

ASSOREAMENTO DA REPRESA DE ALAGADOS PELA CONTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO CURSO DO RIO PITANGUI/PR

Clarice Farian de LEMOS¹; Alberto Pio FIORI²; Chisato OKA-FIORI³; Júlio Caetano TOMAZONI⁴

- (1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, R. Deputado Heitor de Alencar Furtado - CEP: 81280-340, Curitiba/PR, Doutora em Geologia Ambiental da UFPR. Endereço eletrônico: claricelemos@utfpr.edu.br.
- (2) Universidade Federal do Paraná - UFPR - Setor de Ciências da Terra, Caixa Postal 19.001 - Cep 81531-990, Curitiba/PR, Professor Doutor do Curso de Geologia da UFPR. Endereço eletrônico: fiori@ufpr.br.
- (3) Universidade Federal do Paraná - UFPR - Setor de Ciências da Terra, Caixa Postal 19.001 - Cep 81531-990, Curitiba/PR, Professora Doutora do Curso de Geografia da UFPR. Endereço eletrônico: chisato@ufpr.br.
- (4) Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Caixa Postal 135 - CEP: 85601-970, Francisco Beltrão/PR, Professor Doutor do Curso de Engenharia Ambiental da UTFPR. Endereço eletrônico: caetano@utfpr.edu.br.

Introdução
Aspectos Gerais da Área de Estudo
Materiais e Métodos
Resultados e Discussões
Conclusões
Referências

RESUMO - A finalidade deste estudo é verificar o volume de sedimento depositado na represa de Alagados, nos anos de 1984, 1995, 2002 e 2007, devido a contribuição da Bacia Hidrográfica do Alto curso do rio Pitangui - BHAP. Essa represa está localizada entre os municípios de Castro, Carambeí e Ponta Grossa, no Estado do Paraná (24°59' a 25°01' S e 49°58' a 50°03' O). Para a realização deste estudo utilizaram-se: imagens de satélites nas bandas 2B3R4G cena 221/077 (LANDSAT-5/TM de 26.05.1984 e 23.04.1995 e LANDSAT-7/ETM⁺ de 17.03.2002) e cena 157/128 (CBERS-2/CCD de 07.03.2007 e CBERS_2B/CCD de 29.08.09), no formato digital e georreferenciadas; plantas planialtimétricas, com curvas de nível equidistantes 5 m; *software* de geoprocessamento SPRING 5.0 e trabalhos de campos. Para os anos avaliados, o volume de sedimento depositado na represa foi de 928,321; 1.451,840; 821,034; e 1.069,206 m³.ano⁻¹ respectivamente.

Palavras-chave: Sedimentação, Imagens de Satélites, SPRING.

ABSTRACT - The Alagados Dam silting *contributions by sediment of the hydrographic basin of the high flow of Pitangui/PR river*. The purpose of this study is to verify the volume of sediment deposited at the Alagados Dam, in the years 1984, 1995, 2002 and 2007, due contribution of the Hydrographic Basin of the Upper Pitangui River – HBHP. This dam is between the cities of Castro, Carambeí and Ponta Grossa, in the State of Paraná (24°59' to 25°01' S and 49°58' to 50°03' W). In this study it was used satellite images in the 2B3R4G scene 221/077 (LANDSAT-5/TM of 26.05.1984 and 23.04.1995 and LANDSAT-7/ETM⁺ of 17.03.2002) and 157/128 (CBERS-2/CCD of 07.03.2007 and CBERS_2B/CCD of 29.08.09) scene, in digital format and georeferenced; planialtimetric maps with contour curve 5 m; software of geoprocessing SPRING 5.0 and field works. For the years 1984, 1995, 2002 and 2007, the volume of deposited sediment in the dam was 928,321; 1.451,840; 821,034; and 1.069,206 m³.ano⁻¹ respectively.

Keywords: Silting, Satellite Images, SPRING

INTRODUÇÃO

O Paraná é um estado que, pelas características hidrográficas e geológicas existentes, favorece a construção de usinas hidrelétricas. Existem atualmente 17 usinas em funcionamento, pertencentes à Companhia Paranaense de Energia – COPEL, que geram 4.549,6 MW, correspondendo, aproximadamente, 7% de toda eletricidade consumida no Brasil. Desde 1910 esses

empreendimentos vêm sendo realizados no estado, sendo que, em 1945 foi inaugurada a Usina de São Jorge. Esta hidrelétrica possui a capacidade instalada de 2,3 MW e está localizada num tributário da margem esquerda do rio Pitangui, a 18 km do centro de Ponta Grossa (COPEL, 2008).

Junto a essa usina foi construída uma barragem, formando um reservatório

denominado de represa de Alagados, cuja finalidade é controlar as vazões dos rios Pitangui e Jotuba e aumentar a capacidade de geração de energia elétrica. Essa represa é, também, responsável por aproximadamente 62% do abastecimento de água à cidade de Ponta Grossa, conforme relatório da Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG (UEPG, 2002).

Um dos grandes problemas existentes, que interfere na vida útil dos reservatórios e, portanto, na capacidade de produção de energia das usinas hidrelétricas é o assoreamento. Esse fenômeno de deposição de sedimentos de solos desagregados e transportados a partir de áreas fontes, reduz a profundidade dos reservatórios e, conseqüentemente, a capacidade de geração de energia em usinas hidrelétricas (DIAZ, 2001).

Para o cálculo dos sedimentos retidos no reservatório utilizou-se a Equação 1, sendo que: S_R ($m^3 \cdot ano^{-1}$) é o volume de sedimentos retidos no reservatório; A_S ($t \cdot ano^{-1}$) é o aporte de sedimentos no exutório da bacia; E_R (%) é eficiência de retenção dos sedimentos afluente ao reservatório e γ_{ap} ($t \cdot m^{-3}$) é o peso específico aparente médio dos depósitos (CARVALHO, 2008).

$$S_R = \frac{A_S \times E_R}{\gamma_{ap}} \quad \text{Equação 1}$$

O peso específico aparente médio dos depósitos (γ_{ap}) pode variar conforme a granulometria predominante dos sedimentos. Como indicação de Carvalho (2008), arbitra-se o valor entre 1,4 a 1,5 $t \cdot m^{-3}$ para pequenos reservatórios, pois o material predominante que fica depositado é arenoso. No caso de reservatórios de porte médio o γ_{ap} varia entre 1,2 a 1,4 $t \cdot m^{-3}$ e para grandes reservatórios, em que pequena quantidade de finos passa pelos condutos e vertedouro, o valor fica entre 1,1 a 1,3 $t \cdot m^{-3}$.

Para a determinação da produção de sedimentos que chegam aos reservatórios é necessário aplicar um coeficiente à erosão calculada, pois nem todo sedimento erodido da bacia chega à rede de drenagem, ficando parte desse material depositado em declives, nas proeminências dos terrenos ou nas planícies (CARVALHO, 2008). Portanto, o cálculo do

aporte de sedimentos no exutório da bacia (A_S em $t \cdot ano^{-1}$) pode ser estimado através da Equação 2 (SILVA, 2004), em que: SDR - *Sediment Delivery Ratio* (%) é a relação de aporte de sedimento; P_S ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$) é a perda de solo média no interior da bacia; e A_B (ha) é a área da bacia.

$$A_S = \frac{SDR \times P_S \times A_B}{100} \quad \text{Equação 2}$$

O SDR é definido como a relação entre a produção efetiva, caracterizada pelos sedimentos produzidos pela erosão que chegam até a seção de referência da bacia e a produção total de sedimentos (BRANCO, 1998; CHAVES, 2010). O valor do SDR pode ser estimado através de equações empíricas, em que a área da bacia, o gradiente do canal principal, o relevo da bacia e a relação de bifurcação da rede de drenagem são algumas das variáveis independentes usadas (Quadro 1).

Existem várias equações desenvolvidas para estimar o tempo de concentração de bacias hidrográficas (t_c) como Kirpich, Dooge, Carter, *Federal Aviation Agency* e McCuen, que geralmente apresentam resultados muito divergentes entre elas (SILVA *et al.*, 2007).

Dentre as equações citadas, uma das mais utilizadas, por apresentar resultados mais satisfatórios, é a que foi apresentada pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia, em 1942 (Equação 3). Em que t_c (min) é o tempo de concentração; L_{CP} (km) é o comprimento do canal principal; e ΔH_{CP} (m) é o desnível entre a nascente e a foz do canal principal. Esta equação é semelhante à fórmula de Kirpich (Equação 4) sendo apenas substituída a declividade do talvegue (S) por $\Delta H/L$ (SILVA, 2007).

$$t_c = 57 \times L_{CP}^{1,155} \times \Delta H_{CP}^{-0,385} \quad \text{Equação 3}$$

$$t_c = 57 \times \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385} \quad \text{Equação 4}$$

Há, também, a equação de Dooge (Equação 5) apresentada em Porto (1995), mais usada em bacias hidrográficas rurais com áreas (A_B)

compreendidas entre 140 e 930 km², sendo que G_{CP} (m/m) é o gradiente do canal principal.

$$t_c = 21,88 \times A_B^{0,41} \times G_{CP}^{-0,17} \quad \text{Equação 5}$$

No estudo completo sobre o processo de sedimentação de um reservatório deve-se, também, conhecer a eficiência de retenção de

sedimentos em reservatório, que pode ser obtida por meio de medições sistemáticas das descargas sólidas afluente e a jusante da barragem. No caso em que não existem essas medições, podem-se utilizar a curva de Churchill para pequenos reservatórios e a curva de Brune para médios e grandes (CARVALHO, 2008).

Quadro 1. Equações de SDR usadas na pesquisa, com os respectivos autores e variáveis trabalhadas.

AUTOR (ANO)	EQUAÇÃO	VARIÁVEIS
Maner (1958)	$\text{Log SDR} = 2,9426 + 0,82362 \log (\Delta H_{CP}/L_{CP})$	ΔH_{CP} = desnível da nascente e a foz do canal principal (m) L_{CP} = comprimento do canal principal (m)
Roehl (1962)	$\text{Log SDR} = 4,365 - 0,230 \log A_B - 0,510 \log (L_{CP}/\Delta H_{CP}) - 2,786 \log R_B$	ΔH_{CP} = desnível da nascente e a foz do canal principal (m) L_{CP} = comprimento do canal principal (m) A_B = área da bacia (km ²) R_B = relação de bifurcação de Horton
Renfro (1975)	$\text{Log SDR} = 1,793 - 0,142 \log A_B$	A_B = área da bacia (km ²)
Williams; Berndt (1972)	$\text{SDR} = 0,627 \times G_{CP}^{0,403}$	G_{CP} = gradiente do canal principal (%)
Vanoni (1975)	$\text{SDR} = 0,42 \times A_B^{-0,125}$	A_B = área da bacia (mi ²)
NRCS (1979, segundo CHAVES, 2010)	$\text{SDR} = 0,51 \times A_B^{-0,11}$	
Lu; Moran; Prosser (2006)	$\text{SDR} = 2 (t_r/t_c) \{1 - (t_r/t_c) + (t_r/t_c) \exp[-(t_r/t_c)]\}$	t_c = tempo de concentração (h) t_r = Duração da precipitação em excesso (h), considerado igual a 0,5.

NOTA: 1 km² = 0,3863 mi²

FONTE: Adaptado de Ouyang (1997) e Chaves (2010)

A curva de Churchill possui, no eixo das ordenadas, a porcentagem do sedimento que passa para jusante da barragem, e, no eixo das abscissas, o valor do Índice de Sedimentação (IS). O IS é igual ao período de retenção (volume do reservatório dividido pela vazão média diária durante o período de estudo), dividido pela velocidade média no reservatório (vazão média diária dividido pela área da seção transversal média, sendo essa área determinada pela divisão do volume do reservatório e seu

comprimento) (Equação 6). Para a eficiência de retenção do sedimento - E_r (adimensional) é utilizada a Equação 7, em que o IS (s²/m) é o índice de sedimentação do reservatório; V_{res} (m³) é o volume do reservatório no nível médio de operação; Q_{med} (m³.s⁻¹) é a vazão média afluente ao reservatório; L (m) é o comprimento do reservatório; e g (9,815 m.s⁻²) é a aceleração da gravidade (CARVALHO, 2008; CARVALHO *et al*, 2000).

$$IS = \frac{V_{res}^2}{Q_{med}^2 \times L}$$

Equação 6

$$E_r = 100 - \left(1600 \times (IS \times g)^{-0,2} - 12 \right)$$

Equação 7

A degradação ou desgaste do solo (h em $m \cdot ano^{-1}$) é a altura da superfície do solo retirada pelo efeito da erosão (Equação 8), sendo A_s ($t \cdot ano^{-1}$) a produção de sedimento; A_B (m^2) é a área da bacia hidrográfica e γ_{aps} ($t \cdot m^{-3}$) é o peso específico aparente do solo. Segundo Carvalho (2008), o γ_{aps} fica entre 1,3 a 2,4 $t \cdot m^{-3}$, e

considera-se como degradação líquida a divisão por $\gamma_{aps} = 1,6 t \cdot m^{-3}$.

$$h = \frac{A_s}{A_B \times \gamma_{aps}}$$

Equação 8

Portanto, nesse estudo pretende-se estimar o volume de sedimentos retido, no período de 1984 a 2007, na represa de Alagados, oriundo da Bacia Hidrográfica do Alto curso do rio Pitanguí – BHAP, município de Castro - PR.

ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica envolvida neste estudo é a do alto curso do rio Pitanguí - BHAP, desde sua nascente até a represa de Alagados. O rio Pitanguí é afluente da margem direita do rio Tibagi, que é o maior afluente do rio Paranapanema, sendo que pertencem à bacia hidrográfica do rio Paraná. As coordenadas geográficas dessa área são 24°52' a 25°05' S e

49°46' a 50°00' O. A altitude dessa bacia está entre 918 a 1.170 m acima do nível do mar. Possui, aproximadamente, uma área total de 163,537 km^2 , sendo que 149,413 km^2 pertencem ao município de Castro; 8,382 km^2 ao de Carambeí e 5,742 km^2 para Ponta Grossa (Figura 1).

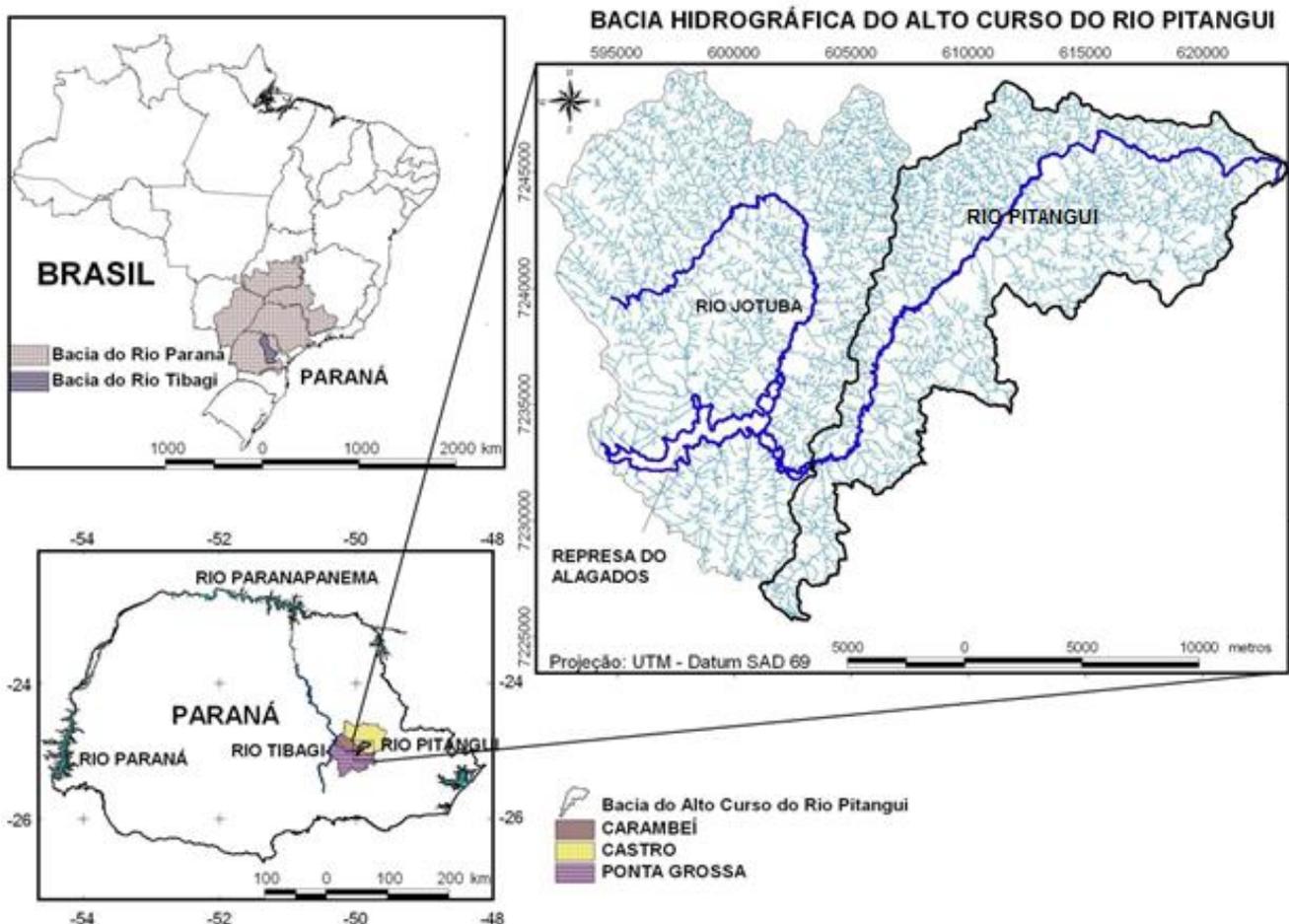


Figura 1. Localização da Bacia do Alto Curso do Rio Pitanguí BHAP.

A represa de Alagados está entre os municípios de Castro, Carambeí e Ponta Grossa e é formada pelo represamento do alto curso do rio Pitangui, cuja área da bacia é de 163,537 km² (16.353,70 ha) e do rio Jotuba com 133,800 km² (13.380,00 ha). Está localizada entre as coordenadas geográficas 24°59' a 25°01' S e 49°58' a 50°03' O (UTM 594.347 a 603.468 e 7.231.745 a 7.236.330). A extensão desse reservatório é de 10,7 km, no trecho compreendido entre a barragem da Usina de São Jorge e a foz do rio Pitangui e de 9,0 km da mesma barragem até a foz do rio Jotuba. Na cota de 918,60 m, a profundidade máxima do reservatório fica em torno de 14 m. Sua largura varia de 200 a 800 m, o que resulta numa área da lâmina d'água de aproximadamente 7,315 km². As vazões máxima e mínima são de 13 m³.s⁻¹ e 6 m³.s⁻¹, respectivamente e o volume é cerca de 27,7 milhões de m³ de água. (GOULART, 2001).

Conforme dados do IAPAR (2000), pela classificação de Köppen, o clima da área de estudo é do tipo Cfb – Clima subtropical úmido mesotérmico, com verões frescos e ocorrências de geadas severas e frequentes. A média da umidade relativa do ar é entre 70 a 75% e os ventos predominantes são NE no verão e NW no inverno. A temperatura média anual situa-se entre 16 a 18 °C e a precipitação média anual está entre 1.400 a 1.600 mm.

A geologia da BHAP engloba unidades do Proterozóico como metarenitos e metarcósios quartzosos do Grupo Açungui (Formação ou Faixa Itaiacoca) e granitóides do Complexo Granítico Cunhaporanga; rochas sedimentares do Devoniano, como o Grupo Paraná (Formação Furnas); diques de diabásio do

Jurássico-Cretáceo e o Grupo São Bento, orientados na direção NW-SE; e sedimentos recentes do Quaternário (Depósitos aluviais e coluviais), localizados na calha de drenagem do rio principal e nas planícies de inundação (MINEROPAR, 2006b).

A BHAP possui 161,874 km² de sua área no Primeiro Planalto e apenas 1,663 km² no Segundo Planalto. As subunidades morfoesculturais encontradas nessa bacia são: Planalto de Castro, Planalto Dissecado do Alto Ribeira e Planalto de São Luiz do Purunã (MINEROPAR, 2006a; SANTOS *et al.*, 2006).

Os solos encontrados na BHAP, conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SBCS (EMBRAPA, 2006), foram os Afloramentos Rochosos – AR1, os Cambissolos Háplicos – CXbd1 e CXbd2, os Latossolos Brunos – LBd1 e LBd2, os Latossolos Vermelhos – LVd4 e LVd8 e as associações de Nitossolo Háplico e Cambissolo Háplico – NXd, Organossolo Mésico e Gleissolo Melânico – OYs2, Neossolo Litólico e Afloramento Rochoso – RLd, Neossolo Litólico e Cambissolo Háplico – RLh1, Neossolo Litólico e Cambissolo Húmico – RLh2 e Cambissolo Háplico e Latossolo Bruno – CXbd5 (BOGNOLA *et al.*, 2002a; BOGNOLA *et al.*, 2002b; FASOLO *et al.*, 2002).

A vegetação característica da BHAP está classificada, conforme a Classificação da Vegetação Brasileira – CVB (IBGE, 2004), em duas regiões fitoecológicas distintas: a Floresta Ombrófila Mista (aluvial, montana e altomontana), com 98,14% de área, e a Estepe Gramíneo-Lenhosa (campo natural) com apenas 1,86% da área total (FASOLO *et al.*, 2002).

MATERIAIS E MÉTODOS

A execução dos mapas e a geração de modelo digital do terreno foram realizadas no Sistema de Informação Geográfica – SIG com os *softwares* de geoprocessamento ArcView 3.2 (ESRI, 1999) e o programa SPRING 5.0 (INPE, 2007). Para a realização dos trabalhos, foram utilizadas: ortofotocartas coloridas (escala 1:10.000), de abril/2001, plantas planialtimétricas, com curvas de nível equidistantes de 5 m, rede de drenagem e vias de acessos, em arquivo *Drawing Exchange*

Format (.dxf) georreferenciados, obtidas do trabalho UEPG (2002) e imagens de satélites, bandas 2B, 3R e 4G, na cena 221/077 dos satélites: LANDSAT-5/TM de 26.05.1984; LANDSAT-5/TM de 23.04.1995 e LANDSAT-7/ETM⁺ de 17.03.2002 e na cena 157/128 dos satélites CBERS-2/CCD de 07.03.2007 e CBERS_2B/CCD de 29.08.2009, todas em formato digital e obtidas no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (1984, 1995, 2002, 2007 e 2009).

Inicialmente, criou-se um banco de dados e um projeto, em ambiente SPRING, com os limites em coordenadas planas dentro do sistema de projeção *Universal Transversa de Mercator* – UTM, *Datum Horizontal South American* 1969 – SAD 69, meridiano central 51° Oeste de Greenwich, fuso 22 Sul. Em seguida, foram criadas as categorias do tipo: temático (TE) e imagem (IMG) para receber os Planos de Informações (PIs) necessários para o georreferenciamento das imagens de satélites (LEMOS, 2010).

Os arquivos da rede de drenagem e acessos foram convertidos e importados ao projeto Tese no SPRING, por meio da entidade Linha com Ajuste (TE) e as imagens de satélites, que se encontravam no formato *Tagged Image File Format* (.tif), foram convertidas para o formato imagem no SPRING (.spg), por meio do módulo IMPIMA. Passando, então, para a etapa de importação, registro e georreferenciamento, por meio da seleção de 10 pontos de controle, em média, pelo modo tela, tomando-se como referência os PIs de hidrografia e vias (LEMOS, 2010).

Para o cálculo da previsão do volume de sedimentos retido na represa de Alagados, no período de 1984 a 2007, utilizou-se a Equação 1; a contribuição apenas da BHAP, por ser essa a área de estudo e adotou-se, 1,45 t.m⁻³ como valor do peso específico aparente médio dos

depósitos, por ser a areia o material predominante que fica depositado no fundo dos pequenos reservatórios, conforme recomendação de Carvalho (2008).

Determinou-se, ainda, o aporte de sedimentos que alcança o exutório da bacia (Equação 2), sendo que, para isso, consideram-se os valores médios para as perdas de solos calculados por Lemos (2010); e o valor médio encontrado para o coeficiente SDR, de acordo com as equações apresentadas no Quadro 1 e Equações 3 e 5.

A eficiência de retenção do sedimento afluente ao reservatório foi obtida pelas Equações 6 e 7, referentes à curva de Churchill, por ser recomendada para pequenos reservatórios.

O cálculo da degradação do solo foi feito através da Equação 8, utilizando o valor do aporte de sedimentos que alcança o exutório da bacia, calculado para os períodos de 1984, 1995, 2002 e 2007, multiplicados pela área da mesma em m². Sendo considerado como peso específico aparente do solo igual a 1,66 t.m⁻³, obtido pela média dos pesos específicos aparentes de 12 amostras coletadas em diferentes pontos na BHAP, cujo valor é próximo do sugerido por Carvalho (2008). A altura total do solo desgastado foi obtida com a multiplicação da altura média pela quantidade total de anos do período avaliado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a estimativa do volume de sedimento retido (Equação 1) na represa de Alagados, no período de 1984 a 2007, foi necessário obter o aporte de sedimentos que chegou ao exutório da bacia, neste período, por meio do valor médio das perdas de solos. Conforme Lemos (2010), os valores médios encontrados para as perdas de solos por erosão entressulcos (laminar), na BHAP, por meio da Equação de Perda de Solos – EUPS, foram de 40,036 t.ha⁻¹.ano⁻¹ para o período de 1960 a 1984; de 62,614 t.ha⁻¹.ano⁻¹ para 1985 a 1995; de 35,409 t.ha⁻¹.ano⁻¹ para 1996 a 2002; e de 46,112 t.ha⁻¹.ano⁻¹ entre 2003 a 2007. Portanto, o valor médio para todo o período avaliado foi de 46,043 t.ha⁻¹.ano⁻¹.

O coeficiente SDR, que se aplica na Equação 2, para o cálculo do aporte de sedimentos, foi obtido pela média dos valores

encontrados nas equações apresentadas no Quadro 1 (Figura 2).

De acordo com a Figura 2, os valores de SDR variaram entre 0,082 e 0,452 %, com uma média de 0,216 %, sendo que a equação que mais se aproximou do valor médio foi a equação de *Vanoni*. Esse resultado ficou próximo do valor obtido por Souza *et al.* (2006), que foi de 0,21 para uma pequena bacia do Rio Grande do Sul, por meio da equação de *Vanoni*; e Chaves (2010), que obteve uma variação de 0,12 a 0,52, com a média de 0,24, calculada para a bacia do rio Pípiripau, usando as mesmas equações deste estudo, sendo que a equação de *Vanoni*, também, foi a que mais se aproximou do valor médio.

Considerando o valor de 0,216 para SDR, 16.353,70 ha para área da BHAP, valor médio

de perda de solos de 46,043 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e aplicando a Equação 2, tem-se o aporte de

sedimentos médio de 1.626,414 t.ano⁻¹, para o período de 1984 a 2007 (Tabela 1).

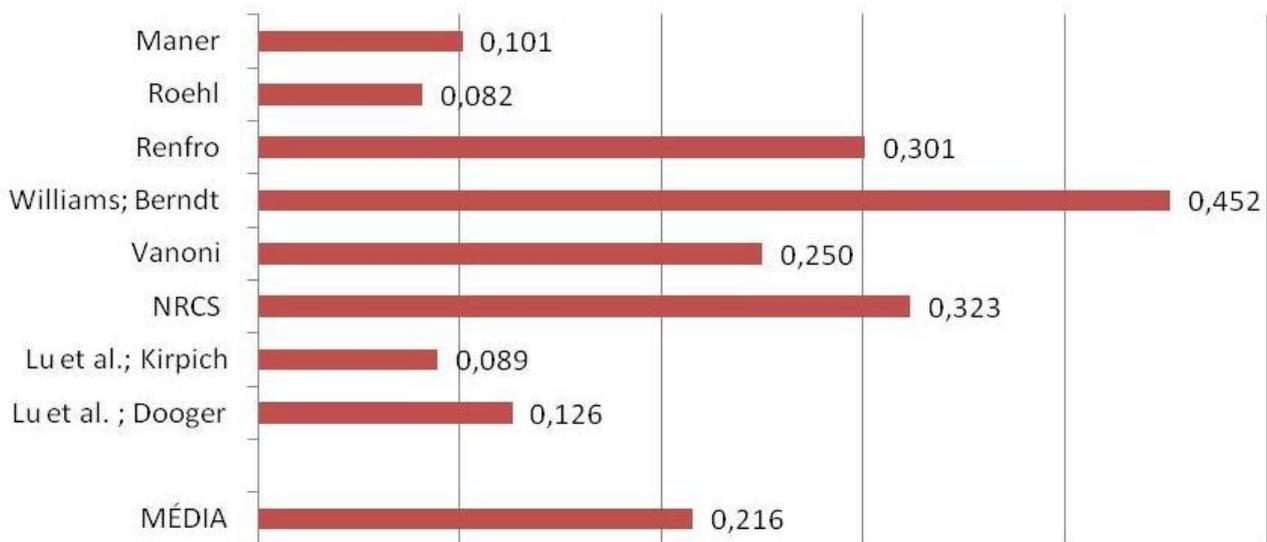


Figura 2. Relação de aporte de sedimento – SDR (%) para BHAP

Tabela 1. Valores médios anuais do aporte de sedimentos no exutório da BHAP, no período de 1984 a 2007.

PERÍODO	1984	1995	2002	2007	Média
A _S (t.ano ⁻¹)	1.414,231	2.211,776	1.250,787	1.628,860	1.626,414

NOTA: A_S = Aporte de Sedimentos.

Ainda, para a aplicação da Equação 1, é necessário determinar a eficiência de retenção de sedimento afluyente ao reservatório. Portanto, considerando o reservatório de Alagados como sendo de pequeno porte, o cálculo para a obtenção desse coeficiente foi realizado pelas Equação 6 e 7, referentes a curva de Churchill. Primeiramente, foi necessário encontrar o índice de sedimentação através da Equação 6, sendo empregado o volume do reservatório de 27,7 milhões de m³ de água, vazão média de 9,5 m³.s⁻¹, e comprimento de 10.700 m, resultando em 0,7945 x10⁹ s²/m, que multiplicado pelo

valor da aceleração da gravidade (9,815 m.s⁻²), obtém-se o valor de 7,798x10⁹ (adimensional).

Com a Equação 7, o valor obtido para a eficiência de retenção de sedimento foi de 95,18%. Portanto, o valor encontrado para o volume de sedimento depositado anualmente nos períodos de 1984, 1995, 2002 e 2007 foi de 928,321; 1.451,840; 821,034; e 1.069,206 m³.ano⁻¹, respectivamente. Sendo a média para esses 23 anos de 1.067,600 m³.ano⁻¹ e o volume total obtido foi de aproximadamente 24.554,81 m³ (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios anuais do aporte ou volume de sedimentos depositados na represa de Alagados, no período de 1984 a 2007.

PERÍODO	1984	1995	2002	2007	Média Anual
S _R (t.ano ⁻¹)	1.346,065	2.105,168	1.190,499	1.550,349	1.548,020
S _R (m ³ .ano ⁻¹)	928,321	1.451,840	821,034	1.069,206	1.067,600
VOLUME TOTAL	24.554,81 m³				

NOTA: S_R = Aporte ou Volume de Sedimento.

Na sequência calculou-se a degradação do solo, encontrando os valores de 5,21 μ.ano⁻¹

para 1984; 8,15 μ.ano⁻¹ no período de 1995; 4,61 μ.ano⁻¹ em 2002; e 6,00 μ.ano⁻¹ para 2007,

sendo que a média para todo o período foi de 5,99 $\mu\text{.ano}^{-1}$ (Tabela 3). Com esse valor médio e o total de anos analisados, obteve-se a altura

total do desgaste de solo igual a 0,138 mm, em toda a BHAP.

Tabela 3. Valores médios da espessura de degradação do solo para 1984 a 2007 na BHAP.

PERÍODO	1984	1995	2002	2007	MÉDIA
h (μ)	5,21	8,15	4,61	6,00	5,99

NOTA: 1 μ = 10^{-3} mm = 10^{-6} m

CONCLUSÕES

Os estudos realizados sobre a Bacia Hidrográfica do Alto Curso do rio Pitangui - BHAP conduziram às seguintes conclusões:

- Os valores calculados para o coeficiente de relação de aporte (SDR) ficaram entre 0,082 e 0,452, sendo o valor médio de 0,216 e a eficiência de retenção de sedimento, foi de 95,18%, Conseqüentemente, os valores médios anuais do aporte de sedimentos e do volume de sedimentos depositados para o período de 1984 foi de 1.414,231 t.ano^{-1} e 928,321 $\text{m}^3\text{.ano}^{-1}$, para 1995 de 2.211,776 t.ano^{-1} e 1.451,840 $\text{m}^3\text{.ano}^{-1}$, para 2002 de 1.250,787 t.ano^{-1} e 821,034 $\text{m}^3\text{.ano}^{-1}$ e para 2007 de 1.628,860 t.ano^{-1} e 1.069,206 $\text{m}^3\text{.ano}^{-1}$, sendo a média para esses 23 anos de 1.626,414 t.ano^{-1} e 1.067,600 $\text{m}^3\text{.ano}^{-1}$.
- A altura de degradação do solo para os anos de 1984, 1995, 2002 e 2007 foram de 5,21 $\mu\text{.ano}^{-1}$, 8,15 $\mu\text{.ano}^{-1}$, 4,61 $\mu\text{.ano}^{-1}$ e 6,00 $\mu\text{.ano}^{-1}$, respectivamente, sendo que a média foi de 5,99 $\mu\text{.ano}^{-1}$. A altura total do solo desgastado, para todo o período analisado, referente a erosão entressulcos (laminar) foi de 0,138 mm, em toda a BHAP.

REFERÊNCIAS

- BOGNOLA, I. A.; FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; POTTER, R. O.; BHERING, S. B.; Levantamento de Reconhecimento dos solos da região centro-leste do Estado do Paraná (área 10). **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, n. 11, 2002a. 110p.
- BOGNOLA, I. A.; POTTER, R. O.; CARVALHO, A. P.; FASOLO, P. J.; BHERING, S. B.; MARTORANO, L. G. Caracterização dos Solos do Município de Carambeí, PR. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, n. 8, 2002b. 75p.
- BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 1998.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 600p.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 2000. 140p.
- CHAVES, H. M. L. Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. 2010. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p. 1469-1477, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n4/43.pdf>> Acesso em: 01.10.14.
- COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Geração**. Publicado em: 08/03/2006. Disponível em: <<http://www.copel.com/pagcopel.nsf>> Acesso em: 28.05.2008.
- DIAZ, J. S. **Control de erosion em zonas tropicales**. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial Santander, 2001. 555p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SBCS**. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos - Embrapa Solos, 2006. 412p.
- FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P.; POTTER, R. O.; BOGNOLA, I. A.; BHERING, S. B.; MARTORANO, L. G. Caracterização dos Solos do Município de Castro, PR. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, n. 9, 2002. 88 p.
- GOULART, C. F. **Diagnóstico e zoneamento ambiental da represa Alagados - Ponta Grossa**. 2001. 51 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental), Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2001.
- IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas climáticas do Paraná**. 2000. Disponível em: <http://200.201.27.14/Site/Sma/Cartas_Climaticas/Cartas_Climaticas.htm> Acesso em: 17.10.2007.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa Vegetação do Brasil**. Escala 1:5.000.000. 3. ed. 2004. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Murais/> Acesso em: 25.04.2009.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagens do Satélite CBERS 2 – Sensor CCD**. Órbita 157, Ponto 128, composição colorida nas bandas 2, 3 e 4 (BRG).

- Data: 07.03.2007a. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 26.03.2007.
15. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagens do Satélite CBERS 2B** – Sensor CCD. Órbita 157, Ponto 128, composição colorida nas bandas 2, 3 e 4 (BRG). Data: 29.08.2009. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 13.09.2009.
16. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagens do Satélite LANDSAT 5** – Imagem TM. Órbita 221, Ponto 077, composição colorida nas bandas 2, 3 e 4 (BRG). Data: 26.05.1984. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 06.11.2007.
17. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagens do Satélite LANDSAT 5** – Imagem TM. Órbita 221, Ponto 077, composição colorida nas bandas 2, 3 e 4 (BRG). Data: 23.04.1995. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 16.08.2008.
18. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Imagens do Satélite LANDSAT 7** – Imagem ETM⁺. Órbita 221, Ponto 077, composição colorida nas bandas 2, 3 e 4 (BRG). Data: 17.03.2002. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 18.01.2008.
19. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **SPRING 5.0**– Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas. 2007b. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring>> Acesso em: 20.01.2009.
20. LEMOS, C. F. **Evolução da erosão na bacia hidrográfica do alto curso do rio Pitangui** – PR. 2010. 236 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2010.
21. LU, H.; MORAN, C.J.; PROSSER, I. P. Modeling sediment delivery ratio over the Murray Darling basin. *Environ. Modelling Software*, v. 21, p. 297-1308, 2006.
22. MANER, S. B. Factors affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Trans. Am. Geoph. Union*, v. 39, p. 669-675, 1958.
23. MINEROPAR - Minerais do Paraná. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:650.000. Curitiba: MINEROPAR/UFPR, 2006a. 63p.
24. MINEROPAR - Minerais do Paraná. **Geologia do Paraná - Atlas geológico do Estado do Paraná**. Escala base 1:250.000. Curitiba, 2006b. 116p. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/mineropar>> Acesso em: 10/10/2007.
25. OUYANG, J. B. D. **Predicting sediment delivery ratio in saginaw bay watershed**. In: NATIONAL ASSOCIATION OF ENVIRONMENTAL PROFESSIONALS CONFERENCE PROCEEDINGS, 22nd, 1997, Orlando, May 19-23, p. 659-671, 1997. Disponível em: <<http://www.iwr.msu.edu/rusle/sdr/sag-sdr.htm>> Acesso em: 27.09.09.
26. PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre, 2003. 628p.
27. PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In **Drenagem Urbana**. Org. por TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T., Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, p. 107–165, 1995.
28. RENFRO, G. W. Use of erosion equations and sediment delivery ratios for predicting sediment yield, in present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. **USDA – Agricultural Research Service**, v.40, p. 33-45, 1975.
29. ROEHL, J. E. Sediment source areas, and delivery ratios influencing morphological factors. *Int. Assoc. Hydro. Sci.*, v. 59, p. 202-213. 1962.
30. SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 7, n. 2, p. 03-11, 2006.
31. SILVA, A.; TERRA, V. S. S.; VIEGAS FILHO, J. S. **Determinação do tempo de concentração da bacia montante do arroio chasqueiro**. In: Congresso de Iniciação Científica - CIC, 16; Encontro de Pós Graduação - ENPOS, 9. 2007. Pelotas: UFPel/Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, 27 a 29 de nov. 2007. Disponível em: <http://www.ufpel.tche.br/cic/2007/cd/_pages/engenharias.html> Acesso em: 10.10.09.
32. SILVA, K. A. **Análise da eficiência de métodos de controle de enchentes na atenuação de picos de cheias utilizando o modelo computacional SWMM** – Storm Water Management Model. 2007. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.
33. SILVA, V. C. Estimativa da erosão atual da bacia do rio Paracatu (MG / GO / DF). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 34, n. 3, p. 147-159, 2004.
34. SOUZA, C. F.; ACIOLLY, L. A.; DORNELES, A. M.; MERTEN, G. Comparação dentre estimativa de produção de sedimentos na bacia do rio Potiribu. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 7. 2006. Porto Alegre. *Anais ...* Porto Alegre, 2006. 20p.
35. UEPG - Universidade Estadual de Ponta Grossa. **Bacia hidrográfica do manancial Alagados**. Ponta Grossa: UEPG/NUCLEAM - Núcleo de Estudos em Meio Ambiente. Convênio: UEPG/COPEL/SANEPAR/ALL/IAP, meio digital - 6 CD's, em formato PDF, AutoCad R 14 (dwg e plt), 2002.
36. VANONI, V. A. **Sedimentation engineering**. Reston, ASCE - Manuals and Report on Eng. (Practice n. 54), 1975. 405p.
37. WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment yield computed with universal equation. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Hydrol. Div.*, v. 98, p. 2087-2098, 1972.

*Manuscrito recebido em: 19 de Julho de 2012
Revisado e Aceito em: 29 de Outubro de 2014*