



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

DAVID BRUNO DE SOUSA TEIXEIRA

**CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLO SOB CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS
NO MODELO HIDROLÓGICO DICASM**

FORTALEZA

2017

DAVID BRUNO DE SOUSA TEIXEIRA

CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLO SOB CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS
NO MODELO HIDROLÓGICO DICASM

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Gosta

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T265c Teixeira, David Bruno de Sousa.
Calibração dos parâmetros de solo sob condições semiáridas no modelo hidrológico DiCaSM / David Bruno de Sousa Teixeira. – 2017.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

1. Modelagem hidrológica. 2. Bacia experimental. 3. Conteúdo de água no solo. I. Título.

CDD 630

DAVID BRUNO DE SOUSA TEIXEIRA

CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLO SOB CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS
NO MODELO HIDROLÓGICO DICASM

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 07/07/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará

Dr. Carlos Alberto Kenji Taniguchi
Embrapa Agroindústria Tropical

Prof. Dr. José Carlos de Araújo
Universidade Federal do Ceará

Eng^a. Léa Moraes Nunes Teixeira
Universidade Federal do Ceará

À minha família, por sonhar este sonho comigo.
Com todo amor e gratidão, os dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pela sua infinita graça que me sustentou nos momentos difíceis e me levou a chegar até aqui.

À Universidade Federal do Ceará pela estrutura concedida e aos meus professores, por todo o conhecimento repassado e por me mostrarem a nobreza da profissão que escolhi.

À minha família, em especial aos meus pais Luciene e Teixeira e minha irmã Shelida, por todo o amor, incentivo e apoio incondicional durante toda minha vida. Aos meus primos e primas, tios e tias, avôs e avós por se alegrarem com minhas conquistas e por tornar minha vida mais feliz e completa.

À minha amada, Mariana, por estar sempre ao meu lado e por me fazer uma pessoa melhor a cada dia. Aos meus sogros Nadja e Heraldo pela confiança e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre, pela excelente orientação e pelo auxílio na construção do conhecimento que proporcionaram a realização deste trabalho, bem como pelo prazeroso convívio e parceria.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, pela oportunidade de estágio. Aos meus orientadores supervisores Dr. Carlos Taniguchi por todos os ensinamentos e pela paciência, Dr. Dheyne Melo e Dr. Luiz Serrano pela oportunidade e confiança. Aos meus companheiros do Laboratório de Solos, em especial a Vanderléia, Thais, Jaciane, Israel, Ricardo, Luiz, Juliana, Hermano e Esraelda por tornarem a rotina laboratorial mais leve e prazerosa e por todos os conhecimentos repassados. Aos funcionários da Estação Experimental de Pacajus, por todo o auxílio durante os trabalhos de campo.

Ao Grupo de Pesquisa em Hidrosedimentologia de Regiões Semiáridas pelo acolhimento. Aos hidrosedianos pelo companheirismo, em especial a Léa, Jairo, Valéria e Karine por todo o incentivo e pelos conhecimentos repassados, e aos caros Adão e Vidal pelo relevante auxílio na coleta de campo.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através do projeto WAR-CAATINGA (431639/2016-7), que auxiliou na execução deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação, Higor, Marina, Mayara, Valéria, Paulo e outros, pela amizade e por todos os momentos de alegria compartilhados ao longo do curso.

Aos meus amigos de intercâmbio, Bruno, Carlos Eduardo, Deives, Milena, Camila, Mariana e Pollyanna por terem sido minha família quando estava longe de casa e por todas as descobertas e momentos incríveis que vivemos juntos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste sonho, a minha eterna gratidão.

“Quem crer em mim, como diz a Escritura, do seu interior fluirão rios de água viva”.

João 7:38

RESUMO

TEIXEIRA, David Bruno de Sousa, Universidade Federal do Ceará. Julho de 2017. **Calibração dos parâmetros de solo sob condições semiáridas no modelo hidrológico DiCaSM.** Orientador: Carlos Alexandre Gomes Costa.

RESUMO: Os solos se constituem como um importante componente na manutenção do ciclo hidrológico, sendo um compartimento que permite tanto a circulação como o armazenamento da água ao longo do seu perfil. A dinâmica hidrológica nos solos do semiárido brasileiro é influenciada fortemente pelos diferenciados padrões pluviométricos dessas regiões que, concomitante à diversidade vegetacional e à alta capacidade de resposta destas às chuvas, caracterizam um sistema ambiental heterogêneo. Nesse contexto, os modelos hidrológicos têm se caracterizado como eficientes ferramentas para uma melhor gestão dos recursos hídricos em bacias do semiárido, principalmente por facilitar a compreensão dos processos hidro-ambientais que interferem na disponibilidade hídricas desses sistemas. Diante disso, este trabalho objetivou avaliar a resposta do modelo hidrológico DiCaSM à calibração dos parâmetros de solo obtidos a partir de análises físico-químicas e equações de pedotransferência, em relação ao conteúdo de água no solo na camada 0-20 cm e na camada das raízes. Para isso, coletaram-se amostras de solos deformadas em diferentes profundidades em cada uma das três associações entre solo e vegetação (SVAs), SVA1, SVA2 e SVA3, presentes na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA). Após a análise das frações granulométricas e dos teores de matéria orgânica, utilizaram-se equações de pedotransferência para a obtenção dos parâmetros de solo utilizados no processo de calibração do modelo. A validação do mesmo foi feita a partir de dados de umidade do solo medidas em campo por sensor TDR e pelos modelados, aplicando o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Os resultados das análises físico-químicas evidenciaram o diferenciado padrão edáfico das três SVAs avaliadas, destacando os solos da SVA1 e SVA3 como os de maior teor de silte e areia, respectivamente. Os valores de matéria orgânica obtidos apresentaram comportamento semelhante nas três associações, decrescendo com a profundidade, sendo os maiores teores observados nos solos da SVA2. Em relação à resposta do modelo à calibração realizada, os maiores valores de NSE foram obtidos ao avaliar o conteúdo de água no solo da camada de 0-20 cm em detrimento da camada das raízes, principalmente para a SVA1. O uso da equação de Philip promoveu uma melhor correlação dos dados medidos e modelados se comparados com obtidos a partir da equação de Green-Ampt. Considerando-se a dispersão dos dados obtidos, a maior concentração de água disponível às plantas foi observada na camada superficial (0-20 cm) da área de Luvisolos. Desta forma, o modelo hidrológico DiCaSM respondeu positivamente à calibração dos parâmetros de solo para a maioria dos cenários avaliados, permitindo maior compreensão da dinâmica dos processos hidrológicos envolvidos na camada litológica de uma bacia semiárida.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Bacia experimental. Conteúdo de água no solo.

ABSTRACT

TEIXEIRA, David Bruno de Sousa, Universidade Federal do Ceará. July 2017. **Calibration of soil parameters under semiarid conditions in the DiCaSM hydrological model.** Advisor: Carlos Alexandre Gomes Costa.

ABSTRACT: Soils constitute an important component in the maintenance of the hydrological cycle, being a compartment that allows both the circulation and storage of the water along its profile. The hydrological dynamics in Brazilian semi-arid soils is strongly influenced by the different pluviometric patterns of these regions, which, concomitant with the vegetation diversity and its high capacity in responding to these rains, characterize a heterogeneous environmental system. In this context, hydrological models have been characterized as efficient tools for a better management of the water resources in semi-arid basins, mainly for facilitating the understanding of hydro-environmental processes that interfere in the water availability of these systems. The objective of this study was to evaluate the response of the DiCaSM hydrological model to the calibration of the soil parameters obtained from physical and chemical analysis as well as pedotransference equations, in relation to soil water content in the 0-20 cm and roots layers. For this, samples of deformed soils were collected at different depths in each of the three associations between soil and vegetation (SVAs), SVA1, SVA2 and SVA3, present at the Aiuaba Experimental Basin (BEA). After the analysis of the granulometric fractions and the organic matter contents, there were used pedotransference equations to obtain the soil parameters used in the calibration process of the model. The validation was done from soil moisture data measured in the field by TDR sensor as well as modeled moisture, applying the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE). The results of the physical and chemical analysis showed the different edaphic pattern of the three SVAs evaluated, highlighting the soils of SVA1 and SVA3 as the ones with the highest silt and sand content, respectively. The values of organic matter obtained showed similar behavior in the three associations, decreasing with depth, being the highest levels observed in the soils of the SVA2. In relation to the model response to the calibration performed, the highest NSE values were obtained when evaluating soil water content of the 0-20 cm layer instead of the root layer, mainly for the SVA1. The use of the Philip equation promoted a better correlation of the measured and modeled data compared to the Green-Ampt equation. Considering the dispersion of the obtained data, the highest concentration of water available to the plants was observed in the superficial layer (0-20 cm) of the soils of the SVA2. Thus, the DiCaSM hydrological model responded positively to the calibration of the soil parameters for most of the evaluated scenarios, allowing a better understanding of the dynamics of the hydrological processes involved in the lithosphere layer of a semi-arid basin.

Keywords: Hydrological modeling. Experimental basin. Soil water content.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com o modo de adequação a aleatoriedade e a variabilidade no espaço e no tempo dos fenômenos hidrológicos	21
FIGURA 2 - Mapa de localização da região de estudo, Bacia Experimental de Aiuaba.....	25
FIGURA 3 - Mapa hipsométrico da BEA.....	26
FIGURA 4 - Mapa do relevo da BEA de acordo com a classificação de declividade da EMBRAPA (2006).....	27
FIGURA 5 - Normais climatológicas mensais de precipitação e caracterização dos meses em chuvosos, secos e de transição para o município de Aiuaba considerando os anos de 1987 a 2016.....	27
FIGURA 6 - Vegetação de caatinga na Estação Ecológica de Aiuaba no a) período seco; e b) período chuvoso.....	29
FIGURA 7 - Distribuição das características a) hidrológicas, b) fitossociológicas, e c) edáficas da BEA ao longo dos pixels.....	32
FIGURA 8 - Localização dos pontos de coleta de solo.....	33
FIGURA 9 - Trincheiras abertas para coleta de solo em diferentes profundidades na a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.....	34
FIGURA 10 - Solos das diversas camadas das a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3 em suspensão para determinação da granulometria pelo método da pipeta.....	35
FIGURA 11 - Tabelas <i>Soil Series</i> , à esquerda, e <i>Soil Props</i> , à direita, para entrada dos dados de solo no modelo DiCaSM.....	36
FIGURA 12 - Média (— ·) e mediana (—) dos teores de areia, silte e argila para as diferentes camadas dos solo nas a) SVA1 b) SVA2 e c) SVA3.....	40
FIGURA 13 - Média (— ·) e mediana (—) dos teores matéria orgânica nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm, e 20-40 cm do solo para as três SVAs.....	41

FIGURA 14 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada 0-20 cm do solo através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Philip (1957) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.....	43
FIGURA 15 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada 0-20 cm do solo através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Green-Ampt (1911) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.....	44
FIGURA 16 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada das raízes através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Philip (1957) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.....	45
FIGURA 17 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada das raízes através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Green-Ampt (1911) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.....	46
FIGURA 18 - Enquadramento da umidade do solo e relação entre o conteúdo de água medido na BEA e modelado através do modelo DiCaSM utilizando a equação Philip (1957) e de Green-Ampt (1911) na camada 0-20 cm do solo para a SVA1, SVA2 e SVA3, durante o período de 2004 a 2008.....	48
FIGURA 19 - Enquadramento da umidade do solo e relação entre o conteúdo de água medido na BEA e modelado através do modelo DiCaSM utilizando a equação Philip (1957) e de Green-Ampt (1911) na camada das raízes para a SVA1, SVA2 e SVA3, durante o período de 2004 a 2008.....	49
FIGURA 20 - Modelo esquemático da estrutura de absorção de água pelas plantas na profundidade do sistema radicular para a) grama permanente e b) culturas.....	63
FIGURA 21 - Interface do modelo DiCaSM parametrizado para a BEA.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Detalhamento das SVAs na Bacia Experimental de Aiuaba.....	30
TABELA 2 – Informações dos pontos de coleta de solo.....	33
TABELA 3 – Análise granulométrica do solo na SVA1.....	38
TABELA 4 – Análise granulométrica do solo na SVA2.....	38
TABELA 5 – Análise granulométrica do solo na SVA3.....	38
TABELA 6 – Teores de matéria orgânica para as diferentes camadas dos solo avaliados na SVA1, SVA2 e SVA3.....	41
TABELA 7 – Valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente obtidos para as diferentes camadas dos solos da SVA1, SVA2 e SVA3.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAJ	Bacia do Alto Jaguaribe
BEA	Bacia Experimental de Aiuaba
BRB	Bacia Representativa do Benguê
DICASM	<i>Distributed Catchment Scale Model</i> ou Modelo Hidrológico Distribuído em Escala de Bacias Hidrográficas
ESEC	Estação Ecológica
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
NSE	Coefficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe
TDR	<i>Time-domain reflectometer</i> ou Reflectometria do Domínio do Tempo
SRTM	<i>Suttle Radar Topography Mission</i>
SVA	<i>Soil Vegetation Association</i> ou Associação entre Solo e Vegetação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	A importância do solo em estudos hidrológicos de regiões semiáridas.....	17
2.2	Modelagem hidrológica e aplicação em regiões semiáridas.....	19
2.3	Modelo Hidrológico DiCaSM (<i>Distributed Catchment Scale Model</i>).....	22
2.3.1	<i>Aspectos gerais do modelo</i>	22
2.3.2	<i>Parâmetros de solo no modelo DiCaSM</i>	23
2.3.3	<i>Conteúdo de água no solo no modelo DiCaSM</i>	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Caracterização da área de estudo.....	25
3.2	Parametrização do modelo DiCaSM.....	31
3.2	Obtenção dos parâmetros de solo.....	32
3.3	Calibração dos parâmetros de solo no modelo DiCaSM.....	36
3.4	Validação do modelo DiCaSM.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	Caracterização granulométrica e de matéria orgânica dos solos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA).....	38
4.2	Parâmetros de solo obtidos para o Modelo DiCaSM.....	42
4.3	Resposta do modelo DiCaSM à calibração dos parâmetros de solo.....	42
5	CONCLUSÕES.....	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO 1 - EQUACIONAMENTO DOS SUB-MODELOS INSERIDOS NO MODELO DICASM.....	60
	ANEXO 2 - INTERFACE DO MODELO DICASM PARAMETRIZADO PARA A BEA.....	65

1 INTRODUÇÃO

Os processos físicos relacionados ao fluxo de água no solo têm um papel central na fase terrestre do ciclo hidrológico, cabendo a este compartimento um papel importante na manutenção da qualidade das águas superficiais, sub-superficiais e subterrâneas. Parte da água advinda das precipitações penetra e fica armazenada nos solos, sendo esta disponível para a evapotranspiração. O restante pode escoar lateralmente ou penetrar até a região saturada do solo, reabastecendo aquíferos subterrâneos. Adicionalmente, das propriedades físicas e características hidráulicas dos solos depende diretamente a dinâmica dos processos hidrológicos neles ocorridos, sendo esses conceitos de alta relevância no que concerne a uma maior compreensão dessa complexa camada litológica.

Na região do semiárido brasileiro, a dinâmica da água no solo é influenciada fortemente pelos diferenciados padrões pluviométricos presentes nessas regiões, que se caracterizam pela alta variabilidade tanto espacial quanto temporal. Apresentando solos, em sua maioria, pouco desenvolvidos, a porção semiárida cearense tem apresentado, ao longo do tempo, reduzida disponibilidade hídrica que, atrelada ao histórico de degradação e ao incorreto manejo da cobertura vegetal, exigem uma maior e mais complexa gestão dos recursos hídricos nessas regiões.

As bacias hidrográficas semiáridas são compostas, em sua maioria, por rios intermitentes sazonais (VIEIRA, 2002), o que compromete a regularização interanual dos deflúvios naturais e a constante disponibilidade hídrica proveniente dos reservatórios. Além disso, as águas subterrâneas do domínio cristalino, embasamento rochoso típico do território cearense, são limitadas, e os elevados índices de evaporação representam uma parcela de perda hídrica considerável através dos mananciais de superfície. Tais peculiaridades favorecem um balanço hídrico deficitário e, em face da crescente demanda por água para consumo humano e atividades produtivas, há de se adequar a relação água/sociedade às potencialidades e limitações hidro-ambientais destas regiões.

Inseridos nesse contexto, os modelos hidrológicos vêm se consolidando como ferramentas de planejamento e tomada de decisão no manejo de bacias hidrográficas, principalmente pela capacidade que possuem de facilitar a compreensão dos processos hidrológicos nelas envolvidos. A eficácia na associação das características topográficas, do tipo de solo, da cobertura vegetal (ou sua ausência), da precipitação pluviométrica regional, entre outros fatores, e da influência destes parâmetros entre si, refletem diretamente nos satisfatórios resultados advindos de avaliações hídricas nesses modelos.

A modelagem hidrológica consiste, portanto, na conexão de equações que representam processos associados dentro do ciclo hidrológico. Em suas diversas vertentes, os processos de modelagem da hidrografia envolvem parâmetros físicos que podem ser medidos diretamente na bacia de drenagem ou estimados. Tais parâmetros são definidos na fase de estruturação do modelo e, após serem calibrados, permitem uma comparação dos resultados simulados com os medidos. Dada a importância do conteúdo de água no solo na interação superfície-atmosfera, modelos capazes de simular os processos que ocorrem nessa camada têm sido amplamente utilizados e contribuem para o estudo do comportamento da água ao longo do perfil litológico.

Nesse cenário, o modelo hidrológico DiCaSM (*Distributed Catchment Scale Model*) (RAGAB e BROMLEY, 2010; RAGAB *et al.*, 2010) se caracteriza como uma ferramenta estratégica na gestão dos recursos hídricos considerando mudanças globais no clima e no uso da terra. Tal modelo permite que um grande número de processos físicos seja simulado em uma bacia, permitindo o cálculo do balanço hídrico, a interceptação de chuva, infiltração, evapotranspiração, absorção de água pelas plantas e dinâmica de umidade do solo, bem como os fluxos de corrente e recarga de água subterrânea, sendo portanto, capaz de simular o ciclo hidrológico.

Desta forma, este trabalho objetivou avaliar a resposta do modelo hidrológico DiCaSM à calibração dos parâmetros de solo obtidos a partir de análises físico-químicas e equações de pedotransferência, em relação ao conteúdo de água no solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica de base conceitual relevante para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, são apresentados alguns conceitos sobre o papel dos solos nos processos hidrológicos. Posteriormente, são apontadas considerações sobre modelagem hidrológica, com ênfase nas suas aplicações em regiões semiáridas. Por fim, são abordados aspectos do modelo hidrológico DiCaSM (*Distributed Catchment Scale Model*), mais especificamente no que diz respeito aos parâmetros de solo e a influência destes na caracterização e simulação dos componentes hídricos de uma bacia semiárida.

2.1 A importância do solo em estudos hidrológicos em regiões semiáridas

Os solos constituem um importante componente na manutenção do ciclo hidrológico, suas propriedades físico-químicas, seu uso e ocupação influenciam nos movimentos e na circulação da água pela litosfera, bem como na disponibilidade hídrica de uma região. O compartimento solo das superfícies continentais representa uma relevante variável ambiental hidrológica, principalmente no que diz respeito às interações superfície-atmosfera bem como às trocas de água e de energia entre as mesmas (TEIXEIRA, 2010).

No semiárido brasileiro, onde o padrão edáfico predominante é o de embasamento cristalino (CUNHA *et al.*, 2010; GIONGO, 2014), os solos se apresentam, em sua maioria, pouco desenvolvidos, rasos e arenosos (SANTOS, 2010; PEREIRA e DANTAS NETO, 2014). Dada a grande diversidade de litologias e de materiais de origem, os solos presentes nessas regiões se distribuem de maneira heterogênea e apresentam características hidrológicas distintas. Em levantamento pedológico, Cunha *et al.* (2010) destacam os Latossolos, Neossolos Litólicos, Argissolos e Luvisolos como as principais ordens de solo do semiárido tropical brasileiro, representando ao todo, 66% das áreas sob caatinga.

Em regiões semiáridas os fenômenos hidrológicos estão sujeitos à alta variabilidade espacial e temporal da pluviometria (BALME *et al.*, 2006; VISCHÉL e LEBEL, 2007; MARENGO, 2009), além das altas taxas de evapotranspiração potencial, principalmente nos trópicos, onde as temperaturas são mais elevadas (PILGRIM *et al.*, 1988). Ademais, a elevada intensidade e a longa duração são características das chuvas nessas regiões, o que dificulta o controle da erosão e do escoamento superficial devido, principalmente, à baixa infiltração dos solos e escassa cobertura vegetal, como esclarecem Chaves *et al.* (1985).

Responsáveis pelo aporte de água na litosfera, as precipitações constituem-se como o principal fator de entrada de água no solo e, juntamente com as características inerentes a

estes, controlam os processos hidrológicos nesta camada (VILLELA e MATTOS, 1975; HUZA *et al.*, 2014). Balbinot *et al.* (2009) explicam que as características do solo e da água, os fenômenos de entrada de água pela superfície, bem como sua transmissão através do perfil, além da depleção da capacidade de armazenamento do solo promovem os processos de infiltração e escoamento na superfície do terreno.

A infiltração da água no solo é um processo dinâmico de penetração vertical da água através da superfície do solo (SOBRINHO *et al.*, 2003; PAIXÃO *et al.*, 2005) cujas características de porosidade, tamanho de partículas, além do estado de fissuração das rochas influenciam diretamente na capacidade de infiltração dos mesmos. Segundo descreve Martins (1976), após eventos pluviométricos, a água penetra no solo sob ação da gravidade e percorre os compartimentos formados pelos interstícios das partículas do mesmo, constituindo uma camada de solo saturado cuja espessura cresce com o tempo. Assim, conforme a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo tendem a se umedecer de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade ao longo das camadas. Santos *et al.* (2008), Mendonça *et al.* (2009) e Lyra *et al.* (2010), destacam ainda que os diferentes manejos do solo promovem respostas distintas no tocante a sua capacidade de infiltração.

Kincaid *et al.* (1964) destacam que a esparsa cobertura vegetal em solos sob condições semiáridas, e a má distribuição temporal das chuvas nessas regiões são fatores que propiciam altas taxas de escoamento superficial. Além disso, características morfométricas da bacia, como sua área e declividade influenciam na velocidade do escoamento que, dependendo das classes de relevo, acarretam numa alteração do tempo de concentração da bacia (TEODORO, 2007). Outro ponto a ser considerado, é a umidade antecedente ou residual no solo. Beskow *et al.* (2009), afirmaram que quando o solo está úmido devido a uma chuva anterior, o processo de escoamento é facilitado pois a saturação deste ocorre mais rapidamente. Tal comportamento é corroborado por Rodrigues *et al.* (2013), ao avaliar e comparar os processos hidrológicos em pequenas bacias de escoamento efêmero em regiões semiáridas.

Uma vez dentro do compartimento solo, a água pode percorrer a bacia hidrográfica através do processo de escoamento subsubsuperficial, percolar em direção ao aquífero ou reservatório, recarregando-os, ou fazer parte do reservatório do solo tornando-se então, disponível à absorção pelas plantas. Independentemente do caminho percorrido pela água nos solos, este compartimento se destaca pela forma preponderante como atua na conservação do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na manutenção da disponibilidade hídrica (DE MEDEIROS, 2004).

Inserida nesse contexto, a modelagem matemática dos processos hidrológicos atua como ferramenta utilizada para a obtenção de conhecimentos mais aprofundados dos fenômenos físicos envolvidos, bem como na previsão de cenários (COLLISCHONN, 2001; SANTOS, 2009; COSTA, 2012). Dada a complexidade dos mecanismos hidrológicos no solo, associada à influência da cobertura vegetal e da distribuição espacial da precipitação e evapotranspiração, os modelos matemáticos se caracterizam como eficientes instrumentos que permitem um melhor estudo e interpretação dos fenômenos envolvidos na hidrologia de uma região (MORAES *et al.*, 2013).

2.2 Modelagem hidrológica e aplicações em regiões semiáridas

Um modelo pode ser caracterizado como uma equação ou um conjunto de equações que representam um processo (REINOLDS, 1979). Para Campos (2009), modelos são conjuntos de hipóteses sobre a estrutura ou comportamento de sistemas, onde procura-se explicar ou prever as propriedades destes últimos. A modelagem remete, portanto, a utilização de modelos no intuito de melhor compreender os fenômenos ambientais que nos rodeiam e, quando aplicada às regiões semiáridas, adquire peculiaridades e complexidades inerentes a este meio.

Definidos como representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos (FAN e COLLISCHONN, 2014), os modelos hidrológicos possuem um grande papel no entendimento da dinâmica dos processos, sobretudo no compartimento solo. Tais modelos são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos, empregando para isso, equações de conservação da massa e equações da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada (SANTOS, 2009).

Ramos *et al.* (2003) reforçam que, dentre suas aplicações, os modelos hidrológicos se destacam pela capacidade de determinar o balanço de água no solo, procurando simular o percurso da água desde a precipitação até o escoamento ou a evapotranspiração. Desta forma, esses modelos descrevem matematicamente a distribuição espacial da precipitação, as perdas por evapotranspiração, o movimento da água no solo causado pela infiltração, percolação e o escoamento, tanto superficial quanto subsuperficial gerando, portanto, saídas de dados capazes de caracterizar hidrologicamente uma bacia.

A simulação é o processo de utilização do modelo que, depois de ajustado e verificado, é utilizado para representar a saída do sistema (ALMEIDA, 2009). Frevert e Singh (2006), fundamentam que os modelos hidrológicos são capazes de simular os processos naturais

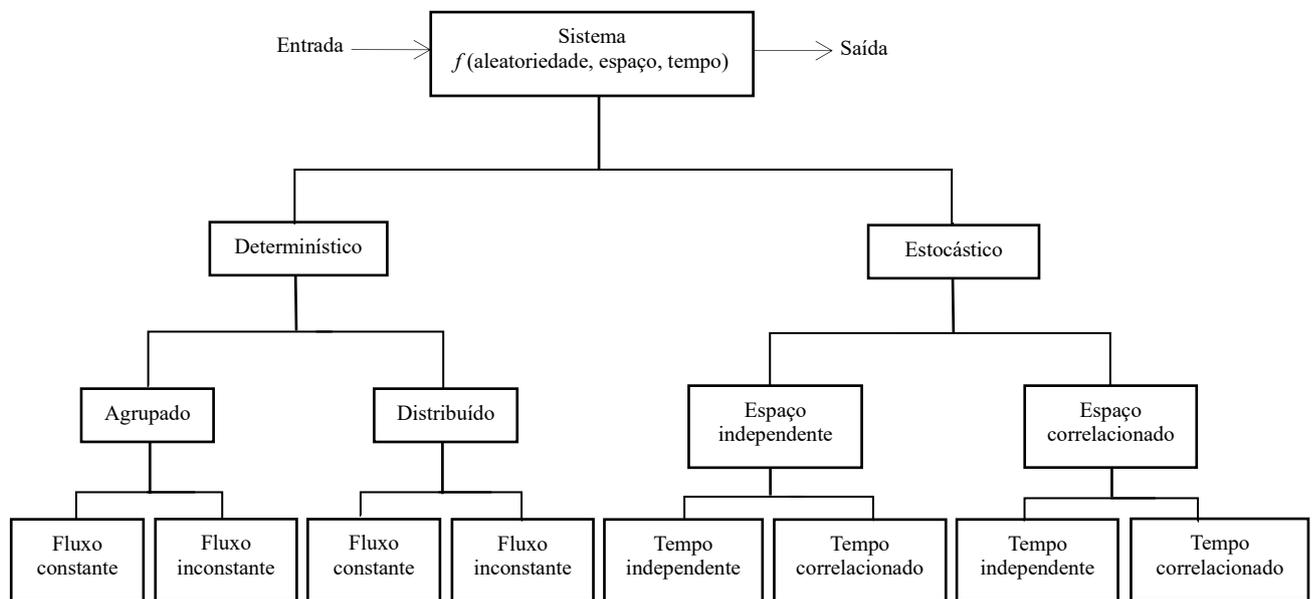
de fluxo de água, sedimentos, químicos, nutrientes e organismos microbianos em bacias hidrográficas, como também quantificar o impacto das atividades humanas nesses processos. Tucci (2005) explica, entretanto, que a simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, das propriedades de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados com o uso dos mesmos.

No tocante a modelagem de processos ambientais, Fragoso Júnior (2009) caracteriza fenômeno como padrão ou processo físico que produz alteração de estado no sistema, variável como um valor que descreve quantitativamente um fenômeno ou o estado do sistema, variando no espaço e no tempo, e parâmetro como um valor que caracteriza o sistema ou um determinado processo no sistema, variando ou não espaço-temporalmente. Exemplos para estes conceitos, no que concerne a modelagem hidrológica podem ser, respectivamente, a precipitação, a vazão e a declividade da bacia hidrográfica. Diante disso, o risco e a incerteza na ocorrência dos processos hidrológicos são concepções probabilísticas importantes, devendo ser compreendidas e consideradas durante o processo de modelagem.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados, de acordo com Tucci (2005), como concentrados ou distribuídos. No primeiro, não é levado em consideração a variabilidade espacial e, no geral, somente o tempo é utilizado com variável independente. No segundo, as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente iguais aos de um modelo concentrado quanto aos ajustes dos valores simulados aos observados, no entanto, somente um modelo do tipo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema.

Outra classificação divide modelos hidrológicos quanto ao padrão na representação dos processos que ocorrem na bacia, em determinísticos e estocásticos (Figura 1). Nos modelos determinísticos, a aleatoriedade não é considerada, ou seja, a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada. Em relação ao espaço, pode-se considerar o sistema homogêneo, onde as variáveis são uniformes para toda a bacia (agrupado) ou heterogêneo, onde os processos hidrológicos ocorrem em vários pontos no espaço (distribuído), ambos variando ou não com o tempo. Nos modelos estocásticos, a aleatoriedade nas saídas e a possibilidade de ocorrência das variáveis é considerada. Nestes modelos, as variáveis podem influenciar umas às outras ou serem independentes, tanto no espaço quanto no tempo (CHOW *et al.*, 1988; TUCCI, 2005).

FIGURA 1 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com o modo de adequação a aleatoriedade e a variabilidade no espaço e no tempo dos fenômenos hidrológicos.



Fonte: adaptado de CHOW *et al.*, 1988.

Freitas e Porto (1990) avaliaram as particularidades de um modelo determinístico de chuva-vazão em bacias hidrográficas do semiárido nordestino. Este estudo mostrou que o modelo utilizado apresentou excelentes coeficientes de correlação para a variável observada, independentemente da localização e do tamanho da bacia. Resultados semelhantes foram obtidos por Alexandre *et al.* (2013), na avaliação do impacto da implantação de reservatórios em bacias semiáridas, a partir de modelos de chuva-vazão, onde se observou uma melhor resposta do modelo quando avaliadas bacias hidrográficas com maiores dimensões.

No intuito de analisar a erosão hídrica do solo em uma bacia experimental do semiárido brasileiro, Srinivasan *et al.* (2003) utilizaram diversos modelos para avaliar o escoamento superficial em áreas da bacia com diferentes padrões de cobertura do solo. Neste estudo, os modelos hidrológicos utilizados mostraram-se bastante eficientes e, apesar de menos satisfatórios na modelagem da erosão, apresentaram elevados índices de correlação entre os valores de escoamento superficial medidos e simulados, tanto para áreas da bacia com vegetação presente como em áreas desmatadas com solo exposto. Os autores destacam ainda, a importância do constante monitoramento e da coleta dos dados utilizados na calibração dos modelos. Ressalta-se também, que as condições hidrossedimentológicas nas regiões semiáridas, em geral, variam bastante, o que dificulta uma simples generalização de resultados empíricos de uma bacia para outra.

Nos dias atuais, é improvável pensar em um problema hídrico ou ambiental cuja solução não envolva a aplicação de algum modelo de bacias hidrográficas ou hidrológico (FREVERT e SINGH, 2006). A par do que foi abordado, o *Distributed Catchment Scale Model* ou Modelo Hidrológico Distribuído na escala de Bacias Hidrográficas (DiCaSM) se caracteriza como uma ferramenta estratégica na gestão dos recursos hídricos considerando mudanças globais no clima e no uso da terra.

2.3 Modelo Hidrológico DiCaSM (*Distributed Catchment Scale Model*)

2.3.1 Aspectos gerais do modelo

O modelo hidrológico DiCaSM foi desenvolvido no Centro de Ecologia e Hidrologia (CEH) do Reino Unido (RAGAB e BROMLEY, 2010; RAGAB *et al.*, 2010). O modelo foi concebido para representar uma estratégia integrada de gestão da água considerando as mudanças globais do clima e mudanças de uso da terra sobre os fluxos de água. Além de calcular o balanço hídrico, o modelo DiCaSM permite a simulação de diversos processos físicos para uma bacia como a interceptação de chuva, infiltração, evapotranspiração, absorção pelas plantas de água e dinâmica de umidade do solo, bem como os fluxos de corrente e recarga de água subterrânea. Desta forma, o DiCaSM é capaz de simular o ciclo hidrológico e detalhar os processos nele envolvidos.

Por se tratar de um modelo distribuído, o DiCaSM compõe uma discretização espacial da bacia no formato de uma grade com espaçamento regular (*grid squares*). As dimensões destas grades ou pixels são especificadas pelo usuário e terão seus componentes avaliados separadamente na geração de dados do modelo. O DiCaSM funciona na escala de tempo diário e compreende os seguintes sub-modelos no processo de geração de saídas:

1. Interceptação por culturas e grama, calculadas de acordo com Aston (1979), e interceptação por árvores, calculada de acordo com Gash *et al.* (1995).
2. Evapotranspiração potencial, calculada segundo Raupach (1995).
3. Escoamento superficial, calculado com base na saturação excessiva ou infiltração em excesso, e se dá a partir da diferença na cota de cada quadrado da grade, seguindo a inclinação prevacente do modelo digital do terreno (MDT).
4. Infiltração, calculada segundo a equação de Philip (1957) ou de Green-Ampt (1911).
5. Balanço hídrico da zona insaturada, baseado no modelo de quatro camadas de raízes (Ragab *et al.*, 1997).

6. Escoamento e encaminhamento do fluxo no canal, baseado no trabalho de Yu e Jeng (1997).

As principais equações incorporadas no DiCaSM são dadas por Ragab e Bromley (2010), e são descritas com maior detalhamento no Anexo 1 deste trabalho.

2.3.2 Parâmetros de solo no Modelo DiCaSM

Ao longo do perfil do solo o fluxo e a retenção de água dependem, dentre outros fatores, da profundidade, textura, estrutura, porosidade e pedoforma, as quais podem integrar-se e influenciar-se das mais variadas maneiras. A infiltração é um dos fenômenos que melhor reflete as condições físicas internas do solo, pois uma boa qualidade estrutural leva a uma distribuição de tamanho de poros favoráveis ao crescimento de raízes e a uma adequada capacidade de infiltração da água no solo (ALVES e CABEDA, 1999). Vale ressaltar que os atributos do solo se comportam de forma bastante diferenciada ao longo da paisagem, sendo os modelos distribuídos os mais adequados na representação dessas variações e da influência das mesmas na hidrologia dos solos.

No modelo DiCaSM os processos hidrológicos calculados são fortemente influenciados pelas características do solo presente na bacia em estudo. Mais especificamente, os valores de umidade do solo na capacidade do campo e no ponto de murcha permanente, a umidade de saturação e a condutividade hidráulica saturada do solo, além da distribuição granulométrica e dos teores de matéria orgânica ao longo do perfil do solo são os parâmetros de maior relevância no processo de entrada de dados e geração de saídas no modelo em questão.

Do ponto de vista agrônomo, os parâmetros de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente refletem diretamente a disponibilidade hídrica para as plantas. O primeiro é definido por Reichardt (1998) como sendo a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente. O segundo é considerado como o teor de água no solo no qual as plantas experimentam perdas de turgescência das folhas e dessa não se recuperam quando colocadas em um ambiente escuro e saturado (KLEIN, 2014). Ambos são propriedades físico-hídricas dos solos que interferem nos dados gerados pelo modelo DiCaSM, principalmente no que diz respeito ao conteúdo de água no solo e podem ser obtidos através de equações de pedotransferência a partir de dados de estrutura do solo.

A umidade de saturação e condutividade hidráulica saturada também são entradas importantes no modelo, sendo esta última de grande relevância por informar sobre a capacidade

de transporte de água, solutos e substâncias químicas no solo, caracterizando os fluxos de água ao longo do perfil. No mais, as características granulométricas (distribuição das frações areia, silte e argila), os teores de matéria orgânica e a capacidade de troca de cátions são considerados pelo modelo DiCaSM para compor as propriedades dos solos da bacia, servindo de base para a estimativa da quantidade e da disponibilidade de água presente no solo nas diferentes grades avaliadas.

2.3.3 Conteúdo de água no solo no modelo DiCaSM

Embora o conteúdo de água no solo exerça papel importante na interação superfície-atmosfera, ele é ainda um dos componentes do ciclo hidrológico pouco estudado na modelagem hidrológica. A umidade do solo é extremamente variável com o tempo, aumentando com a chuva ou com a irrigação e diminuindo com a drenagem ou com a evapotranspiração (REICHARDT, 1987), sendo sua medição ou estimativa essencial para estudos de movimento e disponibilidade de água no solo para as plantas, erosão, manejo da irrigação e muitos outros processos (BERNARDO *et al.*, 2006).

Uma das saídas de maior importância prática gerada pelo modelo DiCaSM e que o diferencia da maioria dos modelos, é a estimativa do conteúdo de água presente no solo em suas diferentes camadas, onde além das propriedades intrínsecas ao solo, fenômenos como a evaporação e a retirada de água pelas plantas afetam os teores de água armazenados. Neste modelo, o conteúdo de água no solo é expresso tanto para a camada superficial quanto para toda a camada da zona das raízes e, considerando a alta heterogeneidade do compartimento solo, o conteúdo de água no mesmo é bem representado, dado o caráter distribuído do modelo em questão.

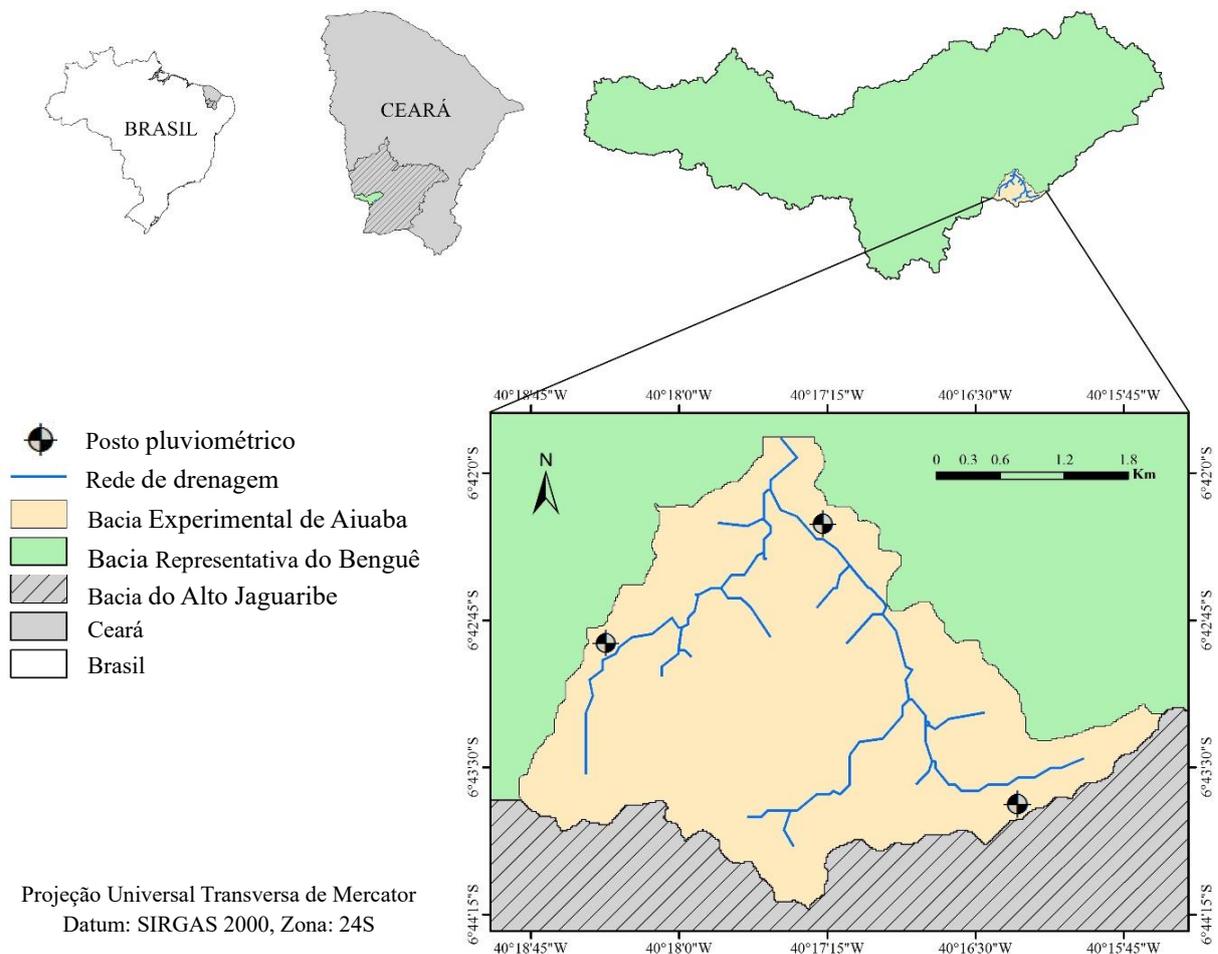
A água armazenada em profundidade no perfil é especialmente importante para a vegetação das regiões que apresentam grandes alterações entre estações úmidas e secas, como é o caso da região semiárida brasileira. Nestes casos, a água quando armazenada nos horizontes subsuperficiais tem papel fundamental na manutenção da vegetação ao longo do ano, pois a recarga ocorrida durante os períodos de chuva torna-se disponível para a evapotranspiração durante os períodos de seca (BRADY e WEIL, 2009). Desta forma, o conteúdo de água no solo afeta diretamente na dinâmica e no comportamento da paisagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), que abrange uma área total de 12 km², sendo localizada no município de Aiuaba, Estado do Ceará, Brasil, coordenadas 6°42' S e 40°17' W (Figura 2). Pertencente à região denominada como Sertão Inhamuns, a BEA é uma sub-bacia integrante da Bacia Representativa do Benguê (BRB). A área BEA é totalmente preservada e está localizada inteiramente dentro da Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, sendo esta a maior unidade de conservação federal do bioma Caatinga, cuja administração é feita pelo IBAMA (ARAÚJO e PIEDRA, 2009). Associada à manutenção da biodiversidade florística e faunística do bioma caatinga, a ESEC de Aiuaba representa um importante papel para a regulação do ciclo hidrológico da região devido, principalmente, a sua cobertura florestal densa (ARAÚJO *et al.*, 2004).

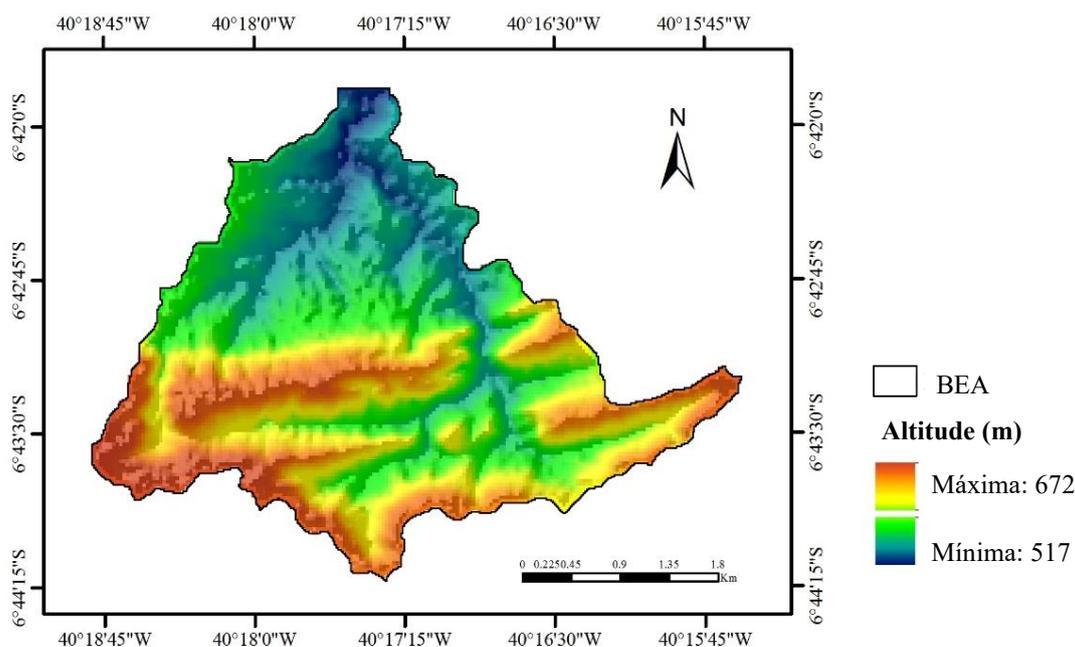
FIGURA 2 – Mapa de localização da região de estudo, Bacia Experimental de Aiuaba.



Quanto a sua litologia, a BEA é caracterizada pela formação cristalina e sedimentar. No extremo sul da bacia, mais especificamente, a geologia se destaca pela ocorrência de gnaisses acinzentados de textura fina a média contendo megacrístais de feldspato; nas porções central e norte da BEA ocorrem rochas metassedimentares (FARIAS, 2008).

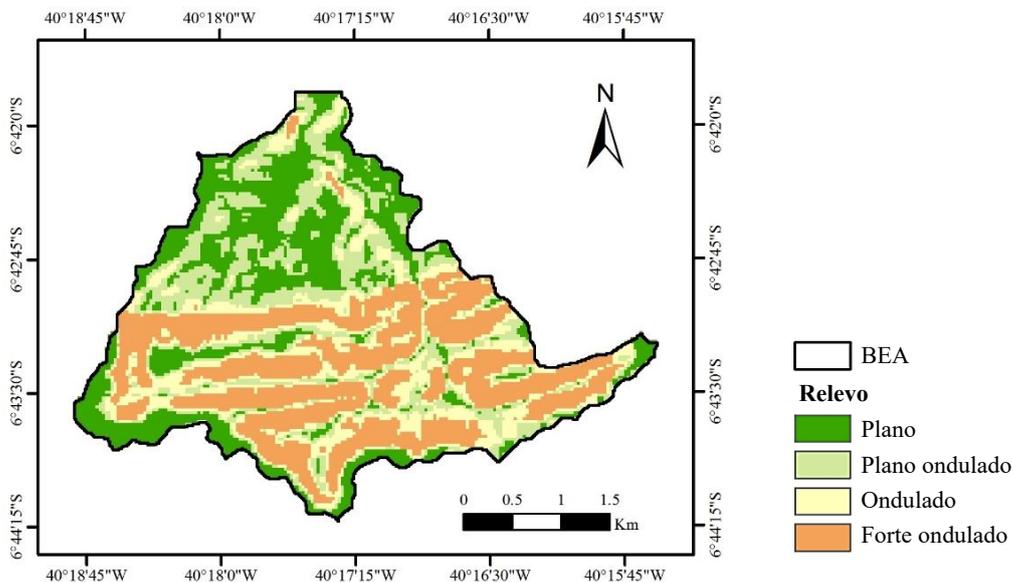
A elevação na BEA varia 517 a 672 metros acima do nível do mar, com as maiores altitudes verificadas ao sul e sudoeste da bacia. A Figura 3 mostra a distribuição da altitude na BEA e foi obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado através de estereoscopia automatizada usando cenas SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial 30 de metros. Autores como Creutzfeldt (2006), Mamede (2008), Medeiros (2009) e Costa (2012) utilizaram, com êxito, MDEs em trabalhos prévios de modelagem hidrológica.

FIGURA 3 - Mapa hipsométrico da BEA.



A BEA é composta, como explica Farias (2008), por serras baixas, apresentando um relevo acidentado em certos trechos e suavemente acidentado ou aplainado em outros. A declividade média da bacia foi definida por Araújo e Piedra (2009), como sendo de 19%. O relevo varia, mais especificamente, de plano a suave ondulado nas porções norte, enquanto que na metade sul da bacia há a predominância de relevo ondulado a fortemente ondulado (ARAÚJO e PIEDRA, 2009), como mostra a Figura 4, na qual utilizaram-se as condições de declividade para a classificação do relevo segundo Embrapa (2006).

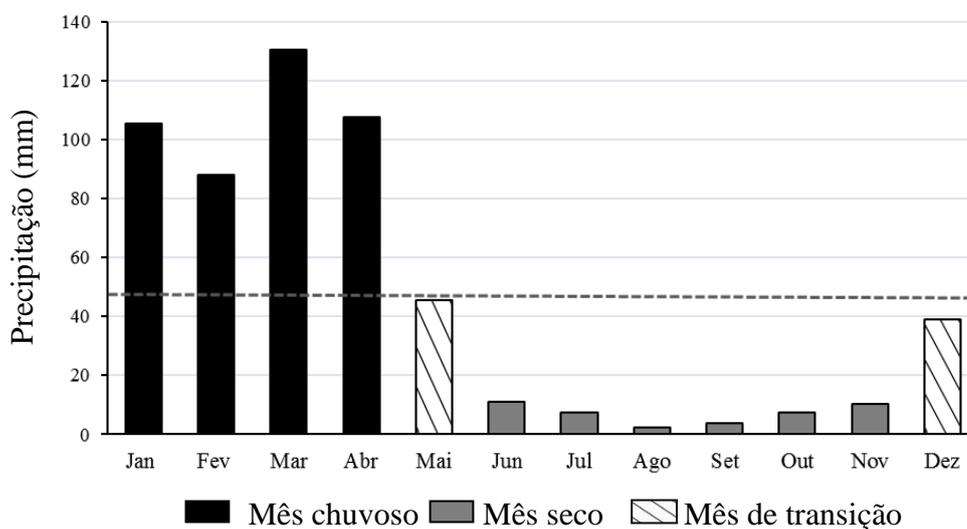
FIGURA 4 - Mapa do relevo da BEA de acordo com a classificação de declividade da EMBRAPA (2006).



Clima e hidrologia

De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região é classificado como 'Bs', tropical semiárido. A normal climatológica é de 560 mm/ano e a média mensal da precipitação ao longo do ano é de 46,5 mm/ano (FUNCEME, 2017) (Figura 5). Segundo Araújo e Piedra (2009), a área de estudo apresenta temperatura média anual de 27° C; umidade relativa do ar média anual de 62%, insolação total média anual de 2.600 horas; e evaporação potencial de aproximadamente 2.500 mm/ano.

FIGURA 5 – Normais climatológicas mensais de precipitação e caracterização dos meses em chuvosos, secos e de transição para o município de Aiuaba considerando os anos de 1987 a 2016.



Fonte: FUNCEME, 2017.

O regime pluviométrico se caracteriza por sua alta variabilidade espacial e temporal, tanto ao longo do ano quanto interanualmente. De caráter convectivo, as chuvas nessa região são concentradas em poucos eventos de elevada intensidade e caracterizam um período chuvoso bem definido, que ocorre entre os meses de janeiro a maio, sendo responsáveis por 80% da precipitação anual (MEDEIROS, 2009), já os meses de junho a dezembro são considerados meses secos. Destaca-se ainda a presença de meses de transição, sendo maio o mês de transição entre o período chuvoso e o seco, e dezembro como o mês de transição entre o período seco e o chuvoso, ambos apresentando padrões pluviométricos semelhantes.

A BEA é integrante da Bacia Representativa do Benguê (BRB), sendo ambas pertencentes a Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ). Em relação às características hidrofisiográficas, ressalta-se que a BEA possui uma rede de drenagem composta por riachos intermitentes, com dois rios principais (COSTA, 2007). O exutório é controlado por um pequeno reservatório, denominado Boqueirão, com capacidade máxima de 59.700 m³, área da bacia hidráulica máxima de 7,12 ha e nível d'água máximo de 4,536 m (ARAÚJO e PIEDRA, 2009). De acordo com Farias (2008), a BEA é uma bacia de drenagem de 5ª ordem e alta intensidade de drenagem, com tempo de concentração de 1,1 h.

Segundo Costa (2007), o movimento da água no ciclo hidrológico apresenta, nessa região, evaporação potencial anual equivalente a quase cinco vezes a precipitação média anual, além temperaturas elevadas, ar seco e alta insolação. Nos eventos chuva-deflúvio, o mecanismo de geração de escoamento superficial predominante é o hortoniano, que ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração na superfície do solo (LOAGUE *et al.*, 2010), sendo a contribuição do escoamento subsuperficial de ocorrência a uma profundidade menor que 15 cm. Figueiredo (2011) destaca ainda, que a taxa de evapotranspiração real é também elevada e os eventos chuvosos mal distribuídos são responsáveis pela maior parte do deflúvio gerado.

Solo e vegetação

Pereira (1982), realizou-se a identificação dos solos em escala regional da área na qual se insere a BEA. O mapa de solos elaborado por Creutzfeldt (2006) define as principais classes de solo da BEA de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2006), como Argissolo Vermelho-Amarelo, Luvisolo Hipocrômico e Neossolo Litólicos, classificados anteriormente como Podzólico Vermelho-Amarelo, Bruno não Cálcico e Litossolo, respectivamente.

Os Argissolos Vermelho-Amarelo são constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. Os Luvisolos Hipocrômicos são solos não hidromórficos, com horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases alta. Variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos e com nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. Os Neossolos Litólicos compreendem solos pouco evoluídos constituídos por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico e são considerados solos em via de formação, seja pela reduzida atuação dos processos pedogenéticos ou por características inerentes ao material originário (EMBRAPA, 2006).

A Caatinga é o tipo de vegetação que cobre a maior parte da área com clima semiárido da região Nordeste do Brasil, sendo o bioma característico na área da BEA. Naturalmente, essa vegetação não possui aspectos uniformes, promovendo áreas de elevada heterogeneidade de flora (GIULIETTI *et al.*, 2004). Tendo como principal característica a caducifolia, ou seja, a capacidade de perda das folhas durante os períodos de estiagem como mecanismo adaptativo à perda excessiva de água por transpiração, essa vegetação demonstra alto potencial de resiliência, apresentando altas taxas fotossintéticas durante o período chuvoso (SANTANA e SOUTO, 2011; BARROS e SOARES, 2010).

FIGURA 6 - Vegetação de caatinga na Estação Ecológica de Aiuaba no a) período seco; e b) período chuvoso.



Fonte: MEDEIROS, 2009.

Estudos realizados por Lemos (2006) e Lemos e Meguro (2010) sobre florística, estrutura e mapeamento da cobertura vegetal da ESEC de Aiuaba, destacaram duas classes principais de

vegetação na BEA: a Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Densa, com elementos arbóreos de até 8,5 m, e Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Aberta com árvores emergentes e esparsas com alturas entre 8 e 10 metros. Creutzfeldt (2006) ao estudar essa região considera a vegetação, em sua maioria, densa, apresentando estrato arbóreo com altura entre 5 a 12 m, com algumas árvores atingindo 15 m.

Entre as espécies vegetais presentes nesta classificação, três espécies se destacam por sua ocorrência na BEA: o Angelim, *Piptadenia obliqua*, se distingue pelo seu grande porte que supera a maioria das demais espécies, caracterizando-se como planta predominante em muitas áreas da BEA (MEDEIROS, 2004); a Catingueira, *Caesalpinia pyramidalis* Tul, possui uma ampla faixa de tolerância ao clima, sendo encontrada desde as áreas de caatinga arbórea até aquelas de condições extremas e tem preferência por solos bem drenados, apesar de se adaptarem a muitos tipos de solos, incluindo os mais pobres; e a Jurema-preta, *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir, cuja ocorrência se dá preferencialmente em formações secundárias de várzeas com bom teor de umidade, solos alcalinos e de boa fertilidade, onde cresce vigorosamente, suas raízes possuem alta capacidade de penetração nos terrenos compactos (MAIA, 2004).

A partir disso, Costa (2012) e Pinheiro *et al.* (2013), em estudos objetivando avaliar a variação espaço-temporal da profundidade efetiva do sistema radicular da vegetação sob condições de caatinga preservada, classificaram a área da BEA em três subáreas distintas em virtude das classes de solo presentes na região e da espécie vegetal predominante em cada uma dessas classes. Esta *Soil Vegetation Association* ou Associação entre Solo e Vegetação (SVA) facilita a compreensão dos processos hidrológicos da bacia a partir da compartimentalização dos mesmos em escalas menores, e adequando esses às particularidades de cada uma das subáreas. As SVAs se distribuem na bacia de maneira distinta, ocupando diferentes porções e proporções da BEA, como é detalhado na Tabela 1.

TABELA 1 – Detalhamento das SVAs na Bacia Experimental de Aiuaba

SVA	Espécie representativa da vegetação	Classe de solo
SVA1	Catingueira (<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul)	Argissolo Vermelho- Amarelo
SVA2	Angelim (<i>Piptadenia obliqua</i>)	Luvisolo Hipocrômico
SVA3	Jurema-preta (<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir)	Neossolo Litólico

SVA: Associação solo-vegetação.

Fonte: Adaptado de COSTA, 2012.

A SVA1 da BEA é representada pela Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) associada ao Argissolo Vermelho-Amarelo; a SVA2 é representada pelo Angelim (*Piptadenia obliqua*) em associação ao Luvissole Hipocrômico; e a SVA3 da BEA, representada pela Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir) associada ao Neossolo Litólico ocupa a maior parte da bacia.

3.2 Parametrização do modelo DiCaSM

A presente pesquisa tomou por base a parametrização do modelo DiCaSM realizada por RAGAB e BROMLEY (2010) e utilizada por Costa (2012) para a análise da disponibilidade hídrica do solo na zona das raízes da Bacia Experimental de Aiuaba. Para isso, a malha da bacia foi dividida em 48 células (*pixels*), de 500 x 500 m (0,25 ha) cada, para as quais foram atribuídas características hidrológicas, fitossociológicas, geológicas, e edáficas foram atribuídas a cada uma destas células, como mostra a Figura 7.

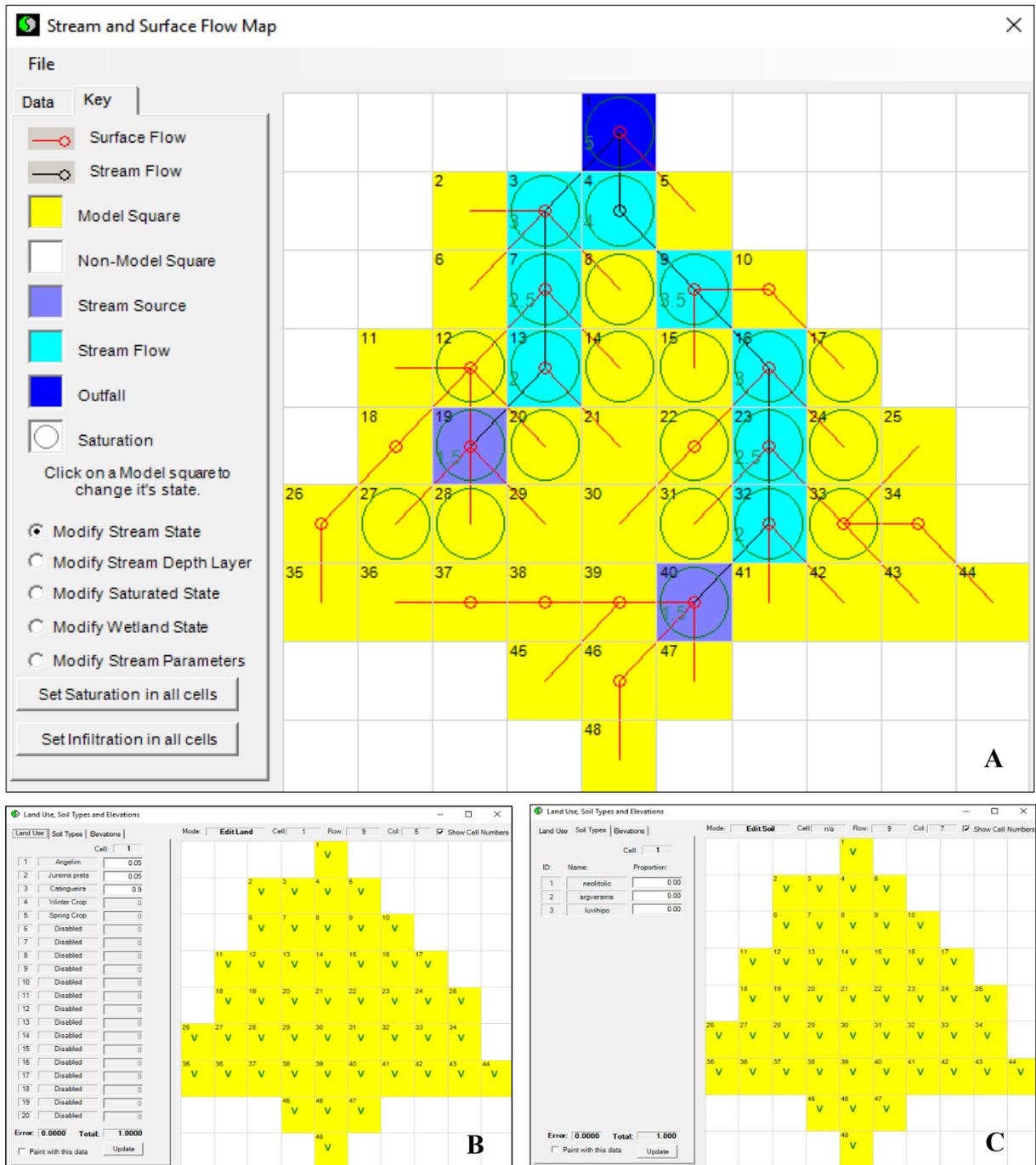
Quanto a sua hidrologia, a BEA tem seus cursos d'água principais representados em azul, as células violetas indicam nascentes ou fontes de fluxo de água, e a célula azul escuro indica o exutório da bacia no modelo (Figura 7a). Além disso, dados meteorológicos de distribuição da precipitação e mudanças climáticas, além da escolha do modelo de infiltração (Phillip (1957) ou Green e Ampt (1911)) se destacam no processo de parametrização.

Do mesmo modo, foram inseridos os tipos de vegetação predominantes (Figura 7b), bem como informações sobre o uso e ocupação da terra. Vários parâmetros são ajustados para as diversas fases do ciclo de crescimento da vegetação como: albedo, altura da vegetação, índice de área foliar, profundidade das raízes e resistência estomática.

Em relação aos solos, foram estabelecidos os percentuais de cada um dos três solos presentes na BEA em cada um dos pixels (Figura 7c). Também foram definidas as faixas limítrofes de disponibilidade hídrica no solo, e principalmente as opções de dinâmica da água no solo, destacando-se a condutividade hidráulica do solo saturado, além da especificação da densidade relativa das raízes (RRD) ao longo do perfil de solo.

A parametrização do modelo DiCaSM, como em qualquer outro modelo hidrológico, requer um número elevado de dados para que, ao final do processo de execução do modelo, este seja capaz de uma boa representação dos processos hidro-ambientais. No geral, a interface de inserção dos dados nesse modelo é de fácil entendimento, sendo detalhada no Anexo 2.

FIGURA 7 – Distribuição das características a) hidrológicas, b) fitossociológicas, e c) edáficas da BEA ao longo dos pixels.



3.3 Obtenção dos parâmetros de solo

Para a melhoria da parametrização do modelo DiCaSM realizada por Costa (2012) foram coletadas amostras de solo deformadas de quatro pontos diferentes em cada uma das três SVAs presentes na BEA (Figura 8), na data de 28/04/2017. O local das coletas foi escolhido de modo a representar os solos presentes em pixels previamente escolhidos (Tabela 2), cujas dimensões foram estabelecidas em 500 x 500 m.

FIGURA 8 - Localização dos pontos de coleta de solo.

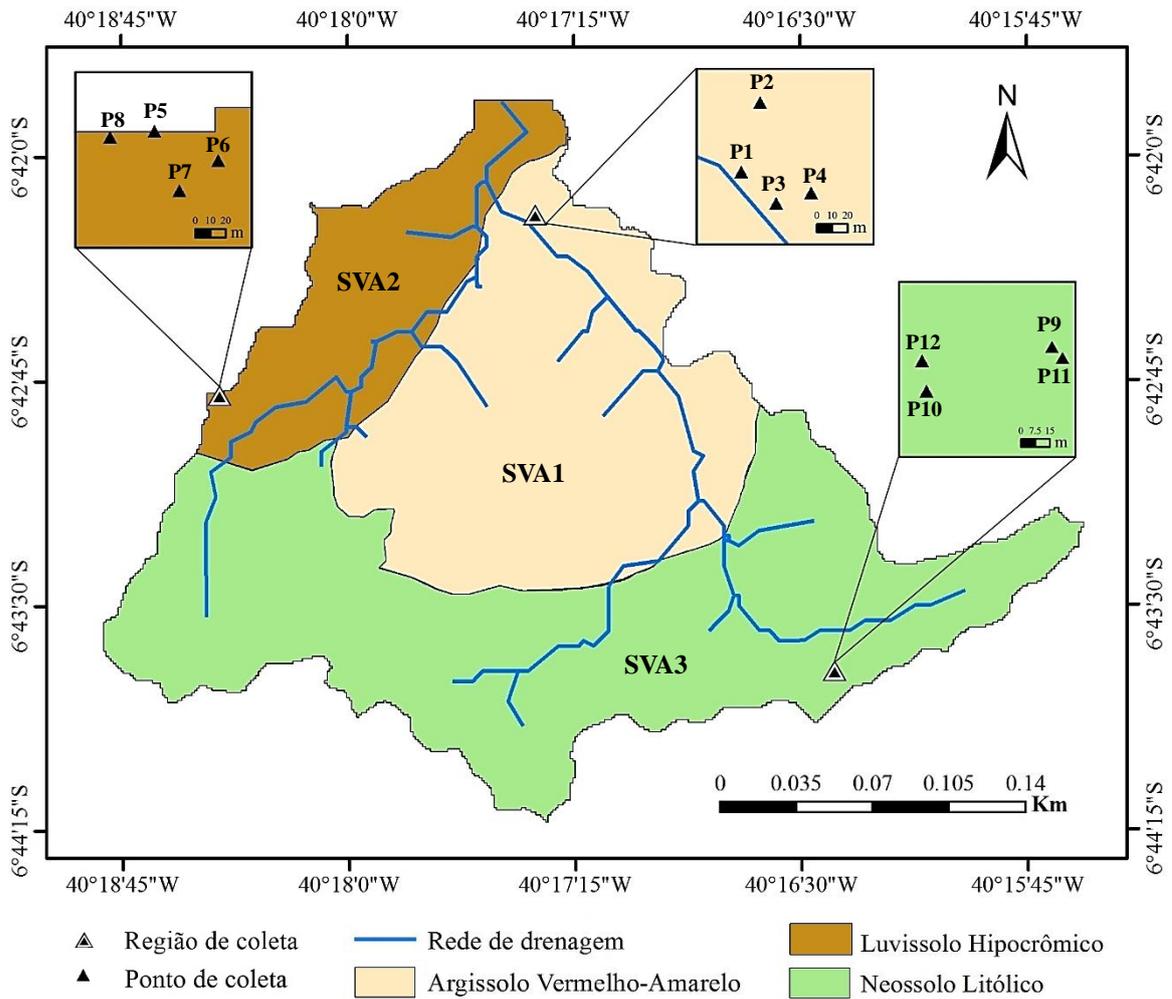
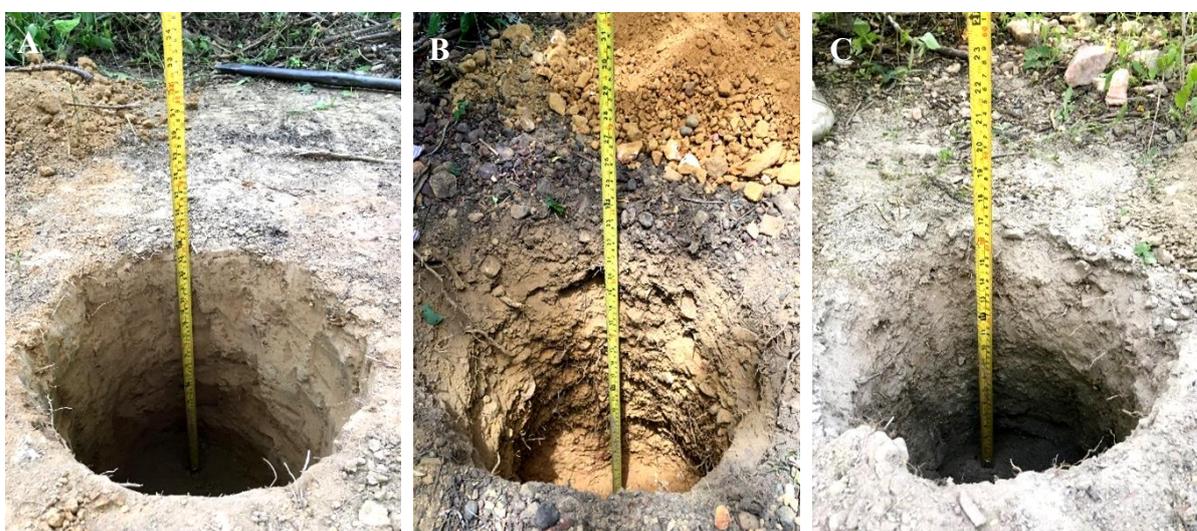


TABELA 2 – Informações dos pontos de coleta de solo.

Ponto	SVA	Coordenadas – UTM (Zona 24S Datum Sirgas 2000)		Pixel no modelo DiCaSM	Nº de camadas coletadas
		Longitude	Latitude		
P1	1	357423	9258818	5	4
P2	1	357434	9258858	5	4
P3	1	357443	9258800	5	4
P4	1	357463	9258806	5	4
P5	2	355523	9257770	11	4
P6	2	355550	9257776	11	4
P7	2	355562	9257752	11	4
P8	2	355496	9257766	11	4
P9	3	359319	9256060	42	3
P10	3	359261	9256038	42	3
P11	3	359321	9256058	42	3
P12	3	359259	9256052	42	3

De modo a representar os processos hidrológicos ao longo das camadas de solo na BEA, as amostras foram coletadas a partir de trincheiras, como mostra a Figura 9, nas profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 80 cm do solo para a SVA1; 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm do solo para a SVA2; e 0 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 40 cm do solo para a SV3. Para as amostras coletadas, foram determinadas as frações granulométricas e a matéria orgânica, a partir de análises físico-químicas realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Agroindústria Tropical.

FIGURA 9 - Trincheiras abertas para coleta de solo em diferentes profundidades na a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.



A matéria orgânica foi determinada por titulação a partir dos teores de carbono orgânico totais, como mostra a Equação 1 (Embrapa, 1997). Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58%.

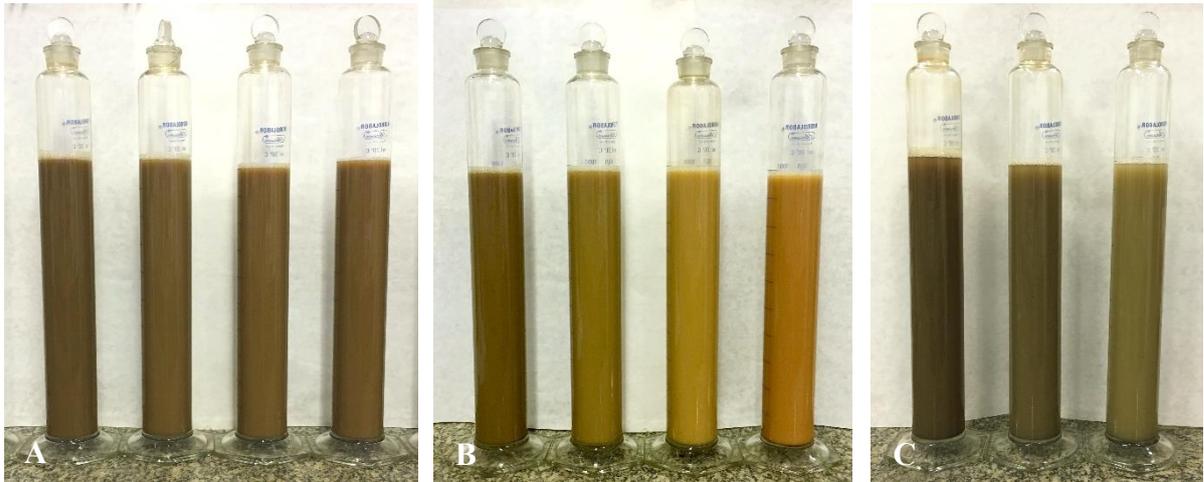
$$MO = C * 1,724 \quad (1)$$

em que: MO = teor de matéria orgânica; e C = teor de carbono orgânico total no solo, ambos expressos em g/Kg.

Para a determinação da granulometria, ou seja, da proporção dos teores de areia total, areia grossa e fina, silte e argila utilizou-se a metodologia de dispersão total, mais especificamente pelo método da pipeta (Figura 10) que se baseia em calcular a densidade da suspensão a uma determinada profundidade em função do tempo a partir da velocidade de queda das partículas que compõem o solo.

As metodologias de determinação da matéria orgânica e das frações granulométricas utilizadas neste trabalho são descritas, com um maior detalhamento, no manual de métodos de análises de solo da Embrapa (1997).

FIGURA 10 – Solos das diversas camadas das a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3 em suspensão para determinação da granulometria pelo método da pipeta.



Os valores obtidos através das análises laboratoriais de solo foram utilizados em equações para a obtenção dos valores de umidade do solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP).

Para a obtenção dos valores CC para as camadas de solo avaliadas nas três SVAs, tomou-se por base a equação global com três variáveis independentes desenvolvida por Macedo (1991) e aplicada por Fabian e Ottoni Filho (2000) na determinação da capacidade de campo em solo Podzólico Vermelho-Amarelo a partir dos percentuais texturais e de matéria orgânica, como mostra a Equação 2.

$$\%CC = (\%AG * 0,05) + (\%AR * (-0,45)) + (\%MO * 1,80) + 49,39 \quad (2)$$

em que: $\%CC$ = umidade do solo na capacidade de campo; $\%AG$ = teor de argila; $\%AR$ = teor de areia; e $\%MO$ = matéria orgânica em g/Kg.

Os valores de PMP foram mensurados por meio da Equação 3 obtida por Klein *et al.* (2010), a partir de estudos que visavam quantificar a influência da textura na retenção de água em condições de ponto de murcha.

$$\%PMP = (0,0003 * \%AG) + 0,0118 \quad (3)$$

em que: $\%PMP$ = umidade do solo no ponto de murcha permanente; $\%AG$ = teor de argila.

Os outros dois parâmetros de solo necessários para a modelagem consistem na umidade de saturação (SAT) e o coeficiente de condutividade hidráulico (kSAT). A umidade de saturação utilizada nesta calibração foi a mesma utilizada por Costa (2012). Os valores de kSAT foram obtidos através do próprio modelo que, a partir dos outros parâmetros inseridos, é capaz de determinar o kSAT para quaisquer que sejam as profundidades das camadas de solo avaliadas.

3.4 Calibração dos parâmetros de solo no modelo DiCaSM

A calibração dos parâmetros de solo no modelo em questão se deu a partir da inserção dos resultados obtidos em campo, em laboratório e por meio das equações citadas anteriormente em duas tabelas de entradas de dados do modelo DiCaSM: a *Soil Series* e *Soil Props Table*, mostradas na Figura 11.

Na tabela de séries de solo (*Soil Series Table*), foram especificados o número de camadas e as profundidades das mesmas, em metros, para cada um dos solos presentes na bacia. Foram inseridos os percentuais de argila e areia ao longo das camadas, além dos teores de matéria orgânica. Por fim, foram inseridos os valores de condutividade hidráulica obtidos pelo próprio modelo.

Para a tabela de propriedades do solo (*Soil Props Tabel*) foram inseridos os parâmetros físicos dos solos presentes nos diferentes pixels (*grid squares*) que compõem a malha da bacia. O presente trabalho limitou-se a inserir os dados de umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Os dados de umidade de saturação utilizados foram os mesmos obtidos por Costa (2012), em sua calibração.

FIGURA 11 - Tabelas *Soil Series*, à esquerda, e *Soil Props*, à direita, para entrada dos dados de solo no modelo DiCaSM.

The image shows two side-by-side windows from the DiCaSM software. The left window is titled 'Soil Series' and contains a table for defining soil series. The right window is titled 'Soil Props' and contains a table for soil properties across different grid squares.

Soil Series Table (Left Window):

SoilSeriesID	SoilSeriesName	NumberOfLayers
1	neoltolic	3
2	argverama	4
3	luwhipo	4

Soil Props Table (Right Window):

GRIDSQ	WP	SAT	FC	LAYNO	KSAT
1	0.11	0.437	0.276	1	11.5
1	0.11	0.437	0.276	2	11.5
1	0.11	0.437	0.276	3	11.5
1	0.11	0.437	0.276	4	11.5
2	0.11	0.437	0.276	1	11.5
2	0.11	0.437	0.276	2	11.5
2	0.11	0.437	0.276	3	11.5
2	0.11	0.437	0.276	4	11.5
3	0.11	0.437	0.276	1	11.5
3	0.11	0.437	0.276	2	11.5
3	0.11	0.437	0.276	3	11.5
3	0.11	0.437	0.276	4	11.5
4	0.11	0.437	0.276	1	11.5
4	0.11	0.437	0.276	2	11.5
4	0.11	0.437	0.276	3	11.5
4	0.11	0.437	0.276	4	11.5
5	0.066	0.529	0.365	1	11.5
5	0.067	0.529	0.361	2	11.5
5	0.072	0.529	0.35	3	11.5
5	0.07	0.529	0.309	4	11.5
6	0.11	0.437	0.276	1	11.5
6	0.11	0.437	0.276	2	11.5
6	0.11	0.437	0.276	3	11.5
6	0.11	0.437	0.276	4	11.5
7	0.11	0.437	0.276	1	11.5

3.5 Validação do modelo DiCaSM

De acordo com Chwif e Medina (2006), a validação é o processo que visa certificar que o modelo é uma boa representação da realidade. Deste modo, é imprescindível a comparação entre valores obtidos em campo com aqueles estimados através do processo de modelagem, afim de, estatisticamente, avaliar a capacidade de adequação do modelo à

representação dos processos hidrológicos ocorridos. A validação se dá a partir da escolha de um parâmetro de referência, aquele cujos dados de campo são coesos e confiáveis, permitindo a comparação com os dados obtidos para o mesmo parâmetro através do modelo. Além disso, há que se escolher um período de referência e, para tanto, deve-se avaliar se o modelo é igualmente válido qualquer que seja o período de referência.

O critério de comparação se dá a partir do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970), denominado de NSE, calculado a partir da equação 4. O coeficiente NSE varia de $-\infty$ a 1, sendo que, quanto maior for o coeficiente, melhor o desempenho do modelo (MACHADO *et al.*, 2003). Araújo (2007) explica que se o NSE for menor que 0, a capacidade de previsão do modelo é inferior a simplesmente adotar o valor médio medido em campo, devendo o modelo ser submetido a um melhor desempenho. Este índice tem sido utilizado com êxito em diversos estudos sobre modelagem aplicados não somente a regiões semiáridas (HUANG e ZHANG, 2005; MUELLER *et al.*, 2007; COSTA, 2012), como no restante do globo (HAGG *et al.*, 2007; LUCAS *et al.*, 2009; VIOLA *et al.* 2009; BLAINSKI, 2011).

$$NSE = 1 - \frac{\Sigma(\theta_m - \theta_s)^2}{\Sigma(\theta_s - \theta_{me})^2} \quad (4)$$

Em que: θ_m = valor do parâmetro medido em campo; θ_s = valor do parâmetro simulado pelo modelo; θ_{me} = média dos valores do parâmetro medidos em campo no período de simulação.

Para o presente trabalho, foram comparados dados de umidade do solo medidos em campo através de sensor TDR obtidos por COSTA (2012) e dados de umidade do solo simulados a partir do modelo em questão, ambos para a camada de 0-20 cm e para todo o perfil do solo (camada das raízes). Os sensores TDR foram instalados e calibrados (COSTA, 2012; COSTA *et al.*, 2013) nas estações pluviométricas presentes em cada uma das SVAs. O horizonte temporal para o cálculo do coeficiente foi de 5 anos, compreendendo medições diárias da umidade entre os anos de 2004 e 2008.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização granulométrica e de matéria orgânica dos solos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA)

Os resultados das análises granulométricas do solo evidenciaram o diferenciado padrão edáfico das três SVAs analisadas na BEA e são expressos nas Tabelas 3, 4 e 5, seguidos por seus respectivos coeficientes de variação.

TABELA 3 - Análise granulométrica do solo na SVA1.

Profundidade (cm)	Granulometria				
	Areia	Silte	Argila	Areia Grossa	Areia Fina
	-----(g.Kg^{-1})-----				
0-10	370 (2,2)	450 (4,2)	180 (3,0)	190 (1,5)	180 (4,4)
10-20	350 (4,7)	460 (7,9)	190 (4,7)	150 (2,5)	200 (10,4)
20-40	370 (3,6)	430 (6,0)	200 (5,1)	150 (1,6)	220 (6,4)
40-80	450 (6,6)	360 (8,3)	190 (6,6)	190 (2,1)	260 (7,3)

Entre parêntesis estão os coeficientes de variação (%)

TABELA 4 - Análise granulométrica do solo na SVA2.

Profundidade (cm)	Granulometria				
	Areia	Silte	Argila	Areia Grossa	Areia Fina
	-----(g.Kg^{-1})-----				
0-10	360 (5,5)	310 (7,5)	330 (12,9)	140 (4,0)	220 (6,3)
10-20	360 (6,9)	310 (7,9)	330 (26,2)	160 (4,0)	200 (5,0)
20-40	330 (6,8)	350 (6,9)	320 (14,3)	130 (4,9)	200 (8,8)
40-60	260 (10,5)	370 (13,3)	370 (31,5)	90 (6,0)	170 (15,1)

Entre parêntesis estão os coeficientes de variação (%)

TABELA 5 - Análise granulométrica do solo na SVA3.

Profundidade (cm)	Granulometria				
	Areia	Silte	Argila	Areia Grossa	Areia Fina
	-----(g.Kg^{-1})-----				
0-10	690 (15,8)	220 (5,7)	90 (7,6)	350 (7,9)	340 (14,3)
10-20	650 (45,2)	260 (6,4)	90 (2,4)	340 (10,6)	310 (9,3)
20-40	610 (10,5)	280 (6,0)	110 (5,2)	320 (4,8)	280 (9,1)

Entre parêntesis estão os coeficientes de variação (%)

Na SVA1 observa-se o predomínio da fração areia em comparação com a fração argila (Tabela 3). Enquanto os percentuais de argila mantiveram-se constantes ao longo das

camadas, observou-se um acréscimo dos teores de areia na camada mais profunda (40-80 cm), na ordem de 450 g.Kg⁻¹.

Os solos da SVA2 apresentaram decréscimo nos teores de areia ao longo das camadas (Tabela 4), variando de 360 g.Kg⁻¹ na cama superficial (0-10 cm) a 260 g.Kg⁻¹ na camada 40-60 cm. De maneira oposta, os percentuais de argila foram menores nas camadas mais superficiais, apresentando valor máximo na ordem de 370 g.Kg⁻¹ para a camada mais profunda.

Para a SVA3, os solos apresentaram teores de areia elevados, bem acima dos teores das demais frações granulométricas para as três camadas avaliadas (Tabela 5). Enquanto os valores de areia na SVA3 apresentaram decréscimo com a profundidade, os reduzidos teores de argila mantiveram-se constantes ao longo do perfil do solo, com um leve acréscimo na camada mais profunda.

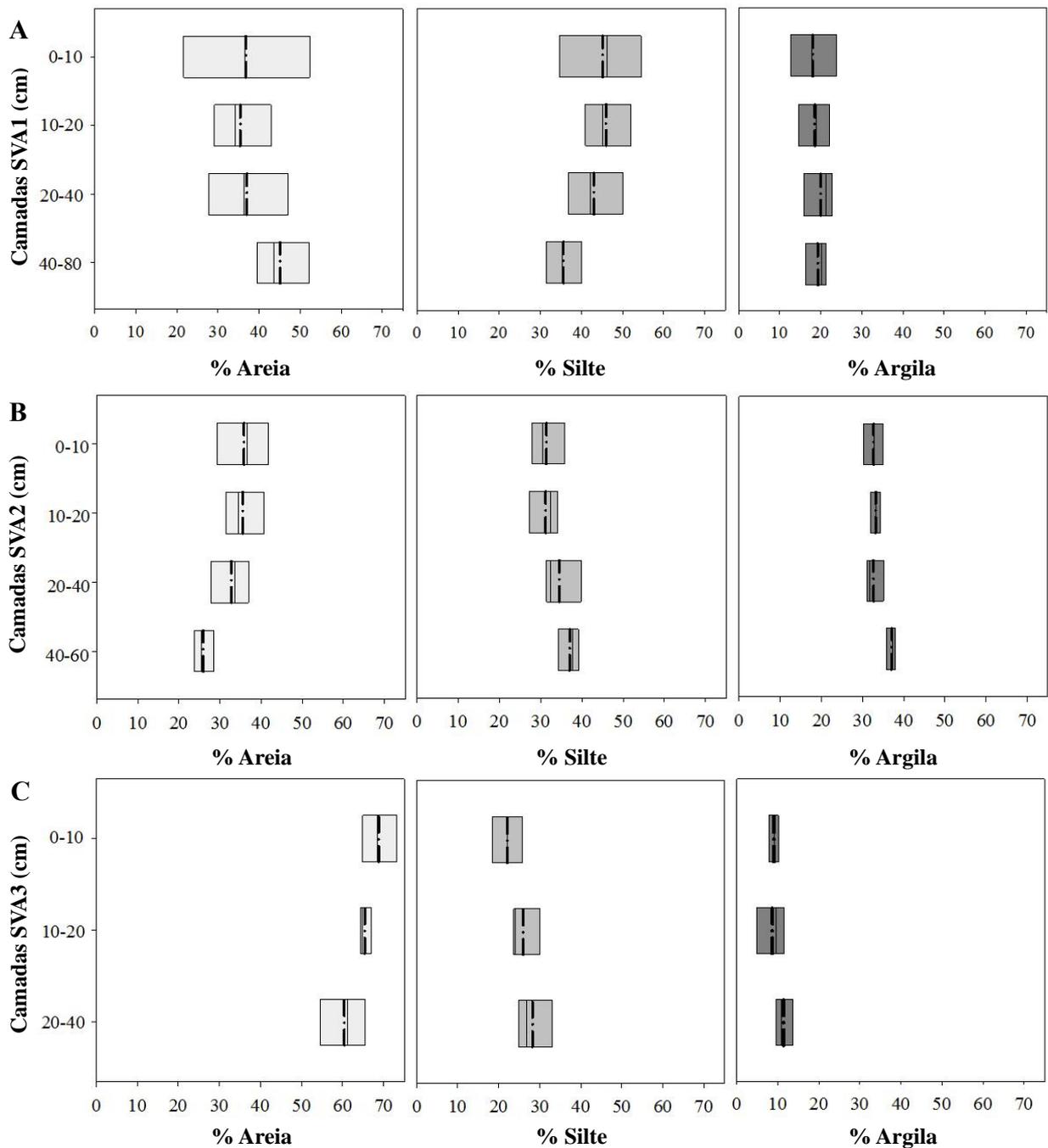
A disposição das três SVAs ao longo da bacia se dá de maneira heterogênea, distribuindo-se ao longo das diferentes classes de relevo, o que confere características próprias a cada uma dessas. Velocidades de infiltração altas típicas de solos com caráter arenoso (AZEVEDO *et al.*, 2007), associadas à baixa profundidade dos mesmos representam uma importante característica hidrológica, principalmente no que diz respeito ao início do processo de escoamento superficial. A SVA3 encontra-se localizada nas cotas de maior altitude bem como nas áreas de maior declividade no sul da bacia em estudo o que, associado às características inerentes de um neossolo litólico, ajudam a esclarecer o baixo teor de argila nas camadas mais superficiais. O reduzido tamanho das partículas desta fração permite um maior deslocamento, sendo estas carregadas com mais facilidade para as cotas mais baixas do terreno (em direção às SVA1 e SVA2) durante os eventos pluviométricos de maior intensidade.

As proporções dos teores de silte apresentaram padrões distintos quando comparadas as três SVAs. Enquanto na SVA1, os valores obtidos foram maiores nas camadas iniciais do solo, na SVA2 e SVA3 os mesmos apresentaram crescimento ao longo do perfil, aumentando com a profundidade. Em relação às sub-frações da areia, o mesmo padrão foi observado para as SVA1 e SVA2, que apresentaram maiores proporções de areia fina em detrimento da areia grossa, sendo contrário ao observado na SVA3.

A Figura 12 mostra a média e a mediana, bem como a distribuição das frações granulométricas para os quatro pontos de coleta de solo em cada uma das três SVAs e suas respectivas camadas. Observadas as barras de distribuição dos resultados considerando os valores entre o vigésimo quinto e o septuagésimo quinto percentis, aponta-se uma maior amplitude na variação dos resultados obtidos para a camada superficial do solo (0-10 cm) na

SVA1, como evidencia a Figura 12a. Destaca-se ainda os teores de argila presentes na SVA2 que, independente da camada avaliada, mostraram-se superiores àqueles obtidos tanto para a SVA1 quanto para a SVA3.

FIGURA 12 - Média (— · —) e mediana (—) dos teores de areia, silte e argila para as diferentes camadas dos solo nas a) SVA1 b) SVA2 e c) SVA3.



Os resultados dos teores de matéria orgânica evidenciaram o mesmo padrão de distribuição nas três SVAs analisadas, apresentando os maiores valores nas camadas mais superficiais, e decrescendo ao longo do perfil (Tabela 6).

TABELA 6 - Teores de matéria orgânica para as diferentes camadas de solo avaliadas na SVA1, SVA2 e SVA3.

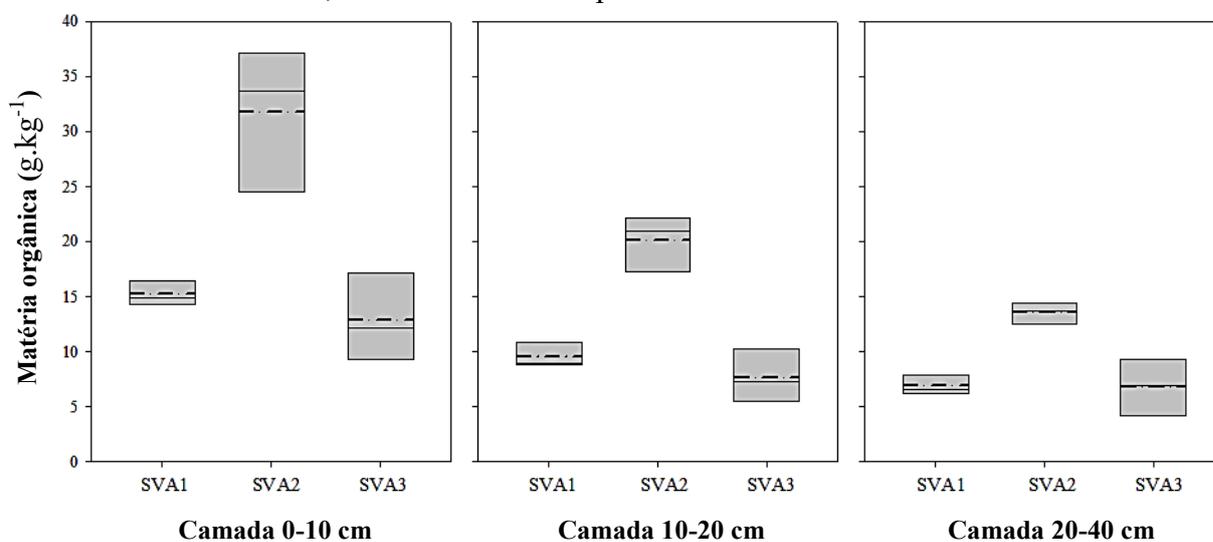
Profundidade (cm)	Matéria orgânica (g.kg ⁻¹)				
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80
SVA1 (Catingueira)	15,1 (13,5)	9,4 (7,2)	6,8 (6,6)	4,8 (4,5)	4,8 (4,5)
SVA2 (Angelim)	31,7 (4,5)	20,0 (7,1)	13,5 (13,4)	8,8 (8,8)	-
SVA3 (Jurema Preta)	12,8 (3,0)	7,6 (3,0)	6,7 (2,4)	-	-

Entre parêntesis estão os coeficientes de variação (%)

Apesar da alta densidade de vegetação encontrada na BEA e por esta apresentar-se inserida numa área de preservação, os teores de matéria orgânica no solo das três SVAs são considerados baixos. Quando comparados aos valores encontrados por Oliveira *et al.* (2009) para a camada superficial do solo também em área de vegetação de caatinga nativa no Ceará, os teores de matéria orgânica da camada 0-10 cm para a SVA1 e SVA3 foram três vezes menores, sendo quase a metade os obtidos na SVA2, evidenciando a influência da heterogênea vegetação presente em cada uma das áreas estudadas.

Quando observadas as três camadas de profundidades comuns às três SVAs (camadas 0-10 cm, 10-20 cm, e 20-40 cm), destacam-se os teores de matéria orgânica presentes na SVA2, que se mostraram superiores tanto em teor quanto em amplitude em relação às demais SVAs analisadas (Figura 13). Os valores para a SVA1 apresentaram a menor variação para todas as camadas avaliadas, além de valores equivalentes aos da SVA3 quando observada a camada 20-40 cm.

FIGURA 13 - Média (---) e mediana (—) dos teores matéria orgânica nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm, e 20-40 cm do solo para as três SVAs.



4.2 Parâmetros de solo obtidos para o Modelo DiCaSM

As equações de pedotransferência utilizadas permitiram a obtenção dos valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente para as diferentes camadas de solo avaliadas nas três SVAs da BEA, como mostra a Tabela 7, expressas em $\text{dm}^3\cdot\text{dm}^{-3}$. Observou-se maiores valores de umidade na capacidade de campo para a camada mais profunda dos solos nas SVA2 e SVA3, enquanto os valores de umidade no ponto de murcha permanente se mostraram mais baixos para as camadas de menor profundidade para as três SVAs.

TABELA 7 - Valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha obtidos para as diferentes camadas dos solos da SVA1, SVA2 e SVA3.

Camada	SVA1		SVA2		SVA3	
	CC	PMP	CC	PMP	CC	PMP
(cm)	----- $\text{dm}^3\cdot\text{dm}^{-3}$ -----		----- $\text{dm}^3\cdot\text{dm}^{-3}$ -----		----- $\text{dm}^3\cdot\text{dm}^{-3}$ -----	
0-10	0,365 (4,5)	0,066 (3,6)	0,406 (11,7)	0,110 (14,4)	0,212 (9,5)	0,039 (10,8)
10-20	0,361 (10,0)	0,067 (5,7)	0,387 (16,4)	0,111 (29,3)	0,218 (22,0)	0,038 (3,5)
20-40	0,350 (7,2)	0,072 (6,1)	0,387 (18,6)	0,110 (16,0)	0,240 (8,9)	0,046 (7,0)
40-60	0,309 (9,4)	0,070 (8,0)	0,412 (41,7)	0,123 (34,8)	-	-
60-80	0,309 (9,4)	0,070 (8,0)	-	-	-	-

Entre parêntesis estão os coeficientes de variação (%). SVA: Associação solo-vegetação. CC: Umidade do solo na capacidade de campo. PMP: Umidade do solo no ponto de murcha permanente.

Os resultados obtidos a partir das equações de pedotransferência, associados aos valores texturais obtidos neste trabalho, mostraram-se coerentes aos obtidos por Costa (2012) para a mesma bacia de estudo, e condizentes aos explicitados por Pereira *et al.* (2010), em que os maiores valores de umidade na capacidade do campo são esperados para solos com maior teor argila, como os observados na SVA2. Esta similaridade também pode ser percebida ao analisar os valores de umidade do solo no ponto de murcha permanente para a SVA3, em que os maiores valores estão associados aos elevados teores de areia.

4.3 Resposta do modelo DiCaSM à calibração dos parâmetros de solo

O modelo apresentou respostas distintas para o conteúdo de água nas diferentes camadas de solo avaliadas (camada 0-20 cm e camada das raízes) das três áreas de associação entre solo e vegetação (SVAs). Observou-se ainda, diferença nos valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) obtidos para as simulações utilizando as equações de Philip e de Green-Ampt para o cálculo da infiltração, demonstrando múltiplas adequações do modelo às simulações consideradas. A correlação entre os valores de umidade do solo medidos e modelados para o período de 2004 a 2008 é representada nas Figuras 14 a 17, com seus respectivos NSEs.

FIGURA 14 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada 0-20 cm do solo através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Philip (1957) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.

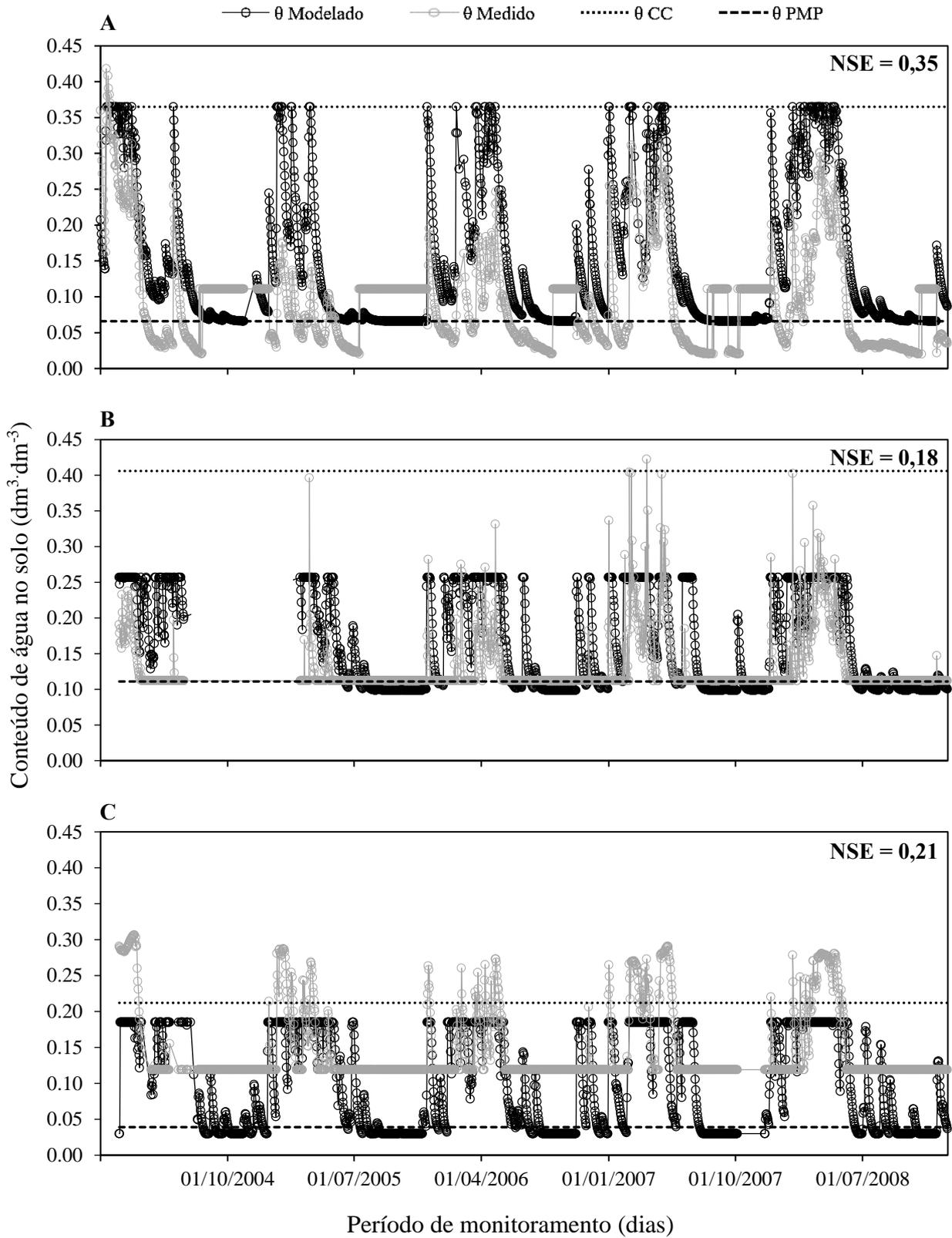


FIGURA 15 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada 0-20 cm do solo através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Green-Ampt (1911) para a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.

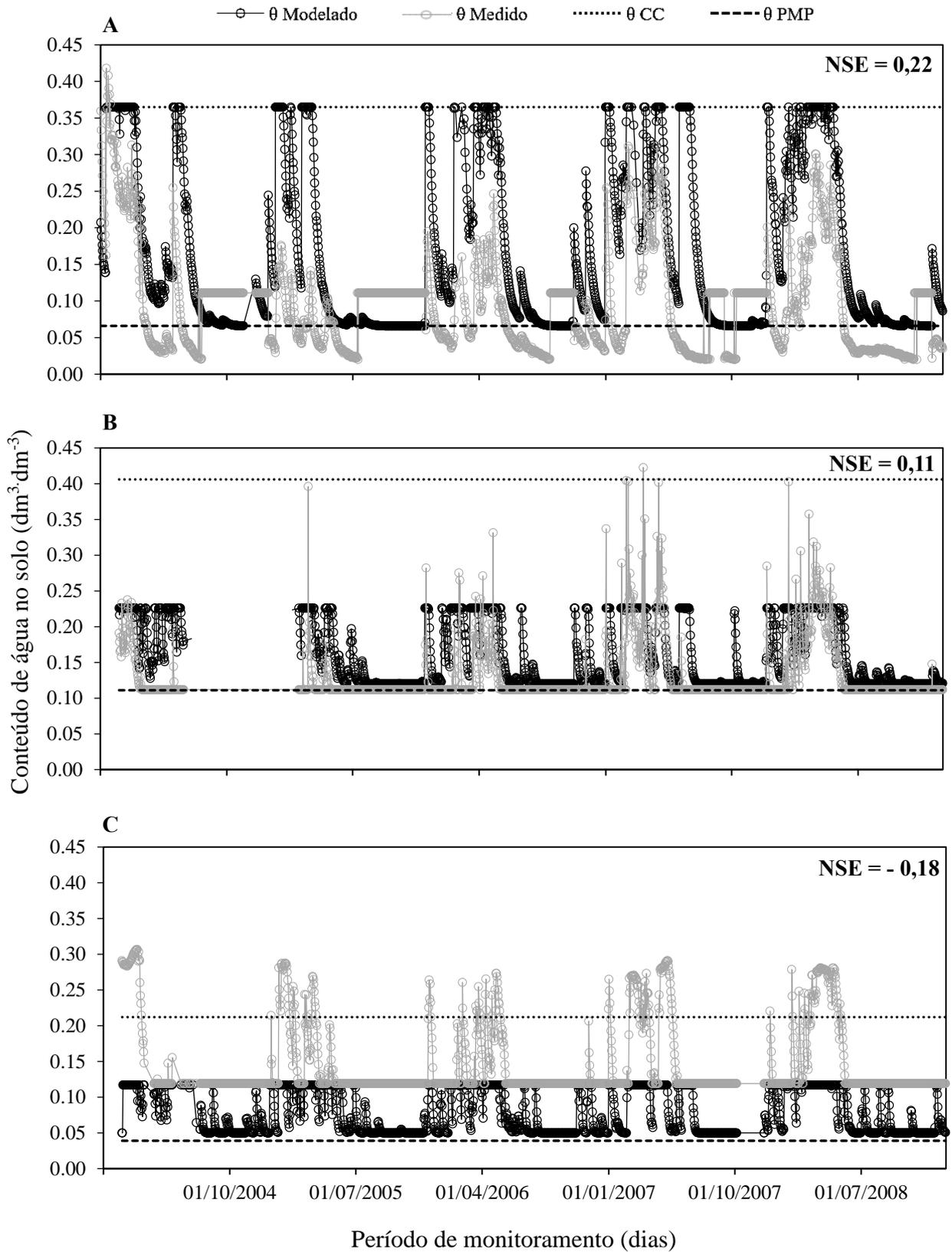


FIGURA 16 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada das raízes através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Philip (1957) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.

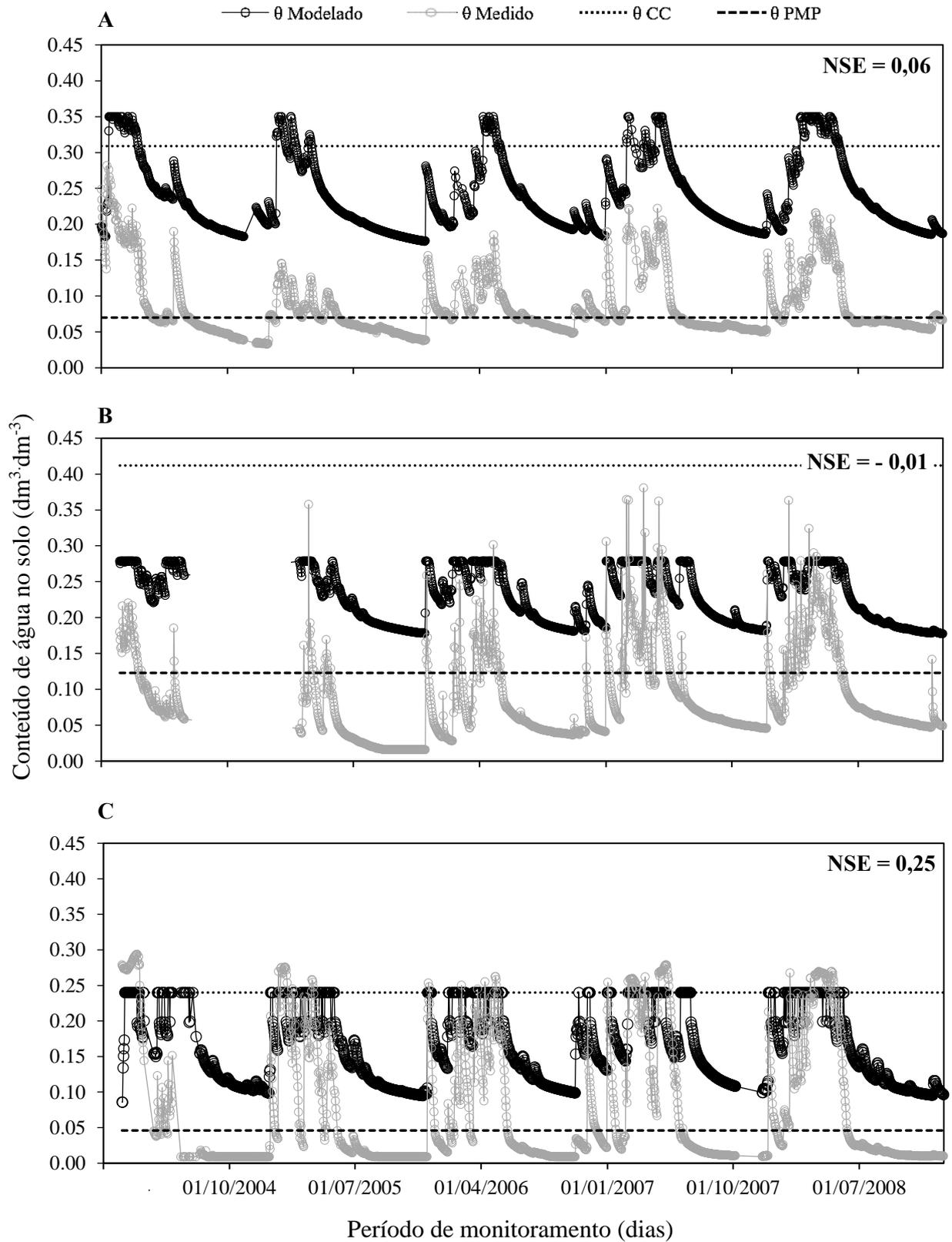
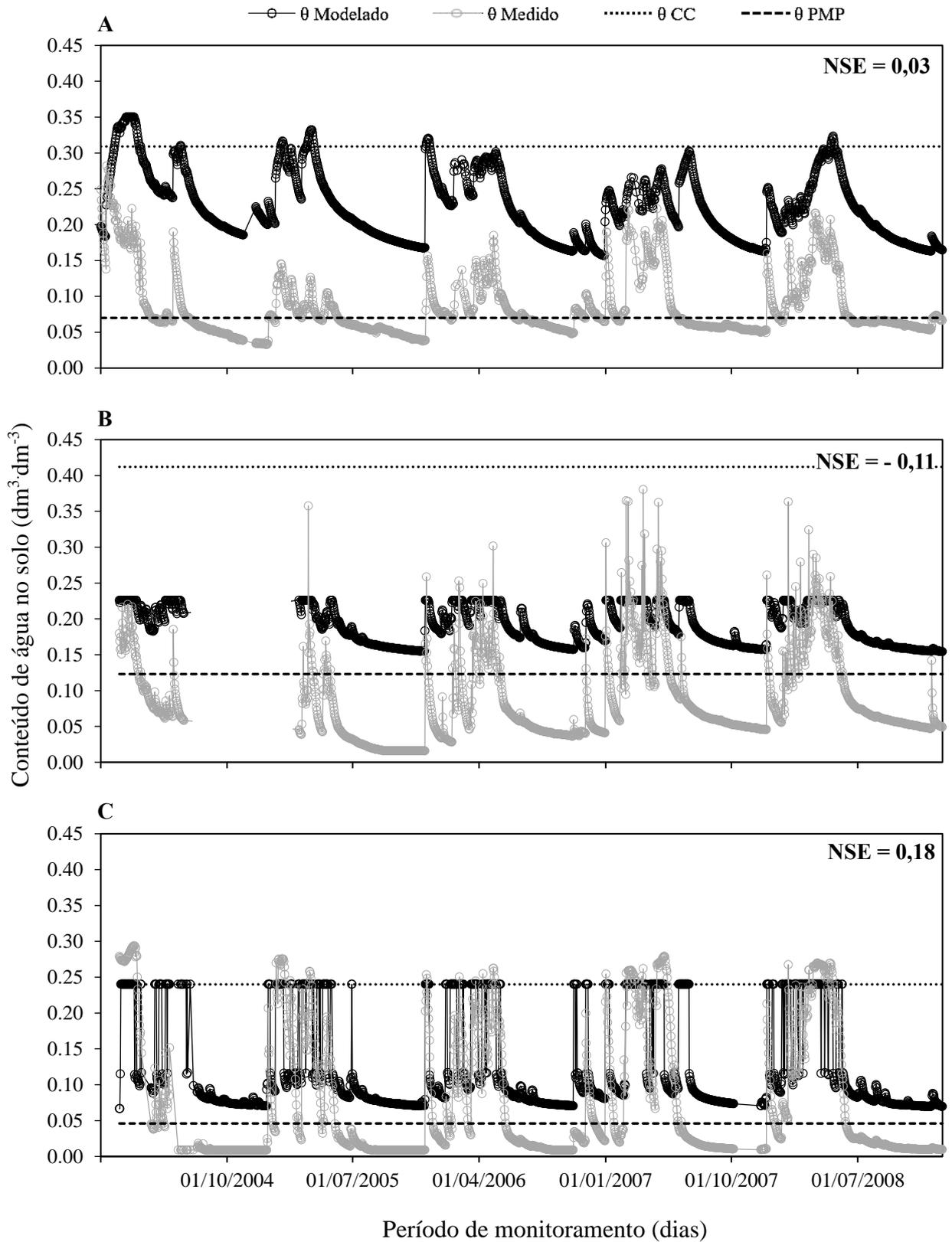


FIGURA 17 - Distribuição temporal dos dados medidos e modelados do conteúdo de água no solo na BEA na camada das raízes através do modelo DiCaSM utilizando a equação de Green-Ampt (1911) para a a) SVA1, b) SVA2 e c) SVA3.



Para a camada 0-20 cm observou-se melhor correlação entre os dados medidos e modelados na SVA1, tanto para a calibração utilizando a equação de Philip quanto para a de Green-Ampt (Figuras 14a e 15a). Nesta camada o modelo não representou bem o conteúdo de água no solo da SVA3 ao calcular a infiltração pelo modelo de Green-Ampt, em que se observou uma limitação na amplitude dos valores modelados, corroborando para um valor de NSE negativo (Figura 15c). Na camada das raízes, a melhor adequação do modelo foi observada para a umidade do solo na SVA3, cujos valores de NSE obtidos utilizando a equação de Philip mantiveram-se semelhantes aos obtidos para a camada superficial (Figura 16c). Para os solos da SVA2, a acurácia da calibração realizada não foi satisfatória, apresentando valores de NSE negativos para ambas as equações de infiltração utilizadas, como mostram as Figuras 16b e 17b.

Apesar da maior dinâmica e complexidade dos processos hidrológicos nas camadas iniciais do solo, o modelo representou o conteúdo de água na camada 0-20 cm melhor que na camada das raízes. Este comportamento também foi observado por Montenegro e Ragab (2012) ao avaliar a distribuição temporal da umidade do solo modelada e medida para uma bacia semiárida no estado de Pernambuco subdividida em malhas de 1,0 km², na qual a alta capacidade de representação da umidade pelo modelo DiCaSM se deu nos 0,4 m iniciais do solo, com valores de NSE próximos a 1,0.

A maneira com que a recarga de água no solo é calculada pelo modelo DiCaSM influencia a distribuição da umidade ao longo do perfil. Tal processo se dá a partir do agrupamento das camadas que compõem a zona das raízes (*Four Root Layers Model* por Ragab *et al.*, 1997) e leva em consideração tanto a profundidade das raízes quanto as características físico-hídricas do solo. Quando a umidade do solo ultrapassa o valor da capacidade de campo, a água excedente é drenada para a camada inferior. Tal comportamento foi observado com maior frequência para a camada das raízes da SVA1, onde valores de umidade modelados mostraram-se superiores aqueles obtidos na capacidade de campo. O elevado percentual da fração silte na estrutura desses solos promoveu uma maior saturação dos mesmos, diferentemente dos solos da SVA3, onde a infiltração é facilitada pela granulometria predominantemente arenosa.

O conteúdo de água disponível no solo é considerado como aquele entre a umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (AMARO FILHO *et al.*, 2008). Valores inferiores a esta faixa são considerados não disponíveis devida sua forte adsorção às partículas sólidas do solo, e os superiores a este intervalo são considerados como água gravitacional. A distribuição do conteúdo de água nos solos da BEA nessas faixas limítrofes, bem como a dispersão entre os dados de umidade medidos e modelos na camada 0-20 cm e na camada das raízes são expressos nas Figuras 18 e 19.

FIGURA 18 – Enquadramento da unidade do solo e relação entre o conteúdo de água medido na BEA e modelado através do modelo DiCaSM utilizando a equação Philip (1957) e de Green-Ampt (1911) na **camada 0-20 cm** do solo para a SVA1, SVA2 e SVA3, durante o período de 2004 a 2008.

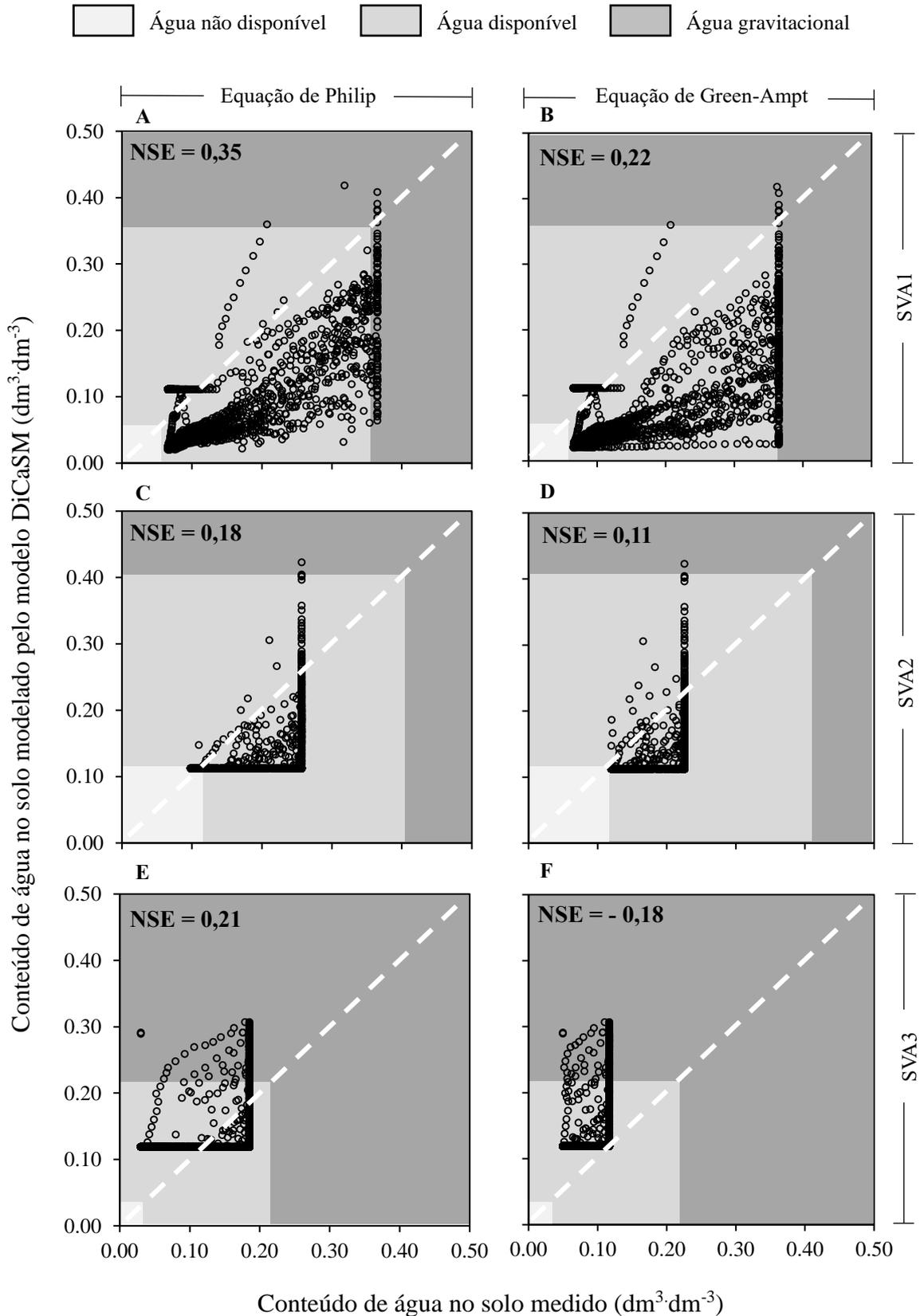
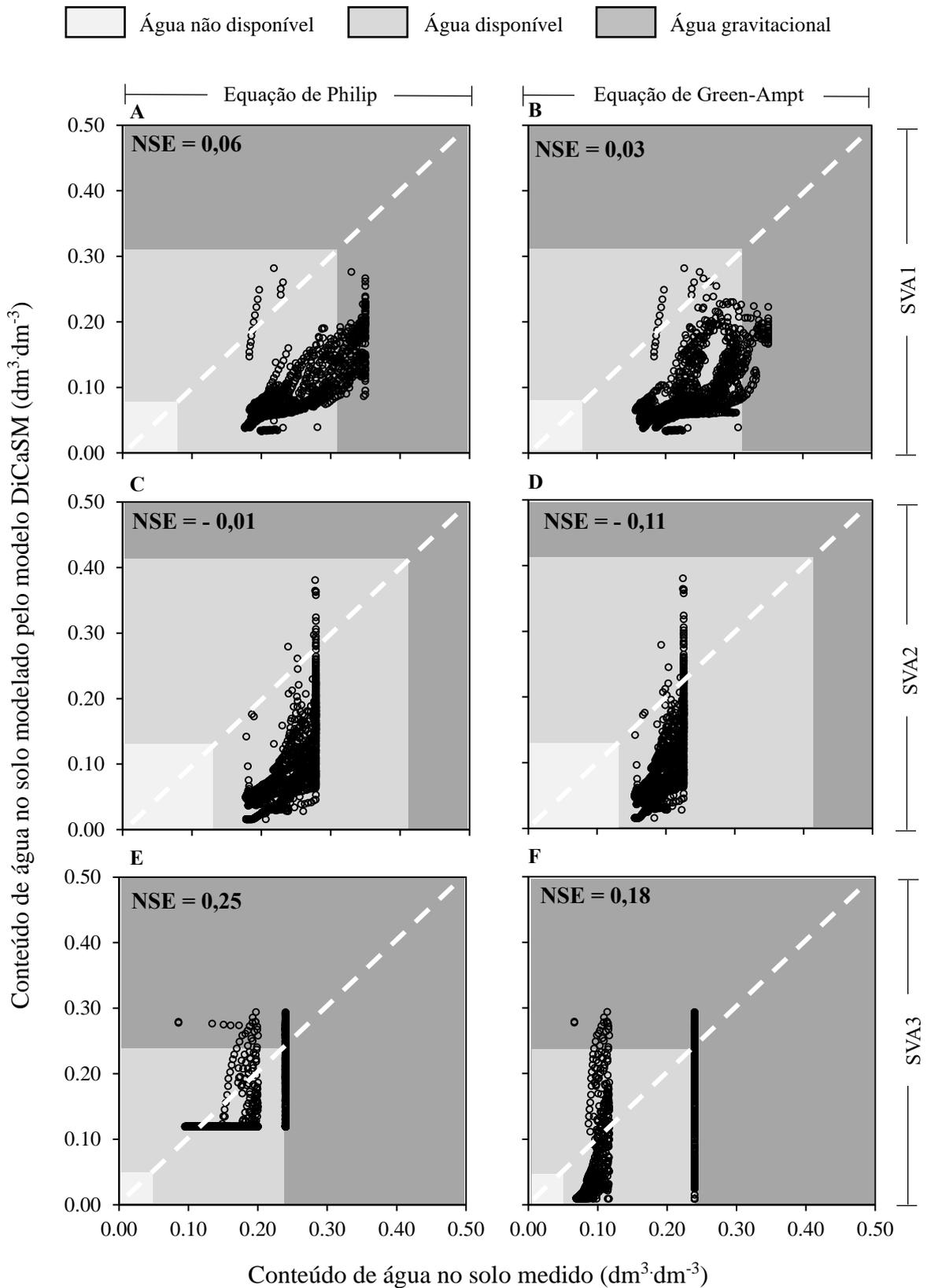


FIGURA 19 – Enquadramento da unidade do solo e relação entre o conteúdo de água medido na BEA e modelado através do modelo DiCaSM utilizando a equação Philip (1957) e de Green-Ampt (1911) na **camada das raízes** para a SVA1, SVA2 e SVA3, durante o período de 2004 a 2008.



Considerando a dispersão dos dados obtidos, observou-se uma maior inserção dos valores de umidade nos solos da SVA2 dentro da faixa de água prontamente disponível às plantas, apesar de os mesmos apresentarem correlação baixa entre os dados medidos na camada das raízes (Figura 19c e 19d). Notou-se ainda, uma dificuldade do modelo na representação da água presente na faixa não disponível. Acredita-se que este fato se deva pela ausência de parâmetros específicos de estimação da umidade residual do solo, bem como da influência desta no acúmulo de água no solo.

Em relação aos dois sub-modelos de infiltração inseridos no modelo DiCaSM, os valores de NSE encontrados para as parametrizações utilizando a equação de Green-Ampt foram menores que aqueles obtidos utilizando a equação de Philip para todas as simulações realizadas. Essa diferenciação também foi constatada por Hsu *et al.* (2002), ao comparar os diferentes parâmetros considerados por equações de cálculo da infiltração. A melhor representação do conteúdo de água do solo ao se utilizar a equação de Philip pode ser explicada pela consideração do parâmetro sortividade, ou seja, a capacidade de um solo homogêneo absorver ou liberar água no processo de movimento descendente da água ao longo do perfil, o que demonstra ser um dos pontos chave a ser considerado pelo sub-modelo *Four Root Layers Model* para a distribuição de água no perfil.

No tocante à distribuição intra-anual da umidade do solo, observou-se maior concentração dos picos de umidade na faixa de água disponível às plantas, tanto na camada 0-20 cm quanto na camada das raízes, durante os meses do primeiro semestre, típica estação chuvosa cearense. Percebe-se portanto, a capacidade que o modelo hidrológico DiCaSM possui de representar a variação do conteúdo de água no solo modelado ao longo do ano, deixando clara a influência da precipitação como fator de recarga de água no solo e a habilidade de representação desse processo em estudos hidrológicos de regiões semiáridas.

5 CONCLUSÕES

A análise dos dados coletados em campo permitiram identificar com maior acurácia o comportamento dos atributos do solo de maneira estratificada, mostrando diferenças relevantes nos padrões granulométricos nas camadas analisadas, o que contribui sobremaneira para uma melhor parametrização de modelos hidrológicos no que concerne aos parâmetros de solo. As funções de pedotransferência apresentaram valores coerentes para as condições de campo na Bacia Experimental de Aiuaba, reduzindo o esforço laboratorial para tais análises. Apesar de estar inserida numa área preservada, os valores de matéria orgânica para os solos da BEA foram considerados baixos, além de apresentarem diminuição abrupta com o aumento da profundidade do solo. Confirmaram-se ainda, dois padrões distintos de erosão, produção e deposição de sedimentos, tendo a SVA1 apresentado um padrão de deposição e a SVA3 um padrão de produção de sedimentos.

O modelo DiCaSM apresenta melhor resposta no período de secamento do solo. No período de umedecimento e de eventuais escoamentos superficiais, a variabilidade dos processos e dos parâmetros sensíveis ao conteúdo de água no solo acarretaram na menos satisfatória resposta do modelo. Apesar dos baixos valores dos coeficientes de Nash e Sutcliffe obtidos, os resultados são promissores, principalmente para análises da camada mais superficial do solo utilizando a equação de Philip para o cálculo da infiltração. Destaca-se, portanto, a necessidade de uma melhor calibração do modelo em questão para as condições semiáridas e de vegetação de Caatinga preservada, afim de se obter uma maior confiabilidade bem como uma melhor adequação do mesmo à realidade hidrológica da bacia em estudo.

Por fim, ressalta-se que, apesar de suas limitações, o uso de modelos hidrológicos distribuídos, como o DiCaSM, se bem calibrados e validados para condições locais de clima e características do solo, caracterizam-se como eficientes ferramentas para análise da resposta dos processos hidrológicos das bacias hidrográficas semiáridas, além de contribuir para um melhor planejamento de sistemas de coleta e monitoramento de dados, permitindo um melhor gerenciamento dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A. M. B.; SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B. Incorporação do Impacto da Rede de Reservatórios Superficiais Artificiais de Caráter Intranual na Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 67-82, 2013.
- ALLEN, R.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v. 43, p. 35–92. 1994.
- ALMEIDA, I. K. **Otimização de parâmetros no ajuste de modelos matemáticos em bacias hidrográficas de escassos registros hidrológicos**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.
- ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 23, p. 753-761, 1999.
- AMARO FILHO, J; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Física do solo: conceitos e aplicações. **Fortaleza: Imprensa Universitária**, v. 1, 2008.
- ARAÚJO, J. C. Entropy-based equation to assess hillslope sediment production. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, n. 13, p. 2005-2018. 2007
- ARAÚJO, J. C.; BELO, P.; SILVA, R.; GERMANO, C.; FREITAS, M.; MEDEIROS, P. H. A. **Bacia Experimental de Aiuba, Ceará**. In: RIGHETTO, A. M. (org.) Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido. Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal. 2004.
- ARAÚJO, J. C.; PIEDRA J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169 – 1178. 2009.
- ASTON, A. R. Rainfall interception by eight small trees. **Journal of Hydrology**, v. 42, p. 383–396. 1979
- AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D. A evolução da vida e as funções do solo no ambiente. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. v. 5, p. 1-48.
- BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, Á. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2009.
- BALME, M.; VISCHÉL, T.; LEBEL, T.; PEUGEOT, C.; GALLE, S. Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff: Part 1: Rainfall variability analysis. **Journal of Hydrology**, v. 331, n. 1, p. 336-348, 2006.
- BARROS, I. O.; SOARES, A. A. Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da caatinga brasileira. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 1, p. 192-198, 2012.

BESKOW, S.; MELLO, C. R. D.; COELHO, G.; SILVA, A. M. D.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, p. 169-178, 2009.

BLAINSKI, E.; SILVEIRA, F. A.; CONCEIÇÃO, G.; GARBOSSA, L. H. P.; VIANNA, L. F. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, 2011.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Bookman Editora, 2009.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza. ASTEF/EXPRESSION GRÁFICA, 2009. 166p. il.

CHAVES, I. B.; FREIRE, O.; AMORIM NETO, M. D. S. Características da precipitação e risco de erosão na região tropical semi-árida brasileira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 9, p. 991-998, 1985.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw Hill 572p. 1988.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Ed. Dos Autores, 2006.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COSTA, A. C. **Hidrologia de uma bacia experimental em caatinga conservada no semiárido brasileiro**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de Caatinga preservada**. 2012. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

COSTA, C. A. G., LOPES, J. W. B., PINHEIRO, E. A. R., ARAÚJO, J. C. D., & GOMES FILHO, R. R. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 4, p. 685-694, 2013.

CREUTZFELDT, B. **Remote sensing based characterization of land cover and terrain properties for hydrological modeling in the semi-arid Northeast of Brazil**. Final Year Work, Potsdam University, Potsdam, Germany. 2006.

CUNHA, T. J. F.; PETRERE, V. G.; SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S.; MELO, R. F.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, M. S. L.; ALVAREZ, I. A. Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. **Seminário brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 49-87.

DE MEDEIROS, J. D. F. **Variabilidade espacial do conteúdo de água no solo na bacia do Arroio Donato-RS**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de Solos**. 2a Edição. Rio de Janeiro. 306p. 2006

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. 1997.

ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; NETO, A. R. Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 81-91, 2012.

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo in situ ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 5, p. 1029-1036, 2000.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.

FARIAS, T. R. L. **Produção de sedimentos em bacias hidrográficas sob diferentes contextos geoambientais: medida e modelagem**. 2008. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2008.

FIGUEIREDO, J. V. de. **Início da geração de escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará. 2011.

FRAGOSO JÚNIOR., C. R., FERREIRA, T. F., MARQUES, D. M. 2009. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos. 2009. 304p.

FREVERT D. K., SINGH, V. **Watershed Models**. Taylor & Francis Group, 653 p. 2006.

FREITAS, M. A. S.; PORTO, A. S. Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado a Bacias do Semi-Árido Nordeste. **Revista Tecnologia**, v. 11, n. 1, 1990.

FUNCEME (2017). Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - **Série pluviométrica do posto de Aiuaba (1987-2016)**. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorologico/572-postos-pluviometricos>. Acesso em: 30 maio 2017.

GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, v. 170, p. 79–86. 1995.

GIONGO, V. 2014. Carbono no semiárido brasileiro. In: **Agricultura Conservacionista no Brasil**. Embrapa, 598 p.

- GIULIETTI, A. M.; BOCAGE NETA, A. L.; CASTRO, A. A. J. F.; GAMARRA-ROJAS, C. F. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; VIRGÍNIO, J. F.; HARLEY, R. M. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**, p. 48-90, 2004.
- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics: 1. Flow of water and air through soils. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, p. 1-24. 1911.
- HAGG, W.; BRAUN, L. N.; KUHN, M.; NESGAARD, T. I. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 1, p. 40-53, 2007.
- HOUGH, M.; PALMER, S.; WEIR, A.; LEE, M.; BARRIE, I. The Meteorological Office Rainfall and Evaporation Calculation System. MORECS version 2.0. **An Update to Hydrological Memorandum 45** UK Met Office: Bracknell; 41. 1996.
- HSU, Shaohua Marko; NI, Chuen-Fa; HUNG, Pi-Fang. Assessment of three infiltration formulas based on model fitting on Richards equation. **Journal of hydrologic Engineering**, v. 7, n. 5, p. 373-379, 2002.
- HUANG, Q. H.; ZHANG, W. C. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River Basin. **Journal of Nanjing Forestry University**, v. 2, 2004.
- HUZA, J.; TEULING, A. J.; BRAUD, I.; GRAZIOLI, J.; MELSEN, L. A.; NORD, G.; RAUPACH, T. H.; UIJLENHOET, R. Precipitation, soil moisture and runoff variability in a small river catchment (Ardèche, France) during HyMeX Special Observation Period 1. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 330-342, 2014.
- KINCAID, D. R.; GARDNER, J. L.; SCHREIBER, H. A. Soil and vegetation parameters affecting infiltration under semiarid conditions. **Land Erosion, Precipitation, Hydrometry, Soil Moisture**, p. 440-453, 1964.
- KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 3. ed. Passo Fundo: Editora UPF, 2014. 263 p.
- KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010.
- LEMOS, J. R. **Florística, estrutura e mapeamento da vegetação de caatinga da Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará**. 2006. 142f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.
- LEMOS, J. R.; MEGURO, M. Florística e fitogeografia da vegetação decidual da Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 8, n. 1, 2010.
- LOAGUE, K.; HEPPNER, C. S.; EBEL, B. A.; VANDERKWAACK, J. E. The quixotic search for a comprehensive understanding of hydrologic response at the surface: Horton, Dunne,

Dunton, and the role of concept-development simulation. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 17, p. 2499-2505, 2010.

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. D. A. S. D.; SILVA, F. D. D. S.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu-Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 308-322, 2009.

LYRA, G. B.; DE SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; MOURA FILHO, G.; JÚNIOR, R. F. A. Conteúdo de água no solo em cultivo de milho sem e com cobertura morta na entrelinha na região de Arapiraca-AL. **Irriga**, v. 15, n. 2, p. 173, 2010.

MACEDO, J.R. **Determinação de retenção hídrica por correlação múltipla e de variabilidade espacial em solos podzólicos de Seropédica, RJ**. 1991. 174p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 1991.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 147-155, 2003.

MAIA, G. N., **Caatinga - Árvores e Arbustos e suas utilidades**; 1º edição, 413p. 2004.

MAMEDE, G. L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modeling and management**. Doctor Rerum Naturalium Thesis. 120 p. Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam. Postdam, 2008.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, Impactos e adaptação à mudança de clima no semiárido do Brasil, In: **Parcerias Estratégicas/Centro de Gestão de Estudos Estratégicos**-Ministério da Ciência e Tecnologia, v.1, n.1, Brasília DF, p. 149-176, 2009.

MARTINS, J. A. Infiltração. In: PINTO, N. L. de S; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976. cap. 4, p. 44 – 55.

MEDEIROS, J. B. L. P. **Zoneamento fito-ecológico da estação ecológica de Aiuaba – uma contribuição à educação ambiental e à pesquisa científica**. 2004. 141 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F. D.; FRANCA, R. M. D.; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89-98, 2009.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principals of Environmental Physics**, 2nd edn. Edward Arnold (Hodder & Stoughton): London; 27–28. 1990.

- MONTENEGRO, S. M. G.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**. v. 434-435, p. 55-68, 2012.
- MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.
- MUELLER, E. N.; WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A. J. Impact of connectivity on the modeling of overland flow within semiarid shrubland environments. **Water Resources Research**, v. 43, n. 9, 2007.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models – Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. v.10 p.282-290. 1970.
- OLIVEIRA, T. S.; NOGUEIRA, R. S.; TEIXEIRA, A. S.; CAMPANHA, M. M.; ROMERO, R. E. Distribuição espacial do índice de manejo do carbono em luvisolos sob sistemas agrícolas tradicionais e agroflorestais no município de Sobral - CE. **Cadernos de Agroecologia**, v. 4, n. 1, 2009.
- PAIXÃO, F. J. R.; SANTOS, A. R. A.; AZEVEDO, C. A. V.; SILVA, J. M.; COSTA, T. L.; FEITOSA, R. M. Estimativa da Infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5, n. 1, 2005.
- PEREIRA, R. A.; DANTAS NETO, J. Efeito das atividades agropastoris sobre os atributos físico-químicos de três classes de solos de uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 34, n. 1, p. 169-188, 2014.
- PEREIRA, R. C. M. **Solos**. In: OLIVEIRA, J. G. B. (Ed) Projeto Aiuaba. Fortaleza. 1982.
- PEREIRA, L. S.; VALERO, J. A. J.; BUENDÍA, M. R. P.; MARTÍN-BENITO, J. M. T. El riego e sus tecnologías. **Albacete: CREA-UCLM**, 2010, 296p.
- PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, v. 84, p. 257–264. 1957.
- 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.
- PINHEIRO, E. A. R.; COSTA, C. A. G.; DE ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1-4, 2013.
- RAGAB, R.; BROMLEY, J. IHMS—Integrated Hydrological Modelling System. Part 1. Hydrological processes and general structure. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2663-2680. 2010.
- RAGAB, R.; BROMLEY, J.; DÖRFLINGER, G.; KATSIKIDES, S. IHMS—Integrated Hydrological Modelling System. Part 2. Application of linked unsaturated, DiCaSM and saturated zone, MODFLOW models on Kouris and Akrotiri catchments in Cyprus. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2681-2692. 2010.

RAGAB, R.; FINCH, J.; HARDING, R. Estimation of groundwater recharge to chalk and sandstone aquifers using simple soil models. **Journal of Hydrology**, v. 190, p. 19–41. 1997

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, p. 41-49, 2003.

RAUPACH, M. R. Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales. **Agricultural and Forest Meteorology** 73: 151–179. 1995.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Piracicaba: Manole, 1987. 188p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p. 211-216, 1988.

REYNOLDS, J. F. Some misconceptions of mathematical modeling. **What's New Plant Physiology**, v.10, n.11, p.41-44, 1979.

RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. A.; MENDONÇA, L. A. R.; ARAÚJO, J. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO, E. M. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.312-318, 2013.

SANTANA, J. A. S.; SOUTO, J. S. Produção de serapilheira na Caatinga da região semi-árida do Rio Grande do Norte, Brasil. **Idesia (Arica)**, v. 29, n. 2, p. 87-94, 2011.

SANTOS, F. N. **Produção de Feijão Macaçar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) e recuperação da fertilidade de um Luvissole via fertilização e inoculação com *Rizobium***. 2010. Tese de Doutorado, Patos, PB: Universidade Federal de Campina Grande.

SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JÚNIOR, V. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, 2008.

SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C.; SOUZA, L. C. D.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. D. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 57-73, 2003.

TEIXEIRA, R. F. B. **Inferência do estado geral da umidade superficial do solo pelo índice de seca temperatura-vegetação e por imagens do satélite NOAA-17: aplicações no**

semiárido do Ceará. 2010. 120 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

TEODORO, V. L. I.; TEXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, n.20, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** 2.ed. -. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: ABRH, 2005. 678 p., il.

VIEIRA, V. P. P. B. Sustentabilidade do semi-árido brasileiro: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 105-112, 2002.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 1975. 245p.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. D.; ACERBI JR, F. W.; SILVA, A. D. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

VISCHEL, T.; LEBEL, T. Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff. Part 2: Idealized modeling of runoff sensitivity. **Journal of hydrology**, v. 333, n. 2, p. 340-355, 2007.

VON HOYNINGEN-HUENE, J. Die Interzeption des Niederschlags in Landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. Arbeitsbericht Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, **DVWK.** v. 57, p. 1-53. 1981.

YU, P. S.; JENG, Y. C. A study on grid based distributed rainfall runoff models. **Water Resources Management**, v. 11, p. 83-99. 1997

ANEXO 1 - EQUACIONAMENTO DOS SUB-MODELOS INSERIDOS NO MODELO DICASM

O embasamento físico-matemático dos processos hidrológicos dos sub-modelos inseridos no modelo DiCaSM são descritos a seguir, segundo Ragab e Bromley (2010).

1. Interceptação

Nem todas as precipitações medidas por pluviômetros efetivamente se infiltram através da superfície do solo. A precipitação efetiva é geralmente inferior ao valor registrado, devido à interceptação pelo dossel da vegetação, sendo a água interceptada evaporada para a atmosfera a uma taxa potencial. A quantidade de interceptação é calculada usando fórmulas diferentes, de acordo com o tipo de vegetação e a precipitação restante (chuva líquida) será dividida entre a infiltração e o escoamento superficial. A interceptação por culturas e pela grama é calculada usando os métodos de Aston (1979) e Von Hoyningen-Huene (1981), ambos descritos por Aston (1979), como mostra Equação 5.

$$S = C_p S_{max} \left[1 - e^{-k \left(\frac{p_{cm}}{S_{max}} \right)} \right] \quad (5)$$

em que S é a interceptação acumulada (mm), p_{cm} é a precipitação acumulada (mm), k é um fator de correção para a densidade da vegetação, C_p é a fração de cobertura vegetal e S_{max} é a capacidade de armazenamento do dossel (mm) estimada a partir do índice de área foliar (LAI) ($m^2 \cdot m^{-2}$) por Von Hoyningen-Huene (1981) segundo a Equação 6.

$$S_{max} = 0,935 + 0,498LAI + 0,00575LAI^2 \quad (6)$$

A interceptação de florestas é obtida pelo modelo de Gash *et al.* (1995). O modelo considera a ocorrência de chuvas como uma série de eventos discretos. Cada evento inclui um período de molhamento, quando a precipitação é inferior ao valor limiar necessário para saturar o dossel. A estrutura da floresta é descrita por dois parâmetros: a capacidade de dossel, definida como a quantidade de água existente no dossel sem evaporação quando as chuvas cessarem e um livre através do coeficiente de queda, o que determina a quantidade de chuva que cai diretamente no chão da floresta, sem tocar no dossel. Evaporação dos troncos é descrito em termos de capacidade de armazenamento do tronco, e a proporção da precipitação desviada para conter o fluxo.

2. Evapotranspiração

Evapotranspiração refere-se a perda de água na superfície do solo e extração de água da zona radicular e subsequente perda de água através do caule e folhas da planta para a

atmosfera, sendo os dois processos considerados em conjunto como um único processo. Quando a água é excedente, e as plantas crescem sob nenhum estresse hídrico, a evapotranspiração é controlada pelas condições atmosféricas e pela evapotranspiração potencial. Quando a água se torna menos disponível para a planta, a evapotranspiração potencial será reduzida para um nível real e será controlada pela planta e pelas propriedades hidráulicas do solo.

Raupach (1995) introduziu o conceito de taxa de evaporação de equilíbrio, ϕ_{eq} . A evaporação de equilíbrio representa um estado termodinâmico e, portanto, pode-se reformular a equação combinada (CE) para expressar o fluxo (f_E) como perturbação em torno do seu valor de equilíbrio. A CE descreve a partição do balanço de energia $f_A = f_E + f_H$ ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em uma superfície de evaporação, onde f_E e f_H são os fluxos de ar superficial latente e calor sensível e f_A é o fluxo de ar superficial de energia disponível (irradiância líquida de armazenamento térmico e menos consumo de energia da fotossíntese). O termo CE é geralmente escrito para descrever f_E . Levando isso em conta, Raupach chegou a formar o “equilíbrio de partida” da CE, que é usado em seu esquema médio para robustez da eficácia da parametrização (Equação 7):

$$F_E = \sum a_i f_{ei} = \sum a_i \left[\phi_{eqi} + \frac{\rho \lambda (D_i - \delta_{eqi})}{r_{di}} \right] = \phi_{eq} + \frac{\rho \lambda ((D) - \Delta_{eq})}{R_d} \quad (7)$$

em que: ρ é a densidade do ar (kg.m^{-3}), λ é o calor latente de vaporização da água ($2465000 \text{ J.kg}^{-1}$), D é o déficit de saturação potencial do ar ambiente e r_d é a resistência que está intimamente relacionada com a resistência em controlar o fluxo do déficit de saturação e, portanto, pode ser chamado de resistência déficit.

Os diferentes parâmetros necessários para a obtenção do f_E na “partida de equilíbrio” completam a equação combinada (CE), sendo estes calculados de acordo com as equações de Allen *et al.* (1994), Hough *et al.* (1996) e Monteith e Unsworth's (1990). A vantagem da abordagem Raupach é a facilidade no uso para se obter um único valor de evapotranspiração para um quadrado da grade, com tipos de vegetação mista, por meio da agregação de três parâmetros de entrada na equação (ϕ_{eq} , r_d , δ_{eq}). Esta abordagem e o esquema de agregação são adotadas no modelo DiCaSM, sendo esta agregação dos diversos tipos de vegetação na quadrícula apresentadas nas Equações 8, 9 e 10, a seguir.

$$\Phi_{eqi} = \sum a_i \phi_{eqi} \quad (8)$$

$$\frac{1}{R_d} = \sum \frac{a_i}{r_{di}} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta_{eq}}{R_d} = \sum \frac{a_i \delta_{eqi}}{r_{di}} \quad (10)$$

O DiCaSM calcula o saldo de radiação de horas de sol ou radiação total, caso não

se tenha dados de saldo de radiação disponíveis.

3. Escoamento superficial

O modelo DiCaSM executa o cálculo sobre a quantidade de água que se infiltra no solo, para cada célula, a partir de dois mecanismos para a geração de escoamento superficial: o excesso de saturação e excesso de infiltração. Para o excesso de saturação, o *runoff* é gerado após a saturação de uma camada superior do solo de profundidade especificada, sendo esta profundidade crítica para as quais o déficit hídrico do solo é calculado. Para o excesso de infiltração, o escoamento é gerado quando a taxa de precipitação líquida excede a taxa de infiltração máxima de uma camada superior do solo de profundidade especificada.

4. Infiltração

Duas equações para o cálculo da infiltração podem ser usadas no modelo DiCaSM: as equações de Philip (1957) e de Green e Ampt (1911), explícitas respectivamente, pelas Equações 11 e 14. Ambas utilizam no cálculo parâmetros físicos do solo, tais como a porosidade, a pressão de borbulhamento, teor de água saturada, além da condutividade hidráulica saturada.

$$i = St^{-0,5} + A \quad (11)$$

em que: i é a taxa de infiltração ($m.s^{-1}$), t é o tempo (s) e S é o sortividade ($m^2.s^{-1}$)^{0,5} tomada a partir da Equação 12.

$$S = [2(H_0 + H_f)(\phi - \theta_i)K_s]^{0,5} \quad (12)$$

em que: H_0 (m) é a profundidade da água empoçada, H_f (m) é a sucção da frente de umedecimento e ϕ é a porosidade total, K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado e θ é o conteúdo de água no solo volumétrico. A é um parâmetro com dimensão de condutividade (Equação 13)

$$A = \alpha(K_s) \quad (13)$$

em que: α varia de 0,33 a 1,0. Normalmente A é tomado como $K_s/3$, onde K_s é a condutividade hidráulica saturada.

$$i = K_s \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i)H_f}{I} \right] \quad (14)$$

em que: K_s ($m.s^{-1}$) é a condutividade hidráulica do solo saturado, θ_i é o teor de água inicial, ϕ é a porosidade total, I é a infiltração acumulada no perfil (m) e H_f (m) é a frente de sucção de molhamento é calculada segundo a Equação 15:

$$H_f = \frac{2+3\lambda}{1+3\lambda} \left(\frac{\psi_e}{2} \right) \quad (15)$$

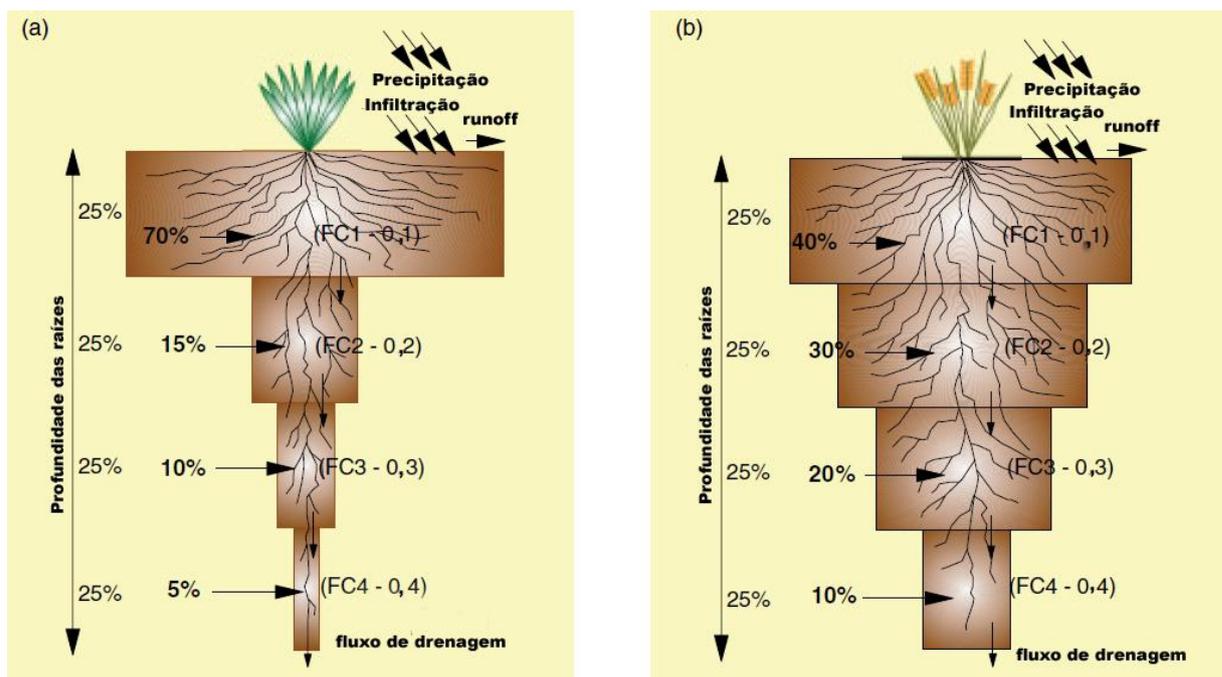
Em que: ψ_e é a pressão de borbulhamento, λ é o índice de distribuição de tamanho dos poros

e K_s a condutividade hidráulica saturada. Os parâmetros de entrada podem ser medidos ou calculados. O DiCaSM utiliza as funções de pedo-transferência de acordo com Rawls e Brakensiek (1989). A entrada para estas funções são: % de areia, % de argila, % de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica (CEC).

5. Balanço hídrico na zona insaturada do solo

Expressa o movimento de água no solo e absorção de água pelas plantas e, para isso, faz uso do sub-modelo de quatro camadas de solo, FRLM (Ragab *et al.*, 1997). O movimento da água entre as camadas é baseada em uma abordagem de capacidade. Com esta técnica, se a entrada para a primeira camada é superior à sua capacidade de armazenamento, então drena o excesso de água até a camada seguinte até que a água disponível para infiltração é dissipada dentro da zona de raiz. A precipitação efetiva é tomada como a entrada para a camada superior, ou seja, a precipitação líquida após a contabilização de interceptação do dossel. Água em excesso da capacidade máxima de retenção de água da camada inferior é considerado potencialmente disponíveis para recarga das águas subterrâneas. A contribuição de cada camada de solo para a absorção total da raiz de água e a evapotranspiração real depende da distribuição de densidade de raízes. A distribuição de raízes ativas em um solo normal é de aproximadamente de forma triangular, a maior concentração de estar perto da superfície, como mostra a Figura 20, para grama permanente e culturas em geral.

FIGURA 20 - Modelo esquemático da estrutura de absorção de água pelas plantas na profundidade do sistema radicular para a) grama permanente e b) culturas.



Fonte: RAGAB e BROMLEY, 2010.

6. *Escoamento e encaminhamento do fluxo de canal*

O DiCaSM calcula os fluxos de superfície e fluxo dentro de seu modelo distribuído. Isso se dá com a definição de uma rota de fluxo através da identificação das células que estão no curso de água com base no modelo digital de elevação a partir de dez ou mais células. A partir disso, utiliza-se o modelo de escoamento e fluxo de encaminhamento de canal de Yu e Jeng (1997), como mostra a Equação 16.

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{2K-\Delta t}{2K+\Delta t} Q_t + \frac{\Delta t}{2K+\Delta t} (I_{t+1} - I_t) \quad (16)$$

em que: Q é a saída, I é o influxo (unidades de Q e I estamos de volume por unidade de tempo) e K é o coeficiente de armazenamento (unidades de tempo), sendo K_s para escoamento e K_c para o fluxo do canal.

ANEXO 2 - INTERFACE DO MODELO DICASM PARAMETRIZADO PARA A BACIA EXPERIMENTAL DE AIUABA

O DiCaSM é usado para modelar recarga nas camadas do solo de uma área, geralmente a uma profundidade de alguns metros. As principais entradas para o modelo são: dados meteorológicos, o uso da terra e tipos de vegetação, altitude terra e cursos de água, e os dados de camada de solo. Além disso, é executado em um intervalo de tempo diário. A Figura 21 mostra a interface do modelo parametrizado para a Bacia Experimental de Aiuaba. Na janela *model data* são especificadas as informações de resolução espacial, localização geográfica e especificações dos arquivos de entrada das informações meteorológicas e de propriedades do solo. Em *model options* são especificados os modelos de infiltração (Phillip ou Green e Ampt), além da distribuição da precipitação e mudanças climáticas, as faixas limítrofes de disponibilidade hídrica no solo, e principalmente as opções de dinâmica da água no solo, destacando-se a condutividade hidráulica do solo saturado. Na janela *Soil/ RRD settings* são definidos as propriedades do solo e densidade relativa das raízes (RRD) para os três maiores grupos de vegetação (culturas, árvores e gramíneas). Na janela *Constants* são especificados os parâmetros constantes de solo e vegetação, como a resistência de solos desnudos, a profundidade de excesso de saturação, o fator de interceptação da vegetação e o conteúdo mínimo de água no solo. Em *Land use* vários parâmetros são ajustados para as diversas fases do ciclo de crescimento da vegetação como: albedo, altura da vegetação, índice de área foliar, profundidade das raízes e resistência estomática. Na aba *Field name* pode ser verificada a nomeação dos parâmetros utilizados pelo modelo. *Output* é a janela que indica o caminho e o nome dos arquivos de saída, resultados do modelo. Uma das janelas mais importantes do DiCaSM, *Data tool*, é o local onde são especificados o desenho, as altitudes, as precipitações etc, ou seja, a discretização distribuída e gerada a rede de fluxo da BEA. A aba *Optimization* promove a otimização do modelo e funciona calculando o Nash e Sutcliffe (1970) valor de eficiência para uma determinada execução DiCaSM. Esse valor representa a capacidade de ajuste entre os valores de fluxo derivados do modelo e aqueles observados.

FIGURA 21 - Interface do modelo DiCaSM parametrizado para a BEA.

DiCaSM
Integrated Hydrological Modelling System
IHMS

CEH **DiCaSM**
 CEH **DiCaSM & MODFLOW**
 CEH **MODFLOW & SWI**

Copyright © Centre For Ecology and Hydrology, CEH - Wallingford, OX10 8BB, UK
 Project Leader: Dr. Ragab Ragab E-Mail: Rag@ceh.ac.uk

DiCaSM: Distributed Catchment Scale Model
 Copyright © 2009 Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, OX10 8BB, UK
 Project Leader: Dr. Ragab Ragab E-Mail: Rag@ceh.ac.uk

Model Options

Model Data | Model Options | Soil / RRD Settings | Constants | Land Use | Field Names | Outputs | Data Tool | Optimization

Model Data is distributed **Infiltration Model Options**

Rain Data: Daily, Distributed
 Accumulate hourly rain for daily run
 Apply Climate Change factors to model
 Update Soil Props with FC, WP & Sat used by model
 Radiation data type: Sunshine Hours, Radiation Units - MJ m⁻² day⁻¹
 Infiltration Mode: Philip, Green-Am
 Source of FC & WP data: From Soil Props table, Use Horizontal KSat as 100 % of vertical KSat
 Initialise Wetland to 2 cells from streamway
 Initialise Stream Water Depth 300 mm Values from DB
 Initialise Soil Water with 27 % of field capacity
 Base Altitude For calculating Water Heads 0
 Climate Change Factors: Change in Rainfall (%) Oct-Mar 0.00, Apr-Sep 0.00, Temperature Change (°C) Oct-Mar 0.00, Apr-Sep 0.00

Soil / RRD Settings

Model Data | Model Options | Soil / RRD Settings | Constants | Land Use | Field Names | Outputs | Data Tool | Optimization

Soil Layer Depths

Layer 1 Bottom	0.20 m	Layer 1 Crop	0.4	Layer 1 Tree	0.85	Layer 1 Grass	0.7
Layer 2 Bottom	0.40 m	Layer 2 Crop	0.3	Layer 2 Tree	0.1	Layer 2 Grass	0.15
Layer 3 Bottom	0.60 m	Layer 3 Crop	0.2	Layer 3 Tree	0.04	Layer 3 Grass	0.1
Layer 4 Bottom	0.73 m	Layer 4 Crop	0.1	Layer 4 Tree	0.01	Layer 4 Grass	0.05

Constants

Model Data | Model Options | Soil / RRD Settings | Constants | Land Use | Field Names | Outputs | Data Tool | Optimization

Bare Soil Resistance	100 s/m	Maximum Actual Evaporation Cut Off Point	0.75
Saturation Excess Depth	0 m	Gash Model Minimum Storm Intensity	0.5 m
Infiltration Excess Layer	1	Initial Average Potential Evap. (Gash: E)ev	0.22 mm/hr
Stream Bed Infiltration/Leakage Percentage	10.00 %	Use Constant Average Rainfall Int.	<input checked="" type="checkbox"/>
Vegetation Interception Factor (Adbr)	0.00	Average Rainfall Int. Constant (Gash: R)ev	1.4 mm/hr
Minimum Soil Water Content	0.005	Typical Rain Event Duration	3 hours
Base Percentage of flow routed to stream	0 %	Catchment Storage/Time Lag Coefficient	1.2
Exponent Function of flow routed to stream	0	Stream Storage/Time Lag Coefficient	0

Field Names

Model Data | Model Options | Soil / RRD Settings | Constants | Land Use | Field Names | Outputs | Data Tool | Optimization

<input checked="" type="checkbox"/> Recharge (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Stream Out (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Wetness Index RZ	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 1 Water (mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Gross Rain (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Leakage (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Water Content of 5cm Layer	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 1 Content
<input checked="" type="checkbox"/> Net Rain (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Surface Runoff (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Water Content of 10cm Layer	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 2 Water (mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Total Interception (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Surface Runoff (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Water Content of Root Zone	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 2 Content
<input checked="" type="checkbox"/> Tree Interception (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Surface Store (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Change in Surface Store (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 3 Water (mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Crop/Grass Interception (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Total Balance (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Change in RZ Water Store (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 3 Content
<input checked="" type="checkbox"/> Flow To Stream (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Water 5cm (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Runoff (Cumecs)	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 4 Water (mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Infiltration (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Water 10cm (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Root Zone Balance (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 4 Content
<input checked="" type="checkbox"/> Potential Evaporation (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Water RZ (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Cell Heads	<input checked="" type="checkbox"/> Heads
<input checked="" type="checkbox"/> Actual Evaporation (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> SMD (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Stream Depth	<input checked="" type="checkbox"/> Stream Depth
<input checked="" type="checkbox"/> Transpiration (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Wetness Index 5	<input checked="" type="checkbox"/> Generate IW Values	
<input checked="" type="checkbox"/> Stream In (mm)	<input checked="" type="checkbox"/> Wetness Index 10		

Outputs

Model Data | Model Options | Soil / RRD Settings | Constants | Land Use | Field Names | Outputs | Data Tool | Optimization

Output Database: C:\DiCaSM_ARQUIVOS\Arquivos_BEA_TCC_NovoKsat\output\casbee\Bea Results.mdb
 Output Rootname: ModelOutput
 Generate Degree Day Data
 Observations: Unspecified
 Generate Text File Output
 Output Root Filename: C:\DiCaSM_ARQUIVOS\Arquivos_BEA_TCC_NovoKsat\output\casbee\ModelOutput
 Averages Root Filename: C:\DiCaSM_ARQUIVOS\Arquivos_BEA_TCC_NovoKsat\output\casbee\CatchmentAverag

Optimization

Model Data | Model Options | Soil / RRD Settings | Constants | Land Use | Field Names | Outputs | Data Tool | Optimization

Single Run Full Calibration Plot

Nash-Sutcliffe Value	0
Total Observed	0 Me3
Total Simulated	0 Me3
Base Percentage of flow routed to stream	2 15 3
Exponent Function of flow routed to stream	0 0.8 3
Stream Bed Infiltration/Leakage Percentage	2 15 3
Catchment Storage/Time Lag Coefficient	15 25 3
Stream Storage/Time Lag Coefficient	10 20 3