

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Calibração e validação da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE)
utilizando dados hidrossedimentológicos na bacia do Ribeirão Pípiripau (DF)

Estudante: Celina Rubiano da Silva, matrícula 06/31868

Linha de Pesquisa: Manejo de Bacias Hidrográficas

Orientador: Professor Henrique Marinho Leite Chaves

Trabalho apresentado ao
Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de
Brasília, como parte das
exigências para obtenção do
título de Engenheiro Florestal.

Brasília – DF, julho de 2010

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Calibração e validação da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE)
utilizando dados hidrossedimentológicos na bacia do Ribeirão Pipiripau (DF)

Estudante: Celina Rubiano da Silva, matrícula 06/31868

Linha de Pesquisa: Manejo de Bacias Hidrográficas

Orientador: Professor Henrique Marinho Leite Chaves

Trabalho apresentado ao
Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de
Brasília, como parte das
exigências para obtenção do
título de Engenheiro Florestal.

Brasília – DF, julho de 2010

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Calibração e validação da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE)
utilizando dados hidrossedimentológicos na bacia do Ribeirão Pípiripau (DF)

Estudante: Celina Rubiano da Silva, matrícula 06/31868

Menção: _____

Aprovada por:

Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

Membro da Banca

Prof. Dr. Eraldo Matricardi

Membro da Banca

Professor Dr. Henrique Marinho Leite Chaves

Orientador

Brasília – DF, julho de 2010

RESUMO

Modelos hidrológicos são de suma importância para a análise ambiental de bacias hidrográficas. Os crescentes conflitos pelo uso da água em algumas regiões indicam o potencial da hidrologia na prognose do comportamento da bacia, de acordo com componentes ambientais e de uso do solo. O ajuste de modelos para condições regionais permite aos gestores melhor planejamento da oferta de água, mitigando ou mesmo evitando conflitos futuros. Assim, foi feita a calibração da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) para a bacia do Ribeirão Pipuripau, partindo de parâmetros médios da bacia. A validação do ajuste foi feita pelo índice de Nash-Sutcliffe. Desde que exista suficiência de dados, a metodologia pode ser aplicada em outras bacias hidrográficas.

PALAVRAS-CHAVE: calibração, validação, MUSLE, hidrossedimentologia.

ABSTRACT

Calibration and validation of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) using hydrologic and sedimentologic data in Ribeirão Pipuripau basin (DF)

Hydrologic models are very important for environmental analysis in watersheds. The increasing number of conflicts involving water quality and availability indicates the potential of Hydrology in predictions about the future situation of the basin, according to environmental and soil use components. Adjusting models to regional conditions is a very important tool in watershed management when the intention is avoid future conflicts. So the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) was calibrated for Ribeirão Pipuripau basin, using average parameters of the watershed. The adjustment was validated by the Nash-Sutcliffe coefficient. With available and sufficient data, it is possible to use the same methodology in other watersheds.

KEY WORDS: calibration, validation, MUSLE, hydrossedimentology.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	06
2. HIPÓTESE.....	07
3. OBJETIVOS.....	07
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	07
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
5.1.Obtenção dos Dados.....	16
5.2.Estimativa da Vazão Sólida.....	17
5.3.Obtenção do Escoamento Direto.....	18
5.4.Calibração da MUSLE.....	18
5.5.Validação do Ajuste.....	19
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
6.1.Estimativa da Vazão Sólida.....	19
6.2.E escoamento Direto e Seleção dos Eventos.....	20
6.3.Calibração da MUSLE.....	25
6.4.Validação do Ajuste.....	27
7. CONCLUSÕES.....	32
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1 – INTRODUÇÃO

A modelagem matemática é de grande serventia na Engenharia Florestal por tentar aproximar em números o comportamento da natureza. No manejo de bacias hidrográficas, pode-se desenvolver modelos de ajuste razoável, dada a base física da hidrologia. Fatores fundamentais no desenvolvimento de modelos hidráulico-hidrológicos são abióticos. A água, como fluido, tem seu comportamento previsto claramente por leis da física. Claro que é possível fazer previsões quanto ao crescimento de uma floresta, por exemplo, mas em última instância, a floresta é composta por seres vivos, e a vida nem sempre se comporta como o esperado. Assim, modelos hidráulico-hidrológicos regionais confiáveis podem ser desenvolvidos com base em modelos globais e ajuste de parâmetros.

Tendo em vista o crescimento demográfico acelerado do Distrito Federal e a crescente taxa de impermeabilização do solo, não é de espantar que a demanda por água esteja aumentando e que a oferta, quando não se reduz, ao menos permaneça constante. Não são raros nem recentes os casos de conflito pelo uso da água no Distrito Federal. Justamente na tentativa de gerir os recursos hídricos nos seus múltiplos usos é que a bacia hidrográfica do Ribeirão Pípiripau foi incluída no Programa do Produtor de Água, da Agência Nacional de Águas – ANA.

O programa se baseia na remuneração do produtor rural que adotar em sua propriedade as práticas conservacionistas previstas pela ANA. Um dos principais problemas em bacias rurais é o aporte de sedimentos pelo canal, o que afeta tanto a qualidade da água (elevação da turbidez, carga de agrotóxicos) quanto à quantidade de água disponível (já que o assoreamento reduz as vazões). Tal aporte de sedimentos é gerado principalmente por processos erosivos que ocorrem, em maior parte, durante eventos chuvosos. Reduzir esse aporte é um dos principais objetivos da adoção de práticas conservacionistas. Assim, é essencial para a ANA que o cálculo do abatimento da erosão seja o mais próximo possível do real, para que os pagamentos aos produtores sejam feitos de forma correta.

A importância do presente trabalho é justamente calibrar a equação universal de perda de solo modificada (MUSLE) às condições locais de aplicação, pois esta é a equação que será utilizada para calcular o aporte de sedimento da bacia, e conseqüentemente, a remuneração dos produtores rurais participantes do Programa.

2 – HIPÓTESE

A equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) e calibrada para a bacia em estudo é capaz de explicar o comportamento hidrossedimentológico do Ribeirão Pípiripau.

3 – OBJETIVOS

- Obter correlação válida entre vazão líquida e vazão sólida (aporte de sedimento) na bacia do Pípiripau;
- Calibrar o coeficiente multiplicativo da MUSLE para condições regionais;
- Validar tal calibração pelo Coeficiente de Nash-Sutcliffe, permitindo o uso do modelo na aplicação do Programa do Produtor de Água, da Agência Nacional de Águas – ANA.

4 – REVISÃO DE LITERATURA

A hidrologia tem ganhado importância nas últimas décadas, dada a demanda crescente por água em quantidade suficiente e qualidade satisfatória para abastecer as necessidades humanas e manter as condições ambientais necessárias à preservação dos ecossistemas.

Assim, modelos matemáticos estão em constante aperfeiçoamento para adaptar-se às diversas condições regionais a que são submetidos. Corpos d'água são, por questões topográficas, o destino de tudo que é arrastado pela água da chuva, incluindo-se aí o sedimento responsável pelo assoreamento de canais e pela redução da qualidade da água. Desta forma, modelos estimadores de erosão como a USLE, a MUSLE e suas revisões, mesmo inicialmente desenvolvidos com fins de proteção do solo, têm sido muito utilizados na hidrologia para predição do aporte de sedimento em pequenas bacias hidrográficas (Mishra et al, 2006, apud Sadeghi et al, 2007).

Modelos matemáticos estimadores de erosão podem ser gerados a partir de gráficos hidrossedimentológicos, ter base causal, estocástica (aleatória no tempo) ou ainda empírica. A MUSLE é um modelo empírico, o que dá liberdade de calibração de seus parâmetros, dadas as condições regionais do local de aplicação do mesmo (Sadeghi et al, 2007).

A MUSLE é a modificação da Equação Universal de Perda de Solos (USLE), e foi proposta por Williams (1975). A principal diferença da modificação é que enquanto a USLE estima a erosão para um período, a MUSLE calcula o aporte de sedimento gerado por eventos chuvosos isolados, e é dada por:

$$Y = a (Q \times q_p)^b K C LS P \quad (1)$$

em que Y é o aporte de sedimento no exutório da bacia em um determinado evento (t), a e b são coeficientes de ajuste (adimensionais), Q é o volume de escoamento superficial (m^3), q_p é a vazão de pico do evento (m^3/s), K é a erodibilidade do solo ($t \text{ h/MJ mm}$), C é o fator de uso do solo, LS é fator de comprimento de rampa e declividade e P é o fator de práticas conservacionistas. Os três últimos fatores são adimensionais.

A MUSLE apresenta-se como um modelo de ampla aplicação, já que não tem muitos parâmetros e estes não exigem grande conhecimento sobre as condições das bacias estudadas para serem calibrados, sendo alterado de forma a se adaptar a regiões com características distintas das bacias utilizadas no seu desenvolvimento (Sadeghi et al, 2007).

Outra vantagem deste modelo é que ele foi desenvolvido em pequenas bacias, que apresentam pouca ou nenhuma variação na formação geológica, nos tipos e usos do solo, índices pluviométricos e no microclima. Além disso, por utilizar um fator de escoamento superficial em lugar do fator de erodibilidade da chuva da equação universal, foi capaz de captar 82% da variação no aporte de sedimentos, enquanto a USLE obteve apenas 47% de eficiência (Williams, 1975). Este autor ainda recomenda que se calibre a MUSLE para alcançar valores adequados de cada coeficiente para diferentes bacias hidrográficas.

Chaves (1991) analisou a sensibilidade dos parâmetros da MUSLE, a fim de garantir uma calibração eficiente dos parâmetros desta equação. Como os parâmetros da MUSLE são resultantes de fórmulas com diferentes coeficientes, foi identificado um total de 16 parâmetros responsáveis pelo cálculo final do aporte de sedimentos segundo este modelo. Os parâmetros mais sensíveis, isto é, os que exigem melhor ajuste para que não se incorra em erro, são utilizados justamente no cálculo de Q e q_p que foram observados no presente trabalho. Isso significa que utilizando esses dados, boa parte dos erros de estimativa está eliminada (Chaves, 1991).

Para o Distrito Federal e especificamente para a Bacia do Pípiripau, já existem boas estimativas das variáveis da MUSLE. Chaves e Piau (2008) alcançaram valores médios ponderados dos fatores K , LS , C e P para a bacia. Os parâmetros a e b da MUSLE podem ser estimados por diferentes metodologias. Avanzi et al. (2008) obtiveram $a = 14,96$ e $b = 0,59$, para uma bacia experimental em Aracruz, ES, a partir da linearização da MUSLE após o isolamento dos parâmetros (Johnson et al., 1985, apud Avanzi et al., 2008). Em uma bacia hidrográfica do Irã, Sadeghi et al. (2007) utilizaram $a = 11,8$ e $b = 0,56$. A MUSLE foi originalmente proposta em unidades fora do Sistema Internacional, e pela mera conversão das unidades para o SI, $a = 89,6$ e $b = 0,56$ (Williams, 1975, apud Chaves e Piau, 2008).

O parâmetro b (exponencial) varia muito pouco entre os trabalhos citados. Já o parâmetro a , que é multiplicativo, sofre variação significativa. Desta forma, este é o parâmetro que será calibrado neste trabalho para tentar melhorar o ajuste da MUSLE às condições do Distrito Federal, enquanto b será utilizado conforme proposto originalmente por Williams (1975).

A MUSLE se baseia na taxa de escoamento superficial de um determinado evento. Muitas vezes os dados disponíveis em quantidade suficiente para permitir análises de séries históricas não são de escoamento superficial direto, que deveria ser medido a cada evento chuvoso capaz de provocar escoamento. É mais prático, portanto, utilizar dados de vazão medidos em estações fluviométricas ao longo dos canais.

No entanto, uma dificuldade se impõe, quando se considera que a vazão no canal após um evento chuvoso é composta pela vazão de base e pela vazão direta. A primeira pode ser definida como a vazão natural do canal, abastecida pela água armazenada nos aquíferos. A vazão direta, por sua vez, corresponde ao escoamento superficial, ou seja, a água precipitada que não foi interceptada nem absorvida pelo solo (Oliveira et al, 2005). Assim, os hidrogramas devem ser decompostos, para que se estime a vazão direta, de forma a utilizá-la no cálculo do aporte de sedimentos pela MUSLE, sem superestimar os resultados.

O comportamento do hidrograma (Figura 4.1) e a posição de seu pico variam de acordo com as características fisiográficas da bacia e também dependem da duração e da intensidade da chuva (Carvalho & Silva, 2006).

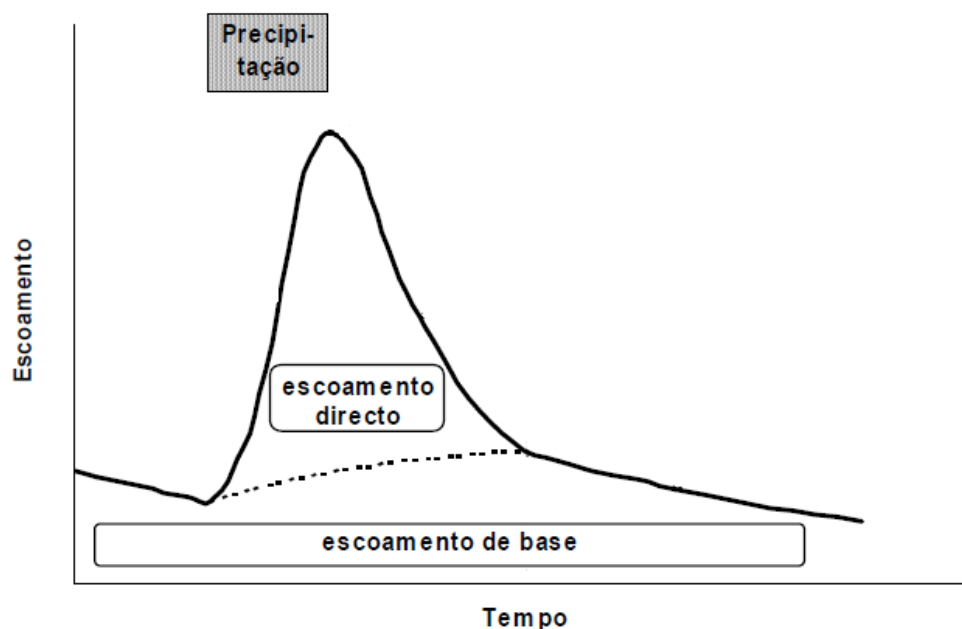


Figura 4.1: Modelo de hidrograma. Modificado de: Oliveira et al. (2005).

Dentro da hidrologia, existem diversas metodologias para decomposição de hidrogramas em escoamento direto e de base. A maioria delas, no entanto, está sujeita à subjetividade de análise, já que são métodos manuais (Arnold & Allen, 1999).

Tradicionalmente são utilizadas três metodologias manuais na decomposição de hidrogramas, baseadas na extrapolação das curvas e nos pontos de inflexão do hidrograma. Os pontos de inflexão serão sempre indicadores do início e do término do escoamento superficial, ou seja, apenas a vazão acima da ligação entre esses pontos será devida ao escoamento direto (ESCOAMENTO..., p.59-60). O que diferencia esses métodos entre si é a forma de extrapolação das curvas, ou seja, de que maneira os pontos de inflexão serão ligados (Figura 4.2). Dependendo da metodologia utilizada, o escoamento calculado a partir de um mesmo hidrograma pode ser maior ou menor.

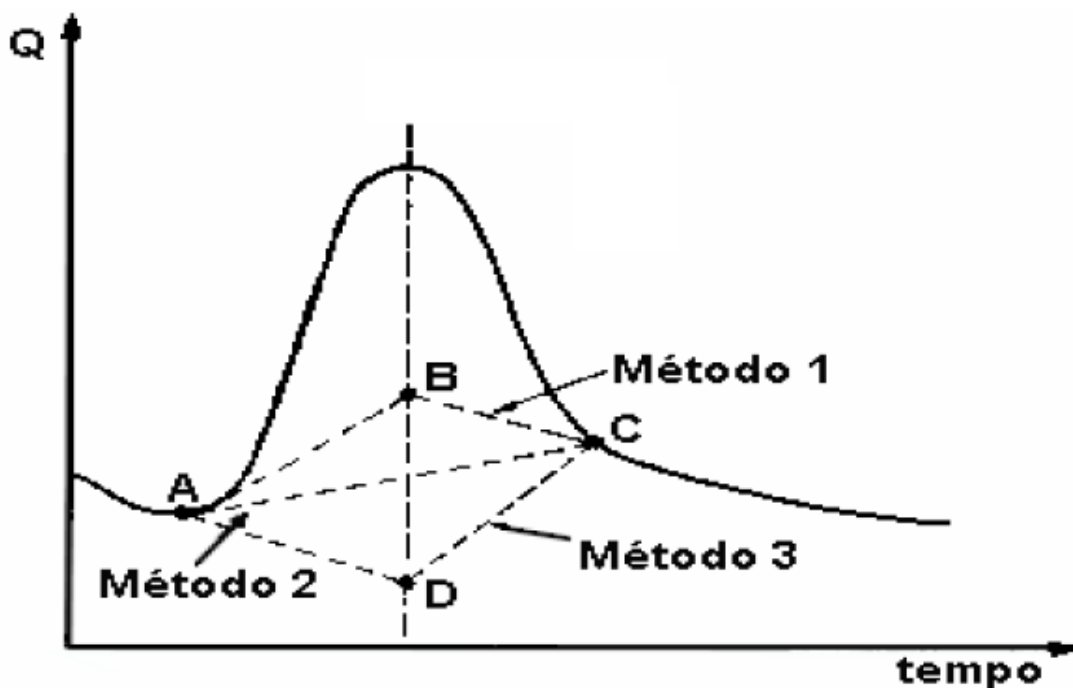


Figura 4.2: Hidrograma decomposto por três metodologias distintas. Os pontos A e C são os pontos de inflexão da curva. (Fonte: ESCOAMENTO..., p. 60).

Com o desenvolvimento de modelos digitais capazes de decompor hidrogramas, a análise e a geração de dados hidrológicos deve ser otimizada. Oliveira (2001, apud Oliveira et al. 2005) apresenta metodologia computadorizada que decompõe hidrogramas, permitindo a individualização dos eventos (Oliveira et al. 2005).

Tais métodos são relativamente simples e de fácil aplicação em hidrogramas de evento único. Neste trabalho foram utilizadas séries históricas de vazão em que os hidrogramas estão sobrepostos, isto é, antes que o efeito de um evento chuvoso termine na estação de monitoramento, inicia-se o efeito de outro evento, de forma que ocorre sobreposição das vazões diretas relativas a dois ou mais eventos.

O uso de algoritmos e filtros digitais na decomposição de hidrogramas retira do processo muitos dos elementos subjetivos presentes nas metodologias manuais, apresentando os mesmos níveis de acurácia (Arnold & Allen, 1999).

Um método analítico de decomposição de hidrogramas consiste em filtro que calcula a vazão de base a partir da vazão total (Nathan & McMahon, 1990, apud Arnold & Allen, 1999). O método é objetivo e de fácil compreensão, e está apresentado a seguir:

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (2)$$

onde q_t é a vazão filtrada, ou seja, a vazão de base no tempo t (em dias), β é o parâmetro do filtro (adimensional) e tem valor de 0,925 e Q é a vazão original (Arnold & Allen, 1999). Assim, a vazão direta pode ser calculada pela diferença entre a vazão original e a vazão filtrada.

Arnold & Allen (1999) citam trabalhos anteriores (Arnold et al. 1995; Mau & Winter, 1997) em que o filtro digital foi testado, obtendo resultados compatíveis aos das metodologias manuais de decomposição de hidrogramas. Comparando a vazão de base medida e a vazão calculada pelo filtro, Arnold & Allen (1999) encontraram índice de correlação (R^2) de 0,86, significando bom ajuste do modelo.

A hidrologia, como ciência de estudo e compreensão dos processos hidrológicos, é de extrema importância para a gestão dos recursos hídricos. Deve ser utilizada como ferramenta de trabalho pelos Engenheiros Florestais que atuam na área de Manejo de Bacias Hidrográficas (Lima, 2008). O principal desafio em relação à gestão da água na atualidade diz respeito a conciliar qualidade e quantidade. Isso significa gerir os recursos hídricos de forma a disponibilizar água para usos múltiplos, minimizando os conflitos e o desperdício.

A antropização de bacias hidrográficas de abastecimento, com compactação do solo e impermeabilização de zonas de recarga, gera aumento dos conflitos pelo uso da água. Isso ocorre devido ao aumento da demanda e redução da qualidade e em alguns casos da quantidade de água disponível. Nesse cenário foi criado pela ANA o Programa do Produtor de Água. Este é um programa de âmbito federal, que visa incentivar com pagamentos periódicos os proprietários rurais que preservem as áreas hidrograficamente sensíveis de suas propriedades (ANA, 2009b).

De acordo com o programa, serão remunerados os proprietários rurais que em um determinado período de tempo melhorarem os serviços ambientais em sua propriedade. Isto significa que serão recompensadas as ações que causem efeitos benéficos à sociedade em termos de melhoria na qualidade e aumento na quantidade de água disponível. A redução da erosão é um dos principais fatores de avaliação na quantificação de serviços ambientais. Adotar boas práticas de manejo reduz em quantidades significativas o aporte de sedimentos de uma bacia. Assim, um exemplo de aplicação do Programa Produtor de

Água é calcular a redução do aporte de sedimento em uma propriedade e remunerar o produtor de acordo com o volume proporcional de redução (ANA, 2009b).

A bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau tem características excelentes para ser escolhida como bacia experimental do Programa Produtor de Água. Isso porque os dados hidrológicos estão disponíveis em séries históricas iniciadas quando a bacia ainda era bem preservada. Assim é possível acompanhar as transformações hidrológicas ocorridas com a antropização da área. Além disso, a bacia é de abastecimento urbano e rural (Figura 4.3), e o aumento da demanda aliado à degradação ambiental da área (compactação e impermeabilização do solo), tem aumentado os conflitos pelo uso da água.

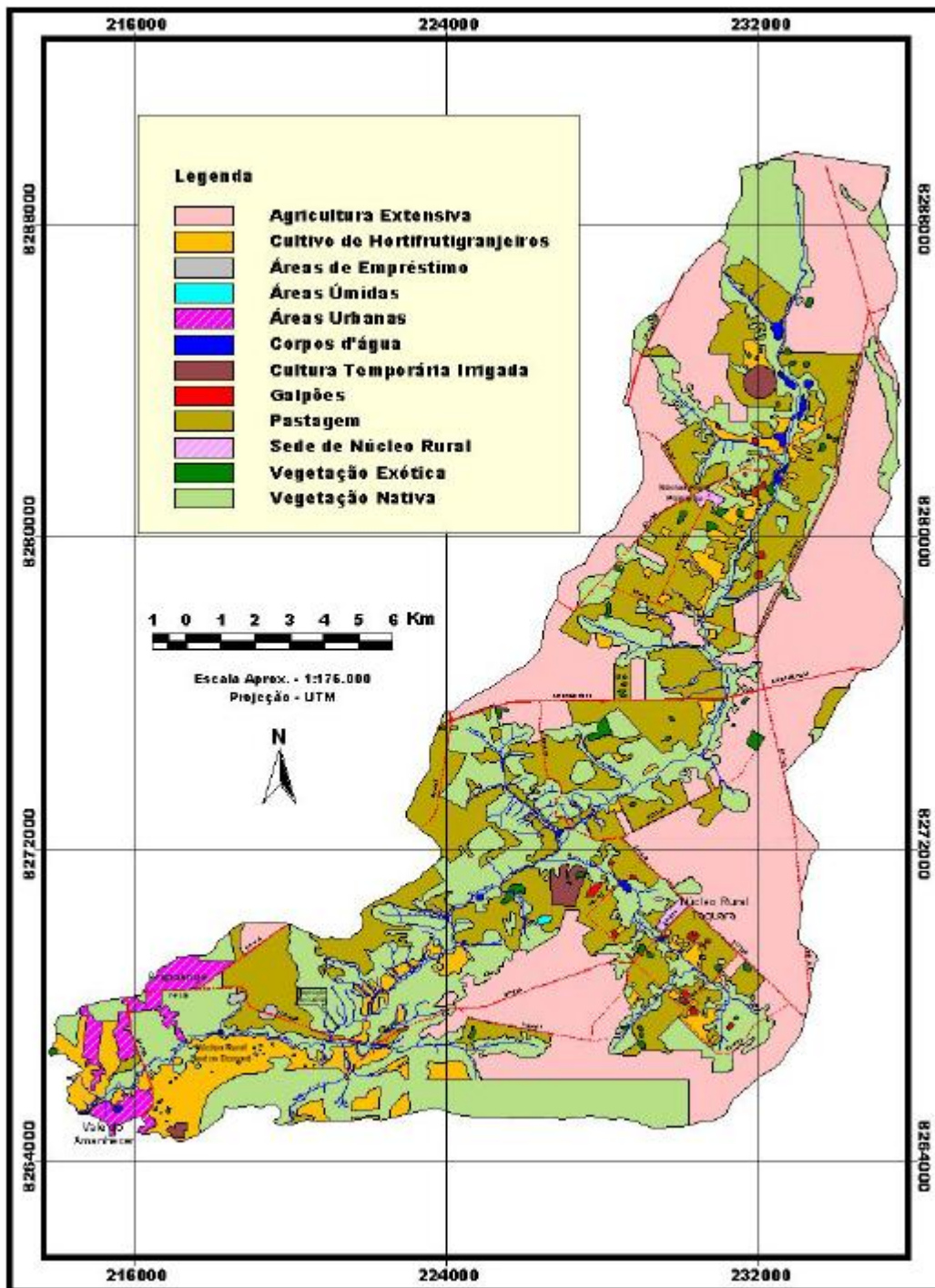


Figura 4.3: Mapa de Uso e Ocupação do Solo na Bacia do Ribeirão Pipiripau (CAESB, 2001).

Esta é, portanto, a área de estudo. A bacia hidrográfica se localiza no Distrito Federal e no estado de Goiás. A área de nascentes fica em Goiás (9,7%) e o restante faz parte do DF, em sua porção nordeste (Figura 4.4), perfazendo uma área de aproximadamente 23500 ha. (ANA, 2009a).

O Ribeirão Pípiripau é monitorado pela Agência Nacional de Águas, devido a registros de conflito pelo uso da água na bacia. Segundo documento do ano de 2009, há risco de racionamento no período seco, pois a vazão disponível (vazão total reduzida da vazão mínima ambiental, necessária para a manutenção do ecossistema) pode não ser suficiente para atender todos os usos nas quantidades demandadas nos meses mais secos do ano (ANA, 2009a).

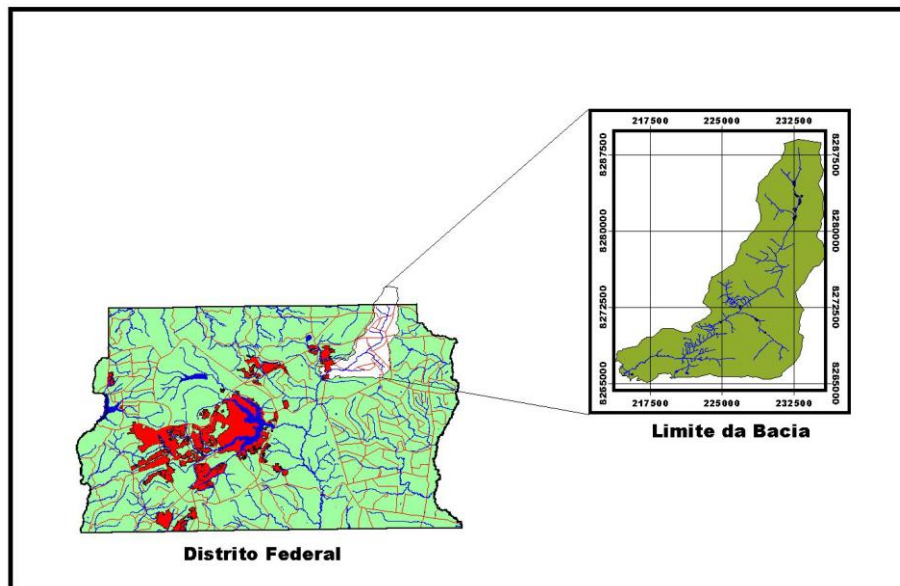


Figura 4.4: Localização da bacia hidrográfica estudada (Fonte: CAESB, 2001).

A geomorfologia da bacia indica relevo predominantemente plano (CAESB, 2001), o que aumenta o tempo de concentração, permitindo maior infiltração da água da chuva no solo. No entanto, em termos de pedologia, os solos da bacia são classificados como erodíveis (CAESB, 2001), resultando em altos índices de erosão quando realizada a agropecuária convencional.

A ausência de proteção do solo é a principal causa da erosão hídrica na bacia do Ribeirão Pípiripau. Cerca de 30% das Áreas de Proteção Permanente (APP's) previstas pelo Código Florestal (Lei 4771/65) está degradada (ANA, 2010). Muitas vezes, as áreas de mata ciliar remanescentes não são suficientes para impedir o aporte de sedimentos advindos de áreas antropizadas. Assim, a poluição difusa causada pelo carreamento de sedimentos para o curso d'água é o fator mais importante na redução da qualidade e da quantidade de água da bacia (ANA, 2010). Isso pode ser notado pela correlação existente entre os eventos chuvosos na bacia e a turbidez da água (Figura 4.5).

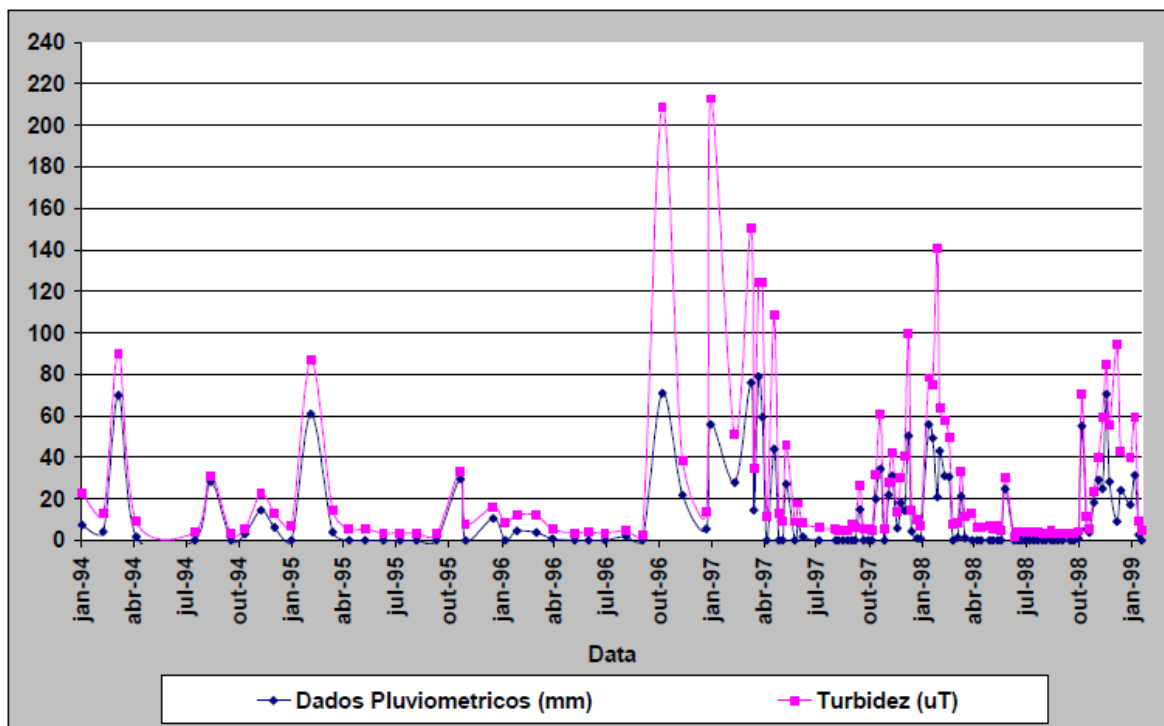


Figura 4.5: Turbidez e índices pluviométricos para um período de 5 anos no Ribeirão Pipiripau (CAESB, 2001).

Apesar de classificada como fornecedora de água de boa qualidade (Classe 1 de acordo com a Resolução CONAMA 357/05), a bacia do Ribeirão Pipiripau é a segunda pior bacia de captação da CAESB, com Índice de Qualidade de Água – IQA = 68,5 (ANA, 2010). Como agravante, é observada tendência de queda dos índices pluviométricos na bacia desde o ano de 1993 (CAESB, 2001).

5 – MATERIAL E MÉTODOS

5.1 – OBTENÇÃO DOS DADOS

Os dados hidrológicos de chuvas e vazões utilizados no presente trabalho foram obtidos no portal HIDROWEB (<http://www.hidroweb.ana.gov.br>), da ANA (Agência Nacional de Águas), em duas estações situadas ao longo da bacia do Ribeirão Pipiripau. Os dados pluviométricos são da estação Taquara (código 1547013) e os dados de vazão foram captados na estação Frinocap (código 60473000), a jusante da anterior. Essa escolha foi feita para que os efeitos do escoamento superficial gerado pela precipitação medida a montante fossem captados pelas medições na estação a jusante (Figura 5.1). Neste

trabalho, serão utilizadas as séries históricas de vazão e precipitação entre os anos de 1995 e 2009, incluindo tanto períodos com alto índice pluviométrico como anos mais secos, assim como alguns de pluviosidade mediana.



Figura 5.1 – Localização das Estações de Monitoramento Hidrológico na Bacia do Ribeirão Pipiripau. Fonte: ANA (2009)

Dados de Sólidos Suspensos Totais (mg/L) foram fornecidos pela CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal). Os valores de Sólidos Suspensos Totais (SST) disponíveis foram coletados entre os anos de 2002 e 2009, com frequência variável na obtenção desses dados.

5.2 – ESTIMATIVA DA VAZÃO SÓLIDA

Utilizando dados de Sólidos Suspensos Totais (mg/L) e de vazão líquida (m^3/s), foram obtidas as vazões sólidas (g/s) para as datas em que houve aferição de SST. Isto é, calculou-se qual o aporte de sedimento no exutório da bacia, já que a estação Frinocap está localizada a jusante de todas as outras.

A partir destes dados, foi feita uma análise de regressão entre os valores das vazões líquida e sólida observadas, de modo a obter uma correlação aceitável, que possa fornecer a vazão

sólida a partir da vazão líquida observada. Assim torna-se possível calcular o aporte de sedimento da bacia a partir da vazão (escoamento direto) gerada nos eventos chuvosos.

5.3 – OBTENÇÃO DO ESCOAMENTO DIRETO

A partir dos dados diários de vazão foram gerados hidrogramas anuais para o Ribeirão Pipiripau. Sabe-se que as chuvas mais intensas são responsáveis pelo maior aporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica (Williams, 1975). Portanto, para que não se superestime a quantidade de sedimento carreada pelos canais, é necessário decompor o hidrograma. Isso porque a vazão de pico de um evento chuvoso é formada pelo escoamento de base e pelo escoamento direto.

Os hidrogramas anuais foram então decompostos de acordo com a metodologia desenvolvida por Arnold & Allen (1999), consistindo em um filtro digital para determinar o escoamento direto a partir do escoamento total. A partir deste filtro, é possível estimar o escoamento de base. A diferença entre a vazão observada e a vazão de base indica a vazão correspondente ao escoamento direto, usado para calcular o aporte de sedimento da bacia em cada evento.

5.4 – CALIBRAÇÃO DA MUSLE

A MUSLE é largamente usada para estimar o aporte de sedimento em pequenas bacias hidrográficas, mas tem sido alterada para se adaptar a regiões com características distintas das bacias utilizadas para sua formulação (Sadeghi et al., 2007).

As variáveis K , C , LS , e P da Equação (1) já foram calibradas para a bacia do Pipiripau (Chaves & Piau, 2008), e podem ser consideradas confiáveis. Os valores calibrados, são, respectivamente, $0,0177 \text{ t ha h ha}^{-1}$, $0,114$, $2,142$ e $0,76$. As variáveis restantes, Q (m^3) e q_p (m^3/s), foram estimadas após filtragem dos dados observados na estação fluviométrica. Ainda assim, a MUSLE superestima o aporte de sedimento por evento. Desta forma, como em outros trabalhos, tentou-se calibrar o coeficiente multiplicativo (a) da equação.

Com os dados observados de aporte de sedimento na bacia para os eventos entre os anos de 2000 e 2005, utilizou-se a MUSLE para encontrar os valores ideais do coeficiente multiplicativo da equação para estes anos. Sabe-se que eventos chuvosos mais intensos são responsáveis pela maior parte do aporte de sedimentos (Williams, 1975). Assim, anos mais úmidos corresponderão a maiores índices erosivos, portanto com maior coeficiente

multiplicativo. Desta forma, foram utilizados dados de precipitação na calibração deste coeficiente.

5.5 – VALIDAÇÃO DO AJUSTE

A validação da correlação foi feita em dois períodos, entre 1995 e 1999, e de 2006 a 2009, perfazendo 9 anos. A validação foi feita pela comparação entre o aporte de sedimentos calculado pela MUSLE ajustada e o aporte observado.

Na validação foi utilizado o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970, apud Silva et al., 2008), para estimar a consistência do modelo. Esse coeficiente (E) pode ser entendido como o coeficiente de correlação R^2 , mas é mais confiável, pois foi desenvolvido especificamente para avaliar correlações hidrológicas, sendo assim mais restritivo, e é dado por:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o - Q_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

onde Q_o (m^3/s) é a variável observada, Q_m (m^3/s) é a variável estimada pelo modelo, \bar{Q}_o (m^3/s) é a variável média observada e t é o número de dados do evento.

O coeficiente E varia de $-\infty$ a 1, e o ajuste será melhor quanto mais próximo de um estiver. O modelo desenvolvido será considerado satisfatório quando $E > 0,75$ (Collischonn, 2001, apud Silva et al, 2008).

Caso a fórmula calibrada não seja validada, buscar-se-á modificação na MUSLE, utilizando variáveis climáticas.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 – ESTIMATIVA DA VAZÃO SÓLIDA

Na calibração da vazão sólida (g/s) em função da vazão líquida (m^3/s), a primeira foi obtida pelo produto da segunda pelos valores observados de SST. Dos valores obtidos, foram excluídos aqueles menores que 2 g/s , por não representarem aporte de sedimento significativo para a bacia. A correlação foi então gerada com os dados restantes, e um outlier foi retirado para melhor ajuste da equação. A relação obtida foi:

$$Q_{sol} = 2,3881 * Q_{liq}^{2,6588} \quad (4)$$

em que Q_{sol} (g/s) é a vazão sólida e Q_{liq} (m³/s) é a vazão líquida registrada na estação fluviométrica. A correlação obtida é satisfatória, com $R^2 = 0,89$, conforme indicado no gráfico abaixo:

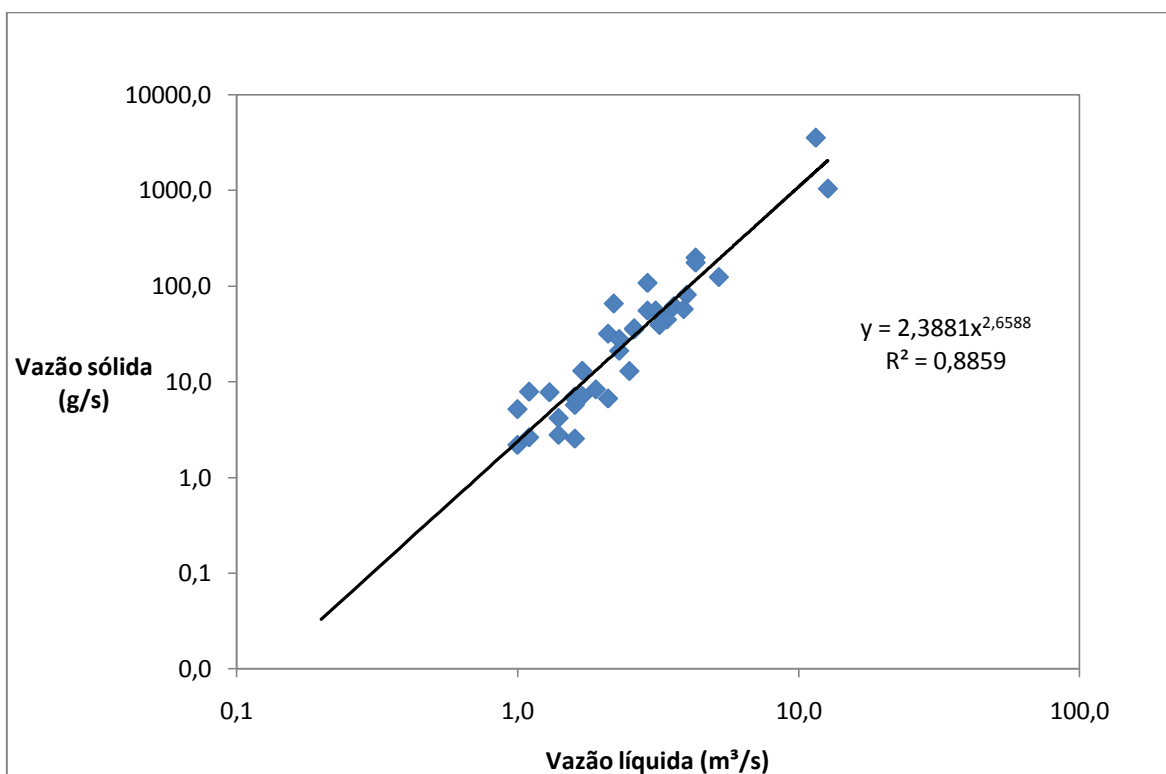


Figura 6.1: Correlação obtida entre os dados observados de vazão líquida e sólida na estação Frinocap, na bacia do Ribeirão Pipiripau.

É importante considerar que ao utilizar os valores de SST para cálculo da vazão sólida, supõe-se que todo o aporte de sedimento da bacia está em suspensão no curso d'água. No entanto, sabe-se que parte do sedimento carregado permanece no leito como sólido de fundo. Assim, é possível que o ajuste subestime o aporte de sedimento total na bacia.

6.2 – ESCOAMENTO DIRETO E SELEÇÃO DOS EVENTOS

Após a utilização do filtro digital proposto por Arnold & Allen (1999), foram gerados hidrogramas decompostos para o período de 2000 a 2005, anos utilizados na calibração da MUSLE (Figuras 6.2 a 6.7).

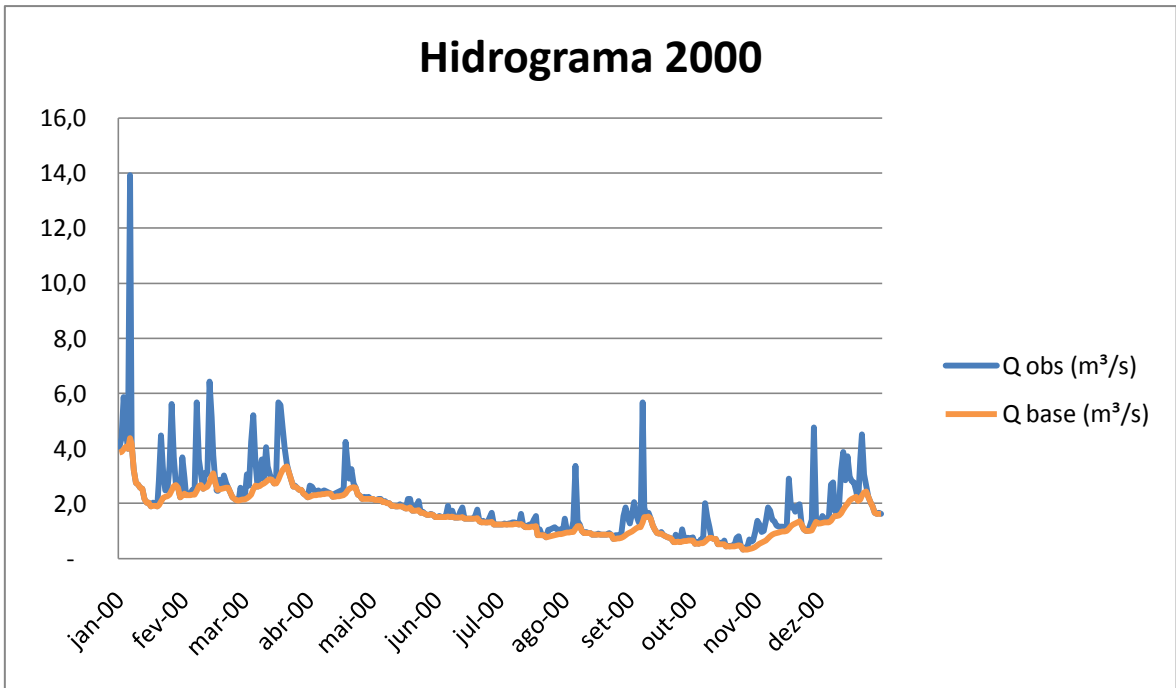


Figura 6.2: Decomposição do hidrograma em vazão total (m^3/s) e escoamento de base (m^3/s) para o ano 2000.

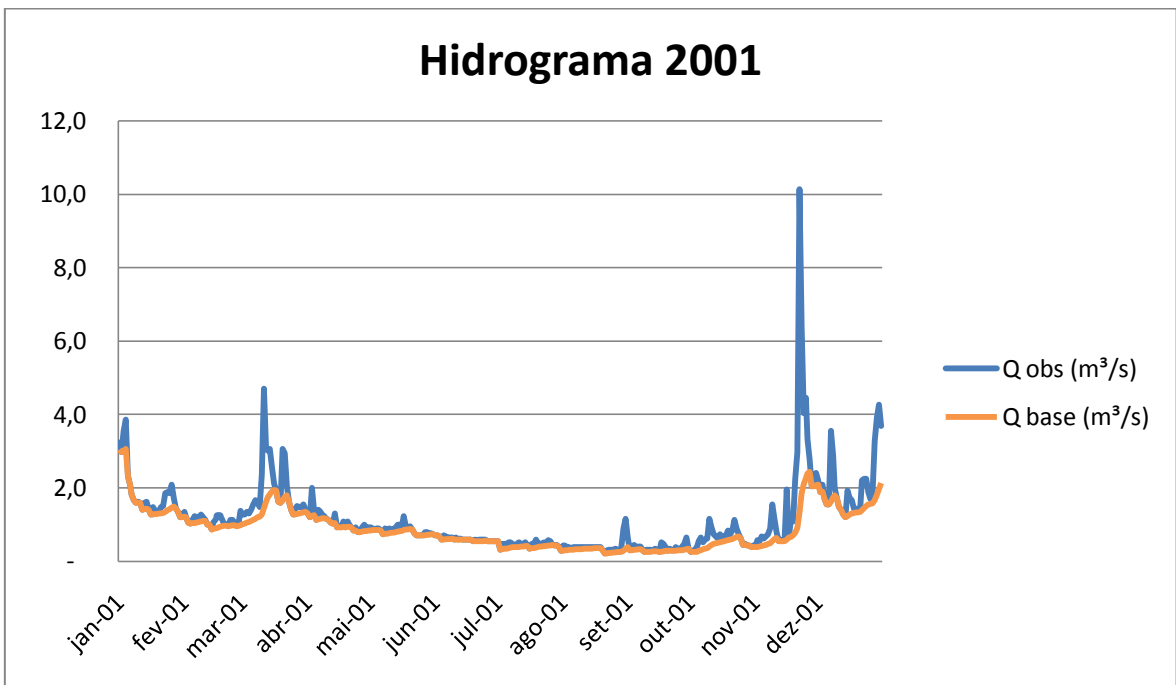


Figura 6.3: Decomposição do hidrograma em vazão total (m^3/s) e escoamento de base (m^3/s) para o ano de 2001.

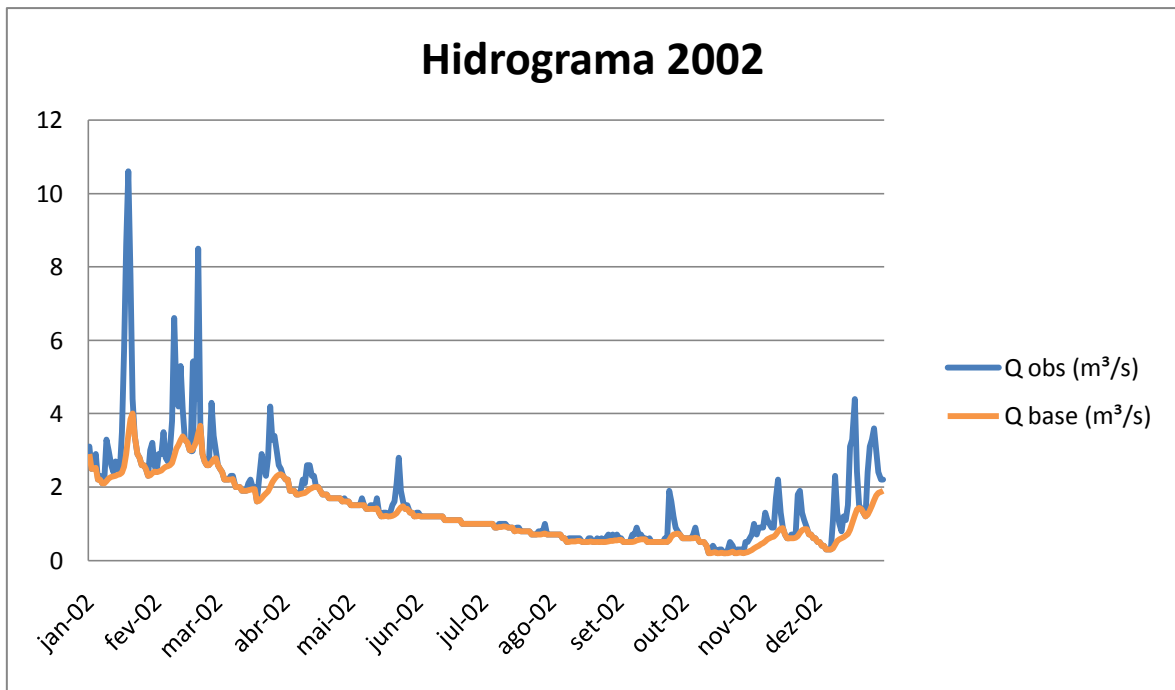


Figura 6.4: Decomposição do hidrograma em vazão total (m³/s) e escoamento de base (m³/s) para o ano de 2002.

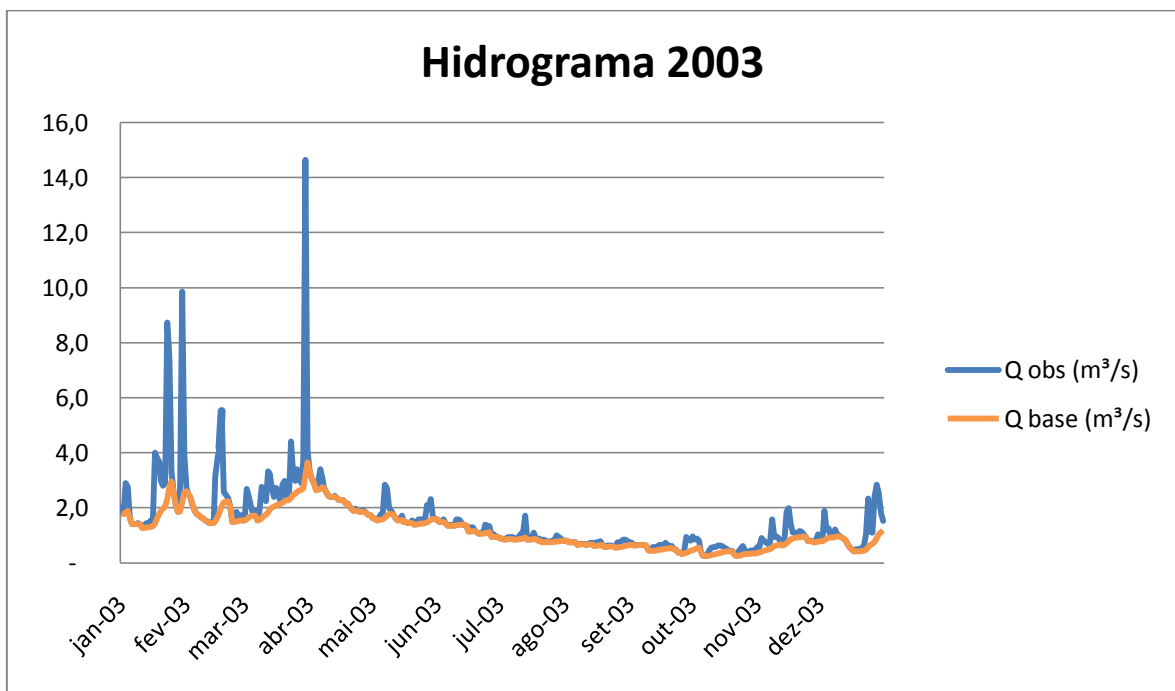


Figura 6.5: Decomposição do hidrograma em vazão total (m³/s) e escoamento de base (m³/s) para o ano de 2003.

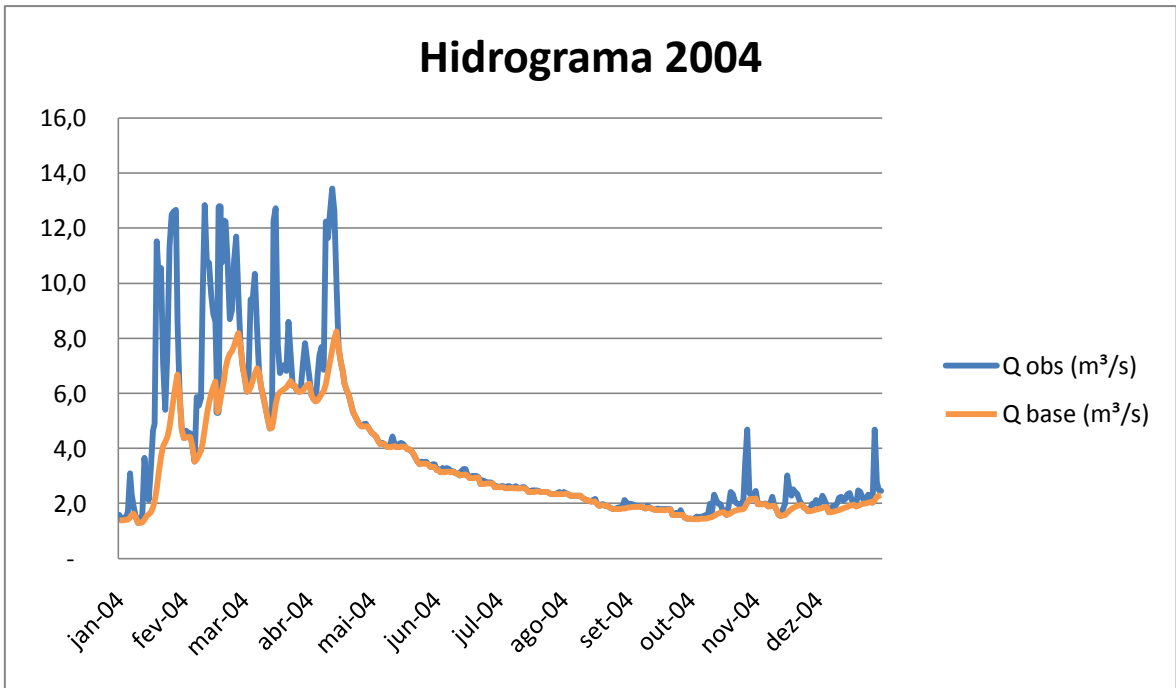


Figura 6.6: Decomposição do hidrograma em vazão total (m³/s) e escoamento de base (m³/s) para o ano de 2004.

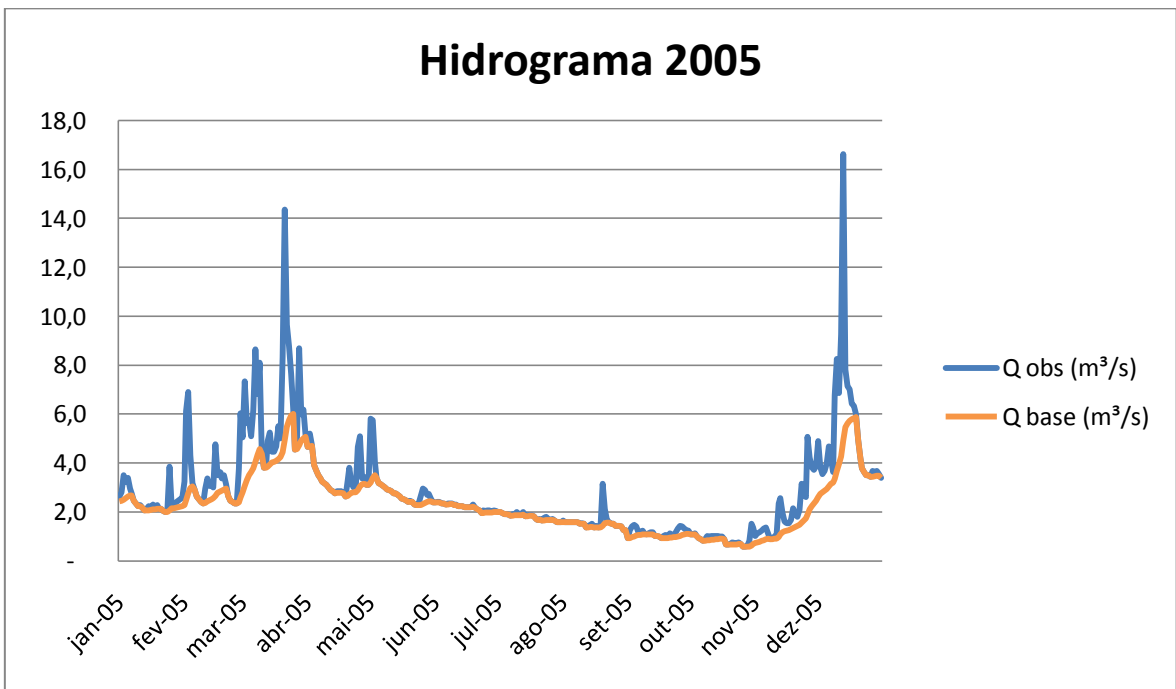


Figura 6.7: Decomposição do hidrograma em vazão total (m³/s) e escoamento de base (m³/s) para o ano de 2005.

A diferença entre as curvas dos hidrogramas decompostos corresponde ao escoamento superficial no período. Pode-se notar que nos meses mais secos do ano (maio a setembro), o escoamento superficial praticamente coincide com o escoamento de base, como esperado. Isso indica um bom comportamento do filtro para as condições climáticas do Distrito Federal.

Do período analisado, os anos de 2004 e 2005 foram os mais chuvosos (valores acima de 1500 mm), 2000 e 2003 se enquadram como anos de pluviosidade média (em torno de 1100 mm) e 2001 e 2002 apresentaram baixos índices pluviométricos (inferiores a 1000 mm anuais). A chuva anual acumulada não apresenta correlação com o número de eventos significativos selecionados para a análise. Isso porque o aporte de sedimentos total não depende tanto da quantidade de eventos chuvosos que causam erosão, mas sim da magnitude desses eventos, como indica a tabela abaixo (Tabela 6.1):

Tabela 6.1: Valores de pluviosidade total, eventos selecionados e aporte de sedimento observado para a bacia do Ribeirão Pipiripau, para os anos de 2000 a 2005.

Ano	P acum. (mm)	Núm. eventos	Y obs (t)
2000	1074,1	24	766,17
2001	949,4	15	276,79
2002	989,4	22	645,36
2003	1117,8	17	682,24
2004	1703,4	23	5544,03
2005	1526,2	21	2193,82

O uso do filtro auxiliou a seleção dos eventos chuvosos responsáveis pelo aporte de sedimentos na bacia do Ribeirão Pipiripau. A seleção de eventos foi realizada através de 3 parâmetros aditivos. Um evento significativo é aquele representado pela ocorrência de escoamento direto por mais de um dia, pela ocorrência de picos de vazão e pela ocorrência de chuva no período.

Dos eventos selecionados, apenas um foi excetuado do critério aditivo. É um evento de único dia, ocorrido em 06/01/2000. Embora não tenha ocorrido escoamento superficial por mais de um dia, a alta vazão líquida registrada (13,9 m³/s) indica elevado aporte de sedimentos pelo rio, fazendo necessária a seleção do evento. Isso pode ser explicado pela

ocorrência de chuva em áreas a montante da bacia, que não possuem registros pluviométricos, o que justifica a falta de registro de chuva na estação nesta data.

6.3 – CALIBRAÇÃO DA MUSLE

Para cada evento selecionado nos anos de 2000 a 2005, calculou-se, através da Equação (4), o aporte observado de sedimentos na bacia. A seguir, para os mesmos eventos, utilizou-se a MUSLE conforme proposta por Williams (1975) para estimar os valores de sedimento carreado. Numa comparação entre o aporte calculado e o observado (Tabela 6.2), nota-se que a MUSLE tem precisão reduzida com a diminuição dos índices pluviométricos anuais, e há alta correlação ($R^2=0,96$) entre o erro acumulado da MUSLE e a chuva anual (Figura 6.8):

Tabela 6.2: Chuva anual (mm), Y observado e calculado (t), e relação entre aporte calculado e aporte observado. A MUSLE tem melhor ajuste em anos mais chuvosos.

Ano	P acum. (mm)	Y obs (t)	Y MUSLE (t)	Y M./Yobs
2000	1074	766,17	21.190,46	27,66
2001	949	276,79	10.553,05	38,13
2002	989	645,36	18.112,68	28,07
2003	1118	682,24	17.187,53	25,19
2004	1703	5544,03	41.333,58	7,46
2005	1526	2193,82	29.994,97	13,67

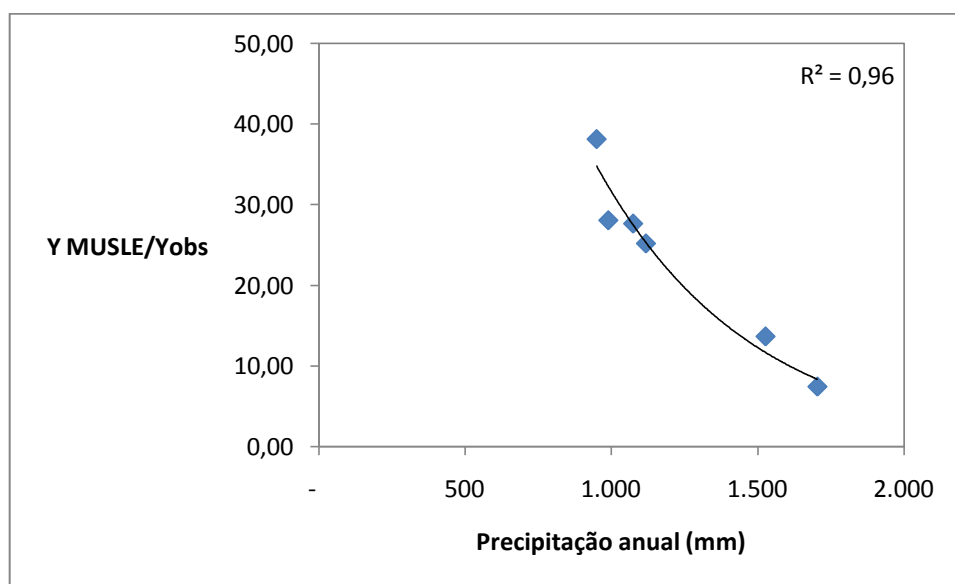


Figura 6.8: Correlação entre o erro acumulado pela MUSLE em relação à precipitação anual para o período de 2000 a 2005.

A partir da relação entre o aporte de sedimentos estimado pela MUSLE e o aporte observado, o parâmetro a da MUSLE foi modificado para todos os anos a partir do valor original, através do seguinte ajuste:

$$a_{mod} = \frac{89,6 * Y_{obs}}{Y_{MUSLE}} \quad (5)$$

em que 89,6 corresponde ao parâmetro a da MUSLE, Y_{obs} é o aporte anual de sedimento observado (t) e Y_{MUSLE} é o aporte de sedimento calculado pela MUSLE. Os resultados são apresentados abaixo (Tabela 6.3). A partir de a_{mod} (parâmetro modificado), o aporte de sedimentos foi recalculado, e os valores totais coincidiram com os observados para os anos de calibração.

Tabela 6.3: Valores recalculados do parâmetro a da MUSLE para os anos de calibração.

Ano	P acum. (mm)	Y obs (t)	Y MUSLE (t)	Y M./Yobs	a_{mod}
2000	1074	766,17	21.190,46	27,66	3,24
2001	949	276,79	10.553,05	38,13	2,35
2002	989	645,36	18.112,68	28,07	3,19
2003	1118	682,24	17.187,53	25,19	3,56
2004	1703	5544,03	41.333,58	7,46	12,02
2005	1526	2193,82	29.994,97	13,67	6,55

A partir destes dados, a modificado foi calibrado em função da precipitação anual, obtendo-se a seguinte relação:

$$a_{mod} = 0,4274 * e^{0,0019 * P} \quad (6)$$

onde a_{mod} é o parâmetro a da MUSLE modificado e P a precipitação anual (mm). A correlação entre as variáveis é alta ($R^2=0,96$), como indica o gráfico abaixo (Figura 6.9):

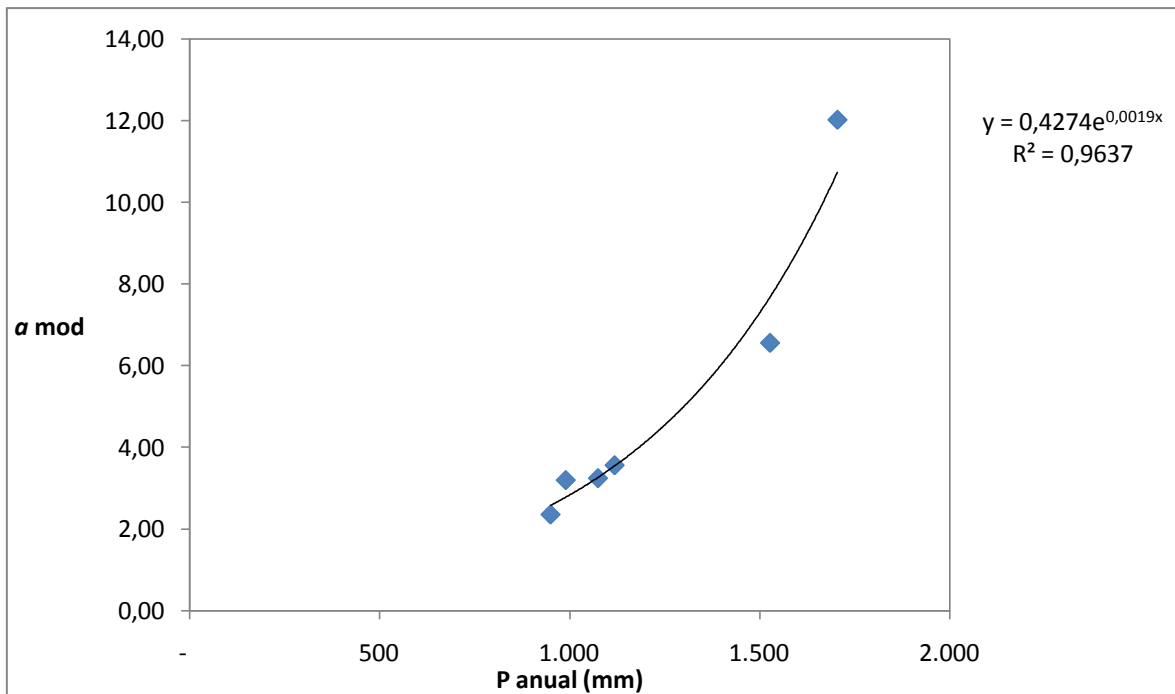


Figura 6.9: Correlação obtida entre a precipitação anual e a modificado para os anos de calibração.

6.4 – VALIDAÇÃO DO AJUSTE

A validação foi realizada para os períodos de 1995 a 1999 e 2006 a 2009. Para tanto, calculou-se o aporte de sedimento observado da mesma forma ocorrida no período de calibração, ou seja, através da seleção de eventos de acordo com os mesmos critérios aditivos.

Os valores estimados de aporte de sedimento foram calculados pela MUSLE (Equação 1), com o parâmetro a modificado de acordo com a Equação (6), cujos valores anuais utilizados estão a seguir (Tabela 6.4):

Tabela 6.4: Valores do parâmetro a da MUSLE modificados de acordo com a precipitação anual.

Ano	P acum. (mm)	a mod.
1995	1313	5,18
1996	1090	3,39
1997	1263	4,71
1998	1379	5,87
1999	1216	4,31
2006	1448	6,69
2007	898	2,36
2008	1224	4,37
2009	1428	6,44

Comparando os valores de aporte de sedimento estimados pela MUSLE modificada com o aporte observado (Tabela 6.5), não se pode dizer que o erro do ajuste tem relação com o índice pluviométrico anual, já que R^2 é baixo (0,26) (Figura 6.10). Ou seja, não se verifica uma tendência de erro de acordo com a quantidade de chuva na bacia, como ocorre na análise da MUSLE antes da calibração (Figura 6.8).

Tabela 6.5: Chuva anual (mm), Y observado e calculado pela MUSLE modificada (t), e relação entre aporte calculado e aporte observado. Não há relação entre o ajuste da equação e o índice pluviométrico anual.

Ano	P acum. (mm)	Y obs (t)	Y MUSLE mod. (t)	Y MUSLE mod/Yobs
1995	1313	638,41	1085,06	1,70
1996	1090	144,80	357,25	2,47
1997	1263	877,97	1191,10	1,36
1998	1379	643,17	1136,48	1,77
1999	1216	742,21	919,57	1,24
2006	1448	1411,77	1725,15	1,22
2007	898	600,03	343,94	0,57
2008	1224	310,84	702,03	2,26
2009	1428	617,65	1532,01	2,48

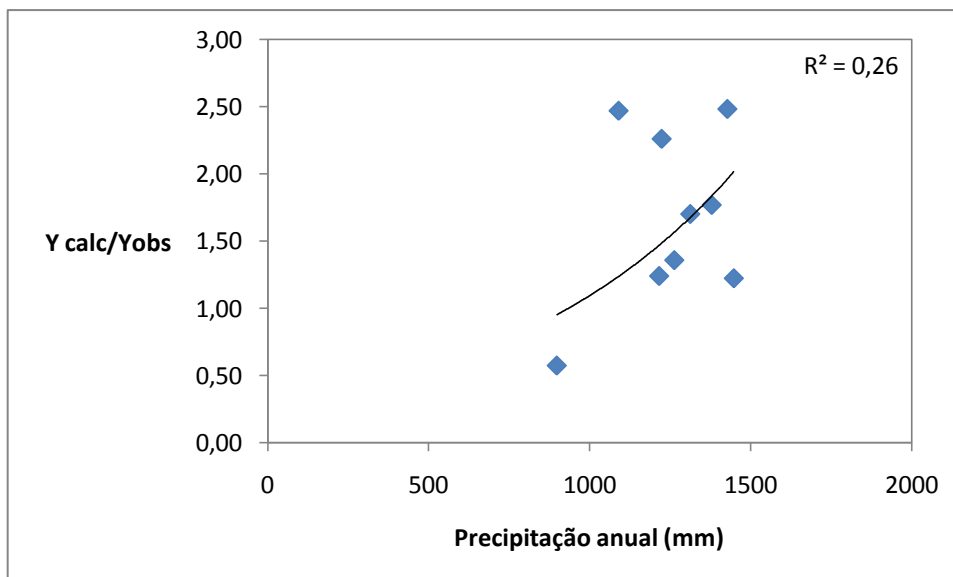


Figura 6.10: Correlação entre o erro acumulado pela MUSLE modificada em relação à precipitação anual para o período de validação.

A calibração da MUSLE para a bacia mostra-se vantajosa ao eliminar o erro cumulativo que a MUSLE original apresenta quando a precipitação acumulada é baixa. Além disso, apesar de também superestimar os valores observados de precipitação, os valores calculados são bem mais próximos ao real. Enquanto a MUSLE original superestima em até 38 vezes o aporte de sedimento observado (Tabela 6.2), a MUSLE recalibrada não chega a triplicar os valores observados de sedimentos carregados.

Para validação do modelo, o índice de Nash-Sutcliffe foi calculado de duas formas. Para análise por evento e para análise por período. Por evento, o coeficiente encontrado foi de 0,64, o que classifica o modelo como aceitável. Assim, a calibração do parâmetro a da MUSLE pode ser utilizada no cálculo do aporte de sedimentos por evento chuvoso e obter resultados razoáveis (Figura 6.11). Não há viés na estimação do aporte, e a nuvem de pontos está bem distribuída em relação ao ajuste ideal do modelo, indicando que o erro é aleatório.

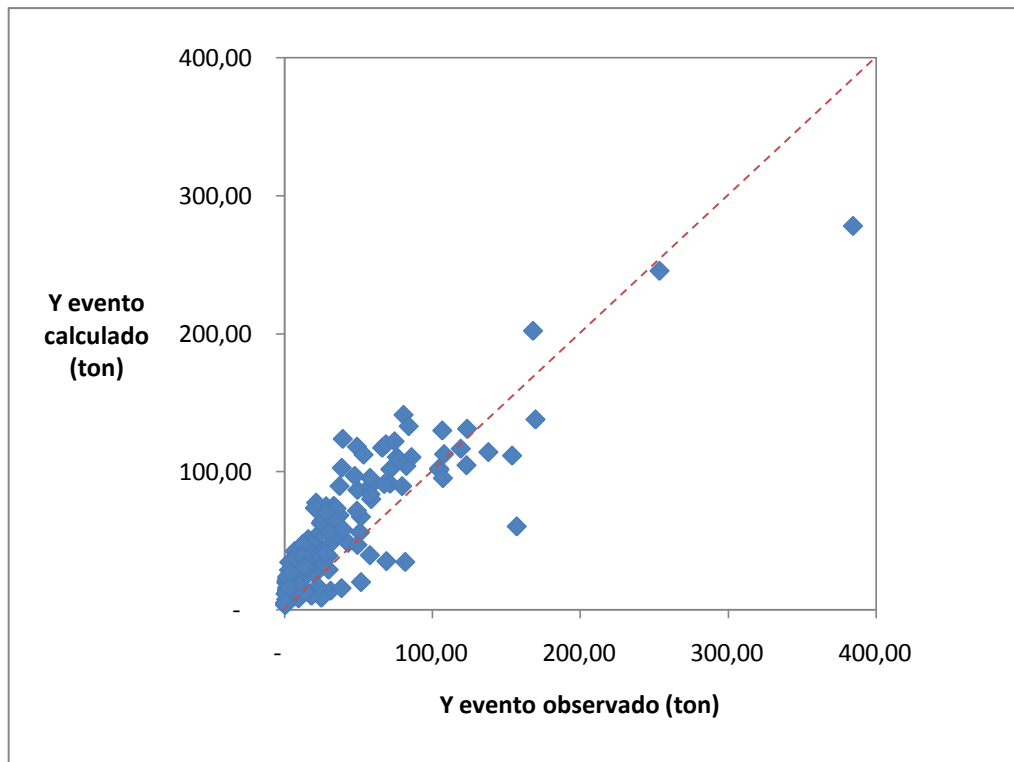


Figura 6.11: Dispersão entre o aporte de sedimento observado e o aporte calculado pela MUSLE calibrada. A linha tracejada representa a adequação total do modelo.

No caso da análise periódica, o valor encontrado para o coeficiente de Nash-Sutcliffe foi de -0,75, o que indica problemas no modelo. O índice de Nash-Sutcliffe é específico para a área hidrológica sendo, portanto, bastante restritivo. Ao analisar a correlação entre os valores observados e estimados para períodos por regressão linear simples, encontra-se $R^2=0,58$, o que coloca o modelo como aceitável (Figura 6.12). A tendência dos pontos é superestimar o aporte total de sedimentos em 323 toneladas, o que pode explicar o baixo coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido. Como a tendência de superestimação do modelo é praticamente constante, o erro é sistemático, e o modelo pode ser ajustado.

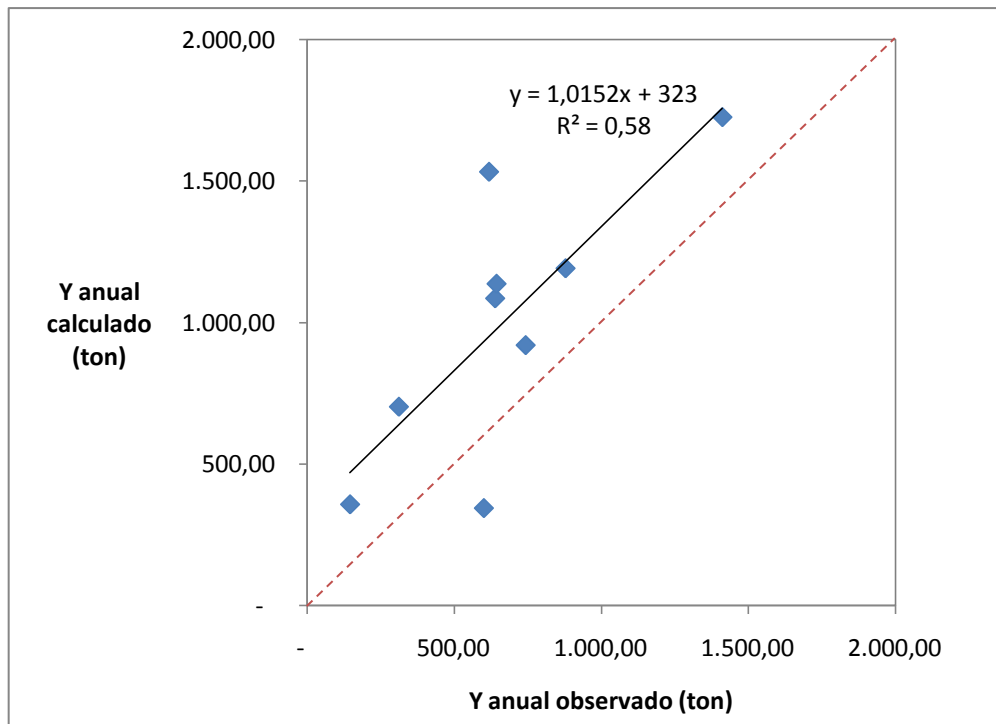


Figura 6.12: Dispersão entre o aporte de sedimento observado e o aporte calculado pela MUSLE calibrada, numa análise periódica. A linha tracejada representa a adequação total do modelo. A linha de tendência (em preto) indica erro sistemático do modelo.

Considerando que para gestores e tomadores de decisões a análise periódica é mais importante que a análise por evento, pode-se considerar o ajuste do modelo adequado, desde que se corrija a equação. Assim, o aporte de sedimentos calibrado para a bacia é dado por:

$$Y = (a_{mod} * (Q * q_p)^{0,56} 0,0177 * 0,114 * 2,142 * 0,76) - 323 \quad (7)$$

onde Y é o aporte de sedimento no exutório da bacia para determinado período, a_{mod} é o coeficiente a modificado de acordo com a precipitação acumulada no mesmo período (Equação 6), Q é o volume de escoamento superficial (m^3) no período, q_p é a vazão de pico do período (m^3/s), os valores 0,0177, 0,114, 2,142 e 0,76 são os parâmetros da MUSLE calibrados para a bacia do Pípiripau e 323 é o fator de correção da equação.

7 – CONCLUSÕES

- A MUSLE superestima o aporte de sedimentos na bacia, e o erro é potencializado quanto menor o índice pluviométrico registrado no período;
- A calibração do parâmetro a da MUSLE aproximou o aporte calculado dos valores observados, retirando também o viés relativo à pluviosidade acumulada;
- A MUSLE pode explicar o comportamento hidrossedimentológico do Ribeirão Pipiripau, com correções;
- Para análises de aporte de sedimento por evento, a calibração do parâmetro a da MUSLE apresentou-se satisfatória, com índice de Nash-Sutcliffe igual a 0,64;
- Para análises periódicas de aporte de sedimentos na bacia, além do uso do coeficiente a modificado, é necessário corrigir o aporte total, pois há superestimação sistemática de 323 toneladas/ano.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. **Journal of the American Water Resources Association**, vol. 35, n. 2, p. 411-424, abril 1999.

AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MELLO, C. R.; FONSECA, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos tabuleiros costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, vol. 12, n. 6, p. 563-569, 2008.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Programa do Produtor de Água – Relatório de Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Ribeirão Pípiripau**. Brasília, jan. 2010. 59 p. Parceria com The Nature Conservancy e EMATER – DF. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/Produagua/LinkClick.aspx?fileticket=TxC9xzOWHM8%3D&tabid=712&mid=1518>> Acesso em 15/07/2010.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Boletim de Monitoramento do Ribeirão Pípiripau**. Brasília, vol. 4, n. 5, p. 1-14, set. 2009a. Disponível em: <[http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/UsosMultiplos/BoletinsMonitoramento/Ribeira oPípiripau/Boletim_Monitoramento_Pípiripau_2009_09.pdf](http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/UsosMultiplos/BoletinsMonitoramento/Ribeira%20do%20Pipiripau/Boletim_Monitoramento_Pipiripau_2009_09.pdf)> Acesso em: 20/05/2010.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Programa Produtor de Água – Manual Operativo**. Brasília, 2009b, 67 p.

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. **Plano de Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau**. Brasília, 2001, 206 p.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Apostila de Hidrologia**. Seropédica, Cap. 7, p. 95-115, agosto 2006. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>> Acesso em 19/05/2010.

CHAVES, H. M. L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da equação universal de perda de solo modificada (MUSLE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 15, p. 345-350, 1991.

CHAVES, H. M. L.; PIAU, L. P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 32, p. 333-343, 2008.

ESCOAMENTO Superficial. In: **Apostila de Hidrologia**. Grupo de Recursos Hídricos – UFBA. Cap. 6, p. 55-71. Autor desconhecido. Disponível em: <<http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/HidrologiaAplicada/Semestre20081/ApostilaCap6.pdf>> Acesso em: 14/05/2010.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2 ed. Piracicaba: ESALQ – USP, 2008. 245 p.

OLIVEIRA, M. M.; COSTA, A. M.; FRANCES, A. Estimativa da recarga de águas subterrâneas a partir da análise dos hidrogramas de escoamento superficial na área abrangida pela folha 6 da carta hidrogeológica de Portugal à escala 1:200000. 2005 Disponível em: <<http://www.igm.ineti.pt/MULTIMEDIA/ASSOCIA/BASE%20MONO/33611.PDF>> Acesso em: 20/05/2010.

SADEGHI, S. H.; MIZUYAMA, T.; VANGAH, B. G. Conformity of MUSLE estimates and erosion plot data for storm-wise sediment yield estimation. **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences**, vol. 18, n. 1, p. 117-128, março, 2007.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, vol. 12, n. 3, p. 258-265, 2008.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: USDA-ARS. **Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources**. Washington, 1975. p. 244-252.