



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL
DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

ABDURAMANE DOS SANTOS BALDÉ

**MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
AÇUDE PEREIRA MIRANDA**

ACARAPE

2021

ABDURAMANE DOS SANTO SABLDE

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA NA SUB-BACIA DO AÇUDE
PEREIRA MIRANDA**

Monografia apresentado como requisito para a
obtenção de título de graduado em Engenharia
de Energias, na Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira,
UNILAB – Campus de Palmares

Orientador: George Leite Mamede

Acarape

2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Baldé, Abduramane Dos Santos.

B147m

Modelagem Hidroessedimentológica na Bacia Hidrográfica do Açude
Pereira Miranda / Abduramane Dos Santos Baldé. - Redenção, 2021.
52f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de
Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,
2021.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

1. Bacia Hidrográfica - Processos hidrossedimentológico. 2.
Semiárido. 3. WASA-SED. I. Título

CE/UF/Dsibiuni

CDD 551.46

ABDURAMANE DOS SANTOS BALDÉ

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA NA SUB-BACIA DO AÇUDE
PEREIRA MIRANDA**

Monografia apresentado como requisito para a obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Energias, na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus de Palmares.

Aprovado em: 14 / 04 / 2021

BANCA EXAMINADORA



Dr. George Leite Mamede (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB



Dr. Alexandre Cunha Costa

Universidade Da Integração Internacional Da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB



Dr. Pedro Augusto Medeiros

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

DEDICATÓRIA

Aos meus Pais Cherno Abdulai Baldé e Geralda Santos Rocha pelos conselhos, ensinamentos, apoio, confiança e amor incondicionais.

Aos meus irmãos Yussuf, Domingos e Luís, por todo o apoio e confiança sem mensuração.

A vocês a minha eterna gratidão

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo o meu trajeto na vida, por me dar saúde e possibilidade de crescer na vida.

Ao professor George Leite Mamede pela orientação, confiança, ensinamentos compreensão e motivação ao longo do trabalho.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio, incentivo, e confiança deposita nos momentos bons e nos difíceis.

À Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) pela oportunidade de estudar e me capacitar e me tornar um engenheiro.

Aos meus amigos, pela convivência, respeito e bons momentos compartilhados ao longo dos estudos coletivos.

A todos os professores que já tive ao longo do curso, pela amizade e pela chance que tive de aprender e compartilhar conhecimentos.

E a todos, que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Os índices baixos de precipitação no semiárido brasileiro associadas a outras características de regiões semiáridas como a enorme variabilidade espacial e temporal da precipitação e elevados índices de evapotranspiração contribuem para uma baixa disponibilidade hídrica, refletida nos rios intermitentes e reduzidos valores de escoamento superficial. A retenção do escoamento do rio em lagos e reservatórios artificiais acaba sendo uma das principais formas de manter o suprimento da água ao longo do ano. Para uma boa gestão e planejamento desses recursos hídricos, é necessário um conhecimento aprofundado dos processos hidrológicos e sedimentológicos que ocorrem nessa região. O presente trabalho propõe estudar a modelagem dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia com densas redes de reservatórios superficiais do semiárido brasileiro aplicando o modelo WASA-SED. A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do Açude Pereira de Miranda – Pentecoste. É uma sub-bacia localizada na região centro norte do estado do Ceará e pertencente à bacia do rio Curu. Para a modelagem hidrológica foram realizadas simulações da evolução do nível do volume de seis reservatórios para o período entre 1980 e 2019, e os resultados do modelo foram comparados com os volumes medidos dos respectivos reservatórios. Para a modelagem do assoreamento foram aplicadas as quatro equações (USLE e seus derivados) disponíveis no módulo sedimentológico do modelo WASA-SED para 8 reservatórios de estratégicos e 725 reservatórios de pequeno porte. Na modelagem hidrológica o modelo apresentou um desempenho satisfatório em 4 dos seis reservatórios estudados, com valores de NSE variando de 0,7 a 0,85. Para os outros dois reservatórios, em um deles, o modelo apresentou um desempenho aceitável, com NSE em torno de 0,5. Já no outro o desempenho do modelo é insatisfatório, com NSE menor que 0. Na modelagem do assoreamento, os reservatórios (estratégicos e pequenos) retêm a maior parte do sedimento produzido a montante, chegando apenas uma pequena parcela para o Açude Pentecoste. A taxa de assoreamento modelado pelas quatro equações gira em torno de 0,5%, um valor inferior à média medida, que é de 1,8%.

Palavras chaves: Processos hidrossedimentológico, Semiárido, WASA-SED.

ABSTRACT

The low levels of precipitation in the Brazilian semiarid, associated with other characteristics of semi-arid regions, such as the enormous spatial and temporal variability of precipitation and high levels of evapotranspiration contribute to a low water availability, reflected in intermittent rivers and reduced runoff values. The retention of the flow of the river in lakes and artificial reservoirs ends up being one of the main ways of maintaining the water supply throughout the year. For a good management and planning of these water resources, it is necessary to have an in-depth knowledge of the hydrological and sedimentological processes that occur in this region. This work proposes to study the modeling of hydrosedimentological processes in a basin with dense networks of superficial reservoirs in the Brazilian semiarid region using the WASA-SED model. The study area comprises the hydrographic basin of the Açude Pereira de Miranda - Pentecoste. It is a sub-basin located in the north central region of the state of Ceará and belongs to the curú river basin. For the hydrological modeling, simulations of the evolution of the volume level of six reservoirs were carried out for the period between 1980 and 2019, and the results of the model were compared with the measured volumes of the respective reservoirs. For the silting modeling, the four equations (USLE and its derivatives) available in the sedimentological module of the WASA-SED model were applied for 8 large reservoirs and 725 small reservoirs. In hydrological modeling, the model performed satisfactorily in 0.4 of the six reservoirs studied, with NSE values ranging from 0.7 to 0.85. For the other two reservoirs, in one of them, the model presented an acceptable performance, with SES around 0.5. On the other hand, the model's performance is unsatisfactory, with an SES less than 0. In silting modeling, the reservoirs (strategic and small) retain most of the sediment produced upstream, reaching only a small portion for the Pentecoste Reservoir. The silting rate modeled by the four equations is around 0.5%, a value lower than the measured average, which is 1.8%.

Key words: Hydrosedimentological processes, Semi-arid, WASA-SED.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivo.....	8
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	9
2.1 Processos hidrossedimentológicos em regiões semiáridas.....	9
2.2 Redes de Reservatórios Superficiais em regiões semiáridas	12
2.3 Modelagem hidrossedimentológica em regiões semiáridas.....	14
3. 1 Área de estudo	Erro! Indicador não definido.
3.2 Modelo wasa-sed: descrição geral	23
3.2.2 Estrutura do modelo para a vertente	23
3.2.3 Estrutura do modelo para redes de drenagens	27
3.2.4 Estrutura do modelo para reservatórios.....	27
3.2.5 Sequência temporal da modelagem dos processos	28
3.3 Parametrização do modelo WASA-SED para a bacia do Pentecoste	29
3.4 Validação do modelo.....	Erro! Indicador não definido.
3.5 Aporte de sedimentos ao longo da bacia.....	33
4 RESULTADOS E DISCUÇÕES	35
4.1 Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Pentecoste com o WASA-SED .	35
4.2 Modelagem da dinâmica de sedimentos pela rede de reservatórios da bacia do Pentecoste com o WASA-SED	40
4.3 Modelagem do assoreamento no açude Pentecoste.....	42
5 CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIA.....	46

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de recursos hídricos é uma questão que levanta discussões e envolve a criação de estratégias de gerenciamento em muitos lugares onde a água é um recurso escasso. Nas regiões com o clima semiárido um bem como a água para o abastecimento humano, irrigação e indústria precisa ser gerida da forma mais eficiente possível dada as condições de secas prolongadas.

O clima semiárido ocupa cerca de um terço da área continental do planeta, algo em torno de 22,6x10⁶ km², onde habitam pelo menos dois bilhões de pessoas. 90% dessas pessoas vivem em países em desenvolvimento, e cerca de 50% conta com o ecossistema para conseguir alguns bens básicos como a água e alimentação (ANDRADE, 2020).

No cenário brasileiro, cerca 12% do território nacional possui um clima semiárido, uma área territorial de 1.000.000 km², que se estende por nove estados da região Nordeste e pelo Estado de Minas Gerais (SILVA, 2020). É a região com o clima semiárido mais densamente povoado do mundo, com mais de 53 milhões de habitantes em 2014, e que de algum modo dependem dos recursos fornecidos por esse ambiente.

Dentre as características principais da pluviometria nessa região estão a grande variabilidade espacial e temporal, baixos totais anuais e eventos de seca prolongada. A taxa de evaporação é alta devido a altos níveis de radiação solar incidente, o que adicionalmente contribui para aumentar a escassez hídrica durante os longos períodos sem chuva (CORREIA *et al.*, 2011).

Os meios adotados para minimizar esses impactos variaram de medidas puramente assistencialistas a intervenções de caráter permanente, com investimento em estruturas, como no caso de construção de reservatórios superficiais denominados de açudes (ANA, 2017).

A construção de açudes públicos no semiárido brasileiro teve o início em 1890 com o açude do Cedro, no município de Quixadá, no estado do Ceará. A prática se intensificou mais tarde devido a medidas de combate a secas levadas a cabo pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) criada em 1902 (ASSUNÇÃO, 1993). O papel desses açudes nessa região é indispensável. O estado de Ceará, por exemplo, conta os recursos hídricos superficiais para suprir quase todas as suas demandas. As águas dos reservatórios monitorados pela companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) são responsáveis por 81% de todo o recurso hídrico destinada para o setor de abastecimento humano, e no caso da indústria e irrigação, esse valor ultrapassa os 90% (LIMA, 2018). Entretanto, a quantidade e a qualidade da água retida nesses reservatórios são ameaçadas pelo assoreamento, ou seja, a deposição de

sedimentos transportados pelo rio. As barragens construídas nos canais fluviais a fim reter a água acabam diminuindo o fluxo que chega no reservatório, o que provoca uma queda na turbulência, reduzindo a capacidade de transporte de sedimentos no rio, provocando a sedimentação da carga em suspensão (CABRAL, 2004).

Os principais fatores que causam os processos erosivos são fatores como clima, tipo de solo e relevo, entretanto a ação humana pode acelerar o processo. A exposição dos solos para práticas agrícolas, exploração agropecuária, mineração ou para ocupações urbanas, em geral, acompanhadas de movimentação da terra e a impermeabilização do solo, abrem caminho para os processos erosivos e para o transporte de materiais orgânicos e inorgânicos (MIRANDA, 2007).

Para que se possa cuidar e gerir de forma eficiente e sustentável a água acumulada é necessário lidar com os sedimentos carregados e depositados nesses açudes. Eles apresentam um grande potencial de diminuir a qualidade e a quantidade da água ofertada. Segundo o Araújo (2003), os reservatórios do semiárido conseguem regularizar só cerca de 40% da vazão afluente, os outros 60% são perdidos por evaporação e extravasamento.

Uma forma de estudar e entender esses processos hidrológicos e sedimentológicos é através de modelos, que permitem analisar cenário, estudar alternativas, prever a ocorrência de fenômenos, entre outros (EDUARDO, 2016).

Segundo o Lopes (2013) os modelos hidrológicos são divididos em dois grandes grupos: modelos estocásticos e determinísticos. Os modelos estocásticos tratam os processos de forma estatística no tempo, e os resultados são apresentados em termos de probabilidade. Os modelos determinísticos ou conceituais representam o sistema físico natural, ou seja, os processos de ciclo hidrológico. Os modelos determinísticos por sua vez podem ser de base física ou empírica. Os modelos determinísticos também podem ser classificados em modelos semi-distribuídos (nesse caso a variabilidade espacial dos processos é considerada) e concentrados (os processos são considerados de forma concentrada).

O modelo WASA-SED (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with a Sediment Dynamics Component*) é um modelo hidrossedimentológico, determinístico, físico, e semi-distribuído que simula o balanço hídrico e os processos de transporte de sedimentos em uma bacia (LOPES, 2013; MAMEDE, 2018).

1.1 Objetivo

O presente trabalho propõe estudar a modelagem de processos hidrossedimentológicos em uma bacia com densa rede de reservatórios superficiais do semiárido brasileiro aplicando o modelo WASA-SED.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Regionalizar a parametrização do modelo WASA-SED para a bacia hidrográfica do açude Pentecoste.
- Avaliar o desempenho de quatro diferentes equações para estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.
- Estimar a retenção de sedimentos na densa rede de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste.
- Analisar a eficiência das diferentes classes de tamanho de reservatório na retenção de sedimentos.

1.2 Descrição dos capítulos

Além do primeiro capítulo que é a introdução, que aborda a questão escassez hídrica em regiões semiáridas, seguido dos objetivos a serem atingidos, o presente trabalho conta com mais quatro capítulos. O segundo apresenta a revisão da literatura sobre o tema: processos hidrológicos em regiões semiáridas, densas redes de reservatórios superficiais em regiões semiáridas e modelagem hidrossedimentológica. No terceiro são descritas as metodologias utilizadas durante a pesquisa. No quarto capítulo são apresentados os resultados dos estudos. Por fim, o quinto capítulo apresenta a conclusão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processos hidrossedimentológicos em regiões semiáridas

Uma das principais características das regiões semiáridas é a alta irregularidade e/ou escassez de chuvas, acompanhada de uma elevada taxa de evapotranspiração (SILVA, 2015). As chuvas são em sua maioria do tipo convectivo, caracterizados, em geral, por uma curta duração, alta intensidade e alta variabilidade espacial e temporal (GUNTNER, 2002).

Devido à alta variabilidade da precipitação, a dinâmica das águas superficiais se torna um fator essencial para a manutenção de atividades humana nesse ambiente (LOPES, 2015). Por isso, eventos como evapotranspiração, erosão do solo e deposição de sedimentos em

reservatórios acabam sendo problemas adicionais quando se fala da escassez hídrica. Montenegro e Ragab (2010 *apud* SILVA, 2015) comentam que esses eventos são um dos principais entraves naturais para o desenvolvimento da região semiárida do Brasil.

A evapotranspiração é uma das características que mais reflete as peculiaridades das regiões semiáridas. Nesse ambiente, é uma componente chave do ciclo hidrológico, sendo responsável pela perda de mais de 80% da precipitação e mais de 95% no longo prazo (MONTE-MOR 201; LOPES, 2013). Em termos potenciais ela pode ser até cinco vezes maior que o total precipitado (LOPES, 2013).

A interceptação é influenciada por diversas características importantes, como o tipo de floresta, a cobertura do solo e o clima. Segundo Pilgrim, Chapman e Doran (1988), as variações cíclicas brutas na vegetação fazem variar significativamente a interceptação, isso complica as descrições do processo e aumenta a complexidade dos modelos necessários para a interceptação. Além disso, o processo é menos pesquisado em ecossistemas áridos em comparação com os ecossistemas úmidos (GUNTNER, 2002).

A capacidade de infiltração é geralmente baixa em ambientes semiáridos, pois o solo é compactado e coberto por uma crosta. Muito disso é devido a uma cobertura vegetal esparsa, típica desses ambientes, que proporciona uma proteção parcial contra a compactação devido à energia cinética das gotas da chuva (MONTE-MOR, 2012). Love et al. (2010) enfatizam a importância de propriedades como a declividade do terreno e a permeabilidade, com a percolação começando muito mais rápido em bacias com perfis do solo mais rasos.

A produção de escoamento é geralmente dominada por componentes de escoamento rápido de superfície, durante e imediatamente após a chuva. O processo ocorre quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração e do solo (processo Hortoniano) (LOPES, 2013; PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988). Isso se deve às características da chuva, como a escassez combinada com a elevada intensidade dos eventos (LOPES, 2013). Em estudo realizado por Medeiros e Silva (2014) no semiárido brasileiro apenas os eventos chuvosos com mais de 1,3 mm foram responsáveis por perdas de água e solo. Já Sousa et al. 2020, analisaram os eventos pluviométricos registrados em uma bacia experimental do semiárido brasileiro, no intervalo de 2012 a 2016. Segundo os autores somente 18% dos 158 eventos pluviométricos registrados causaram escoamento superficial e somente 15% causaram transporte de sedimentos.

A geração de escoamento nas encostas é não-uniforme e, muitas vezes, apenas uma pequena parcela da bacia de drenagem contribui para o escoamento no canal principal do curso d'água durante uma tempestade. Um comportamento relacionado à grande variação espacial na

capacidade de infiltração, que depende principalmente de propriedades físicas e químicas dos materiais da superfície do solo (MONTE-MOR, 2012).

O fato de a produção de sedimentos ser altamente dependente do escoamento superficial faz com que apresente um caráter episódico. Srinivasan, Santos e Galvão (2003) explicam que o fato de a maioria dos eventos de precipitação ter uma duração menor que uma hora e ser raro os casos de dias consecutivos com precipitação contínua, não ocorre armazenamento subterrâneo significativo que gere escoamento de base prolongado. Entretanto, ainda assim, a umidade proveniente das precipitações antecedentes desempenha um papel importante na taxa de produção dos sedimentos. Segundo Santos et al. (2017), a taxa de produção de sedimentos é maior nos casos em que os eventos de precipitação ocorrem em solos que já apresentam uma alta umidade antecedente.

Segundo Medeiros (2010) a produção de sedimentos no semiárido brasileiro não depende só dos fatores da erosão, mas também das condições de transporte. A maior parte do material erodido é depositado ao longo do fluxo superficial, apenas uma parcela desse total alcança o exutório da bacia. Fatores como cobertura vegetal, topografia do terreno, intensidade da precipitação e a grande quantidade de reservatórios superficiais contribui para essa quebra da conectividade.

A cobertura vegetal não só protege o terreno da erosão reduzindo o volume de água que atinge o solo, pela interceptação, alterando a distribuição do tamanho das gotas de chuva, o que interfere na energia cinética da chuva (SILVA; SANTOS, 2009), mas também funciona como uma barreira para o escoamento superficial, que diminui a velocidade do fluxo facilitando a infiltração e a deposição de sedimentos. Segundo Lopes e Pinheiros (2013), em regiões sob condições áridas e semiáridas ocorre uma relação dinâmica entre áreas de solo nu e áreas vegetadas. A geração de escoamento predomina nas primeiras, e as áreas vegetadas funcionam como barreiras que retêm tais recursos. Em estudo realizado no Semiárido brasileiro, Silva e Santos (2009) encontraram uma média anual de perda de solo de 4,2 t/ha em uma área desmatada, e 1,0 t/ha em uma área mantida um tempo com vegetação.

Além da presença da cobertura vegetal, a topografia do terreno e a intensidade da precipitação são fatores que contribuem para uma baixa ou alta conectividade entre diferentes pontos da bacia. Santos et al. (2017) calcularam a taxa anual de entrega de sedimentos (SDR) por evento, para a Bacia Experimental de Iguatú (BEI). Os resultados mostraram que apenas 0.37% da perda de solo na bacia foi transportada e exportada para além da saída da bacia hidrográfica. No entanto, os autores destacam que, para os anos em estudo, a precipitação média anual ficou abaixo da média histórica (864 mm), ou seja, pode se tratar uma condição de baixa

conectividade hidrológica quando comparada aos anos com precipitação acima da média e temporalmente bem distribuídas.

Segundo Santos et al. (2017) os sedimentos derivados a montante, ou seja, em áreas de grande declividade nos divisores da bacia, são depositados nas superfícies das planícies de inundação, e só durante eventos de alta magnitude, a conectividade entre as diferentes unidades da paisagem é aumentada, gerando mais energia para o escoamento e uma maior produção de sedimentos na bacia hidrográfica.

A presença de reservatórios superficiais contribui para a quebra da conectividade, retendo parte do sedimento desagregado e reduzindo a capacidade de transporte até o escoamento da bacia hidrográfica (SANTOS et al., 2017).

Lopes et al. (2015) realizaram a quantificação do assoreamento em um reservatório de águas superficiais no estado do Ceará. Foi encontrado uma produção média anual de sedimentos da ordem de $5,22 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. De acordo com os autores houve uma redução na capacidade de acumulação do reservatório de $1,03 \text{ hm}^3$ em um período de 60 anos. Araújo (2003) estimou o assoreamento em reservatórios de sete bacias hidrográficas do semiárido, sendo seis bacias rurais e uma urbana, todas localizadas no estado do Ceará. O valor da taxa anual de produção de sedimento encontrado variou de $1,60$ a $12,77 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

De acordo com Araújo (2003) os reservatórios do semiárido conseguem regularizar apenas cerca de 40% da vazão afluente, perdendo 60% entre evaporação e extravasamento. Com o assoreamento as perdas por evaporação aumentam na medida em que o material acumulado altera a relação cota-área-volume do reservatório, e a perda por extravasamento aumenta, pois, o fenômeno diminui a capacidade cumulativa dos reservatórios.

2.2 Redes de Reservatórios Superficiais em regiões semiáridas

No semiárido brasileiro os índices baixos de precipitação e a enorme variabilidade espacial e temporal do seu regime, associados ao contexto hidrogeológico local, contribuem para os reduzidos valores de escoamento superficial e para a baixa quantidade de rios perenes (GONDIM, et al., 2017). Essa oferta limitada dos recursos hídricos é uma condição que historicamente serviu de entrave para o desenvolvimento socioeconômico da região. Apesar de ser uma região altamente povoada, as condições ambientais, econômicas e sociais são desafiadoras e refletem na ocupação do solo, na demografia, nas relações de trabalho, nas estruturas políticas e de poder e diversos outros aspectos da vida da população local (LIMA, 2020).

Com o crescimento populacional e as altas taxas de consumo de água per capita a demanda hídrica aumenta, exigindo alternativas eficazes para lidar o problema de disponibilidade de água. Diversas políticas têm sido sugeridas e aplicadas, dentre elas estão incluídas a alocação de água, reuso, aproveitamento da água da chuva. Mas, a técnica mais utilizada tanto pelos governos federais e estaduais quanto pelos moradores do SAB é a construção de reservatórios superficiais (NASCIMENTO; MACAMBIRA; MEDEIROS, 2016). Entretanto, segundo Lira (2012), a construção da maioria dos reservatórios não contou com um plano integrado resultando em uma densa rede de pequenos e reservatórios de pequeno, médio e grande porte.

Segundo Mamede et al. (2012), a bacia de Jaguaribe, no nordeste brasileiro, possui algo próximo de 4.000 reservatórios em uma área de 25.000 km². Em um estudo realizado por Molle (1994 *apud* SANTOS et al., 2009) na região nordeste, foi estimado uma quantidade de aproximadamente 70.000 açudes com área superior a 1.000 m². Estimativas realizadas a partir de imagens de satélites no ano 2000 contabilizaram cerca de 8000 açudes na região semiárida, sendo que 7.600 deles foram considerados pequenos. Essas estimativas apontaram que em média 2 bilhões e 267 milhões de m³ estão armazenados nesses reservatórios, correspondendo a 60% da quantidade de água armazenada pelos médios e grandes reservatórios (SANTOS et al., 2009).

Essa elevada densidade apresenta resultados tanto positivos quanto negativos para a segurança hídrica local. Se por um lado as perdas por evaporação e o sistema caótico dificultam a gestão dos recursos hídricos, por outro lado, uma distribuição mais democrática desse recurso acaba sendo benéfica para região (LIMA, 2020). Segundo Nascimento, Macambira e Medeiros (2016), a implantação indiscriminada dos pequenos reservatórios pode causar impacto na disponibilidade hídrica de grandes reservatórios através das perdas por evaporação. De forma individual, os pequenos reservatórios não interferem nas variáveis hidrológicas, mas o efeito cumulativo pode ser considerável na conectividade hidráulica e sedimentológica.

Outro fator que afeta a rede dos pequenos reservatórios é a deposição de sedimentos no seu leito. Mueller *et al.* (2010) explica que em terras secas onde disponibilidade de água é dependente da retenção do escoamento do rio em lagos e reservatórios artificiais, a confiabilidade desses reservatórios é frequentemente ameaçada pela deposição dos sedimentos erodidos nas vertentes.

Nascimento, Macambira e Medeiros (2016) discutiram o efeito da rede de reservatórios de pequeno porte na produção e o consumo da eletricidade. De acordo com os

autores, a presença de reservatórios de pequeno porte, apesar de ter um impacto negativo no potencial elétrico dos reservatórios estratégicos, tende a distribuir espacialmente a disponibilidade hídrica, reduzindo o consumo com eletricidade para esses setores.

Segundo Mamede et al. (2018), um tamanho adequado do reservatório é crucial para um bom funcionamento dos reservatórios. Os reservatórios menores são tipicamente incapazes de fornecer água suficiente durante toda a estação seca, devido à baixa capacidade de armazenamento e altas perdas por evaporação e infiltração. Já os muito grandes apresentam problemas de sustentabilidade no longo prazo. Pois, se a capacidade armazenada exceder o volume equivalente a três vezes o escoamento médio anual, a sua água não é suficientemente renovada. Para além das propriedades dos reservatórios, é bastante importante a forma como estão interligadas. Os reservatórios a montante podem reter uma parcela significativa da água coleta, possibilitando uma distribuição espacial eficiente, garantindo uma conexão contínua com outros reservatórios mesmo durante as estações secas.

Para uma boa gestão dos recursos hídricos é essencial minimizar os impactos negativos e ampliar os efeitos benéficos, pois a dependência desses reservatórios é elevada. No Ceará mais 90% da demanda atendida provem dos açudes, principalmente dos estratégicos, de grandes volumes. Os pequenos acabam sendo muito importantes para as esparsas comunidades rurais, onde contribuem diretamente na segurança alimentar e econômica (LIMA, 2020), e garantem uma redução significativa na quantidade de sedimentos que são responsáveis pela diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios estratégicos (LIRA, 2012). As questões de erosão e sedimentação devem ser lavadas em consideração no processo de implementar estratégias sustentáveis de longo prazo (MUELLER *et al.*, 2010).

2.3 Modelagem hidrossedimentológica em regiões semiáridas

Para um eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos em regiões semiáridas, é necessário um conhecimento aprofundado dos processos hidrológicos e sedimentológicos que ocorrem nessa região. Assim, faz-se necessário o uso de modelos hidrosedimentológicos. Segundo Aragão *et al.*, (2012), a necessidade de prever os processos de escoamento superficial e da carga de sedimento devido a um evento ou eventos de chuva em uma dada bacia levou ao desenvolvimento de diversos modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos.

De acordo com Santos *et al.* (2014), os modelos possibilitam a análise de cenários, sejam realistas ou hipotéticos, sem alto custo, tornando possível o estudo das diferentes respostas dos processos hidrológicos diante de cada condição.

A modelagem hidrossedimentológica exige um profundo conhecimento do ciclo hidrológico, dos processos hidrossedimentológicos e de todos os processos físicos envolvidos, que serão representados através de métodos matemáticos. Segundo Rennó e Soares (2003), os modelos não são uma representação exata do mundo real, pois trabalham com simplificações, dado o enorme grau de complexidade nos eventos.

Os primeiros registros dos modelos hidrológicos são do início do século XX. Com o avanço da ciência hidrológica e da computação, eles ficaram cada vez mais complexos (MALVEIRA, 2009). Segundo Fayal (2008), a evolução dos modelos vem seguindo, desde o método racional – onde se calcula a vazão por meio do produto do escoamento superficial, intensidade pluviométrica e área de drenagem – até os recentes modelos físico-distribuídos.

Com essa evolução, impulsionada pela intensificação de pesquisas e o aumento da sua aplicação nos últimos anos (LOPES, 2013), surgiram vários tipos de modelos e a classificação deles depende do critério estabelecido.

Discussões sobre a classificação dos modelos podem ser encontradas em Tucci (1998), Almeida e Sara (2017), Rennó e Soares (2020), Santos (2009), Fagundes (2018) e Lopes (2013).

Considerando os tipos de variáveis utilizados na modelagem, os modelos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Os modelos determinísticos são aqueles que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório, ou seja, os conceitos de probabilidade não são considerados durante a sua elaboração. No caso dos modelos estocásticos o conceito de probabilidade é introduzido na sua formulação, de modo que as variáveis envolvidas na modelagem apresentam um comportamento aleatório, ou seja, em eventos de modelagem diferentes, uma mesma entrada pode produzir saídas diferentes segundo uma determinada distribuição de probabilidade.

De acordo com a relação entre as variáveis, os modelos podem ser conceituais ou empíricos. Nos modelos conceituais é considerado os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Possuem uma maior complexidade em relação aos modelos empíricos, e geralmente requerem uma parametrização cuidadosa antes de serem executados. Já os modelos empíricos não contam com a representação explícita dos processos físicos da bacia, em outras palavras, utilizam funções que não apresentam relações com os processos físicos

envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão. São em geral, simples e normalmente são de uso específico para a região e condições para as quais as relações foram estimadas.

Segundo Santos (2009), os modelos conceituais podem ser divididos em dois subgrupos: físicos e semiconceituais. Os modelos físicos utilizam equações diferenciais do sistema físico para representar os processos e os seus parâmetros, ou seja, se aproximam muito da física do sistema. Uma característica importante desses modelos é que podem ser aplicados em bacias hidrográficas que não possuem dados observados. Já os modelos semiconceituais, apesar de estarem relacionados às características dos processos, mantêm um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas.

Considerando a existência ou não de relações espaciais, os modelos podem ser concentrados ou distribuídos. Nos modelos concentrados não considera a variabilidade espacial da bacia. A área da bacia é representada de forma homogênea, sem a possibilidade da distribuição das características físicas relacionados ao solo, à vegetação e à chuva. Já nos modelos distribuídos a área é dividida em unidades menores segundo um certo grau de homogeneidade, desse modo as variáveis e parâmetros variam no espaço. A escolha do intervalo de discretização depende basicamente do fenômeno a ser estudado, da disponibilidade dos dados e da precisão desejada.

Quanto à existência de dependência temporal, os modelos são divididos em estáticos e dinâmicos. Os modelos são estáticos quando, em um único passo, um conjunto de dados de entrada origina um resultado proveniente da solução das equações do modelo. Em um modelo dinâmico é necessário que ocorra uma sequência de iterações, onde o resultado uma iteração serve de entrada para a próxima iteração.

Com essa variedade de modelos, a escolha de um determinado tipo depende da aplicação desejada, disponibilidade de dados básicos, da variabilidade temporal e espacial das características físicas e climáticas da bacia em estudo, etc., ou seja, não existe um modelo único ou melhor, mas sim, modelos mais adequados para o problema que se deseja resolver (ALMEDIA; SARA, 2017).

Vários modelos orientados a processos (modelos de base física) foram desenvolvidos nas últimas décadas com complexidade crescente em termos de detalhes de representação dos processos. No entanto, poucos modelos hidrológicos e de erosão acoplados, seguindo uma abordagem orientada a processo, são aplicáveis à mesoescala (BRONSTERT *et al.*, 2014).

Os modelos conceituais, destinados à quantificação da erosão e produção de sedimentos na mesoescala, possuem formulações empíricas para representar esses processos (LOU, 2010). São geralmente baseados em um componente de erosão do tipo (R) USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Esses modelos, apesar de sua ampla aplicação para problemas de mesoescala, geralmente não consideram os processos de erosão ou armazenamento na rede de canais, nem o efeito de reservatórios ou rede de reservatórios na retenção de água e sedimentos (BRONSTERT *et al.*, 2014). São exemplos dessa categoria o ANSWER (*Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation*, Beasley *et al.*, 1980), o MODHAC (Modelo Hidrológico Auto-Calibrável, Lanna e Schwarzbach, 1989) e o AÇUMOD (Passerat de Silans *et al.*, 2001).

Nesse contexto, Segundo Medeiros (2009) o principal dilema para a modelagem hidrossedimentológica de bacias hidrográficas consiste na escolha entre duas abordagens bastante distintas, com resultados também diferenciados: I. Modelos simples (empíricos, concentrados) capazes de indicar a produção de sedimentos total na escala de bacia, porém inadequados para a determinação de sua distribuição espacial; II. Modelos complexos (bases físicas, distribuídos) que permitem a previsão do padrão espacial da produção de sedimentos, simulando explicitamente as condições de transporte, mas que requerem uma grande quantidade de dados e apresentam incertezas quanto à simulação conjunta de diferentes processos e suas interações.

De acordo com Bronstert (2014) um sistema de modelagem para avaliação de mesoescala da dinâmica da água e dos sedimentos precisa ser de base física, incluir os principais fenômenos de conectividade e, por outro lado, apresentar um conceito de multi-escala para se aproximar das necessidades de aplicação de um sistema de modelagem de mesoescala e permitir uma integração e quantificação dos diferentes processos. O autor chama o tal sistema de "modelo de captação de mesoescala integrado". O modelo WASA-SED é um caso de um modelo concebido para atender tais características.

Existem, atualmente, vários modelos utilizados na representação dos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos em ambientes semiáridos, alguns exemplos dos mais citados são descritivos brevemente a seguir.

Modelo USLE - (*Universal Soil Loss Equation*) é um modelo empírico desenvolvido em 1954 por W. H. Wischmeier, D. D. Smith (1978) e outros com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS), Serviço de Conservação do Solo (SCS) e Universidade de Purdue no final dos anos 1950. Foi projetado para prever perdas de solo em médio e longo prazo, com base em séries históricas de

precipitação, tipologia do solo, topografia, sistemas de cultivo e práticas de conservação do solo (SILVA, 2015).

O modelo USLE trabalha apenas com os fatores que regem os processos erosivos, de modo que não considera, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e transporte de sedimentos (SIMÕES, 2019).

O modelo sofreu algumas alterações com o tempo, dando origem a derivados como o MUSLE (WILLIAMS, 1975), a USLE-M (KINELL & RISSEL, 1998), Dusle (FLACKE et al, 1990) e RUSLE (RENARD *et al.*, 1998).

O modelo MUSLE (*modified universal Soil Lose equation* -Equação Universal de Perda de Solo Modificada) resultou da modificação feita por Williams (1975). Consegue prever a produção de sedimentos para aplicação em bacias hidrográficas, incluindo uma taxa de entrega. Além disso, o fator de energia da chuva foi substituída por um fator de energia de escoamento.

Modelo KINEROS – (*Kinematic Runoff Erosion Model*) foi proposto por Woolhiser *et al.*, (1990). É um modelo de escoamento e erosão, orientado a eventos e de base física. O modelo descreve os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão de pequenas bacias hidrográficas agrícolas e urbanas. A bacia hidrográfica é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento (SANTOS,2009). Pode ser utilizado para determinar os efeitos de várias características artificiais, como desenvolvimentos urbanos, pequenos reservatórios de retenção ou canais forrados em hidrografias de inundação e rendimento de sedimentos (WOOLHISER *et al.*, 1990).

O Modelo WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*) foi proposto por Lopes (1987) e conta com a componente hidráulica do modelo KINEROS e as técnicas de modelagem apresentadas no projeto WEPP (SANTOS, 2009). É um modelo físico e distribuído desenvolvido para simular o comportamento erosivo dinâmico e deposicional de pequenas bacias hidrográficas. No que diz respeito à desratização da sua área de estudo, a bacia é representada através uma configuração simplificada composta por um sistema de planos de escoamento e segmentos de canais. O modelo simula eventos de chuva, e foi elaborado pensando em pequenas bacias nas regiões semiáridas.

O modelo WEPP (*Water Erosion Forecast Project*) é um modelo de simulação contínua baseado em processo, desenvolvido para prever os efeitos de erosão a partir de práticas de manejo agrícola e para acomodar a variabilidade espacial e temporal na topografia, propriedades do solo e condições de uso de terra em pequenas bacias hidrográficas agrícolas (ASCOUGH II *et al.*, 1995). Foi desenvolvido pelo Departamento de Agrícola dos Estados

Unidos (USDA) como um substituído para o modelo empírico USLE (Universal Soil Loss Equation, Weismeyer e Smith, 1965, 1967).

Modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido pelo Arnold *et al.* (1998) para o USDA Agricultural Research Service (ARS). Foi desenvolvido para prever os impactos que práticas de manejo de terra exercem sobre água, produção de sedimentos e efeitos dos produtos químicos agrícolas em grandes bacias hidrográficas. É um modelo de base física, computacionalmente eficiente que possibilita o estudo dos impactos a longo prazo.

Modelo WASA-SED - o modelo hidrológico WASA (*Water Availability in Semi-Arid environments*) foi desenvolvido por Güntner (2002). Posteriormente foi adicionado o módulo de sedimentação. A versão atual WASA-SED é um modelo determinístico, espacialmente semi-distribuído, que simula os processos de escoamento pluviométrico e os processos de transporte de sedimentos na encosta, rio e reservatórios (MAMEDE, 2009).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

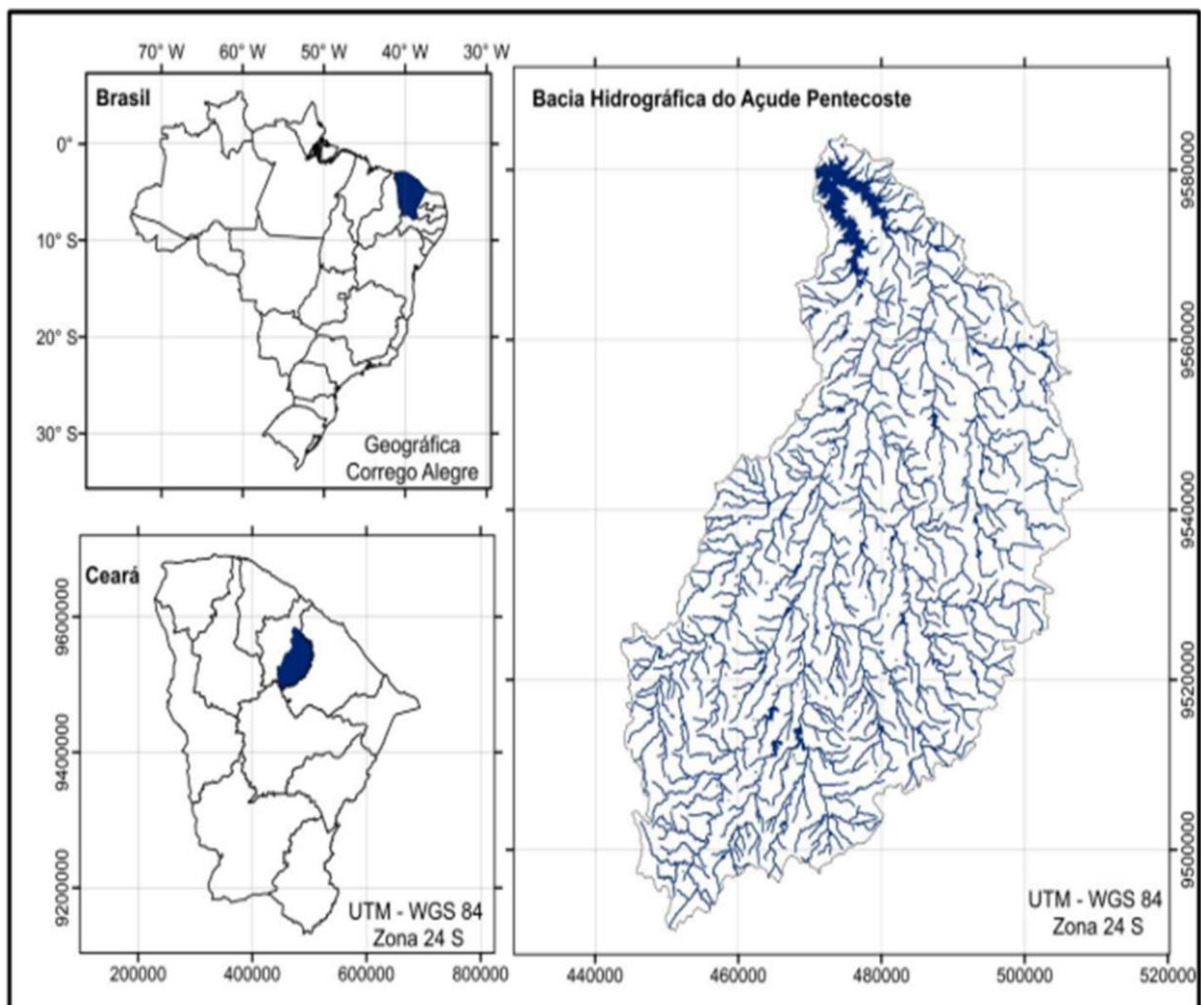
A bacia hidrográfica do Açude Pereira de Miranda - Pentecoste é uma sub-bacia localizada na bacia de Curu, na região centro norte do estado do Ceará. Considerando o Sistema de coordenadas UTM (24 S, WGS 84 datum), ela se encontra localizada entre 9480000 - 9590000 N e 440000 - 510000 E, (LIRA, 2012), com uma área de aproximadamente 2.840 km² (COGERH, 2021) (Figura 1). A sua rede de drenagem é composta pelos rios: Canindé, Capitão Mor, Juriti e Batoque; e os riachos: Aroeira, Bom Sucesso, Cachoeira, Cedro, Meio, Mel, Serrote, Macacos, Salgado, Seriema (IPIRANGA, 2016).

O açude Pereira Miranda foi construído em 1957 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), a partir do barramento dos rios Canindé e Capitão Mor, com o objetivo de controlar as cheias, regularizar a vazão hídrica, promover irrigações a jusante, gerar energia elétrica, favorecer a piscicultura e reter a água para outros fins (IPIRANGA, 2016). É o quinto maior reservatório artificial do estado do Ceará, sendo fundamental para o desenvolvimento e a manutenção da qualidade de vida regional. A sua construção criou condições para a implementação e expansão de diversos projetos agrícolas irrigados à jusante de sua barragem (Projeto Curu-Paraipaba), e atraiu o interesse de investidores diante do seu potencial aquícola para tilapicultura e carcinicultura (Oliveira, 2009).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948), é BSw'h', ou seja, semiárido com chuvas irregulares e com duas estações climáticas bem definidas (GOMES, 2016).

A região apresenta índices pluviométricos médios anuais em torno de 800 mm, concentrado nos meses de janeiro a abril. Apresenta uma altitude média de 60 m, evaporação de 1.436 mm.ano⁻¹ e a sua temperatura varia de 26 a 28 °C (FRANÇA et al. 2013).

Figura 1 – Hidrografia e localização da bacia hidrográfica do açude Pentecoste em relação ao Ceará e ao Brasil



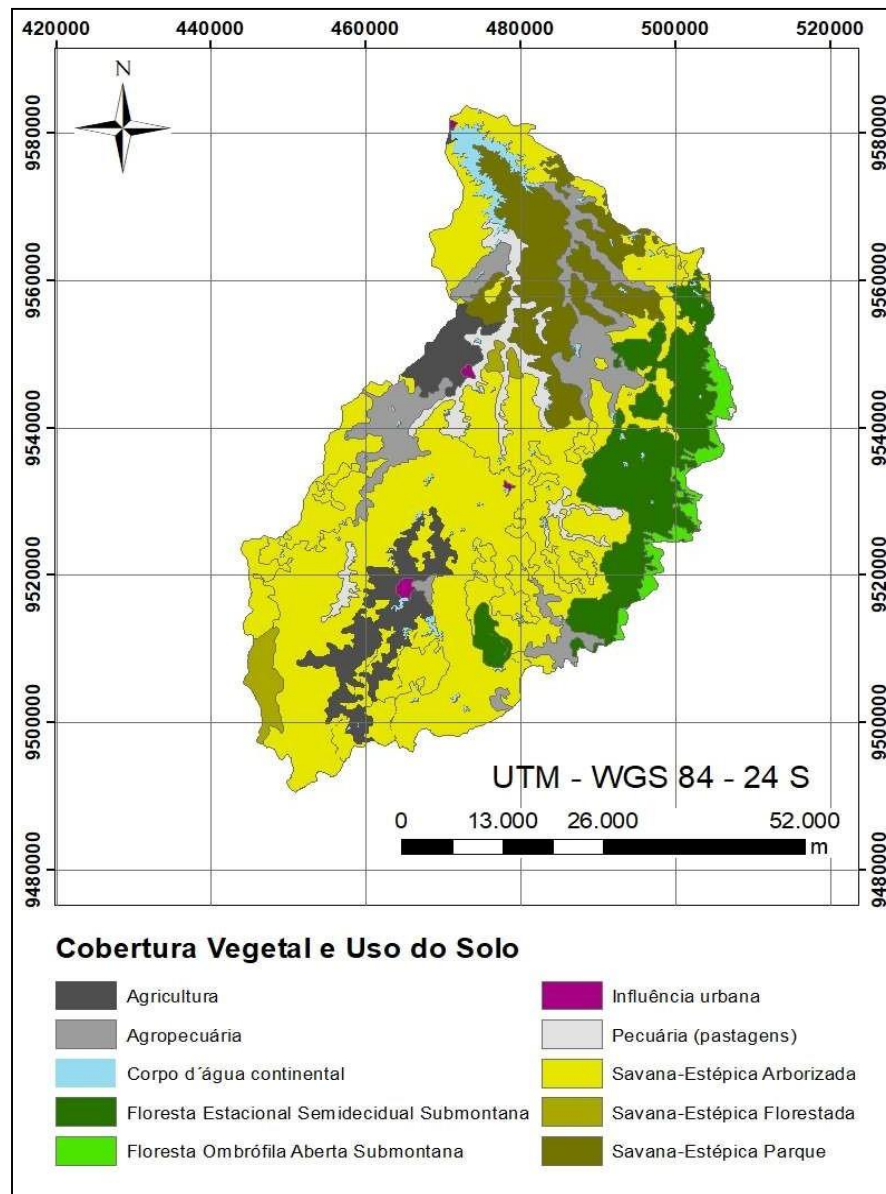
Fonte: Lira (2012).

A cobertura vegetal é predominantemente caatinga, de caráter hiperxerófilo (GOMES, 2016). De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponíveis no Banco de Dados de Informações Ambientais, a vegetação da bacia pode ser classificada em: savana estépica arborizada, savana estépica florestada, savana estépica

parque, floresta estacional semidecidual submontana, floresta ombrófila aberta submontana e áreas modificadas pela influência antrópica, como mostra a figura 2.

A região está inserida em rochas do embasamento cristalino e aluviões, representativas de duas unidades litológicas, referentes aos períodos pré-cambriano e quaternário (CRISTEA, 2016).

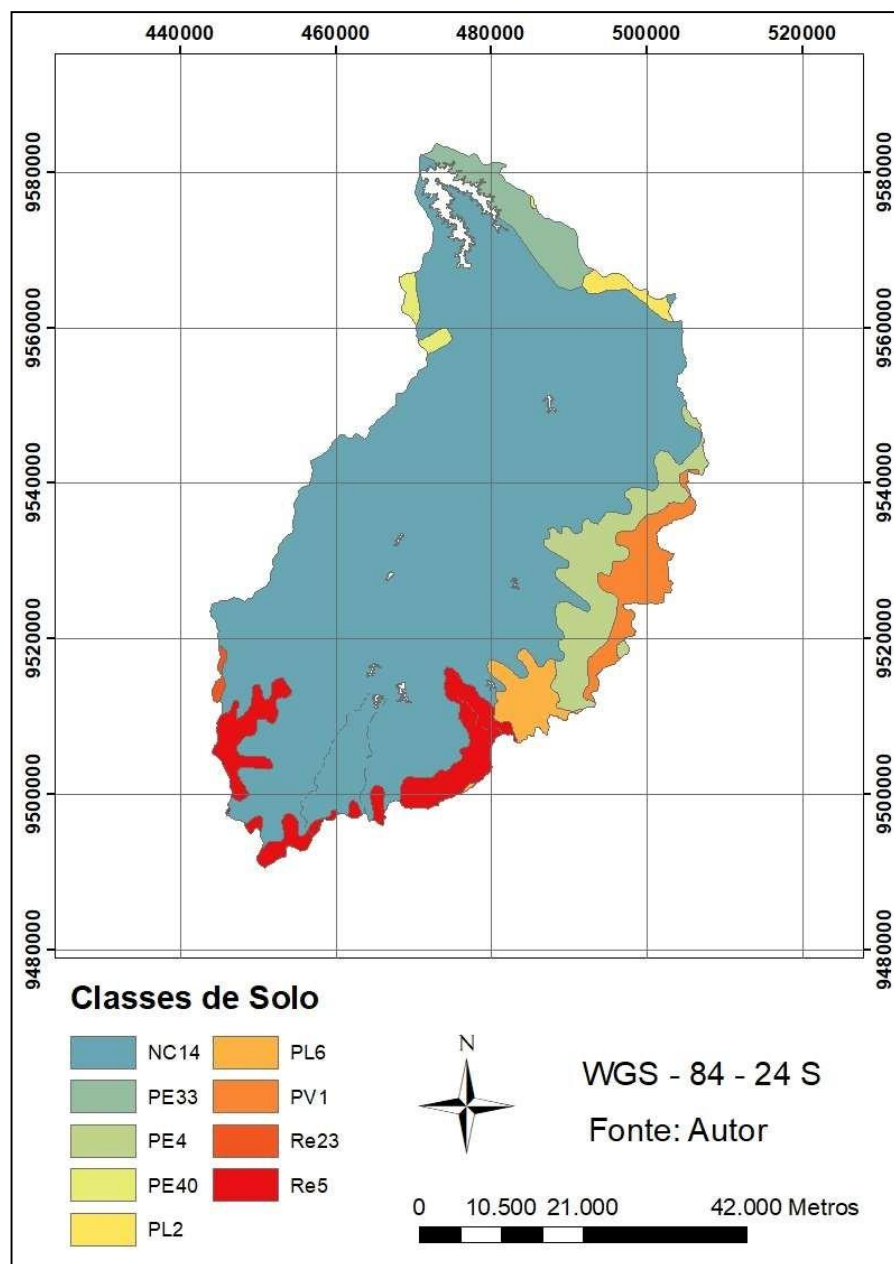
Figura 2. Cobertura vegetal e uso de solo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.



Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com o mapa base de Reconhecimento dos Solos do Ceará na escala de 1:600.000 (figura 3), a bacia apresenta nove tipos de solos, dentre eles estão os solos: bruno não cálcio, que ocupam cerca de 82% do percentual da área; podzólico vermelho amarela equivalente eutrofico, com 9% da área; litórico, com 2% da área; planossolo solódico, com 2% da área; e podzólico vermelho amarela, com 2% (LIRA, 2012).

Figura 3 - Tipos de solo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste de acordo com o mapa base de Reconhecimento dos solos no Estado do Ceará, na escala de 1:600.000.



3.2 Modelo WASA-SED

O modelo WASA-SED (Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with Sediment Dynamics Component) (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004; GÜNTNER ET AL., 2004; BRONSTERT ET AL., 2007; MAMEDE, 2008; MUELLER ET AL., 2008; FRANCKE ET AL., 2008; MEDEIROS, 2009) é um modelo hidrossedimentológico desenvolvido para simular a geração de fluxo de água e sedimentos, e a disponibilidade de água em grandes bacias hidrográficas em condições ambientais semiáridas.

Segundo Güntner (2002), o modelo WASA-SED preenche critérios de um modelo conceitual e de base física. É um modelo distribuído, ou seja, a sua área de estudo pode ser subdividida em áreas menores com sua localização geograficamente referenciada. No entanto, em escalas espaciais menores, as unidades de modelagem não são abordadas de forma individual, assim, ao invés da sua localização geográfica, são representadas apenas pela fração da sua área sobre as unidades de maior escala. Por esse ângulo o WASA-SED tem o aspecto de um modelo semi-distribuído. Em escalas ainda menores, como a variabilidade da condutividade hidráulica do solo dentro de um componente do solo, o WASA-SED trabalha na forma de um modelo espacialmente agrupado (GÜNTNER, 2002). De acordo com Mueller et al. (2010) essas características dão ao modelo uma possibilidade de representar de forma detalhada as variáveis presentes na área de estudo e, ao mesmo tempo, ser aplicável para uma grande extensão espacial e temporal sem perder a eficiência computacional.

A resolução temporal do modelo é usualmente de um dia, entretanto, para estudos de menor escala, como eventos de tempestade, podem ser usadas etapas de tempo mais curtas (um mínimo de uma hora) (MAMEDE, 2008; GUNTNER, 2002). De acordo com Mamede (2008), a estrutura espacial do modelo conta com três níveis conceituais: vertente, rede de drenagens e reservatórios superficiais.

3.2.2 Estrutura do modelo para a vertente

A vertente obedece uma estrutura de desagregação hierárquica *top-down* com cinco níveis espaciais, de modo a reproduzir o carácter variável das propriedades como topografia, tipo de solo e cobertura vegetal ao longo da bacia e a influência dessa variabilidade na geração do escoamento (MEDEIROS, 2009).

A seguir são apresentadas as características e representações de processos específicos de cada nível de escala conforme retratado em (GÜNTNER, 2002; GUNTNER; BRONSTARD, 2004; MEDREIROS, 2009; e MAMEDE, 2009).

- Sub-bacia: unidade básica, demarcada tendo em conta a localização dos grandes reservatórios (com a capacidade de armazenamento superior a 50.106m³) e de convergência de grandes rios. Como uma alternativa a sub-bacias, pode-se utilizar unidades administrativas (municípios) ou células de grade, com uma área na ordem de magnitude de 103 km².

- Unidade hidrológica (*landscape unit* – LU): são delineadas dentro das sub-bacias. Precisam apresentar uma semelhança em termos de fluxos verticais e horizontais da água entre as vertentes. Para isso, cobrem áreas com semelhanças na litologia subjacente, nas características das rochas e no aspecto geral da superfície, e são caracterizados por uma catena de encosta com uma associação específica de solo e vegetação.

- Componente de Terreno (*Terrain component* – TC): subdivisão de uma LU. Cada LU é composta por, no máximo, três TCs, podendo ser menor em caso de não haver uma diferença significativa em zonas topograficamente distintas dentro do LU. Os três TCs representam terras altas, encostas e fundos de vale, respectivamente. São caracterizados pela sua posição em relação aos outros TCs da topossequência, por uma declividade específica na vertente, e pela existência de um tipo específico de solo e vegetação.

- Componente de solo e vegetação (*Soil-Vegetation component* – SVC): uma subdivisão dos componentes TC. Possuem uma combinação específica entre o tipo de solo e a classe de cobertura vegetal. Nesta escala se considera a redistribuição lateral do escoamento superficial e sub-superficial entre SVCs.

- Perfil de solo: é o menor componente espacial da hierarquia. Onde é especificado os horizontes de solo dos SVCs e é calculado o balanço hídrico, considerando processos verticais e horizontais. O número de horizontes de solo pode ser livremente escolhido e pode variar entre diferentes SVCs.

Segundo Medeiros (2009), a rotina de modelagem hidrológica do modelo WASA-SED incorpora os seguintes processos: interceptação (balanço simplificado - Güntner, 2002); evapotranspiração (modelo de duas camadas - Shuttleworth e Wallace, 1985); evaporação de reservatórios superficiais (Penman, 1948; Monteith, 1965); infiltração (Green e Ampt, 1911); percolação entre horizontes de solo (Arnold et al., 1990); escoamento sub-superficial (relação simplificada para fluxo saturado baseada na equação de Darcy); armazenamento subterrâneo (modelagem simplificada com base em um modelo linear de armazenamento). Detalhes sobre

a representação dos processos hidrológicos são apresentados em Güntner (2002) e Mamede (2009).

A rotina dos processos sedimentológicos em WASA-SED fornece quatro equações de erosão de geração de sedimentos usando derivados da equação USLE (Wischmeier e Smith, 1978), que podem ser generalizadas como (Williams, 1995). Mais detalhes dos processos são apresentados em Mueller et al. 2010.

A equação USLE e suas derivadas podem ser generalizadas da seguinte forma:

$$E = \chi KLSC PROKFA \quad (1)$$

onde E é a erosão (t), K o fator de erodibilidade do solo ($t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), L o fator de declive de comprimento, C o fator de manejo de vegetação e cultivo, P o fator de prática de controle de erosão, $ROKFA$ o fator de fragmento grosso como usado na USLE e A a área do escopo (ha). χ é o termo de energia que difere entre os derivados USLE, que são fornecidos abaixo. É calculado como (Williams, 1995):

$$\text{USLE } \chi = EI \quad (2)$$

$$\text{Onstad-Foster } \chi = 0,646EI + 0,45(Q_{\text{surf}}q_p)^{0,33} \quad (3)$$

$$\text{MUSLE } \chi = 1,586(Q_{\text{surf}}q_p)^{0,56}A^{0,12} \quad (4)$$

$$\text{MUST } \chi = 2,5(Q_{\text{surf}}q_p)^{0,5} \quad (5)$$

onde EI é o fator de energia da chuva ($\text{MJmmha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), Q_{surf} é o volume de escoamento superficial (mm) e q_p é a taxa de escoamento de pico (mmh^{-1}). Em contraste com a USLE original, as abordagens (3–5) incorporam o escoamento superficial Q_{surf} (calculado pelas rotinas hidrológicas) no cálculo do componente de energia. Isso melhora o desempenho da modelagem de sedimentos ao eliminar a necessidade de uma taxa de distribuição de sedimentos (SDR) e considera implicitamente a umidade antecedente do solo (Neitsch et al., 2002). E é distribuído entre o número especificado pelo usuário de classes de tamanho de partícula, conforme a composição média dos horizontes erodidos na área (MUELLER et al. 2010).

WASA-SED permite aplicar qualquer uma das quatro equações de erosão na escala de sub-bacia ou na escala do componente do terreno. No primeiro caso, os fatores USLE

resultam de médias ponderadas por área em toda a sub-bacia e cumulativamente para o fator LS conforme proposto por Foster e Wischmeier (1974 *apud* HAAN et al., 1994). Se aplicado na escala do TC, os fatores específicos de cada TC são usados e, entre eles, é realizado o roteamento de sedimentos: qualquer massa de sedimento SED_{in} (t) proveniente de áreas de declive é adicionada à massa de sedimento gerada E para obter o rendimento de sedimentos SY (t) de um TC. SY é limitado pela capacidade de transporte q_s (t) do fluxo que sai do componente do terreno. Como mostra a equação 6.

$$SY = \text{minimo}(E+SED_{in}, q_s) \quad (6)$$

Existem duas opções disponíveis para calcular a capacidade de transporte q_s :

(a) Com a capacidade de transporte de sedimentos de acordo com Everaert (1991):

$$\text{se } D_{50} \leq 150 \mu\text{m} : q_s = 1,50 \times 10^{-5} \Omega^{1,07} D_{50}^{0,47} W \quad (7)$$

$$\text{se } D_{50} > 150 \mu\text{m} : q_s = 3,97 \times 10^{-6} \Omega^{1,75} D_{50}^{-0,56} W, \quad (8)$$

$$\text{com } \Omega = (\rho g p S)^{1,5} / R^{2/3}$$

Onde Ω é a potência efetiva da corrente ($\text{g}^{1,5} \text{s}^{-4,5} \text{cm}^{-2/3}$) computada nas rotinas hidrológicas de WASA-SED, D_{50} é o diâmetro médio das partículas (μm) estimado a partir da distribuição do tamanho médio das partículas dos solos erodidos, e W é a largura da componente do terreno (m), ρ é a densidade das partículas (gm^{-3}), g é a aceleração gravitacional (ms^{-2}), q é a taxa de fluxo superficial em uma faixa de 1-m ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$) e R é a profundidade do fluxo (cm).

(b) Com o valor máximo previsto por MUSLE assumindo a erodibilidade irrestrita com K definido como 0,5:

$$q_s = E_{\text{MUSLE}, K} = 0,5 \text{ usando Eq. (7) (8)} \quad (9)$$

O sedimento que deixa um componente do terreno i é particionado em uma fração que é encaminhada para o próximo componente do terreno a montante (SED_{in}, TC_{i+1}) e uma fração que atinge o rio diretamente (SED_{river}, i), representando as partículas de solo

transportadas por caminhos preferenciais de escoamento, como riachos e voçorocas. SEDriver, i é uma função da fração de área α_i do componente i do terreno atual dentro da unidade de paisagem:

$$\text{SEDriver}, i = SYi(\alpha_i / \sum_{n=1}^{nTC} \alpha_n) \quad (10)$$

onde i é o índice do componente de terreno atual (contado do topo), α é a fração de área de um componente de terreno e nTC é o número de componentes de terreno na unidade de paisagem atual (MUELLER et al. 2010).

3.2.3 Estrutura do modelo para redes de drenagens

A rede fluvial é a componente espacial que serve de ligação entre a encosta e o reservatório (MAMEDE, 2008). Consiste em trechos individuais de rios com seções transversais pré-definidas. Cada trecho está associado a uma sub-bacia, desse modo, cada trecho recebe os fluxos de água e sedimentos provenientes de uma sub-bacia e de outros trechos dos rios situados a montante. A seção transversal dos trechos é do formato aproximado de um trapézio (MUELLER et al., 2010). O seu módulo conta com uma abordagem espacialmente distribuída, que possibilita a simulação do transporte de água e sedimentos.

Para a simulação dos processos sedimentológicos, o WASA-SED possui módulos para o transporte da carga suspensa e para o transporte da carga do leito. O transporte de carga suspenso é modelado usando o conceito de capacidade de transporte, calculado como uma função da velocidade de pico do fluxo. O transporte da carga do leito é calculado usando cinco equações diferentes de transporte de carga: MEYER-PETER & MÜLLER (1948); SCHOKLITSCH (1950); SMART & JAEGGI (1983); BAGNOLD (1956); E RICKENMANN (1991, 2001).

3.2.4 Estrutura do modelo para reservatórios

Para a descrição dos processos que ocorrem nos reservatórios, o modelo possui duas abordagens diferentes: uma abordagem simplificada desenvolvida por Güntner (2002) e uma abordagem detalhada desenvolvida por Mamede et al. (2006).

A abordagem simplificada separa os reservatórios em estratégicos e pequenos. São considerados reservatórios estratégicos, aqueles com porte grande e médio, que se encontram

localizados nos principais rios na saída da sub-bacia. Para esses reservatórios, os saldos da água e sedimentos são calculados explicitamente no modelo. No caso dos reservatórios menores, eles são agrupados em classes de tamanho de acordo com a sua capacidade de armazenamento. A abordagem aplica um sistema de roteamento em cascata para descrever a posição das classes de reservatórios e a redistribuição do fluxo de água e sedimento entre as diferentes classes de reservatórios.

Na abordagem detalhada, o reservatório é dividido em dois componentes espaciais: o componente sub-alcance do rio e o componente sub-alcance do reservatório. Os limites entre os dois componentes espaciais são definidos tendo em conta a profundidade normal de cada seção transversal, sem considerar o preenchimento do reservatório. É considerada como profundidade normal a profundidade máxima da água para um fluxo uniforme, calculado pela fórmula de Manning. Se o valor da profundidade da seção do reservatório for menor que a profundidade normal, a seção é considerada pertencente a sub-alcance do rio, caso contrário a seção é considerada pertencente a sub-alcance do reservatório.

Para simular o transporte de sedimentos nos reservatórios, o modelo considera quatro aspectos: equilíbrio hídrico do reservatório, transferência hidráulica pelo reservatório, transporte de sedimentos no reservatório e mudanças de elevação do leito do reservatório (MAMEDE, 2008; MUELLER, 2010).

O modelo de sedimentação de reservatórios permite o cálculo de eficiência de aprisionamento do reservatório, o cálculo dos padrões de deposição de sedimentos, a simulação de várias opções de gestão de sedimentos do reservatório e o cálculo da expectativa de vida do reservatório.

3.2.5 Sequência temporal da modelagem dos processos

A sequência temporal de modelagem dos processos relacionados à dinâmica da umidade do solo e à geração de escoamento em cada iteração apresentado pelo Güntner (2002) segue as seguintes etapas:

- 1) O processo inicia no componente de terreno situado na mais elevada posição topográfica na unidade paisagística, daí seguem as etapas 2 a 10 para todos os componentes de solo-vegetação (SVCs) presentes no componente de terreno (TC);

- 2) A influência do fluxo superficial lateral provenientes dos TCs a montante e nos SVS do mesmo TC produzidos na iteração anterior é calculada e usada para atualizar a umidade do solo de todos os horizontes. Se o teor atual de água do solo de um perfil exceder o seu

máximo possível na saturação, a água excedente conta como escoamento superficial (fluxo de retorno).

3) É determinado a retenção da precipitação na cobertura vegetal (interceptação) e a evaporação da água interceptada;

4) É determinado o escoamento superficial devido à saturação por excesso de precipitação ou devido ao fluxo lateral (produzido na mesma iteração) proveniente de TCs a montante e/ou de uma fração saturada do SVC produzido na etapa 9.

5) É calculado infiltração com a entrada da chuva e em função do escoamento superficial (produzido na mesma iteração) proveniente de TCs a jusante e/ou de outros SVCs do mesmo TC. Simultaneamente, a rotina de infiltração determina o escoamento superficial em razão da saturação por excesso da água infiltrada (para casos em que o perfil do solo é completamente saturado pela água infiltrada durante o período).

6) É atualizado a umidade do solo dos horizontes mais profundos em função da água infiltrada.

7) A evapotranspiração é calculada em função da umidade do solo, com esse valor a umidade do solo de todos os horizontes sofrem uma atualização.

8) Para cada horizonte de solo é calculado o fluxo vertical que segue para o horizonte inferior ou para águas subterrâneas profundas e é determinado o volume do escoamento lateral subsuperficial para os SVCs adjacentes e para o TC a jusante ou para a rede fluvial. De acordo com essas saídas a umidade do solo dos horizontes sofre uma nova atualização.

9) É determinado a fração saturada do svc como uma função do teor de umidade do solo em um perfil representativo do solo.

10) Os escoamentos, superficial e subsuperficial, de todos os SVCs do TC atual são somados e distribuídos entre o escoamento do rio e a entrada para o TC a jusante.

11) As etapas, 2 a 10, se repetem para todos os SVCs do próximo TC a jusante.

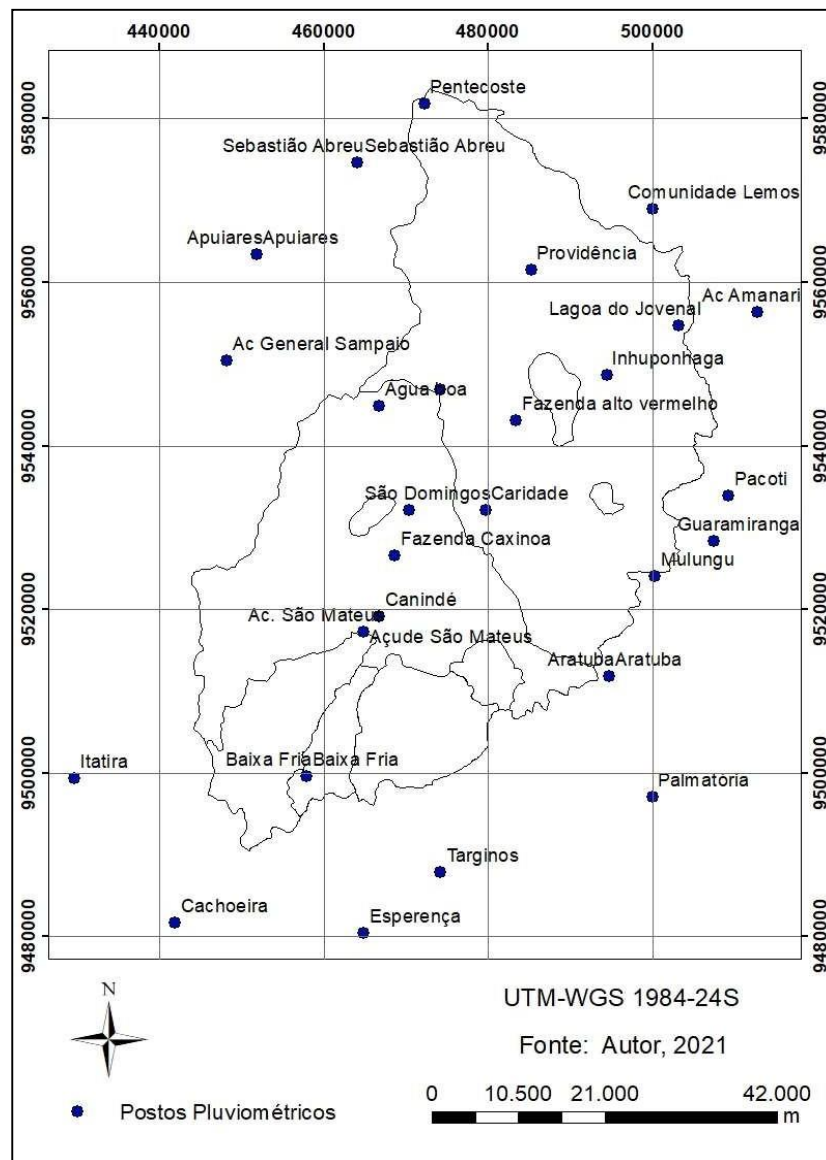
3.3 Parametrização do modelo WASA-SED

Para o presente estudo, o modelo WASA-SED aplicado é a versão da parametrização proposta por Medeiros (2009) e modificada por Lima (2020). Medeiros (2009) usou o modelo para avaliar os efeitos da conectividade sobre a produção de sedimentos na bacia hidrográfica de meso-escala de açude Benguê. Lima (2020) aplicou essa versão para avaliar o comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe (BHJ) diante de diferentes

cenários de utilização de sistemas hídricos. Pelo fato de o estudo realizado por Medeiros (2009) ser em macro escala, foi necessário ajustar alguns dados na parametrização inicial, possibilitando uma maior compatibilização entre os processos hidrológicos simulados e a área estudada. No presente trabalho a versão do modelo ajustado por Lima (2020) foi aplicado para a bacia hidrográfica do açude Pereira Miranda, trocando os dados de entrada - séries temporais de precipitação, radiação, umidade e temperatura (em intervalo de tempo diário) e dados de solo e vegetação.

As séries históricas de precipitação foram obtidas a partir de dados de postos pluviométricos disponíveis no portal da FUNCEME. A figura 5 mostra os postos pluviométricos utilizados.

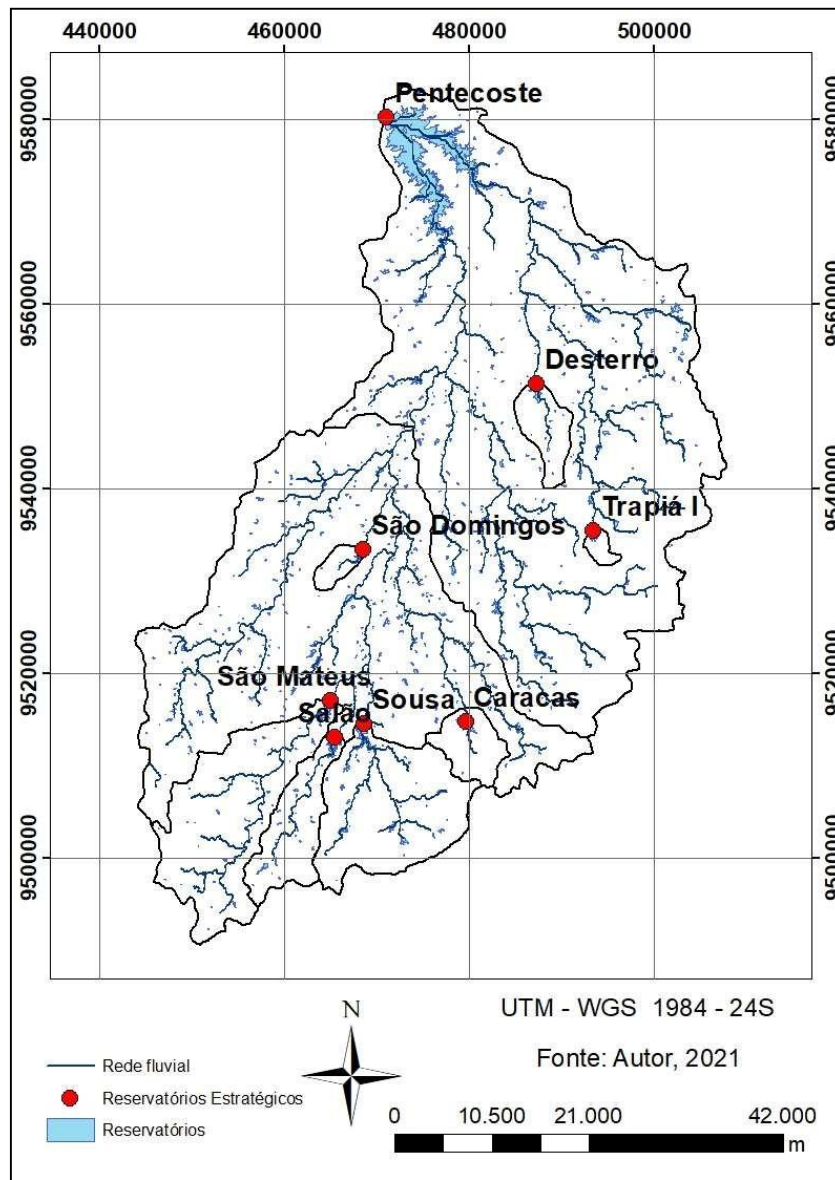
Figura 5 – Postos pluviométricos utilizados no trabalho.



As séries históricas de radiação, temperatura e umidade estão disponíveis no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados usados no trabalho são do posto de Quixeromobim. Nas datas em que faltaram dados monitorados, foram usados os dos postos mais próximos com dados disponíveis.

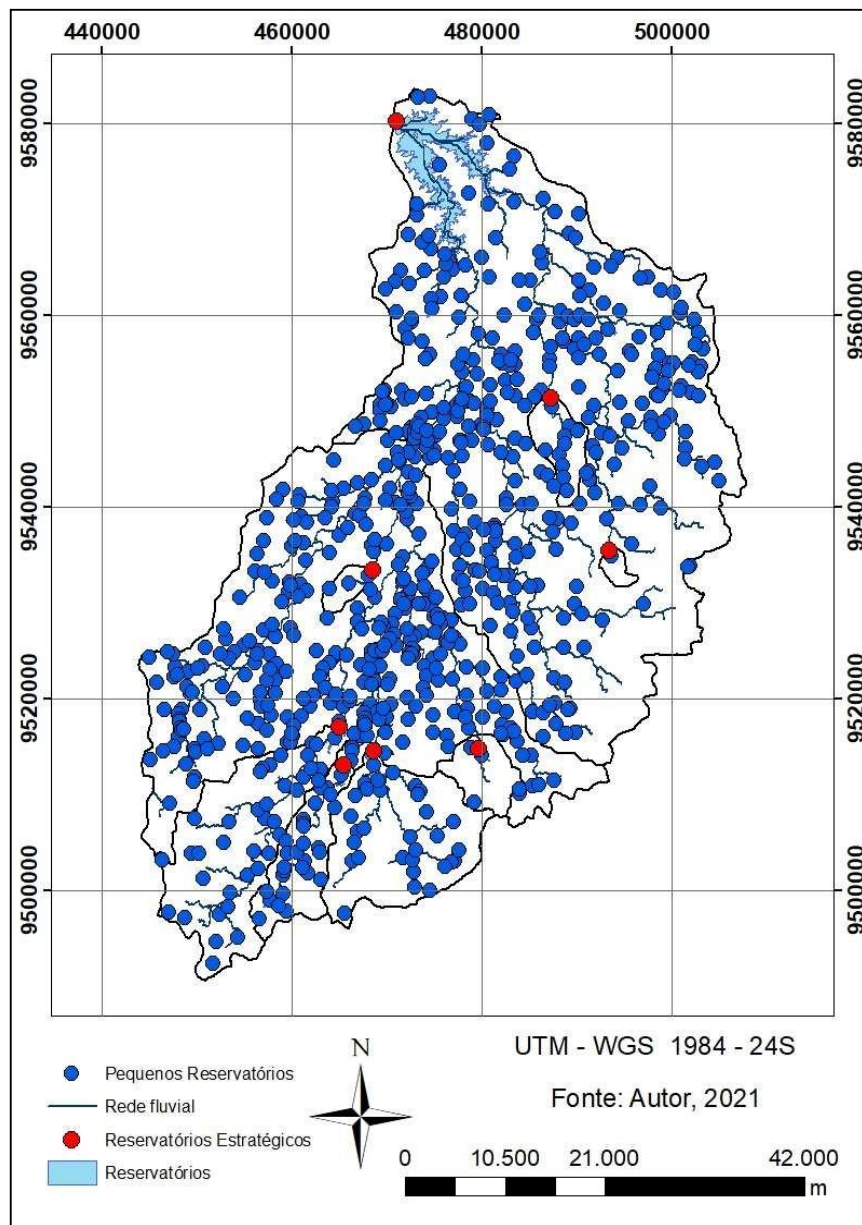
Como apresentado anteriormente, o modelo WASA-SED simula os processos hidrossedimentológicos que ocorrem nos reservatórios dividindo-os em duas classes: estratégicos e pequenos. A bacia hidrográfica do açude Pereira Miranda apresenta oito reservatórios estratégicos monitorados pela Companhia de Gestão e Recursos Hídricos (COGERH). São eles: Caracas, Desterro, Pentecoste, São Domingos, São Mateus, Salão, Sousa e Trapiá I. A figura 4 mostra a disposição desses reservatórios e suas respectivas sub-bacias.

Figura 6 – Reservatórios estratégicos e suas respectivas sub-bacias.



Os reservatórios de pequeno porte não são modelados a partir de suas características individuais. São incluídos em classes estabelecidas conforme o tamanho do reservatório. Os dados dos reservatórios de pequeno porte foram baseados no trabalho de Lira (2012), que fez levantamento de 733 reservatórios para o ano de 2004. A figura a seguir mostra a disposição dos reservatórios na bacia.

Figura 7 – Rede de reservatórios superficiais



Para avaliar a capacidade do modelo na estimativa do volume dos reservatórios estratégicos, as simulações foram realizadas para o período entre 1980 e 2019. Dentre os oito

reservatórios estratégicos foram selecionados seis (Desterro, Pentecoste, Salão, São Domingos, São Mateus e Sousa) para o balanço hídrico dos reservatórios. Os outros dois reservatórios foram deixados de fora porque não foram encontrados dados de volume medido disponíveis.

O resultado da simulação foi comparado com dados históricos dos volumes de armazenamento nos reservatórios obtidos junto ao Portal Hidrológico do Ceará mantido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) (COGERH, 2021).

Para avaliar a eficiência do modelo, foi empregado o coeficiente Nash e Sutcliffe (NSE) (Eq. 11).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_j (F_{med}^j - F_{sim}^j)^2}{\sum_j (F_{med}^j - \bar{F}_{med})^2} \quad (11)$$

em que: Y_{med} é o valor medido da variável no tempo j , Y_{sim} é o valor simulado da variável no tempo j e \bar{Y}_{med} é a média dos valores medidos. O coeficiente NSE varia de $-\infty$ a 1, sendo que, quanto maior for o coeficiente, melhor o desempenho do modelo. Se NSE for menor que 0 (zero), a capacidade de previsão do modelo é inferior ao valor médio medido (LOPES, 2013).

A simulação foi realizada tendo em conta três cenários diferentes: simulação sem retirada; com retirada medida e com retirada simulada. No primeiro caso os dados da vazão regularizada não são incluídos nos dados de entrada do modelo. No segundo caso esses dados são incluídos na entrada do modelo, e no terceiro o próprio modelo simula a vazão regularizada.

3.5 Produção de sedimentos e retenção na densa rede de reservatórios.

Para a simulação da retenção de sedimentos ao longo da encosta e do assoreamento no açude Pentecoste. Foram usadas as quatro abordagens disponíveis no modelo WASA-SED (USLE e seus derivados – MUSLE, Ostad-Foster e MUST). Essas opções diferem no componente de energia χ , que é calculado a partir da erosividade da chuva, características do escoamento superficial ou uma combinação de ambas e a equação da capacidade de transporte para estimar a massa de sedimentos que pode ser transportada encosta abaixo (Brontert et al. 2014). A tabela 1 mostra um resumo das abordagens sedimentológicas e as escalas espaciais relacionadas ao modelo WASA-SED.

Tabela 1 Resumo das abordagens do modelo sedimentológico e as escalas espaciais relacionadas no modelo WASA-SED (componente de vegetação do solo SVC, componente de terreno TC, unidade de paisagem LU).

Processo	Escala Espacial	Abordagem/Equação	Referência
Erosão do Solo	Vertente / LU	USLE + 3 modificações: MULSE, Ostad-Foster, MUST (para o uso opcional)	Wischmeier and Smith (1978), Williams (1995)
Deposição do material erodido	Escala de campo / TC	Limite da capacidade de transporte de sedimentos	Everaert (1991)
Transporte do material suspenso (incluindo deposição ou degradação em) em rios	Rede fluvial	Avaliação da capacidade de transporte de sedimentos suspensos	Arnold et al. (1995)/Neitsch et al. (2002)
Transporte do material de leito	Rede fluvial	5 equações de transporte (para uso opcional)	Meyer-Peter e Muller (1948); Schokitsch (1950); Bagnold (1956); Smart and Jaeggi (1983); Rickenmann (2001)
Transporte de sedimentos em pequenos reservatórios	Classes de reservatórios	Cálculo de sedimentação de forma agregada para as diferentes classes de reservatórios	Mamede (2008)
Transporte de sedimentos em grandes reservatórios	Reservatórios estratégicos	Cálculo de sedimentação para cada reservatório individual, incluindo medidas de gerenciamento dos reservatórios	Mamede (2008)

Fonte: Bronstert, 2014

Com cada uma das quatro equações, foram feitas simulações da quantidade de sedimentos retidos nos reservatórios a montante do açude Pentecoste.

Para estimativa da taxa de assoreamento dos reservatórios estratégicos, aplicou-se a seguinte equação, considerando uma evolução temporal descrita por uma progressão geométrica:

$$Sed = 1 - e^{\ln\left(\frac{7_f/7_i}{t_d}\right)} \quad (12)$$

em que: Sed é taxa de assoreamento por década, V_i é a capacidade de armazenamento inicial; V_f é a capacidade de armazenamento final, e t_a é o tempo em décadas é a média dos valores medidos.

Para analisar o desempenho do modelo na estimativa da taxa de assoreamento por década nos reservatórios estratégicos, usou-se a equação da raiz quadrática média dos erros.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (13)$$

em que: RMSE é o desvio quadrático médio, N é o número de dados presentes, x_i é a série temporal simulada, e \hat{x}_i é a série temporal medida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Pentecoste com o WASA-SED

Para a análise do desempenho do modelo foram feitas comparações entre os valores modelados e os medidos fornecidos pela COGERH para o período de 1980 a 2019. A análise da consistência dos resultados foi feita calculando os valores NSE para três cenários diferentes: volume modelado sem retirada; volume modelado com retirada simulada; e volume modelado com retirada medida.

A tabela 2 apresenta o desempenho dos modelos (NSE) para os três cenários. Nos reservatórios Desterro, Pentecoste e São Mateus o coeficiente NSE é superior 0,7. Para o reservatório salão, o desempenho do modelo não segue o mesmo padrão, com NSE variando de 0,35 a 0,51. No caso do reservatório Sousa, o modelo apresenta um desempenho ruim para duas condições: simulação sem retirada e simulação com retirada medida. Na simulação com retirada simulada o NSE foi superior a 0,5.

No geral, o desempenho do modelo pode ser considerado bom, com os valores modelados apresentando a mesma ordem de grandeza dos dados medidos, com exceção do reservatório Sousa, em que o modelo superestima o volume do reservatório. O fraco desempenho do reservatório Sousa pode estar relacionado aos dados de precipitação. Não havia disponível dados de algum posto situado dentro da sua bacia, e os postos mais próximos

(Targinos e Baixa fria) não apresentam séries históricas de precipitação com um período superior a dez anos. Por isso, a área acabou recebendo dados de postos distantes.

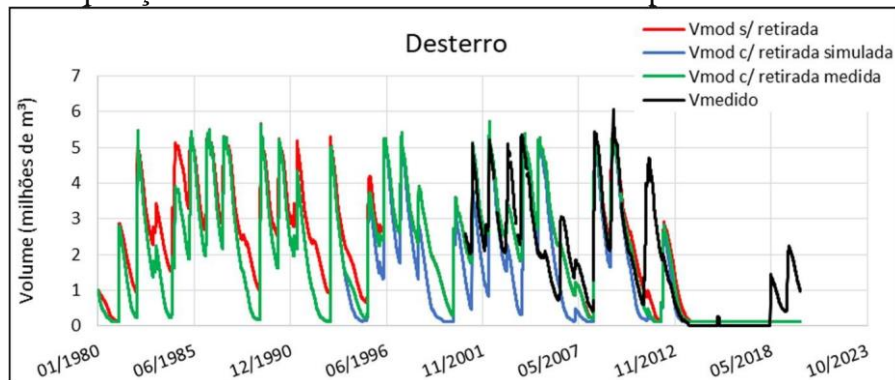
Tabela 2. Análise do desempenho do modelo a partir dos valores NSE

Reservatório	NSE - Simulação com retirada simulada	NSE - Simulação sem retirada	NSE - Simulação com retirada medida
Desterro	0.70	0.79	0.78
Pentecoste	0.81	0.71	0.86
Salão	0.40	0.51	0.35
São Domingos	0.64	0.84	0.75
São Mateus	0.78	0.80	0.79
Sousa	0.54	-0.35	-0.17

Fonte: elaborado pelo autor

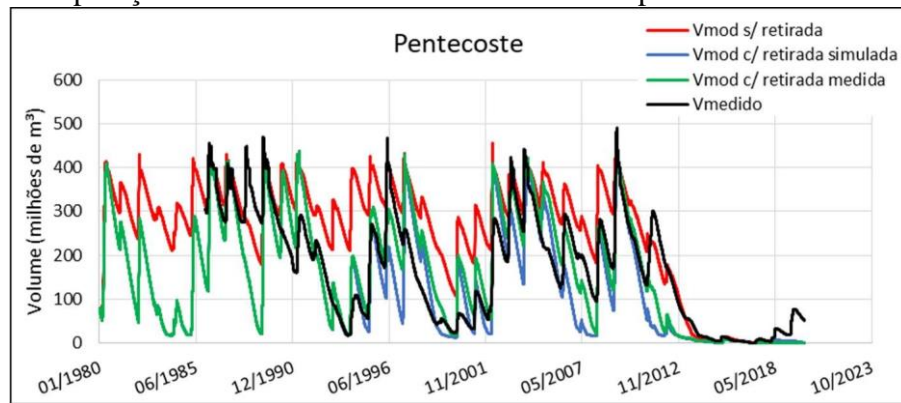
As figuras 8 a 13 mostram a relação entre os volumes simulados e os medidos. Analisando os gráficos pode-se notar um padrão que se repete nos reservatórios Desterro (figura 8), Pentecoste (figura 9), São Domingos (figura 10) e São Mateus (figura 11). Depois de 2014 ocorreu um período de seca, com o volume dos reservatórios indo a zero ou quase zero, e só entre 2017 e 2018 começaram a apresentar alguma subida no volume, contudo o modelo não acompanhou a retomada após a seca. Para o açude Salão (figura 12) e Sousa (figura 13) ocorreu o contrário, a retomada foi mais tímida para os volumes medidos, e o modelo superestimou os valores de volume. Isso pode representar alguma limitação do modelo em simular a retomada após secas, onde, ora não apresenta a retomada, ora superestima os valores.

Figura 8. Comparação entre valores medidos e modelados para o reservatório Desterro.



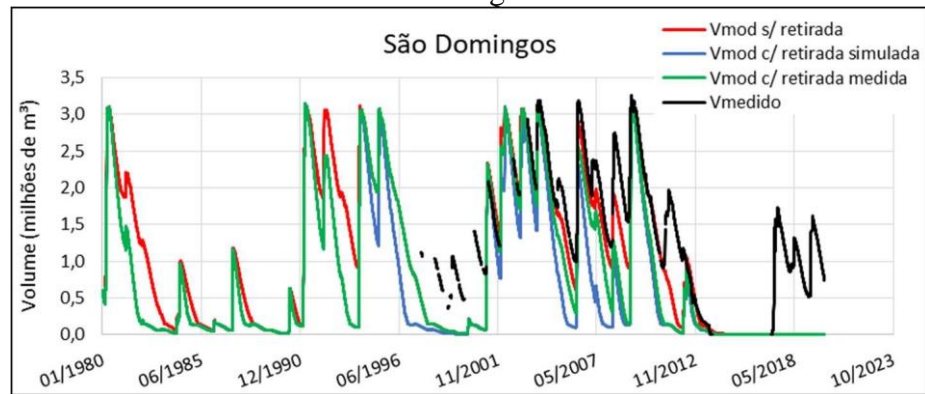
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 9. Comparação entre valores medidos e modelados para o reservatório Pentecoste.



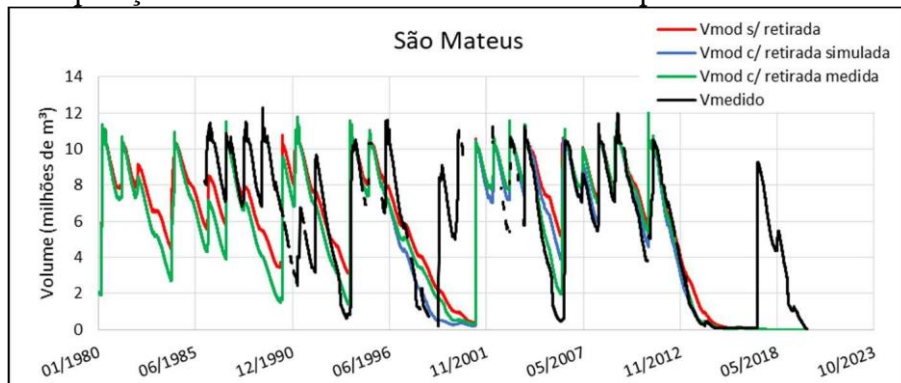
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 10. Comparação entre valores medidos e modelados para o reservatório São Domingos.



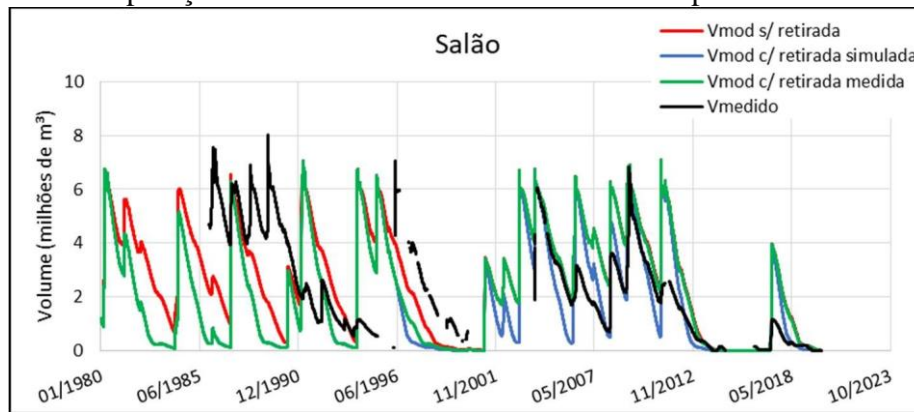
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 11. Comparação entre valores medidos e modelados para o reservatório São Mateus.



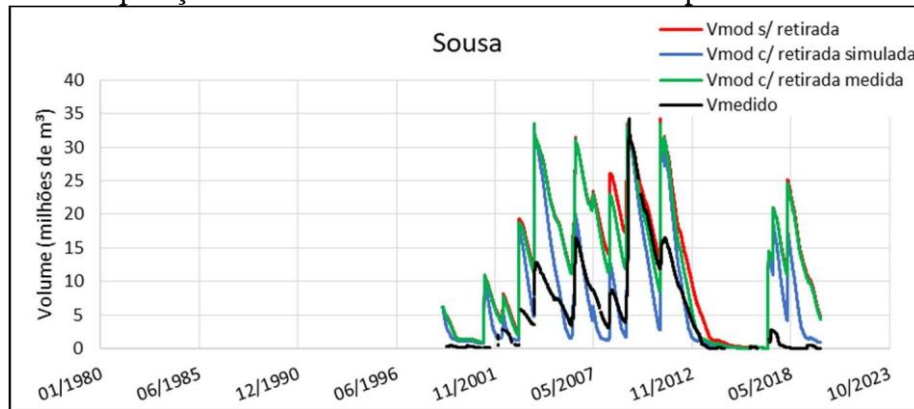
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 12. Comparação entre valores medidos e modelados para o reservatório Salão



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 13. Comparação entre valores medidos e modelados para o reservatório Sousa.



Fonte: elaborado pelo autor

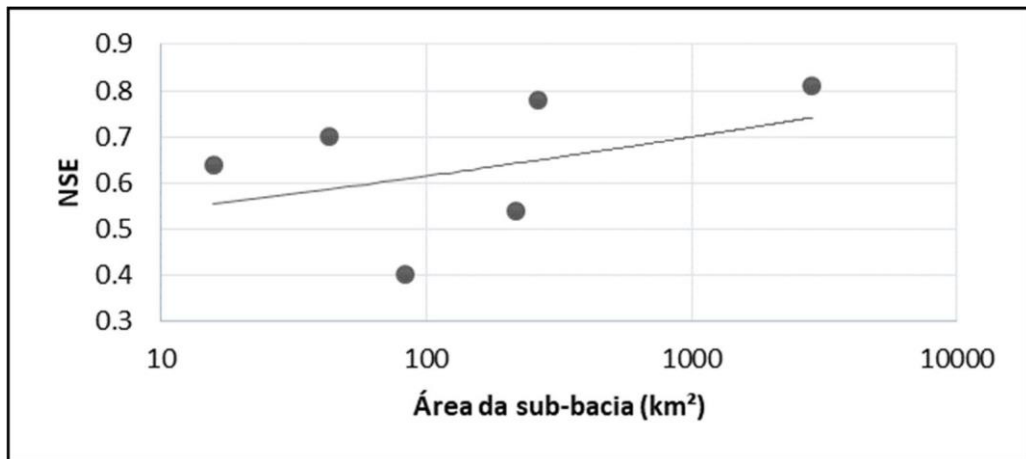
A figura 14 mostra a relação entre a área da sub-bacia e o coeficiente de desempenho NSE. Pode-se observar que, nas duas situações em que a vazão regularizada foi considerada, o desempenho do modelo melhorou com o aumento da área. Na modelagem sem retirada ocorre o contrário, ou seja, o melhor desempenho do modelo ocorre nas bacias menores.

Em estudo realizado por Malveira (2009) na bacia do açude Orós, o coeficiente de eficiência NSE do modelo variou de valores negativos em sub-bacias com área em torno de 300 km² para valores próximos de 1 em bacias com áreas superiores a 10.000 km², mostrando que há uma relação direta entre o NSE e a área da bacia. Medeiros (2009), em estudo realizado na bacia de Benguê, conseguiu um bom desempenho do modelo, tanto na bacia com 933km² de área, como em uma sub-bacia com área de 12 km². Segundo o autor, a melhoria da qualidade dos parâmetros e dados de entrada do modelo consegue compensar a falta de precisão do modelo nos reservatórios pequenos. Assim, o modelo WASA-SED consegue simular adequadamente os processos hidrossedimentológicos em ambiente semiárido, transferindo os

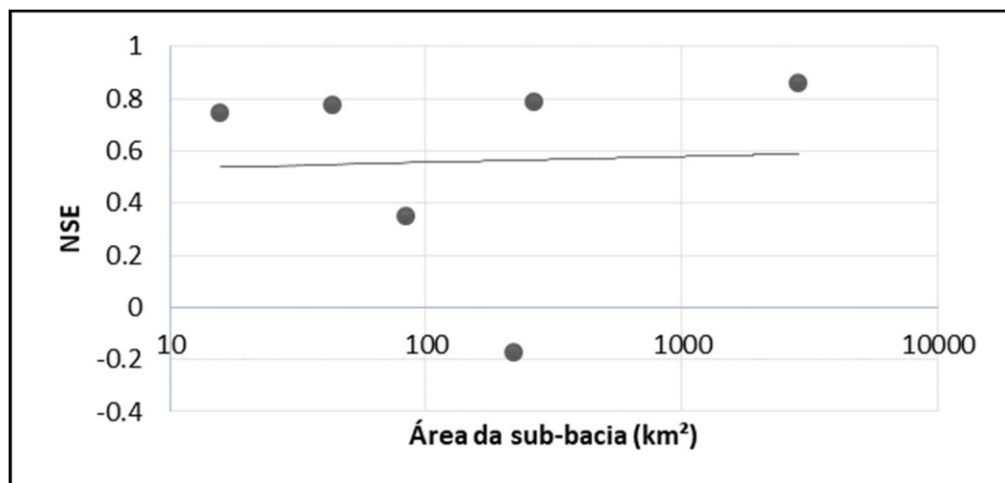
fluxos de água e sedimentos entre diferentes escalas espaciais. Os resultados apresentados na figura 14 corroboram com esse ponto, ou seja, há uma relação entre a área da bacia e um bom desempenho do modelo, entretanto o desempenho do modelo para as pequenas bacias é satisfatório.

No caso da simulação sem retirada (Figura 14 c) o coeficiente de desempenho do modelo é menor nas bacias maiores. Isso porque essas bacias apresentam reservatórios maiores e com maiores volumes de vazão regularizada, desconsiderar essa vazão induz o modelo ao erro.

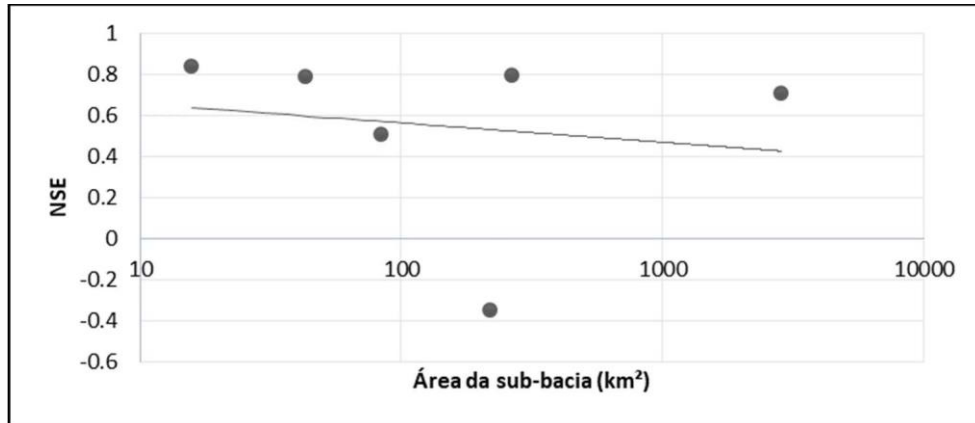
Figura 14 – Relação entre área e o NSE



a) Simulação com retirada simulada



b) Simulação com retirada medida



c) Simulação sem retirada

4.2 Modelagem da dinâmica de sedimentos pela rede de reservatórios da bacia do Pentecoste com o WASA-SED

O modelo WASA-SED simula os processos hidrossedimentológicos nos reservatórios separando-os em dois grupos: reservatórios de grande porte (denominados de estratégicos) e os de pequeno porte. Os reservatórios de pequeno porte não são modelados de forma individual, ao invés disso, são agrupados em classes de acordo com o tamanho. A tabela 3 mostra a capacidade cumulativa dos reservatórios estratégicos e pequenos do açude Pereira Miranda, com os reservatórios menores agrupados em cinco classes. Pode se ver que existe uma grande quantidade de reservatórios de pequeno porte, e essa quantidade vai diminuindo à medida que aumenta o tamanho, com os reservatórios estratégicos representando apenas 1,10% do total dos reservatórios presentes na bacia. Por outro lado, os reservatórios estratégicos acumulam 92,10% de todo o volume presente na bacia, ou seja, são responsáveis por quase toda a água armazenada. Os reservatórios pequenos representam apenas uma pequena fatia da capacidade de armazenamento da bacia.

A tabela 4 apresenta o total de sedimentos retidos nos reservatórios da bacia. O modelo WASA-SED oferece a opção de calcular a retenção de sedimentos escolhendo um entre quatro equações de cálculo disponíveis no seu módulo sedimentológico. Para cada uma das equações foram calculados os valores totais de sedimentos retidos durante o período de simulação (1980 - 2019).

Tabela 3 – Capacidade cumulativa das classes de reservatórios de pequeno porte e dos reservatórios estratégicos.

Classe dos Reservatórios	Limite máximo do volume (m3)	Número de reservatórios	Número de reservatórios (%)	Capacidade cumulativa para cada classe (m3)	Capacidade cumulativa para cada classe (%)
1	5.000	319	43,50%	509.473	0,10%
2	25.000	222	30,30%	2.622.971	0,50%
3	125.000	123	16,80%	6.579.988	1,30%
4	625.000	45	6,10%	13.220.864	2,60%
5	3.125.000	16	2,20%	16.690.079	3,30%
Estratégicos	395.638.000	8	1,10%	462.552.200	92,10%
Total		733	100%	502.175.575	100%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4 - Total de sedimentos retidos nos reservatórios localizados a montante do açude Pentecoste em toneladas.

Tipo de Reservatórios	Reservatórios	Retenção de Sedimentos (ton)			
		USLE + Everaert	Onstad-Foster	MUSLE	MUST
Estratégicos	Caracas	1.046.764	1.437.400	2.741.663	1.257.892
	Desterro	380.008	640.111	967.881	438.103
	Pentecoste	9.792.313	18.366.488	22.513.894	7.076.194
	Salao	190.277	312.008	584.173	243.743
	São Domingos	32.524	126.191	228.778	119.809
	São Mateus	2.265.778	3.503.860	6.873.355	2.828.783
	Sousa	1.329.422	1.828.060	3.013.565	1.109.739
	Trapiá I	1.268	16.409	1.059	770
Pequenos	5000,00	2.248.291	3.770.013	6.988.448	2.573.100
	25000,00	4.036.902	6.972.736	12.962.380	4.791.519
	125000,00	4.938.700	8.248.220	15.247.135	5.475.041
	625000,00	4.799.760	7.874.644	13.816.191	4.886.013
	3125000,00	2.780.182	4.911.893	6.988.340	2.309.024
Total - Reservatórios Estratégicos*		15.038.354	26.230.527	36.924.368	13.075.030
Total - Pequenos Reservatórios*		18.803.835	31.777.506	56.002.494	20.034.697

Fonte: elaborada pelo autor

A retenção de sedimentos, para as diferentes equações, varia de 13 a 37 milhões de toneladas nos reservatórios estratégicos. Já nos reservatórios de pequeno porte, esse valor varia de 20 a 56 milhões de toneladas. De acordo com Mamede et al. (2018), a existência de densas redes de reservatórios e o seu padrão de distribuição espacial exerce um impacto significativo no transporte de água e sedimentos. Isso corrobora com os resultados obtidos, onde apesar da fração pequena no volume de água armazenada na bacia, os reservatórios de pequeno porte demonstraram ter uma importante contribuição na retenção de sedimentos a montante. Mamede et al. (2018), estudando a retenção de sedimentos a montante do reservatório de Benguê, indicaram que 42% dos sedimentos que atingiriam os reservatórios de Benguê foram retidos a montante. Com frações semelhantes aprisionados nos reservatórios pequenos e estratégicos (21%).

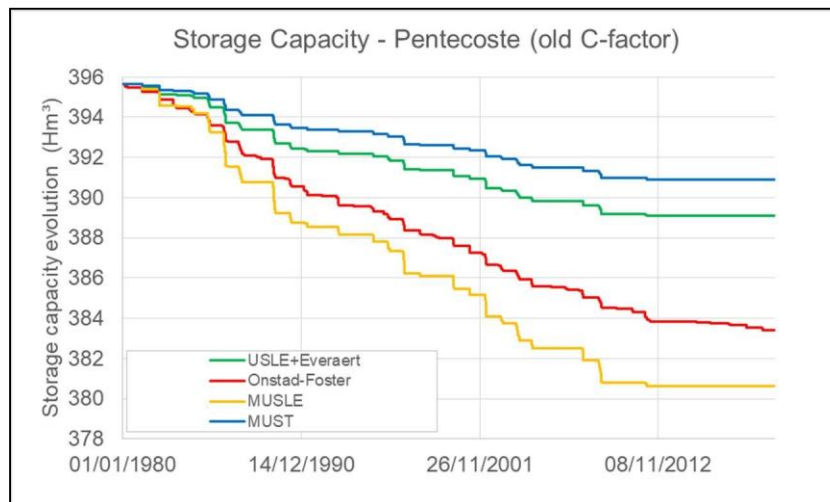
4.3 Modelagem do assoreamento no açude Pentecoste

O gráfico (figura 15) mostra a variação da capacidade de armazenamento do reservatório Pentecoste no período entre (1980 a 2019), a partir das quatro equações de perda de dolo (USLE e seus derivados). Pode-se ver uma tendência da perda de capacidade do reservatório devido ao assoreamento. Com um volume superior a 395 hm³ em 1980 a capacidade do reservatório decresceu para valores em torno de 390 hm³ em 2019.

Araújo (2003) realizou uma estimativa do assoreamento em sete bacias hidrográficas com reservatórios representativos no estado de Ceará. Segundo o autor a taxa média de produção de assoreamento é de 1,85% para cada década. Analisando a tabela 5, pode-se ver que a taxa de assoreamento estimada pelo modelo para as quatro equações é menor que essa média. A equação MUSLE é o que mais se aproxima, com uma taxa de assoreamento de 0,95%.

O baixo valor de taxa de assoreamento modelada no Açude Pentecoste pode ser resultado de uma maior taxa de retenção nos reservatórios a montante estimada pelo modelo WASA-SED. Se o modelo estiver superestimando a retenção de sedimentos nos reservatórios de montante, chegará menos sedimentos no Pentecoste.

Figura 15 – Evolução da Capacidade de armazenamento do reservatório Pentecoste durante do período de (1980 a 2019)



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5. Taxa de assoreamento por década no Açude Pentecoste

Item	USLE + Everaert	Onstad- Foster	MUSLE	MUST
Volume inicial (m³)	395,630,016	395,630,016	395,630,016	395,630,016
Volume final (m³)	389,102,112	383,385,664	380,621,088	390,913,280
Assoreamento (%/dec)	0.41%	0.77%	0.95%	0.30%

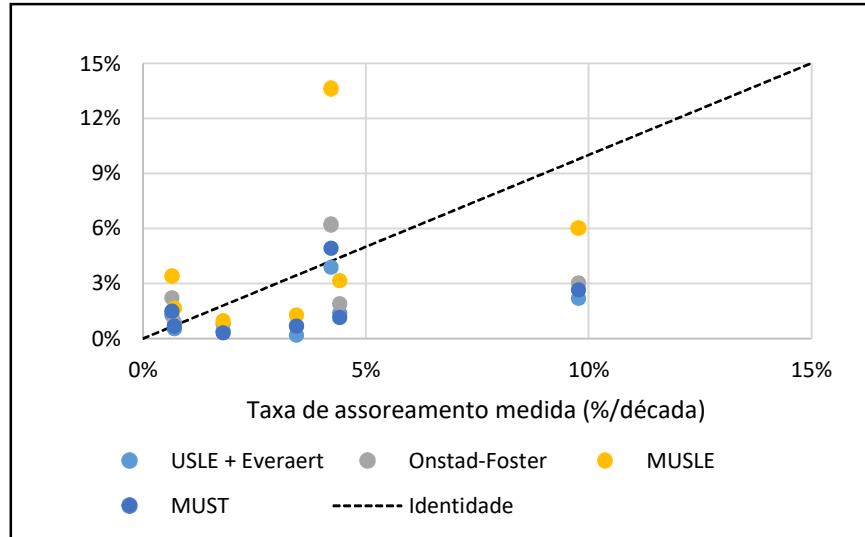
Fonte: elaborado pelo autor

Lopes et al. (2015) com o uso do modelo USLE indicou, para o açude Marengo no estado de Ceará, uma taxa moderada de assoreamento da ordem de 0,15% ao ano. Lira (2012) estimou o assoreamento na bacia de Pentecoste a partir de dois cenários: (1) considerando apenas os grandes reservatórios existentes na bacia e (2) considerando todos os reservatórios existentes na bacia. Os resultados variaram de 0,40 a 9,14% por década para o primeiro cenário e 0,34 a 7,29% para segundo cenário.

A figura 16 mostra a relação entre a taxa de assoreamento medida e a modelada por década nos reservatórios estratégicos. Observa-se que, em geral, o modelo apresenta uma tendência em subestimar a taxa de assoreamento quando comparada a dados medidos. Tal fato, poderia ser explicado pela alta eficiência de retenção de sedimentos da densa rede de

reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste, reduzindo consideravelmente o aporte de sedimento a este último.

Figura 16 Relação entre a taxa de assoreamento por década medida e modelada.



Fonte: Elaborado Pelo Autor

Para avaliar o desempenho do modelo na estimativa da taxa de assoreamento por década, aplicou-se a equação de erro quadrático médio (RMSD) para cada uma das quatro equações de produção de sedimentos disponíveis no modelo WASA-SED (Tabela 6), comparando-se os dados medidos e modelados. Como se pode observar, a variabilidade dos valores de RMSD é pouco significativa (6,86% a 8,33%), com menor erro médio para a equação da MUSLE, ratificando o melhor desempenho desta equação na estimativa da retenção dos reservatórios estratégicos da bacia do Pentecoste.

Tabela 6. Taxa de assoreamento medida e modelada pelas quatro equações de produção de sedimento do WASA-SED, com respectivos valores de erro quadrático médio (RMSD)

Reservatórios estratégicos	Taxa de assoreamento (%/década)				
	Medida	USLE + Everaert	Onstad-Foster	MUSLE	MUST
Caracas	9,8%	2,2%	3,0%	6,0%	2,6%
Desterro	0,7%	1,3%	2,2%	3,4%	1,5%
Pentecoste	1,8%	0,4%	0,8%	1,0%	0,3%
Salao	0,7%	0,5%	0,9%	1,7%	0,7%
Sao Domingos	3,4%	0,2%	0,7%	1,3%	0,7%
Sao Mateus	4,2%	3,9%	6,2%	13,6%	4,9%
Sousa	4,4%	1,4%	1,9%	3,2%	1,1%
RMSD	-	8,4%	7,7%	6,9%	8,2%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos na presente pesquisa, destacam-se as seguintes conclusões:

- Mesmo sendo parametrizado para a escala macro e validado para uma outra bacia, modelo teve um bom desempenho da representação dos processos hidrológicos na bacia estudada.
- O modelo apresenta uma limitação na representação dos períodos que ocorrem após eventos prolongados de seca, subestimando os valores de volume em quatro dos reservatórios estudados e superestimando nos outros dois.
- Existe uma grande quantidade de reservatórios de pequeno porte na bacia hidrográfica do açude Pereira Miranda, sendo 99% do total dos reservatórios. Apesar disso a sua contribuição no total de volume de água armazenada na bacia é baixa, com os reservatórios estratégicos acumulando mais de 92% de toda o volume disponível.
- Apesar de contribuírem muito pouco para a retenção de água a montante, os reservatórios de pequeno porte são importantes na retenção de sedimentos. No presente estudo o total acumulado nos reservatórios menores é maior que o acumulado nos estratégicos.
- Os reservatórios estratégicos e os pequenos, juntos, desempenham um papel importante na retenção de sedimentos a montante, reduzindo a carga que acumularia no Açude Pentecoste.
- A taxa de assoreamento por década produzido pelo modelo varia de 0,30% a 0,95% valores menores que a média de 1,85% estimado por Araújo (2013).

REFERÊNCIA

- ANA. **Práticas mecânicas de conservação de água no solo: Erosão hídrica**, Unidade 1. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerc/handle/ana/62>. Acesso em: 20 de jan. 2021.
- ASCOUGH II, J.C. **USDA-Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation** NSERL,1995. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/wepp/wepp-model-documentation/>. Acesso em 15/04/2021.
- ARAÚJO J. C. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 8, n.2, p. 39–56 Abr./Jun. 2003.
- BRONSTART et al. Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments. **Journal of Soils and Sediments**. p. , 2014.
- COSTA, A. C. **Hidrologia de um abacia experimental em Caatinga conservada no semiárido brasileiro**. (2007). Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica), - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, CE
- ENOCH, J. et al. Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 07, n. 06, p. 1187–1195, 2014.
- FAYAL, M. A. DE A. **Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet**. (2008). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.
- FRANÇA et al. Comportamento das variáveis qualitativas do açude pereira de miranda – pentecoste/ce, no período de estiagem. **Geociências**, UNESP, São Paulo, v. 32, n. 4, p.586-599 , 2013.
- GAMO, M.; SHINODA, M.; MAEDA, T. Classification of arid lands , including soil degradation and irrigated areas , based on vegetation and aridity indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 19, p. 6701-6722, 2013.
- GODIM, J. et al. A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos. **Parc. Estrat**, Brasília, DF, v. 22, n. 44, p. 277-300, jan./jun. 2017.
- GOMES F.E.F. **Processos hidrossedimentológicos em uma bacia experimental do semiárido brasileiro (2016)**. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola) - departamento de engenharia agrícola, universidade federal do ceará, 2016.
- GUIRRO, M. O. **Avaliação da aplicabilidade do modelo geowep na bacia hidrográfica do rio cunha, município rio dos cedros (SC)**. (2018). Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade federal do Rio Grande do Sul.

GÜNTNER, A. et al. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. **Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques**. p. 901–918 , 2004.

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil**. 2002. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Faculty of Mathematics and Sciences, University of Potsdam, Potsdam, 2002.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, v. 297, n. 1–4, p. 136–161, 2004.

IPIRANGA P.C. **nutriente em sedimentos e qualidade da água em açude do semiárido brasileiro**. (2016). Monografia (Graduação em Ciências Ambientais) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Ceará, 2016.

LIMA, T.B.R. **Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos**. (2020). Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento De Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2020.

LIRA, C.D.L. **Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem pereira de miranda, CE**. (2012). Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Departamento De Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2012.

LOPES, J. W. B. **Modelagem Hidrossedimentológica em Meso-Bacia do Semiárido**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

LOPES, J. W. B.; NETO, J. R. A.; RODRIGUES, E. A. Produção de sedimentos e assoreamento em reservatório no semiárido: o caso do açude marengo, ceará. **Geoambiente online: Revista eletrônica do curso de geografia**. UFG/REJ. Jataí,| n.24, Jan./Jun. 2015.

LOPES, J.W.B.; PINHEIRO, E.A.R. Análise temporal da conectividade e da Capacidade de transporte potencial de sedimentos em meso-bacia semiárida, CE, Brasil. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 7, n. 2, p. 136-144, mai./ago. 2013

LOU, R. F. 2010. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFRJ/COPPE, 174p.

LOVE, D. et al. Rainfall – interception – evaporation – runoff relationships in a semi-arid catchment, northern Limpopo basin, Zimbabwe. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 5, p. 687-703, 2010.

MAGALHÃES P.B. **Qualidade da água subsuperficial e de fundo no cultivo de tilápia em tanques-rede na fazenda campo grande (Açude Pereira de Miranda, Pentecoste, Ceará**.

(2013). Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca) – Departamento de engenharia de pesca, Universidade Federal de Ceará, 2013.

MALVEIRA, V. T. C. **Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: estudo de caso da bacia do orós.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAMEDE, G. L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments : modelling and management.** 2008. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Faculty of Mathematics and Sciences, University of Potsdam, Potsdam, 2008.

MAMEDE, G.L. et al. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **PNAS.** vol. 109, no. 19, p. 7191–7195, mai. 2012.

MAMEDE, G. L. et al. Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. **J. Hydrol. Eng.,** v. 23, n.12. 2018.

MARCELINO, L. **Transporte de sedimentos em suspensão nos rios catarinenses.** 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Centro tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal,** v. 55, n. 4, p. 636-648, jun./dec. 2019.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal,** v. 55, p. 636-648, 2010.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 2009.

MONTE-MOR, R. C. A. **Análise De Processos Hidrológicos Em Bacias De Rios Intermitentes No Semiárido Mineiro.** 2012. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MUELLER, E. N. et al. Model Development Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model. **Geosci. Model Dev,** v. 3, p. 275–291, 2010.

NASCIMENTO, A.T.P.; MACAMBIRA, A.G.; MEDEIROS, P.H.A. Efeito da rede de reservatórios sobre a energia Hidráulica acumulada em bacia hidrográfica de Meso-escala no semiárido brasileiro. **Conex. Ci. e Tecnol.** Fortaleza, v. 10, n. 5, p. 49-56, dez. 2016.

PEIXOTO, R. A. L. **Estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jordão – upgrh-pn 1**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 33, n. 4, p. 379-400, 1988.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; PORTER, J.P. RUSLE: Revised Universal Soil Loss. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.46, n.1, p 30-33. 1991.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem hidrológica**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.

SANTOS, F.A. et al. Estimativa e análise do volume dos pequenos açudes através de imagem de satélite e levantamento de campo na bacia hidrográfica do açude Sumé. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2009.

SANTOS, J. C. N. Taxa de entrega de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica semi-árida sob condições de baixa conectividade. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 49-58, jan./mar. 2017.

SANTOS, L. L. DOS. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. RBGF- **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 1–19, 2009.

SILVA JR, Valdemir P et al. Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** Campina Grande , v. 15, n. 10, p. 1073-1081, Oct. 2011 .

SILVA R.M.; SANTOS C.A.G. Influência da cobertura vegetal nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do Nordeste, Brasil. **ISSN 1808-866x unioeste geografia**, vol. 1 e 2, n. 5, p. 113 – 125, mar./ago. 2009.

SILVA, D. S. D. S. **Modelos empíricos para estimativa de produção de sedimentos. (2015)**. Dissertação (Concentração em Engenharia Hídrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SILVA, J. R. L. **Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de pernambuco**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural De Pernambuco, Recife, 2015.

SIMÕES, Kauem. **Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio indaiá, alto são francisco – MG, utilizando SWAT**. (2019)

SOUSA M. M. M. et al. Determinant pluviometric characteristics of sediment transport in a catchment with thinned vegetation in the tropical semiarid1. **Rev. Caatinga**, Mossoró, vol. 33, n. 3, p. 785 – 793, jul./ set. 2020.

SOUZA, A. B. et al. Geração automatizada de dados de entrada para o Modelo wasa-sed. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**.

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C. O. Erosão Hídrica do Solo no Semi-árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 8, n.2, p. 57–73. abr./jun. 2003.

WILLIAMS, J.R. Sediment-yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources**. Publication ARS-S-40. US Department of Agriculture: Washington, DC. 1975