O dia 12 de março foi separado do dia 13 de março na discussão dos resultados do monitoramento automatizado, uma vez que, conforme será discutido, as precipitações, medidas como referentes ao dia 12 pelo método convencional (em intervalos de 24 horas) ocorreram mais precisamente em dois momentos durante a noite: a partir de 18:51 do dia 12 de março e a partir de 2:29 do dia 13 de março.

Com base na interpretação dos dados obtidos através destes gráficos foi gerada a Tabela 4, que mostra resultados analíticos obtidos com o monitoramento da precipitação pluvial. São dispostos em ordem dados da precipitação pluvial: início, final e pico da precipitação, duração da chuva, precipitação

acumulada, intensidade máxima da precipitação. Foi também gerada a Tabela 5, que mostra resultados analíticos obtidos com o monitoramento da calha juntamente com o transmissor de nível LU-20. São dispostos em ordem dados de duração do evento de escoamento e pico de vazão na calha, nível máximo na calha, vazão máxima na calha, análise do padrão hidrológico, precipitação no pico de vazão da calha e escoamento superficial máximo na calha.

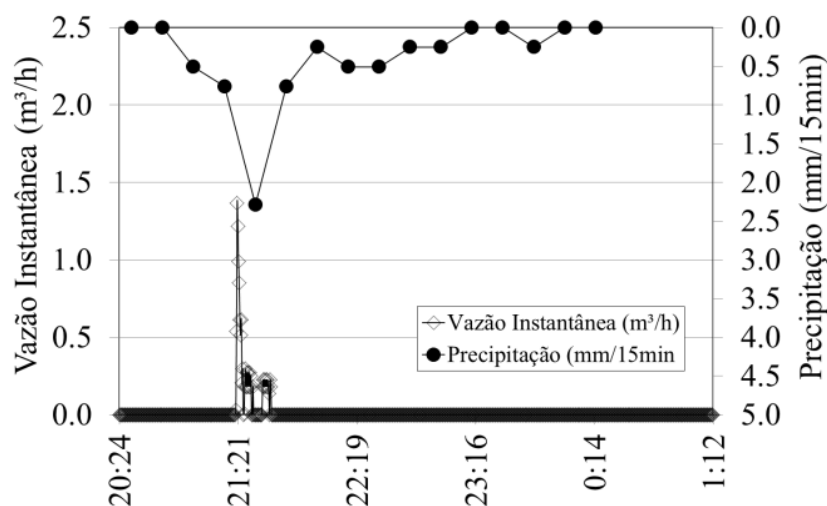


Figura 10. Vazão instantânea (m^3/h) e precipitação pluvial ($\text{mm}/15\text{min}$) durante o dia 4/2.

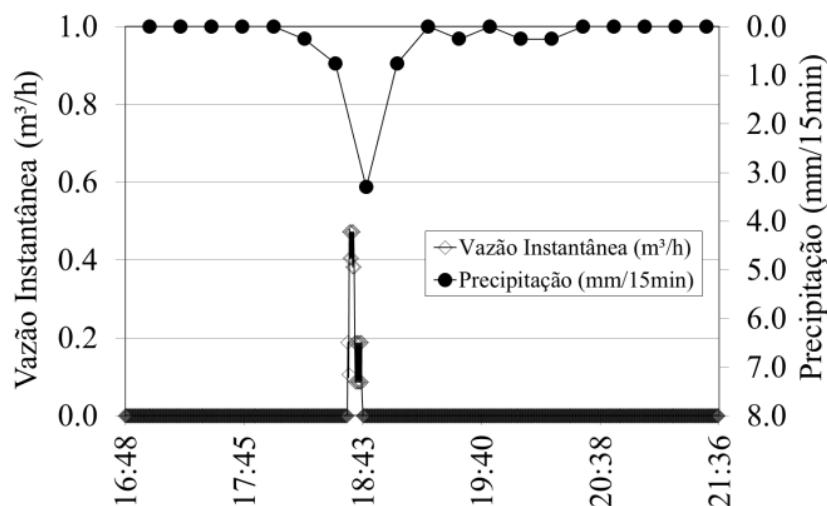


Figura 11. Vazão instantânea (m^3/h) e precipitação pluvial ($\text{mm}/15\text{min}$) durante o dia 8/2.

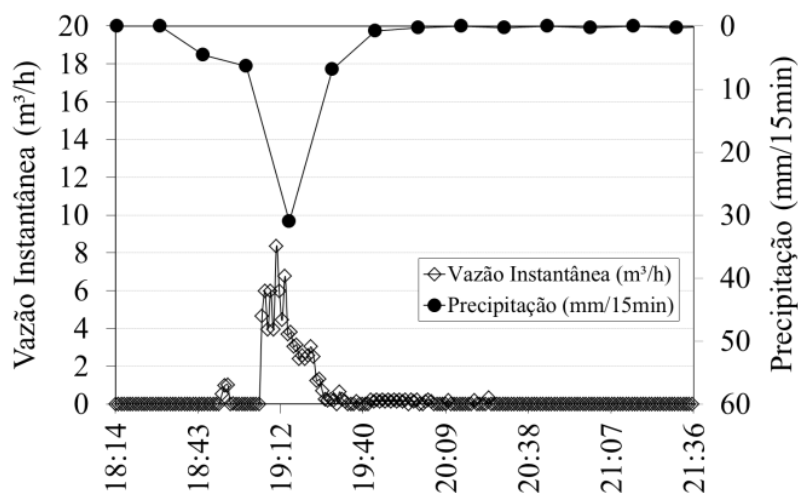


Figura 12. Vazão instantânea (m^3/h) e precipitação pluvial ($\text{mm}/15\text{min}$) durante o 12/3.

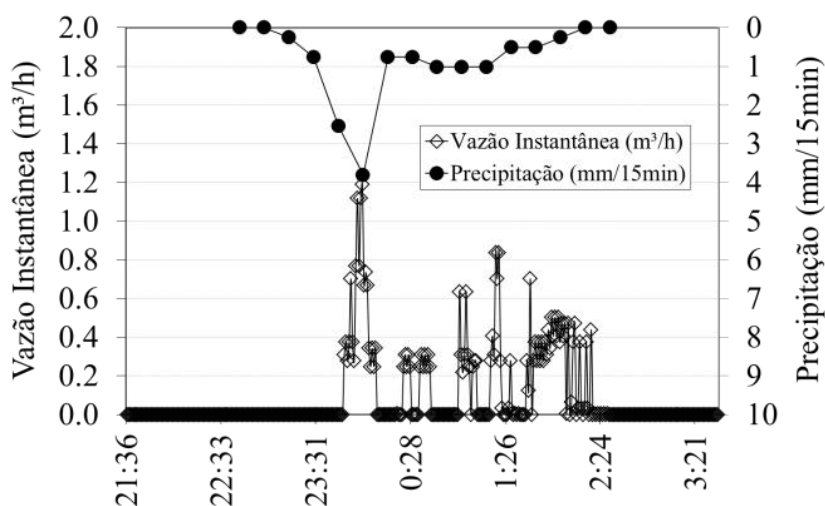


Figura 13. Vazão instantânea (m^3/h) e precipitação pluvial ($\text{mm}/15\text{min}$) durante o dia 13/3.

Dia	Precipitação Pluvial					
	IP	FP	PP	Dur	PA	IM
	(d/m)	(h:m)			(mm)	(mm/15min)
4/2	21:20	21:37	21:30	00:17	6.34	2.28
8/2	18:36	18:43	18:45	00:07	5.84	3.3
12/3	18:51	20:24	19:15	01:33	13.20	30.98
13/3	23:45	02:29	00:00	02:44	50.80	3.81

Tabela 4. Precipitação pluvial: início (IP), final (FP) e pico da precipitação (PP), duração da chuva (Dur), precipitação acumulada (PA), intensidade máxima da precipitação (IM).

Dia	Calha Parshall/LU-20						
	Dur	PVc	NM	VMc	PH	PPVc	ESMc
(d/m)	(h:m:s)	(h:m)	(mm)	(m ³ /h)	(seg.)	(m ³ /h)	(%)
4/2	00:17:00	21:21	29.87	1.36	9	9.12	14.91
8/2	00:07:20	18:37	15.84	0.47	8	13.2	3.56
12/3	01:33:00	19:10	122.92	8.35	5	123.92	6.74
13/3	02:44:00	23:56	26.52	1.15	4	15.24	7.55

Tabela 5. Duração do evento de escoamento (Dur), pico de vazão na calha (PVc); nível máximo na calha (NM), vazão máxima na calha (VMc); padrão hidrológico (PH); precipitação no pico de vazão da calha (PPVc) e escoamento superficial máximo na calha (ESMc).

Na Figura 10, que apresenta os gráficos de variabilidade da vazão instantânea na parcela experimental em função da precipitação pluvial durante o dia 4/2, pode-se observar que existe um adiantamento do pico de vazão de escoamento em relação ao pico da precipitação, o que deve ser inicialmente atribuído à resolução temporal dos diferentes instrumentos utilizados, uma vez que o pluviômetro foi programado para medidas de mm/15min, enquanto a calha ficou programada para aquisições de dados em intervalos de 1 minuto. O total pluviométrico referente a este evento foi de 6.34 mm após 17 minutos de chuva tendo atingindo uma intensidade máxima de 2.28 mm/15min (Tabela 4).

Os resultados de monitoramento dos níveis resultantes na calha, obtidos por meio do transmissor de nível ultrassônico, mostram que a enxurrada do dia 4/2 durou 17 minutos, com um pico máximo de 29.87 mm de altura na calha (que representa uma vazão máxima instantânea de 1.36 m³/h) ocorrendo às 21h21min, isto é, 9 minutos antes do pico da precipitação pluvial, o que indica um padrão hidrológico antecipado da vazão das enxurradas em relação ao pico de precipitação pluvial (Tabelas 4 e 5). A intensidade desta última durante o pico de vazão da calha de 9.12 m³/h resultou num coeficiente de escoamento superficial máximo de 14.91%.

Observa-se na Figura 11, que apresenta os gráficos de variabilidade da vazão instantânea na parcela experimental em função da precipitação pluvial durante o dia 8/2, um evento mais rápido, com um total pluviométrico de 5.84 mm após 7min20sec de chuva tendo atingindo uma intensidade máxima de

3.30 mm/15min, valor superior ao do evento avaliado anteriormente. Os resultados do monitoramento dos níveis mostram que a enxurrada resultou em um pico máximo de 15.84 mm de altura na calha (vazão máxima instantânea de 0.47 m³/h) ocorrendo às 18h37min, 8 minutos antes do pico da precipitação, o que representa uma minimização do padrão hidrológico antecipado da vazão em relação à precipitação neste evento (Tabelas 4 e 5). Esta interpretação deve ser feita com ressalvas, uma vez que o intervalo de aquisição de dados é de 15 minutos, assim como no evento anterior.

A precipitação pluvial durante o pico de vazão da calha no dia 8/2 atingiu um volume de 13.2 m³/h para a parcela e resultou num coeficiente de escoamento superficial máximo de 3.56%, menor do que o estimado para a chuva anterior, o que possivelmente se deve à curta duração da enxurrada e devido a condições de umidade antecedente.

As enxurradas avaliadas durante o mês de março foram marcadas por maiores volumes de escoamento superficial e precipitação pluvial, devido à chegada do final do período de chuvas do verão. Na Figura 12 que apresenta o gráfico referente ao dia 12/3, observa-se uma enxurrada resultante de uma precipitação pluvial que atingiu um total pluviométrico de 13.20 mm após 1 hora e 33 minutos de chuva tendo atingido uma intensidade máxima de 30.98 mm/15min (Tabela 5). A enxurrada neste dia durou 1h33min, com um pico máximo de 122.92 mm de altura na calha (vazão máxima instantânea de 8.35 m³/h) ocorrendo às 19h10min, 5 minutos antes do pico da precipitação (Tabelas 4 e 5). Este resultado mostra que existe possivelmente uma relação entre o comportamento de antecipação do pico de vazão da calha em relação ao pico de precipitação pluvial de acordo com a intensidade das chuvas, sendo que quanto maior esta última menor será a antecipação dos picos de vazões de enxurradas. Observa-se ainda que a precipitação pluvial durante o pico de vazão da calha de 123.92 m³/h, relacionada à vazão de pico na calha resultou num coeficiente de escoamento superficial máximo de 6.74% neste dia (12/3), consideravelmente maior que o percentual referente ao dia 8/2, o que pode ser observado na Figura 12.

Na Figura 13, que apresenta dados do dia 13/3, observa-se um evento de maior magnitude e intensidade, com um total pluviométrico de 50.80 mm após 2 horas e 44 minutos de chuva, tendo-se atingido uma intensidade máxima de 3.81 mm/15min. Os resultados do monitoramento dos níveis

mostram que esta enxurrada durou 2h44min, com um pico máximo de 26.52 mm de altura na calha (vazão máxima instantânea de 1.15 m³/h) ocorrendo às 23h56min, 4 minutos antes do pico da precipitação, o que reforça ainda mais a relação existente entre o comportamento de antecipação do pico de vazão da calha em relação ao pico de precipitação pluvial de acordo com a intensidade das chuvas. A precipitação pluvial durante o pico de vazão da calha de 15.24 m³/h, relacionada à vazão de pico na calha resultou num coeficiente de escoamento superficial de 7.55%, isto é, observa-se que apesar do volume precipitado durante o pico de precipitação pluvial do dia 12/3 ter sido muito maior, o percentual escoado ao final do evento foi semelhante ao do evento seguinte.

Como os eventos monitorados indicaram que o aumento do volume de escoamento superficial pode se dar rapidamente, com ascensões ocasionais do nível na Calha após poucos minutos, observa-se a necessidade de avaliações mais pormenorizadas destes processos, reforçando a importância desta metodologia para a compreensão dos fenômenos avaliados.

Um aspecto relativo ao presente subitem é a questão da eficiência do sistema em termos hidrossedimentológicos, isto é, como foi o desempenho deste sistema em relação a suas características de manutenção e autolimpeza. Foi possível constatar ao longo do período de monitoramento que o processo de deposição de sedimentos no corpo da instrumentação ocorre somente após períodos de chuvas com elevadas magnitudes e intensidades. No decorrer do período avaliado a instrumentação manteve-se completamente desobstruída até o dia 13/3, isto é, após a ocorrência de duas grandes enxurradas ou em resposta a 64.00 mm de chuvas. O problema não foi suficientemente relevante para gerar interferências na medição dos níveis no decorrer do período monitorado, mas observações de campo indicam que a manutenção das calhas é um procedimento recomendado após a ocorrência destes tipos de chuvas, e o desempenho do sistema dependerá das taxas de escoamento, das características das enxurradas e do tamanho da área de captação.

No período avaliado as enxurradas apresentaram uma vazão máxima instantânea ao longo de todo o período avaliado de 8.35 m³/h em resposta a uma precipitação pluvial que chegou a 30.98mm/15min de intensidade. A concentração de sólidos suspensos ficou entre 430 a 1080 PPM, sendo que o

material resultante da secagem das enxurradas em estufa apresentou textura argilo-siltosa e densidade relativa dos grãos de 1.661g/cm^3 , indicando uma elevada erodibilidade. Isto mostra que o sistema funcionará para a grande maioria das situações, isto é, até mesmo para materiais com elevada erodibilidade e/ou submetidos a elevadas taxas de escoamento.

Balances Hídricos na Parcela Experimental

Os hidrogramas com a variabilidade do escoamento superficial e da precipitação acumulados encontram-se nas Figuras 14 a 17. A Tabela 6 sumariza dados de precipitação pluvial acumulada durante cada evento medido na calha e vazão acumulada na calha durante este mesmo, tendo sido possível gerar estimativas da taxa de infiltração no solo.

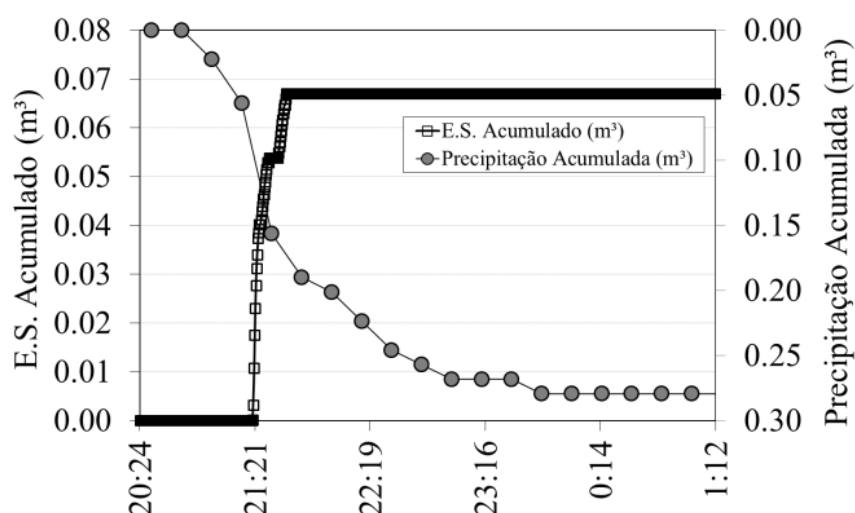


Figura 14. Hidrograma com escoamento superficial acumulado e precipitação acumulada (m^3) no dia 4/2.

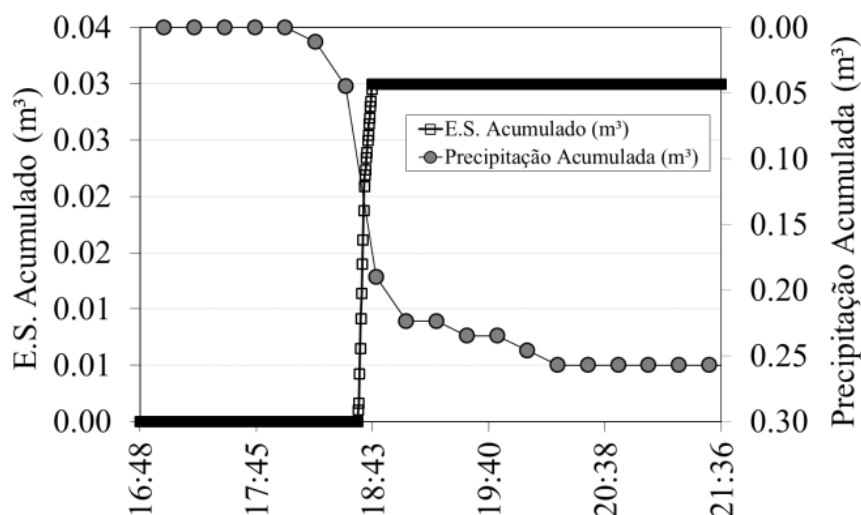


Figura 15. Hidrograma com escoamento superficial acumulado e precipitação acumulada (m^3) no dia 8/2.

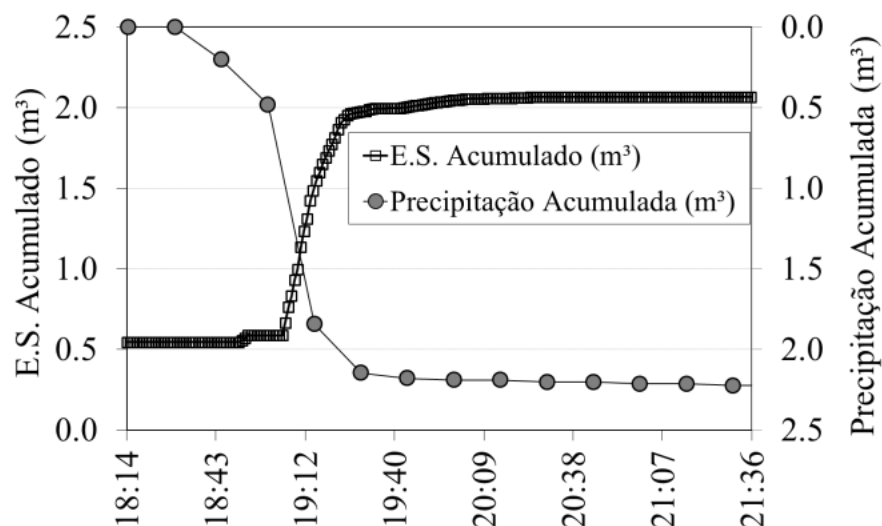


Figura 16. Hidrograma com escoamento superficial acumulado e a precipitação acumulada (m^3) no dia 12/3.

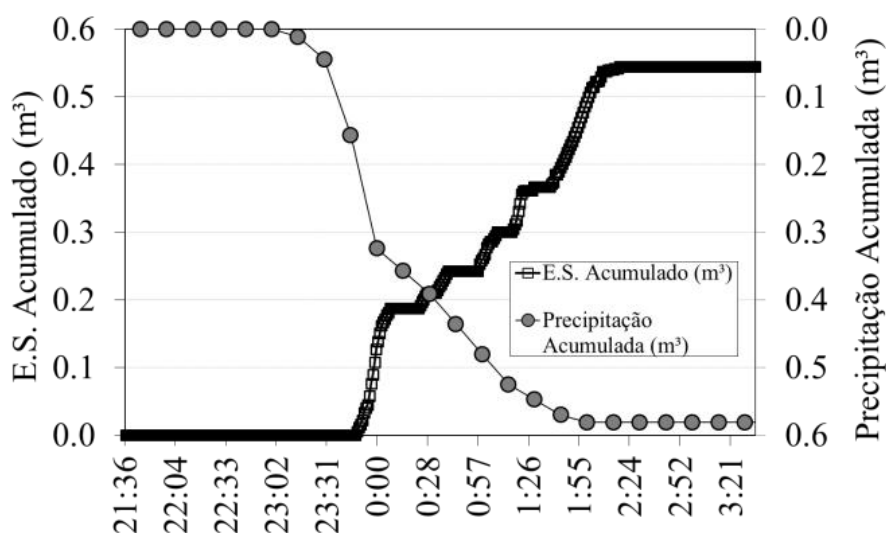


Figura 17. Hidrograma com escoamento superficial acumulado a precipitação acumulada (m^3) no dia 13/3.

	PAC	VAC	Inf	VAC
Dia	(m^3)	(m^3)	(m^3)	(%)
4/2	0.279	0.067	0.212	24.01
8/2	0.257	0.030	0.227	11.67
12/3	2.235	2.067	0.168	92.48
13/3	0.581	0.545	0.036	93.80

Tabela 6. Resultados analíticos de balanços hídricos obtidos com a interpretação dos eventos de escoamento na calha. Precipitação acumulada na calha (PAC); vazão acumulada na calha (VAC); infiltração no solo (Inf).

Na Figura 14, que apresenta o hidrograma para o dia 4/2, pode-se observar a existência uma resposta quase imediata da enxurrada em relação à precipitação, isto é, a maior parte do volume de enxurradas medido ocorreu durante o período entre o início e meio da chuva. A resposta ocorreu em duas etapas, o que ficou evidenciado com a presença de um “degrau” na curva. Os dados analíticos expostos na Tabela 6 mostram que a precipitação que resultou na enxurrada teve um volume total de 0.279 m^3 considerando a área da parcela experimental. O volume infiltrado no solo foi de 0.212 m^3 e o volume escoado e medido na calha foi de 0.067 m^3 , o que representa 24.01% do total precipitado durante esta chuva.

Na Figura 15, que apresenta o hidrograma para o dia 8/2, pode-se observar a existência de uma resposta ainda mais rápida da enxurrada em relação à precipitação, com uma ascensão quase vertical na curva de vazão acumulada. Os dados analíticos da Tabela 6 mostram que a precipitação que resultou na enxurrada teve um volume total de 0.257 m^3 considerando a área da parcela em avaliação. O volume escoado e medido na calha foi de 0.030 m^3 , o que representa 11.67% do total precipitado durante esta chuva. Ocorreu uma menor antecipação no comportamento hidrológico em relação ao dia 4/2, conforme já discutido no tópico anterior, e este dado mostra que a enxurrada foi concentrada, mas sua resposta não foi tão rápida quanto à do dia 4/2.

A Figura 16 e a Figura 17, referente aos eventos monitorados durante o mês de março, quando as precipitações atingiram maiores magnitudes e intensidades, mostram hidrogramas com comportamentos diferentes dos encontrados para fevereiro, com uma maior distribuição do escoamento no decorrer da chuva. No dia 12/3 (Figura 16), o escoamento superficial foi acumulado de maneira gradual, gerando uma curva mais convexa. O evento teve seu início com um pequeno volume escoado, gerando uma pequena ascensão na vazão do hidrograma. A convexidade indica que houve uma redução gradativa da taxa de escoamento. Os dados analíticos da Tabela 6 mostram que a precipitação do dia 12/3 representou um volume total de 2.235 m^3 considerando a área da parcela em avaliação, suficiente para preencher duas caixas d'água. Tais resultados reforçam a importância do desenvolvimento deste tipo de sistema automatizado, uma vez que em sistemas convencionais a capacidade de armazenamento de enxurradas é limitada e esgota-se, e por isso existem vários tipos de

mecanismos quarteadores entre as caixas coletoras que acabam aumentando a complexidade e imprecisão das avaliações.

Segundo os resultados analíticos expostos na Tabela 6 referentes ao dia 12/3, o volume infiltrado no solo foi de 0.168 m³ e o volume escoado e medido na calha foi de 2.067m³, o que representa 92.48% do total precipitado durante esta chuva, isto é, a capacidade de infiltração reduzida é esgotada em eventos de maiores intensidades e o percentual escoado sofre grande incremento.

No dia 13/3, conforme observado na Figura 17, o escoamento superficial foi sendo acumulado de maneira ainda mais gradual. Os dados analíticos da Tabela 6 mostram que a precipitação que resultou na enxurrada do dia 13/3 teve um volume total de 0.581 m³ considerando a área da parcela em avaliação. O volume infiltrado no solo foi de 0.036 m³ e o volume escoado e medido na calha foi de 0.545 m³, o que representa 93.80% do total precipitado durante esta chuva. A vazão medida neste evento foi marcada por seis pulsos, sendo o primeiro mais intenso, o que reforça a tendência de um comportamento hidrológico antecipado. Observa-se que as curvas se cruzaram mais adiante no gráfico, em relação aos anteriores, isto é, há uma maior distribuição da enxurrada ao longo da chuva.

A Tabela 7 a seguir apresenta um comparativo entre a interpretação dos eventos de escoamento na calha e através do monitoramento das caixas coletoras (método convencional). Encontram-se relacionados dados de precipitação pluvial acumulada durante cada evento medido na calha, vazão acumulada na calha e a porcentagem do escoamento superficial medido na calha em relação ao retido na caixa coletora.

Dia	PAc		VAc		ESc/ESx
d/m	mm	(%)	mm	(%)	(%)
4/2	6.34	99.84	1.52	25.90	25.93
8/2	5.84	83.43	0.68	17.58	21.06
12/3*	64.00	100.0	59.36	129.08	129.08

*Valores acumulados para os eventos de 12/3 e 13/3.

Tabela 7. Comparativo entre a interpretação dos eventos de escoamento na calha e através do monitoramento das caixas coletoras (convencional). Precipitação acumulada na calha (PAc); vazão acumulada na calha (VAc); porcentagem do escoamento superficial retido na caixa coletora medido na calha (ESc/ESx).

Segundo a Tabela 7 no dia 4/2 a precipitação acumulada ao longo do período em que a enxurrada foi monitorada na calha foi de 6.34 mm (99.84% da chuva monitorada no intervalo de 24 horas); a vazão acumulada na calha foi de 1.52 mm (25.90% do escoamento acumulado no intervalo de 24 horas), correspondendo a 25.93% do escoamento superficial medido na caixa coletora. No dia 8/2 a precipitação acumulada foi de 5.84 mm (83.43% da chuva monitorada no intervalo de 24 horas); a vazão acumulada na calha foi de 0.68 mm (17.58% do escoamento acumulado no intervalo de 24 horas), correspondendo a 21.06% do escoamento superficial medido pelo método convencional em 24 horas.

Os resultados referentes ao monitoramento automatizado do escoamento superficial nos dias 12/3 e 13/3 encontram-se inseridos dentro de um único período de avaliação de 24 horas das caixas coletoras, aqui denotado como dia 12/3, uma vez que o evento do dia 13/3 teve seu início na madrugada do dia 12/3. Os dados analíticos, correspondentes, portanto a valores acumulados para os eventos dos dias 12/3 e 13/3, mostram que a precipitação acumulada foi de 64.00 mm (100.00% da chuva monitorada no intervalo de 24 horas); a vazão acumulada na calha foi de 59.36 mm (129.28% do escoamento acumulado medido nas caixas coletoras no intervalo de 24 horas), ou 129.08% do escoamento superficial medido pelo método convencional em 24 horas.

A Tabela 7 mostra que os eventos monitorados na calha corresponderam a, pelo menos, 83.43% (no dia 8/2) do precipitado ao longo do período diário em que foram realizadas as avaliações pelo método convencional. Nos demais dias estes percentuais foram de 99.84% para o dia 4/2 e 100.00% para o dia 13/3 (que neste caso correspondeu a dois eventos avaliados nas calhas, respectivamente dias 12 e 13 de março). Isto é, foi registrada precipitação na estação meteorológica durante este período, porém não foi suficiente para a geração das enxurradas, ou o escoamento foi significativo, mas não acarretou na formação da lâmina d'água. Os resultados indicam, entretanto, que o sistema obteve bom desempenho abrangendo eventos de escoamento ocorridos no decorrer do período de monitoramento em diferentes volumes e intensidades.

CONCLUSÕES

A adaptação da calha Parshall se mostrou uma boa alternativa para medição de parcelas de controle de erosão em taludes de corte, uma vez que o sistema permitiu abranger os diferentes eventos de escoamento ocorridos no decorrer do período de monitoramento. Os eventos monitorados na calha corresponderam a, pelo menos, 83.43% do precipitado ao longo do período diário em que foram realizadas as avaliações pelo método convencional. Nos demais dias estes percentuais foram de 99.84% para o dia 4/2 e 100.00% para o dia 13/3, este último correspondente a dois eventos avaliados nas calhas, respectivamente dias 12 e 13 de março. A vazão máxima instantânea no período avaliado foi de 8.35 m³/h em resposta a uma precipitação pluvial que chegou a 30.98mm/15min de intensidade.

Foi observado deste modo que o volume de escoamento superficial responde em poucos minutos às alterações na intensidade da precipitação ao longo dos eventos, observando-se a necessidade de avaliações mais pormenorizadas da precipitação pluvial para o entendimento deste processo.

O processo de deposição de sedimentos ao longo do corpo da instrumentação também chamou a atenção, tendo ocorrido porém somente após determinado período. O problema não foi suficientemente relevante para gerar interferências na medição dos níveis no decorrer do período monitorado, mas observações de campo indicam que a manutenção das calhas é um procedimento recomendado, sendo que a intensidade deste problema dependerá das taxas de escoamento e erosão mensuradas e da carga hidráulica imposta pela parcela.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido como parte do Projeto PRONEX intitulado, “Geotecnia Aplicada à Avaliação, Prevenção e Remediação de Problemas Ambientais”, desenvolvido em parceria com a Embrapa-Solos e Infraero. Os autores agradecem o apoio dado pela FAPERJ, CNPq, e CAPES.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.L.; OLIVEIRA, J.G.B.; ARAÚJO, J.C. Impacto da recuperação de área degradada sobre as respostas hidrológicas e sedimentológicas em ambiente semiárido. **Water Resources and Irrigation Management**, vol. 1. No. 1. pp. 39-50. 2012.
- BABCOCK, D.; MCLAUGHLIN, R.A. Runoff water quality and vegetative establishment for groundcovers on steep slopes. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 66. No. 2. pp. 132-141. 2011.
- BONTA, J.V. 2008. Drop-box weir for measuring flow rates under extreme flow conditions. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 63, No. 4. 2008.
- FERNANDES, L.S.; GRIFFITH, J.J.; FONSECA, D.M.; DIAS, L.E.; RUIZ, H.A. Uso de Geomantas no Controle da Erosão Superficial Hídrica em um Talude em Corte de Estrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, No. 1, pp. 199-206. 2009.
- QU, L.; ZHAO, J.; ZHAO, X.; YAN, L.; ZHOU, J.; LEI, T. A mechanic–electronic sensor for automatic measurement of sediment-laden flow rate from erosion runoff plots. **Journal of Hydrology**, vol. 342, No. 1–2, 15. pp. 42–49. 2007.