

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DANIELLA PEREIRA DOS SANTOS

TESE:

MONITORAMENTO E MODELAGEM DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS
COMO BASE PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM REGIÃO
SEMIÁRIDA

Recife-PE, 2018.

DANIELLA PEREIRA DOS SANTOS

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Recife-PE, 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Centra, Recife-PE, Brasil

S237m Santos, Daniella Pereira dos
Monitoramento e modelagem de processos hidrológicos como
base para a gestão de recursos hídricos em região semiárida /
Daniella Pereira dos Santos. – 2018.
119 f. : il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Recife, BR-PE, 2018.
Inclui referências.

1. Solos - Umidade 2. Sistemas de informação geográfica
3. Balanço hidrológico 4. Ingazeira, Açude de (PE) 5. Bacias
hidrográficas 6. Modelos matemáticos I. Montenegro, Abelardo
Antônio de Assunção, orient. II. Título

CDD 631

DANIELLA PEREIRA DOS SANTOS

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS
COMO BASE PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM REGIÃO
SEMIÁRIDA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em 26/07/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof.º Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco
DEAGRI/UFRPE

Dr. José Marcelo Cordeiro Possas
Agência Pernambucana de Águas e Clima
GPSI/APAC

Prof.º Dr. João Audifax Cesar De Albuquerque Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco
DEAGRI/UFRPE

Prof.ª Drª Suzana Maria Gico Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco
UFRPE

Prof.º Dr. Ricardo de Aragão
Universidade Federal Rural de Pernambuco
UFCG

À minha família base de tudo, meu lar dentro de mim. Aos amigos e irmãos Célia, Diego e Wanderson por toda a ajuda e por ensinar que amizade transcende o conhecimento.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de estar concluído uma etapa tão importante da minha vida.

À minha família, pela dedicação, compreensão e paciência que tiveram durante todo este tempo e que, mesmo à distância, sempre me apoiou em todos os caminhos e decisões.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela formação e estrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho, como também ao coordenador Professor Ênio F. F. Silva, ao vice coordenador Mario Rolim e a Secretária Nádia Casseiro.

Ao Prof. Dr. Abelardo Montenegro, pela orientação.

À FACEPE e a APAC pela concessão de Bolsa de Estudo, e pelo apoio concedido, em particular ao Dr. Marcelo Possas, pela participação no decorrer deste estudo, e pela oportunidade de participação na Alocação de Água no Açude Ingazeira.

A todos os amigos, funcionários e professores da Engenharia Agrícola, pela amizade e convívio ao longo destes quatro anos, especialmente aos que fazem e fizeram parte do LAS (Laboratório de Água e Solo): Adriano, Ailton, Betinho, Carol, Célia, Edivaldo, Eduardo, Fred, Frederico, Hélio, Iug, João Gabriel, Kátia, Liliane, Malaquias, Renato Augusto, Robertson, Sonny, Thayná, Tiago, Valdemir e Vítor.

Aqueles que contribuíram sendo ponte no processo de aprendizado e conduta: Manuel Capano (ex-secretário da Pós-graduação), Jussara (UFPE), Wanderson (ITEP), Professor Ricardo Aragão (UFCG), Professora Werônica Souza (UAG/UFRPE), Professora Suzana Montenegro, Marcelo Possas (APAC) e ao Professor João Audifax Albuquerque Filho.

Aos meus amigos a quem vou levar da Rural para vida: Aninha, Célia, Diego, Jéssyka e Wanderson, pessoas formidáveis e que terão para sempre todo meu respeito e gratidão.

À FINEP (Rede REHIDRO), pelo apoio financeiro e de instrumentação.

À Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA).

Ao CNPq, pelo suporte financeiro ao monitoramento de campo.

Ao Laboratório de Água e Solo por disponibilizar os dados históricos que viabilizaram esta pesquisa, e pela instrumentação disponibilizada para as experimentações hidrológicas.

À todas as outras pessoas que não foram citadas aqui, mas que de alguma forma colaboraram com este trabalho.

RESUMO

SANTOS, Daniella Pereira dos. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Julho de 2018. Monitoramento e modelagem de processos hidrológicos como base para a gestão de recursos hídricos em região semiárida. Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio Assunção Montenegro. Conselheiros: Dr. José Marcelo Cordeiro Possas, Prof. Dr. Dr. João Audifax Cesar De Albuquerque Filho, Prof.^a Dr^a Suzana Maria Gico Montenegro, Prof.^o Dr. Ricardo de Aragão.

O balanço hídrico é essencial em diversas áreas do conhecimento, tais como a agrícola, florestal e hidrológica. Dentro das atividades em meios rurais, algumas práticas estão diretamente relacionadas com o balanço hídrico, como o manejo da irrigação, o abastecimento humano e a dessedentação animal, entre outros. O entendimento do ciclo hidrológico auxilia no processo de planejamento e manejo dos recursos hídricos, em estudos ambientais e projetos de obras hidráulicas, em bacias hidrográficas. Na atual conjuntura, os desafios da gestão ambiental frente aos impactos das mudanças climáticas tornaram mais urgente a necessidade do progresso tecnológico e os resultados da pesquisa científica mais acessíveis e prontos para uso. O monitoramento, a análise e o gerenciamento adequados dos recursos naturais (especialmente a água) exigem a implementação de uma abordagem multidisciplinar conjunta, a fim de criar estratégias racionais e políticas aplicadas para melhores cenários de gestão. O objetivo da pesquisa foi investigar a dinâmica hidrológica da umidade do solo, vegetação, balanço climatológico e índices climáticos em sub-bacia hidrográfica do Açude da Ingazeira, localizada na região semiárida de Pernambuco, calibrar modelo hidrológico e analisar o balanço hídrico e a vazão da bacia hidrográfica do rio Ipanema com o modelo SWAT. Foram encontradas diferenças entre as umidades em função da cobertura vegetal e uma diminuição acentuada nos totais de precipitação registrados na bacia, no período de 2011 a 2017 juntamente com uma tendência de aumento das temperaturas e crescente aumento do índice de aridez, resultando na diminuição da umidade e aumento na evapotranspiração na área da bacia apresentando deficiência hídrica para a região. Assim, verifica-se que o monitoramento e o levantamento hidrológico forneceram uma ordem de grandeza da umidade do solo e suas correlações com os dados hidro-climáticos, contribuindo para melhor gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Ipanema-PE. Mesmo verificando grandes limitações de medições experimentais na bacia do Ipanema, o modelo SWAT apresentou um ajuste aceitável para dados mensais, evidenciado por um NASH de 0,85 e um R^2 de 0,88 na calibração. Embora os valores encontrados para o NASH e R^2 sejam considerados aceitáveis, espera-se que com a continuidade das medições de campo, obtenha-se aprimoramento da ferramenta aqui disponibilizada.

Palavras-chave: umidade do solo; SIG; balanço climatológico, balanço hídrico; SWAT.

ABSTRACT

SANTOS, Daniella Pereira dos. Rural Federal University of Pernambuco. July 2018. Monitoring and modeling of hydrological processes as a basis for the management of water resources in the semi-arid region. Advisor: Prof. Dr. Abelardo Antônio Assunção Montenegro. Advisors: Dr. José Marcelo Cordeiro Possas, Prof. Dr. Dr. João Audifax Cesar De Albuquerque Filho, Prof.^a Dr^a Suzana Maria Gico Montenegro, Prof.^o Dr. Ricardo de Aragão.

The water budget is essential in several areas of knowledge, such as agriculture, forestry and hydrology. Within the activities in rural environments, some practices are directly related to the water budget, such as irrigation management, human supply and animal welfare, among others. The understanding of the hydrological cycle assists the water resources planning and management, in environmental studies and hydraulic projects, in watersheds. At the current scenario, the challenges of environmental management in the face of the impacts of climate change have increased the need for technological advances and the results of scientific research more accessible and ready for use. Proper monitoring, analysis and management of natural resources (especially water) require the implementation of a joint multidisciplinary approach to create rational and applied policies for better management scenarios. The objective of the research was to investigate the hydrological dynamics of soil moisture, vegetation, climatological balance and climatic indexes in the sub-basin of the Ingazeira Dam, located in the semi-arid region of Pernambuco, calibrate the hydrological model and analyze the water balance and watershed of the Ipanema River with the SWAT model. Differences were found between the moisture content and the vegetation cover and a marked decrease in rainfall totals recorded in the basin from 2011 to 2017. Moreover, increasing temperatures and aridity index trends, resulting in a decrease in humidity and increased evapotranspiration have been observed in the basin area, presenting water deficiency for the region. Thus, it is verified that hydrological monitoring and surveying provided an order of magnitude of soil moisture and its correlations with hydro-climatic data, contributing to better management of water resources in the Ipanema-PE river basin. In spite of high limitations of experimental measurements in the Ipanema basin, the SWAT model presented an acceptable adjustment for monthly data, evidenced by a NASH of 0.85 and an R^2 of 0.88 in the calibration. Although the values found for NASH and R^2 are considered acceptable, it is expected that with the continuity of the field measurements, an improvement of the such management tool will be obtained and available.

Keywords: soil moisture; SIG; climatic balance, water balance; SWAT.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I. REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1. Processos do ciclo hidrológico.....17

CAPÍTULO II. ESTUDO DE CASO RESERVATÓRIO INGAZEIRA.

Figura 1. Localização do Reservatório Ingazeira na Bacia.....40

Figura 2. Chuva e evaporação (mensais médias) na bacia do Açude Ingazeira com distinção do período chuvoso ou úmido (janeiro a julho) e seco ou de estiagem (agosto a dezembro).....41

Figura 3. Reunião de Alocação de Água do Reservatório Ingazeira, realizada na Câmara de Vereadores do município de Venturosa-PE.....43

Figura 4. Tipos de usos do Açude Ingazeira.....44

Figura 5. Histórico de volume do Reservatório da Ingazeira.....45

Estados Hidrológicos do Reservatório Ingazeira para um Ciclo de Descarga de 19 meses em função das demandas previstas ($Q_{atribuida} = 14,0 \text{ L s}^{-1}$).....48

CAPÍTULO III. DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO, BALANÇO CLIMÁTICO E DINÂMICA DA VEGETAÇÃO EM REGIÃO SEMIÁRIDA.

Figura 1. Localização do município de Venturosa - PE, na Bacia do Ingazeira.....57

Figura 2. Medição da umidade do solo. Em A: sonda de nêutrons; B: solo descoberto (SD), cobertura morta (CM), barramento em palma (BP); C: cobertura natural (CN).....58

Figura 3. Mapa das estações Pluviométricas da Bacia do Açude Ingazeira -PE.....59

Figura 4. Dinâmica da umidade do solo nas camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm no Argissolo Amarelo Distrófico típico, para condições de cobertura natural (CN), parcela com solo descoberto (PD), parcela com cobertura morta (CM) e parcela com barramento de palma (BP) por meio de sonda de nêutrons no período de 2011 a 2017.....63

Figura 5. Valores médios da umidade do solo na profundidade de 20 cm para diferentes condições de cobertura vegetal, medida por sonda de nêutrons.....64

Figura 6. Dinâmica da umidade do solo nas camadas de 0-20 cm, no Argissolo Amarelo Distrófico típico, para condições de cobertura natural (CN), parcela com solo descoberto (PD), parcela com cobertura morta (CM) e parcela com barramento de palma (BP) por meio de sonda de nêutrons no período de 2011 a 2017.....65

Figura 7. Distribuição no círculo de correlações das umidades para o ano de 2011 (A), 2012 (B), 2013 (C), 2014 (D), 2015 (E), 2016 (F), 2017 (G)67

Figura 8. Extrato do balanço hídrico mensal, deficiência, excedente, retirada e reposição, da Bacia do Rio Ipanema-PE (Ingazeira) durante os anos de 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, respectivamente.....74

Figura 9. Mapas temáticos de índice de aridez na Bacia do Rio Ipanema-PE.....77

Figura 10. Distribuição temporal do SPI para o período de 1985 a 2016 na Bacia do Rio Ipanema-PE.....	79
Figura 11. Índice de vegetação IVDN (A) e temperatura de superfície do solo (B) na Bacia do Rio Ipanema (Ingazeira), para o período de 2011 a 2017.....	81
Figura 12. Comparativo das umidades por satélite e sonda de nêutrons e volume (m ³) do Reservatório de da bacia do Ingazeira.....	83
CAPÍTULO IV. Gestão de recursos hídricos em bacia do semiárido utilizando modelagem hidrológica	
Figura 1. Localização da bacia do Ipanema (Estados de Alagoas e Pernambuco).....	95
Figura 2. Localização espacial dos postos pluviométricos na bacia do Rio Ipanema (Santana do Ipanema)	98
Figura 3. Mapa modelo de elevação digital do (3A); Mapa de uso e ocupação do solo (3B); Mapa de solos (3C)	99
Figura 4. Delineamento das sub-bacias da bacia do Mimoso realizado no ArcSWAT.....	103
Figura 5. Hidrograma da Calibração mensal (A) da bacia do Rio Ipanema; em B dispersão dos dados.....	105
Figura 6. Comparação de umidade no solo do SWAT e da Sonda de nêutrons (mm) durante o período (janeiro 2011 - dezembro 2013).	106
Figura 7. Validação das vazões do Swat com sonda de nêutrons (m ³ s ⁻¹) durante (janeiro 2016 - dezembro 2017)	107
Figura 8. Análise conjunta de dados de umidade com os valores da umidade de saída do modelo SWAT; A: correlação entre SWAT e LAFDM; em B: correlação entre SWAT e sonda de nêutrons; em C: distribuição das umidades no período de validação.....	108
Figura 9. Relação da evapotranspiração real e a potencial para o período de 01/01 de 2017 a 30/04 de 2018.....	110
Figura 10. Vazões calibradas com parâmetros no Alto do Ipanema-PE (AI) e em Santana do Ipanema-AL (SI) e vazão observada do Reservatório Ingazeira localizado na bacia 5.....	113
Figura 11. Correlação entre a vazão simulada na Bacia SI e a vazão no reservatório incluído seus usos.....	114

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II. ESTUDO DE CASO RESERVATÓRIO INGAZEIRA

Tabela 1. Usos múltiplos da água no açude (Ingazeira)	40
Tabela 2. Estado hidrológico do reservatório Ingazeira de acordo com os usos.....	41
Tabela 3. Usos múltiplos da água no açude (Ingazeira).....	44
Tabela 4. Estado Hidrológico do reservatório Ingazeira e condição de uso da água em 19 de dezembro de 2017.....	47

CAPÍTULO III. MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO, BALANÇO CLIMATOLÓGICO E DINÂMICA DA VEGETAÇÃO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Tabela 1. Classificação quanto ao nível de susceptibilidade à desertificação com o auxílio do uso do Índice de Aridez, adaptada da metodologia de Matallo Júnior (2001)	61
Tabela 2. Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI segundo Mckee, Doesken, Kleist (1993).....	62
Tabela 3. Resumo das componentes principais para os anos de avaliação da umidade.....	66
Tabela 4. Dados mensais para o balanço normal climatológico para os anos de 2011 a 2017 da Bacia do rio Ipanema-PE (Ingazeira).....	72

CAPÍTULO IV. GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIA EM BACIA DO SEMIÁRIDO UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

Tabela 1. Postos Climatológicos selecionados para o projeto.....	97
Tabela 2. Parâmetros de calibração com faixas de valores e métodos de cálculos para o SUFI2.....	100
Tabela 3. Valor de calibração dos parâmetros do SWAT, utilizando o SWAT-CUP.....	103
Tabela 4. Valores dos métodos estatísticos para a calibração dos dados de escoamento superficial.....	105
Tabela 5. Valores dos métodos estatísticos para validação dos dados de umidade.....	109
Tabela 6. Principais componentes do balanço hídrico simulado.....	109
Tabela 7. Principais componentes do balanço hídrico simulado sub-bacia 5.....	111
Tabela 8. Parâmetros de calibração da Bacia do Alto Ipanema.....	112
Tabela 9. Principais componentes do balanço hídrico simulado para sub-bacia 5, parâmetros utilizados por Fontes Junior (2016) na Bacia do Alto Ipanema.....	112

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO I.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.2. Ciclo Hidrológico	16
2.3. Evapotranspiração	17
2.3.1. Evapotranspiração de Referência.....	17
2.3.2. Evapotranspiração real	19
2.3.3. Transpiração.....	20
2.4. Umidade do solo	22
2.5. Vazão	24
2.6. Balanço Hídrico	25
REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO II	39
ESTUDO DE CASO RESERVATÓRIO INGAZEIRA	39
2.8.1. Estudo de caso Reservatório Ingazeira	40
REFERÊNCIAS	50
CAPÍTULO III.....	51
DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO, BALANÇO CLIMATOLÓGICO E DINÂMICA DA VEGETAÇÃO EM REGIÃO SEMIÁRIDA	51
INTRODUÇÃO	54
MATERIAL E MÉTODOS.....	56
Umidade do solo	57
Balanço hídrico mensal climatológico	60
Índice de aridez	61
Índice de precipitação padronizada e índices de vegetação	61
RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
Umidade do solo	63
Balanço hídrico normal climatológico	72
Índice de Aridez	76
Índice de precipitação padronizada e índice de vegetação	79
CONCLUSÕES.....	83

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
CAPÍTULO IV	89
GESTÃO DE RECURSOS HIDRICOS EM BACIA DO SEMIÁRIDO UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA	89
INTRODUÇÃO	92
MATERIAL E MÉTODOS	94
2.1. Caracterização da área de estudo	94
Clima	95
Apresentação do modelo	96
Dados de entrada utilizados no Modelo SWAT	97
Calibração e Validação com dados de umidade	101
Análise do desempenho das simulações para a bacia	101
RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
Calibração e validação com eventos de vazão	103
Balço hídrico	109
CONCLUSÕES	114
REFERENCIAS	115

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são de suma importância econômica e estratégica para o desenvolvimento regional. O problema da escassez e excesso de água vem se agravando ao longo do tempo e o estudo das bacias hidrográficas por meio de monitoramento e modelagem, torna-se essencial para o planejamento, gerenciamento e uso deste recurso. Não somente a falta de água com qualidade de uso, mas também o seu excesso tem causado uma série de problemas. Regiões urbanizadas vêm sofrendo frequentemente com enchentes provenientes da falta de planejamento e de estudos que levem em consideração o impacto ambiental devido à utilização dos recursos hídricos disponíveis e alterações no uso e ocupação do solo. Por outro lado, regiões Agrícolas e pecuárias vêm sofrendo com a seca extrema.

A região da Bacia do Ipanema que cobre os Estados de Alagoas e Pernambuco, em sua maioria em região semiárida, apresenta agricultura diversificada, aproveitando, as terras férteis dos vales, os pés de serra e os terraços pouco elevados. Feijão, milho, algodão herbáceo são algumas das culturas produzidas, assim como frutíferas como manga, caju, banana. Essa região também possui grandes fazendas de criação de gado castrado, leiteiro ou de corte, em regime de pastoreio extensivo. Isso torna essa bacia ainda mais importante, em particular a bacia localizada no município de Venturosa.

Estudos que englobam o desenvolvimento dessas atividades dentro da bacia são de grande valia para a economia da região, assim como pesquisas que visam o desenvolvimento dessas atividades e ou a conservação das mesmas. Os recursos hídricos devem ser gerenciados para que essas atividades ocorram de forma adequada e para isso há necessidade de gestão da água na bacia do Ipanema.

Adicionalmente, tais estudos possibilitam o aumento da disponibilidade hídrica por meio de técnicas de captação in situ. Entretanto, deve-se ressaltar a carência de estudos que analisem a efetividade de procedimentos e práticas conservacionistas que venham a proporcionar o incremento na renda de agricultores familiares, bem como assegurar a recuperação e/ou manutenção de áreas produtivas, e proteção dos recursos hídricos disponíveis. A gestão desses recursos para proteção dos mesmos é de fundamental importância para a continuidade dessas áreas de ocupação.

A modelagem hidrológica é instrumento tanto para avaliação quanto para prevenção de processos de degradação em bacias hidrográficas. Com essa ferramenta é possível tomar decisões a respeito do uso múltiplo da água e assim melhor gerir esse recurso na bacia.

CAPÍTULO I

REVISÃO DE LITERATURA

2. REVISÃO DE LITERATURA

A chuva é um dos componentes mais relevantes do ciclo hidrológico, pois controla o balanço hídrico da bacia hidrográfica. Por sua capacidade de produzir o escoamento, a chuva é uma forma de precipitação muito importante para hidrologia (ZANG e SRINIVASAN, 2009; TUCCI, 2013; GÁLVAN et al., 2014). A representação com maior precisão da distribuição das chuvas (e.g. os registros de postos pluviométricos) é essencial para modelagem quantitativa da água, sendo que o modelo não será capaz de gerar previsões precisas se a chuva não é adequadamente caracterizada (BEVEN, 2001; GÁLVAN et al., 2014).

A lâmina e intensidade das chuvas podem variar rapidamente no espaço e no tempo, especialmente em chuvas convectivas (chuvas de curta duração, porém com alta intensidade). Sendo assim, fazem-se necessárias interpolações, dos dados nos postos pluviométricos, para melhor representação das lâminas e variabilidade espacial da chuva na bacia (BEVEN, 2001). Arnold et al. (2012) descrevem que alguns dos resultados ineficientes publicados em estudos com o uso de modelos hidrológicos podem ser parcialmente atribuídos à cobertura espacial ineficaz dos dados de chuva, devido ao inadequado número de postos de monitoramento ou uma configuração espacial que não consiga capturar a espacialidade da chuva.

Além dos dados de chuva obtidos por medições pontuais, eles podem ser obtidos via radares e satélites. Esses últimos são geralmente recomendados quando não existe o monitoramento convencional, ou auxiliando, por exemplo, no preenchimento de falhas na série histórica (DILE e SRINIVASAN, 2014).

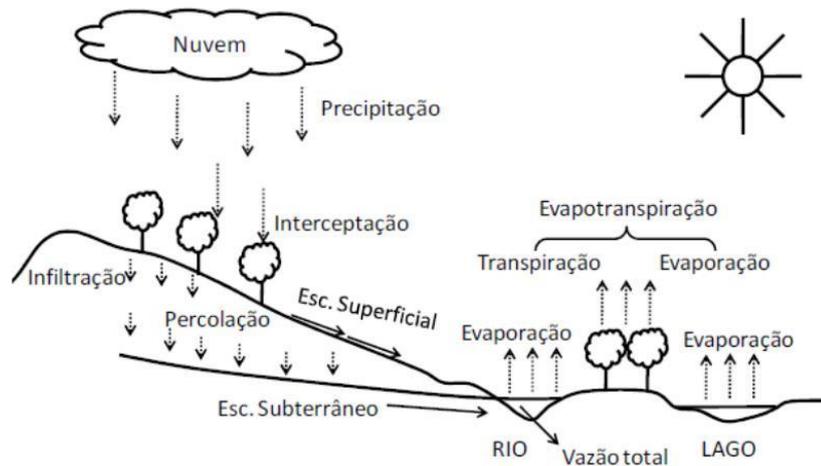
Em região semiárida do Nordeste brasileiro a precipitação é limitada, reduzindo disponibilidade de recursos hídricos. O regime pluviométrico é irregular, com chuvas mal distribuídas temporal e espacialmente, e solos rasos com baixa capacidade de retenção de água. Isto torna essencial a gestão das águas nas bacias hidrográficas, além da proteção dos mananciais para desenvolvimento sustentável da região, conforme (MONTENEGRO et al., 2013).

2.2.Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é um fenômeno de circulação fechado da água dentro do globo terrestre, impulsionado pela energia solar, gravitacional e de rotação da terra (SILVEIRA, 2013). É composto pelas três fases da água, e vários processos, entre eles: precipitação, evaporação, interceptação, transpiração, infiltração, escoamento superficial (Figura 1). A

hidrologia, é a ciência que descreve a ocorrência e o comportamento de água por toda Terra (SAVENIJE, 2009). Sendo a água componente fundamental para todos os organismos vivos, a necessidade do estudo dos componentes hidrológicos é facilmente compreensível.

Figura 1. Processos do ciclo hidrológico.



Fonte: Adaptado de KOBAYAMA et al. (2011).

Tradicionalmente, a hidrologia é dividida em duas partes: Hidrologia Física, que se concentra na compreensão do sistema hidrológico e das técnicas necessárias para prever e modelar os processos físicos; e a Hidrologia Aplicada, a qual se preocupa com a gestão dos recursos hídricos (CLIFFORD, 2002). Ao longo das últimas décadas, a ampliação da tecnologia tem permitido o melhoramento das medições das variáveis hidrológicas, o que acarretou avanços fundamentais na compreensão conceitual dos processos hidrológicos.

2.3. Evapotranspiração

2.3.1. Evapotranspiração de Referência

Um dos requisitos fundamentais para estimar a quantidade de água necessária para uma produção agrícola ideal é entender efetivamente as relações entre as condições climáticas e a evapotranspiração (ALENCAR et al., 2011), sendo esta a soma dos componentes de transpiração e evaporação. Sua estimativa é de fundamental importância, pois estabelece o consumo de água pelas plantas, e por consequência, a lâmina de irrigação a ser aplicada pelo sistema (MANTOVANI et al., 2013), bem como o consumo hídrico na bacia.

A estimativa das perdas por evaporação e transpiração é importante para atividades como projetos de irrigação, gerenciamento de reservatórios e planejamento de uso e outorga de recursos hídricos (BORGES e MENDIONDO, 2007). Esta pode ser determinada de forma

direta ou indireta. Segundo Bernardo (2013), os principais métodos diretos são: lisímetros; parcelas experimentais no campo com equipamentos de medição da evapotranspiração total durante ciclo da cultura; controle da umidade do solo e método da “Entrada-saída” em grandes áreas.

A taxa evapotranspirométrica é normalmente expressa em lâmina por unidade de tempo, sabendo que a lâmina é a razão de volume por área, a evapotranspiração representa o volume de água perdido em determinada área durante certo tempo (CARVALHO e OLIVEIRA, 2011).

Estudos da evapotranspiração de referência (ET_o) se tornam mais importantes em regiões caracterizadas pela irregularidade espacial e temporal da precipitação, e pela escassez de reservas naturais de água, como nas áreas áridas e semiáridas do Nordeste do Brasil (MOURA et al., 2013). Como os elementos da variação climática influenciam na ET_o, estabelecer métodos confiáveis e práticos para estimá-la em regiões distintas é de grande importância para gerenciamento adequado dos recursos hídricos (BUZINARO e ROLIM, 2015).

A complexidade e dificuldade para determinar ET (evapotranspiração) no campo foram atenuadas pelos avanços tecnológicos nos sistemas de coleta de dados eletrônicos que monitoram direta ou indiretamente os diferentes processos envolvidos (MARIANO et al., 2015). Existem diferentes métodos para calcular a ET_o que utilizam um ou mais elementos meteorológicos, tais como: temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e vento (BRIXNER et al., 2014).

Utilizando-se dados meteorológicos como entrada, diversas equações para estimativa da ET_o têm sido desenvolvidas com variável complexidade e requerimento de dados, constituindo-se em métodos indiretos que podem ser classificados com base no requerimento de dados combinados: (Penman-Monteith e FAO-24 Penman), de radiação: (FAO-24 Radiação e Priestley-Taylor) e de temperatura: (FAO-24 Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Camargo-71) (BORGES JUNIOR et al., 2012).

A equação de Penman-Monteith – FAO é considerada como o método-padrão de estimativa da ET_o devido à característica de interatividade entre a base física e os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos da planta (PALARETTI et al., 2014).

A estimativa da evapotranspiração diária pelo método padrão FAO Penman-Monteith é considerada a mais apropriada por representar influência da componente do balanço de energia e da componente aerodinâmica e pode ser representada como segue na equação descrita abaixo (ALLEN et al., 1998):

$$ET_{oPM} = \frac{0,408 \cdot \Delta (Rn - G) + \frac{Y \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + Y(1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_o - evapotranspiração de referência, mm.dia^{-1} ; δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{KPa.}^\circ\text{C}^{-1}$; λ - calor latente de evaporação, MJ.kg^{-1} ; r_c - resistência do dossel da planta, s.m^{-1} ; r_a - resistência aerodinâmica, s.m^{-1} ; Rn - saldo de radiação à superfície, $\text{kJ.m}^2\text{s}^{-1}$; G - fluxo de calor no solo, $\text{kJ.m}^2\text{s}^{-1}$; γ - constante psicrométrica, $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$; T - temperatura média do ar, $^\circ\text{C}$; U_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m.s^{-1} ; DPV - déficit de pressão de vapor, kPa ; 900 - fator de transformação de unidades, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A equação empregada no método de Priestley-Taylor (1972), desenvolvido na Austrália é uma simplificação da equação de Penman (1948), onde é abordado somente o termo adiabático. Esse termo é multiplicado por um coeficiente (α), que representa em termos percentuais a contribuição média do termo aerodinâmico da equação de Penman. A equação é expressa por:

$$ET_{o_{PT}} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (Rn - G) \quad (2)$$

Em que: α é o coeficiente de Priestley-Taylor; λ - calor latente de evaporação, MJ.kg^{-1} ; Rn - saldo de radiação à superfície, $\text{KJ.m}^2\text{s}^{-1}$; G - fluxo de calor no solo, $\text{KJ.m}^2\text{s}^{-1}$; γ - constante psicrométrica, $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$;

O método de Hargreaves-Samani (1985) foi estabelecido na Califórnia em condições semiáridas a partir de dados adquiridos em lisímetro gramado (PEREIRA et al., 1997). Neste caso, podem-se obter os valores de evapotranspiração de referência, em mm dia^{-1} , pelo método de Hargreaves - Samani, na equação expressa por:

$$ET_{o_{HS}} = 0,0023(Tm + 17,8) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} * Ra * 0,408 \quad (3)$$

Em que: ET_o - é a evapotranspiração de referência, mm.dia^{-1} ; Ra - é a radiação solar no topo da atmosfera, mm.dia^{-1} ; T_m - temperatura média diária, $^\circ\text{C}$; T_{\max} - temperatura máxima, $^\circ\text{C}$; T_{\min} - temperatura mínima, $^\circ\text{C}$; 0,408 - fator de conversão da radiação solar de MJ m^{-2} para mm.dia^{-1} .

O referido método também é recomendado pela FAO (ALLEN et al., 1998) quando há somente disponibilidade de dados de temperatura do ar no local de estudo.

2.3.2. Evapotranspiração real

A evapotranspiração real é definida como a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais ou existentes de fatores atmosféricos e umidade do solo (MATZENAUER, 1992). A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial. De acordo com Tucci (2007), as variáveis obtidas no

lisímetro, como escoamento, infiltração, armazenamento e percolação, permitem medir a evapotranspiração real.

Existem diversos métodos destinados à estimativa da evapotranspiração real, sendo considerados dois grandes grupos, a saber, métodos diretos e métodos indiretos. Os primeiros consistem de medidas *in situ* realizadas através de lisímetros (de pesagem e/ou de drenagem), o método do balanço hídrico e controle da umidade do solo. Os demais se baseiam em estimativas através de dados meteorológicos, avaliados por fórmulas empíricas. Dentre os quais, pode-se mencionar o método do balanço de energia, o método da razão de Bowen e o método das correlações turbulentas (PEREIRA et al., 1997).

De acordo com Allen et al. (2002), os métodos mencionados anteriormente apresentam alta confiabilidade, pois são capazes de gerar medidas com boa precisão. Porém, ainda de acordo com Allen et al. (2002), os mesmos apresentam limitações quando se pretende fazer estimativas da evapotranspiração para grandes áreas, pois as estimativas feitas com esses métodos são baseadas em dados pontuais, para um local específico, e são integradas para a área que envolve o local da medição, levando-se em consideração que a evapotranspiração é uniforme na referida área. O fator complicador é que existem variações em uma área quanto à: cobertura de culturas, alturas, fase fenológica, necessidades hídricas, e todos esses fatores são determinantes na evapotranspiração, daí não ser adequado considerá-la uniforme em escala regional.

As medições de evapotranspiração real geralmente possuem custos elevados, uma vez que sua realização se dá *in situ*, demandando tempo e utilização de equipamentos onerosos.

Assim, as técnicas propostas com a utilização do sensoriamento remoto entram como uma alternativa efetiva de fornecer valores de evapotranspiração real. Essa metodologia tende a ser promissora por fornecer valores que podem ser especializados em escala regional, o que permite se distinguir dos demais métodos por não se restringir a uma estimativa local (pontual), desta forma corroborando e subsidiando o desenvolvimento e a implementação das técnicas de agricultura de precisão e monitoramento de bacias hidrográficas, voltado ao uso sustentável.

2.3.3. Transpiração

O processo pelo qual as plantas eliminam a água para a atmosfera na forma de vapor é designado transpiração. Geralmente, esse processo acontece nas folhas, mas pode ocorrer, também, nas lenticelas de plantas lenhosas. Em folhas, a evaporação ocorre a partir das paredes celulares em direção aos espaços intercelulares que contêm ar. A partir dos espaços

intercelulares, ocorre a difusão da molécula de água para a atmosfera por meio dos estômatos. Os estômatos são essenciais na regulação da taxa transpiratória, juntamente com a camada de ar adjacente à folha (PEREIRA et al., 2002).

Quando ocorre incidência direta da radiação solar, a transpiração é fundamental, pois impede que as folhas fiquem submetidas ao superaquecimento (PEREIRA et al., 1997). Devido ao fato de a energia do sol ser necessária para a realização da fotossíntese, no processo evolutivo, a folha evoluiu como um órgão que maximiza a superfície (maior relação área/volume), o que proporciona, ao mesmo tempo, uma maior superfície de transpiração (RAVEN et al., 2001).

Na natureza o solo, as plantas e a atmosfera podem ser considerados como componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico, no qual processos de fluxo estão interligados como elos de uma corrente (REICHARDT, 1990). Neste sistema, é importante e aplicável o conceito de potencial hídrico, ou seja, o fluxo de água se move dos locais de maior potencial para os de menor potencial. Ou seja, o fluxo sempre se dirige em direção do gradiente de potencial negativo.

A quantidade de água transpirada diariamente é grande em relação às trocas de água na planta, de modo que se pode considerar o fluxo através da planta, em curtos períodos de tempo, como um processo em regime permanente. As diferenças de potencial, em distintos pontos dentro do ecossistema são proporcionais à resistência do fluxo. A menor resistência ao fluxo é encontrada na planta. E a maior resistência é detectada, no fluxo das folhas para atmosfera, devido à mudança do estado líquido para o vapor. A passagem para atmosfera ocorre através dos estômatos localizados nas folhas. O transporte de água desde as folhas até o ar atmosférico ocorre também por difusão de vapor, sendo o mesmo proporcional a tensão do vapor de água. A umidade relativa do ar, ou seja, a relação entre a tensão real e a de saturação de vapor, relaciona-se exponencialmente com o potencial hídrico da planta (REICHARDT, 1990).

Assim a evaporação e a transpiração representam uma fração significativa do movimento da água através do ciclo hidrológico.

Uma das principais influências de vegetações ocorre já na interceptação das chuvas pelas copas das árvores, quando se dá o primeiro fracionamento da água, onde uma parte é temporariamente retida pela massa vegetal e em seguida evaporada para a atmosfera (ARCOVA et al., 2003). A interceptação é a retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo, podendo ocorrer devido à vegetação ou outra forma de obstrução ao escoamento.

A cobertura vegetal, através da interceptação, influencia a redistribuição da água da chuva, em que as copas das árvores formam um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e o processo de infiltração.

Portanto, o umedecimento do solo é favorecido e a variação de vazão ao longo do ano, reduzida, além do retardamento dos picos de cheia. Alguns estudos verificam que a floresta nativa, entre os ecossistemas vegetais, atua no ciclo hidrológico de maneira significativa, pois proporciona melhores condições de infiltração da água da chuva (OLIVEIRA JÚNIOR e DIAS, 2005).

2.4. Umidade do solo

O conteúdo de água de um solo é um de seus atributos mais importantes para gerenciamento dos recursos hídricos como componente do balanço hídrico, e um dos mais variáveis. O deslocamento e reciclagem de vários elementos químicos, o desenvolvimento dos processos bioquímicos do solo, o crescimento das plantas e uma série de outras propriedades físicas do próprio solo como densidade, resistência à penetração e tensão cisalhamento, são significativamente influenciadas pelo teor de água (CHICOTA, 2004).

Dentre os fatores que influem na variabilidade do conteúdo de água no solo, encontram-se topografia, propriedades do solo, tipo e densidade de vegetação, profundidade do lençol freático, precipitação, radiação solar e outros fatores meteorológicos (MEDEIROS e CLARKE, 2007).

Pesquisas teóricas e experimentais sobre a de umidade do solo em função do tempo foram realizadas recentemente para obter uma representação aceitável de muitos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais (MONTENEGRO et al., 2018; CORRADINI, 2014; ROMANO, 2014) para o campo (VERECKEN et al., 2008; PENNA et al., 2009; ZEHE et al., 2010; OJHA et al., 2014; MARTINI et al., 2015) e em escala de bacia (FANG e LAKSHMI, 2014; SCHROTER et al., 2015).

A umidade do solo influencia, por exemplo, o fornecimento de vapor de água para a atmosfera através dos processos de evaporação e evapotranspiração da superfície terrestre, recarga de aquíferos, transporte sub- superficial de poluentes, temporização da irrigação e transformação chuva-escoamento.

Para eventos de chuva leve a moderada, o escoamento superficial é geralmente afetado por uma perda significativa devido à infiltração, que é tipicamente expressa em função da taxa

de precipitação, condutividade hidráulica saturada do solo e umidade inicial do solo, antes de um evento de precipitação. Neste contexto, na representação matemática da transformação chuva / escoamento na escala de campo / bacia, o processo de infiltração deve ser descrito considerando a heterogeneidade espacial da taxa de precipitação, condutividade hidráulica do solo e umidade inicial do solo (MORBIDELI et al., 2016).

A prática de conservação do solo com uso de cobertura vegetal no solo é uma técnica muito recomendada para as regiões semiáridas, uma vez que contribui para o desenvolvimento das culturas, reduz a perda de água, diminui a erosão superficial e incrementa a umidade (MONTENEGRO et al., 2013).

Santos et al. (2010), em estudo em parcelas experimentais no semiárido brasileiro, observaram que a condição da superfície do solo teve uma expressiva influência sobre a variação do teor de água no solo, tanto em períodos secos quanto em períodos chuvosos. Estes mesmos autores observaram também que a presença de vegetação natural contribuiu para reter maiores teores de água no solo, durante todo o período chuvoso, embora nessa pesquisa o barramento em palma tenha se destacado retendo maior umidade.

A umidade inicial do solo e a condutividade hidráulica do solo são as duas grandezas principais inclusas na maioria dos modelos de infiltração e estritamente ligadas com a geração de escoamento superficial (MORBIDELI et al., 2016).

Em uma bacia hidrográfica de 1,6 km² localizado na Umbria região central, Itália, Morbideli et al. (2016) verificaram que para os eventos de chuva que produzem tipicamente inundação, a heterogeneidade espacial da umidade não afeta significativamente a natureza do hidrograma de escoamento superficial na escala de pequena bacia hidrográfica, onde uma única medida de umidade pode ser suficiente para simulações de precipitação / escoamento (MORBIDELI et al., 2016). Obviamente, para escala de bacias hidrográficas, faz-se necessário realizar medições espacializadas.

A quantidade e distribuição vertical não linear da água do solo depende das propriedades físicas do solo (TIMM et al., 2006) e dentre outros fatores, das condições climáticas anteriores e atuais (SENEVIRATNE et al., 2010). A umidade do solo presente na camada superficial mostra uma variação espaço-temporal máxima em comparação com as camadas inferiores do solo (CHEN et al., 2010; LI et al., 2016). Também desempenha um papel importante no controle da intensidade do uso da água em bacias agrícolas. Portanto, uma boa percepção da variabilidade da umidade do solo trará os pesquisadores mais próximos na compreensão da

hidrologia em bacia, dos processos de cultivo, do controle da irrigação e do manejo da água de uma melhor maneira.

Brocca et al. (2017) revisaram técnicas para monitorar a umidade do solo para aplicações hidrológicas e descreveram o uso de dados de umidade do solo in situ e por satélite para melhorar as previsões hidrológicas. Zhuo et al. (2016) exploraram as vantagens da umidade do solo via satélite na modelagem hidrológica e sugeriram uma avaliação, representação e compatibilidade da umidade do solo via satélite em um modelo hidrológico. Além disso, recomenda-se modificar o modelo hidrológico para torná-lo compatível com a variação da umidade do solo em campo.

Li et al. (2016) avaliaram a variação espaço-temporal nas variáveis de umidade e balanço hídrico do solo sob diferentes gradientes de precipitação na bacia do rio Amarelo, China. Os resultados revelaram que a umidade do solo mostrou uma relação não linear com a precipitação e a evapotranspiração, porém todas as variáveis exibiram uma tendência decrescente anual.

Nilawar et al. (2017), trabalhando com dados de umidade do satélite AMSR2, verificaram que os resultados do SWAT com a umidade do solo são capazes de simular adequadamente a vazão e pode ser efetivamente aplicada na modelagem hidrológica.

A disponibilidade de água no solo desempenha um papel vital na produtividade das culturas. Modelos agro-culturais e hidrológicos costumam usar o esgotamento da água do solo como o gatilho para as operações de irrigação. Assim, a umidade do solo é uma variável fundamental do estado hidrológico, que é de grande interesse entre os agricultores, meteorologistas e hidrólogos (BROCCA et al., 2010; ZUCCO et al., 2014).

Rajib et al. (2016) avaliaram a área de superfície e umidade da superfície espacial da raiz distribuída em duas bacias hidrográficas de Indiana, EUA, para melhorar a previsibilidade hidrológica da SWAT. Foi indicado a partir dos resultados que a umidade do solo da zona radicular pode desempenhar um importante papel na calibração do modelo. A Ferramenta de Avaliação de Água e do Solo (SWAT) tem sido usada por muitos pesquisadores para avaliar a umidade do solo na escala de bacia.

2.5. Vazão

A vazão é um importante componente de processo-base para realização de estudos hidrológicos, pois é componente do balanço hídrico na fase terrestre (ARNOLD et al., 2012).

Porém, é relativamente oneroso medi-la diretamente, em um intervalo de tempo curto (e.g. 5 em 5 minutos) e por longos períodos consecutivos. Há muitas alternativas de se medir tal descarga. O nível de água é a maneira indireta mais simples para obter tais resultados (BEVEN, 2001). Segundo Jacon e Cudo (1989) a curva-chave é a equação que relaciona a descarga com o nível de água em uma seção de controle, sendo que essa função depende das características geométricas e hidráulicas do canal monitorado.

A separação dos escoamentos é outro passo a ser realizado em estudos hidrológicos (ARNOLD et al., 1995). O escoamento total pode ser dividido em três tipos diferentes: escoamento superficial, sub-superficial e de base. Pelo fato da separação entre os escoamentos superficial e sub-superficial ser relativamente difícil de ser realizada, quando são ausentes medições específicas realizadas em campo, vários métodos desconsideram essa separação (e.g. NATHAN e MCMAHON, 1990).

O uso de tecnologias (e.g. computadores e sensores de medição) tem auxiliado na descrição de tais processos, bem como, a facilidade em representar os fenômenos em escala temporal e espacial (Committee on Challenges and Opportunities in the Hydrologic Sciences, 2012). Tão importante quanto o correto equacionamento dos processos hidrológicos, são os dados de entrada que alimentarão as equações representativas de tais fenômenos.

A quantidade de água e a velocidade com que ela circula no compartimento do solo são influenciadas por diversos fatores, como a cobertura vegetal, tipo de solo, geologia e temperatura local. A partir deste conjunto de fatores que atuam conjuntamente, pode-se caracterizar este fluxo através de um balanço onde são consideradas as entradas e saídas de água do compartimento solo através do balanço hídrico.

2.6. Balanço Hídrico

O balanço hídrico promove o equilíbrio entre a entrada e saída de água de uma região, de modo a constatar a variação de volume de água presente no solo (TUCCI, 1997), sendo resultante da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo (PEREIRA et al.,1997).

Para Tucci (1997), o balanço hídrico de bacias hidrográficas geralmente visa estimar a evapotranspiração, baseando-se em dados de precipitação, evaporação e escoamento superficial e profundo.

A avaliação de cada termo da equação do balanço envolve o levantamento de dados observados ou de expressões que exprimam o mecanismo de transporte dos volumes. Para quantificação dessas variáveis, utilizam-se modelos empíricos ou determinísticos, com embasamento físico, com ou sem componentes aleatórios ou probabilísticos.

O balanço hídrico pode ser contabilizado para diversos períodos de tempo, variando de horas a anos. As escalas de tempo mais utilizadas estão entre a diária e a anual, ficando a escolha dessa escala temporal a critério da finalidade da contabilidade hídrica (GOMES, 2005).

2.7. Modelagem Hidrológica – SWAT

Tucci (2013) afirma que é com base nos registros e análises das variáveis hidrológicas que é possível compreender estes fenômenos e representá-los matematicamente. Modelos hidrológicos são, portanto, um conjunto de equações físicas e matemáticas utilizadas para auxiliar o entendimento do comportamento da água dentro de uma bacia hidrográfica. Os modelos podem ser classificados por diferentes aspectos, tais como: tipos de variáveis utilizadas (estocástico ou determinístico); tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual); a forma de representar os dados (discretos ou contínuos); a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos).

O modelo Soil and Water Assessment Tool – SWAT nas simulações hidrológicas está sendo utilizado em muitos projetos, a exemplo o HUMUS (Modelo de Unidades Hidrológicas dos Estados Unidos), que dá suporte ao desenvolvimento agrícola e ambiental do governo americano, e o projeto África financiado pela ONU e União Europeia para identificar as Unidades Hidrológicas do continente africano. O Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco (SUPer) é um sistema interativo de modelagem hidrológica e de qualidade de água que utiliza como mecanismo de modelagem a Ferramenta de Avaliação do solo e da Água - Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

O SUPer visa avaliar os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos de Pernambuco a partir da criação de um sistema que possa contribuir para a tomada de decisões políticas, econômicas e sociais do Estado, para mitigação da vulnerabilidade da população frente a extremos hidrológicos. O sistema pretende integrar as bases de dados climáticos, de cobertura vegetal, e hidrológicos, utilizando o modelo hidrológico SWAT.

Participam do projeto: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP),

Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Texas A & M University (EUA), Instituto de Pesquisa de Impactos Climáticos de Postdam (PIK - Alemanha) e Universidade de Coimbra (Portugal).

O SWAT é um modelo matemático de domínio público desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA, em conjunto com a Texas A & M University – TAMU.

A ferramenta SWAT é baseada em uma estrutura de comandos para propagar o escoamento, sedimentos e agroquímicos através da bacia (SIRINIVASAN & ARNOLD, 1994). Os maiores componentes do modelo incluem hidrologia, sedimentos, nutrientes, temperatura do solo, clima, crescimento de plantas, pesticidas e manejo agrícola (ARNOLD et al., 1998). O componente hidrológico do modelo abrange sub-rotinas do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração. O modelo demanda dados diários de precipitação, radiação solar, velocidade do vento, temperaturas (máxima e mínima) do ar e umidade relativa.

A ferramenta SWAT trabalha com uma fórmula modificada do Método da Curva Número - CN para calcular o escoamento superficial (USDA, 1972). O Método da Curva Número relaciona o escoamento superficial ao tipo de solo, uso da terra e práticas de manejo (ARNOLD et al., 1995).

A entrada de dados no modelo acontece através de uma interface apropriada, os planos de informação cartográficos – PI's e dados alfanuméricos. Os PI's necessários são: Modelo Numérico do Terreno (MNT); solos e uso da terra. Um aspecto importante na modelagem espacial distribuída é definir o delineamento de sub-bacias e com isso a extração da rede de drenagem a partir dos MNT's. De acordo com Machado (2002), na modelagem hidrológica, o desenvolvimento de técnicas automáticas nas últimas décadas para a definição das propriedades da drenagem em bacias e sub-bacias hidrográficas, possibilitou a substituição gradual das representações cartográficas por MNT, o que facilitou muito a preparação dos dados.

Uma interface foi desenvolvida entre o SWAT e o SIG ArcSwat. A interface subdivide automaticamente a bacia em sub-bacias a partir do MNT, em seguida extrai os dados de entrada a partir dos PI's e do banco de dados relacionados para cada sub-bacia. A interface possibilita que as saídas do modelo sejam exibidas em mapas, gráficos e quadros do ArcSwat. Este modelo permite a simulação de processos hidrológicos, a produção e transporte de sedimentos, e o ciclo de pesticidas e nutrientes.

Para processar a simulação e previsões de cenários, o SWAT requer informações espaciais, tais como: modelo digital do terreno, séries temporais de precipitação, hidrografia, vazão líquida, mapa de solos, mapa de uso e ocupação do solo e de descarga sólida, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima e também dados da radiação solar.

Para as informações dos solos, o SWAT demanda um banco de dados com múltiplas informações, entre elas, pode-se destacar o número de camadas do solo e informações por camada de solo, porosidade, condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível, grupo hidrológico, podendo ser agregada outras informações. O modelo também utiliza um banco de dados relativos ao uso do solo (FERNANDES et al., 2012).

A utilização do SWAT pode estar atrelada a vários propósitos segundo os objetivos de cada trabalho desenvolvido com essa ferramenta; uns visam avaliar o comportamento hidrológico (MORIASI et al., 2007; ABBASPOUR et al., 2007 e SOUZA et al., 2009), outros procuram quantificar a produção de sedimentos, embasados em diferentes formas de uso e manejo do solo (LOPES, 2008; LINO, 2009 e BONUMA, 2011).

O SWAT gradualmente vem ampliando suas aplicações no ambiente científico, pois permite reunir diferentes componentes hidrológicos e agrônômicos, tornando-se um modelo versátil para muitas empresas e órgãos públicos na tomada de decisões diante de situações de conflito de uso de água e solo (VACHÉ et al., 2002; SANTHI et al., 2001; CHU et al., 2005).

O modelo SWAT foi adotado para a bacia de Elimbah Creek, Austrália, estimando a produção de água para a referida bacia hidrográfica diferentes fontes. Para o período de modelagem de abril de 1999 a setembro de 2009, os resultados mostraram que as principais fontes de água em Elimbah Creek são o escoamento superficial total e fluxo lateral (65%). O fluxo de base contribui com 36% para o escoamento total. Em uma análise sazonal, os resultados da modelagem mostraram um deslocamento na fonte de água que contribui ao córrego de Elimbah do escoamento superficial e do fluxo lateral durante tempestades intensas do verão (LABADZ, 2010).

Montenegro e Ragab (2010) avaliaram o escoamento superficial na Bacia do Mimoso (sub-bacia do Rio Ipanema), aplicando modelo hidrológico distribuído DiCaSM. Os autores destacam que a carência de medições de campo limita as previsões de escoamento, dificultando a adoção de estratégias de planejamento. Previsões de impactos no clima a longo prazo, uso do solo e alterações no fluxo de água foram estudadas para diferentes condições.

Vários estudos vêm sendo abordados com a aplicabilidade do modelo SWAT, desde a estimativa de sedimentos a análise de incertezas (ARAGÃO et al., 2013; STRAUCH et al.,

2012), o uso do modelo em regiões semiáridas (BRESSIANI et al., 2015) também vem sendo objeto de análise desse modelo, visto a capacidade de o mesmo calibrar e validar em regiões onde ocorre apenas alguns picos de vazão. Lima et al., (2017) utilizaram o modelo para gerenciamento de terras e planejamento paisagístico dentro do bioma Cerrado.

No que se refere à modelagem, a implementação de qualquer representação numérica demanda calibração e validação, de forma a garantir a melhor caracterização da realidade física. Os coeficientes do modelo regulam o comportamento das equações que descrevem as variáveis ao longo do tempo e do espaço, bem como as suas interações. O processo de calibração pode ser longo e trabalhoso e requer uma compreensão clara dos efeitos dos parâmetros sobre as variáveis. Uma vez calibrado e validado o modelo, este pode ser utilizado para diferentes simulações em função dos objetivos para os quais está sendo empregado.

Segundo Montenegro e Ragab (2010), em estudo na bacia do Alto Ipanema, Pesqueira-PE, com base em uma série de cenários de mudança climática para a região, o modelo DiCaSM prevê uma redução de 35%, 68% e 77% na recarga de água subterrânea (GWR) e de 34%, 65% e 72% em fluxo, para os períodos 2010-2039, 2040-2069, e 2070-2099, respectivamente.

De acordo com Andrade et al. (2017), trabalhando com o modelo SWAT, com este modelo calibrado, estudos futuros podem ser realizados a fim de, validá-lo e prever possíveis impactos de mudanças climáticas e de uso do solo.

2.8. Gestão de recursos hídricos baseados em cenários de modelos hidrológicos

A gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas tem sido cada vez mais abordada pelas políticas nacionais e internacionais. Desde o início da década de 80, muito avanço houve em relação às discussões sobre temas referentes à sustentabilidade e à preservação hídrica e ambiental.

A Rede Cooperativa de Gestão de Recursos Hídricos (REHIDRO), inserida na rede de hidrologia do semiárido (REHISA), atuam recentemente de modo conjunto e buscando compartilhamento de metodologias, sendo composta pelas universidades: UFPE, UFRPE, UFAL, Universidade de Brasília (UnB) e Universidade Federal de Sergipe (UFS). Estas redes buscam o desenvolvimento de estudos conjuntos, e fortalecimento de parcerias científicas e tecnológicas com apoio da FINEP, com o intuito de buscar o desenvolvimento, o aprimoramento e a difusão de técnicas para melhor aproveitamento dos recursos de água e solo em áreas sob escassez.

Neste contexto, surge a necessidade de fundamentos legais e institucionais que garantam a efetiva aplicação de conceitos ligados à gestão dos recursos hídricos. Na legislação brasileira,

a Lei nº 9.433/97 consolida estes princípios e tem como objetivo assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, tendo em vista o desenvolvimento sustentável, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, bem como a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrente do uso inadequado dos recursos.

As várias possibilidades de conflitos relacionados com uso e gestão das águas e suas fortes características de bem público têm levado o setor público, de diversos países, a regular e criarem instrumentos para gerir os recursos hídricos.

O Código das Águas assegura o uso das águas para as primeiras necessidades da vida e prevê, concessão ou autorização para uso de águas por determinado período de tempo (não superior a trinta anos) e uso comum de águas públicas na forma ou remunerada.

A atual política nacional de recursos hídricos, definida pela Lei Federal No. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, baseia-se nos seguintes fundamentos: a) A água é um bem de domínio público; b) É um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; c) Em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é para consumo humano e para a Dessedentação animal; d) A gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; e) A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da política nacional de recursos hídricos; e f) A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Dentre os aspectos institucionais mais importantes da atual Política Nacional de Recursos Hídricos, destacam-se: a) A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos; e b) A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. Nesse sentido, a Lei Federal No. 9.433/97 prevê a criação de Comitês de Bacia Hidrográfica cujas áreas de atuação incluem: a) A totalidade de uma bacia hidrográfica; b) Sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário; ou c) Grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas.

Compete aos Comitês de Bacia Hidrográfica, no âmbito de sua área de atuação, a) Promover o debate das questões relacionadas com recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes; b) Arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados com recursos hídricos; c) Aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia e acompanhar sua execução; d) Estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos

hídricos e sugerir os valores a serem cobrados; e e) Estabelecer critérios e promover o rateio de custo das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo.

Para garantir que tais objetivos sejam cumpridos, a lei avança ao estabelecer instrumentos de gestão, dentre os quais estão os Planos de Recursos Hídricos, que visam, através de diagnóstico da situação atual e criação de cenários futuros, fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. A outorga, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos e o enquadramento dos corpos d'água, que visam assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que foram destinadas, com diminuição de custos mediante ações preventivas permanentes e o sistema nacional de informações sobre recursos hídricos também são instrumentos da Lei nº 9.433/97.

A escassez de água exige que se formulem políticas para garantir uma alocação inter setorial eficiente do recurso, ao mesmo tempo em que se reverta a degradação do mesmo. A decisão de políticas de alocação de água apropriadas pode se beneficiar diretamente da melhoria ou evolução da modelagem de alocação de água em nível de bacia (MORAIS et al., 2006).

A alocação da água para usos múltiplos poderia se beneficiar do uso de procedimentos que contemplassem a complementaridade existente e a modelagem da disponibilidade hídrica, geralmente representada por uma estimativa de vazão associada a um determinado risco de falha, e as diferentes garantias requeridas pelos vários tipos de uso, otimizando assim a aplicação da água para fins de produção. (ASFORA e CIRILO, 2005). Neste contexto, a utilização da modelagem para prognóstico do impacto das práticas de gestão do solo nos recursos hídricos, pode ser considerada como uma importante ferramenta a ser utilizada em estudos de enquadramento de rios, principalmente no que diz respeito ao atendimento às metas progressivas.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333:413-430, 2007.

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) –Advanced training and user Manual. Version 1.0. Idaho, p.97,2002.

ANDRADE, C. W. L. de. et al. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*. V. 02, n. 03, 227-238. (2017).

- ANDRADE, T. et al. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.496 - 504, 2012.
- ARAGÃO, R. et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1091-1102, 2013.
- ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha – São Paulo. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 27, n.2 - Março/Abril. 2003.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, Middleburg, v. 34, n. 1, p. 73– 89. 1998.
- ASFORA, M. C.; CIRILO, J. A. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. *REGA – Vol. 2, no. 2*, p. 27-38, 2005.
- BAKKER, M. M. et al. Soil erosion as a driver of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 105, p. 467–481, 2005.
- BASTIAANSEN, W. G. M. et al. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131, p.85-89, 2005.
- BASTOS, D.C. de O.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Avaliação de Alternativa de Irrigação Suplementar com Água Moderadamente Salina em Vale Aluvial no Semiárido: Experimentação e Modelagem. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, p.27 - 36, 2009.
- BONUMÁ, N. B. Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil. 136 p. 2011. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- BRESSIANI, D. A. et al. Effects of spatial and temporal weather data resolutions on Streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *International Journal Agricultural & Biological Engineer*, v. 8, n. 3, p. 125-139, 2015.
- BROCCA, L. et al. A. Soil Moisture for Hydrological Applications: Open Questions and New Opportunities. *Water*, 9, 140. 2017.

BROCCA, L. et al. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resour. Res.* 46 (2), 1–14. 2010.

CARLSON, T.; GILLIES, R.; PERRY, E. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, v.9, p.161–173, 1994.

CARLSON, T.; GILLIES, R.; SCHMUGGE, T. An interpretation of methodologies for indirect measurements of soil water contents. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 77, p.191–205, 1995.

CARVALHO, J.F. et al. Produtividade do repolho utilizando cobertura morta e diferentes intervalos de irrigação com água moderadamente salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.256 - 263, 2011.

CHEN, H. et al. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China. *Environ. Earth Sci.* 61(6), 1105–1111. 2010.

CHICOTA, R.; VAN LIER, Q. J. Avaliação no campo de um TDR segmentado para a estimativa da umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.1, p.72- 78, 2004.

CHU, T. W. et al. Watershed level BMP evaluation with SWAT model. In: *SAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING*, 2005. Saint Joseph. (ASAE Paper n. 052098). 2005.

CORRADINI, C. Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. *J. Hydrol.* 516, 1–5. 2014.

DE VENTE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale. Scale issues and emiquantitative models. *Earth-Science Reviews*, v. 71, p. 95–125, 2005.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sumula da 10ª reunião de levantamento de solos. Rio de Janeiro, 1979.

FELIX, V. DE S.; PAZ, A. R. DA. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016.

FERNANDES, J. G.; GALVINCIO, J. D.; FREIRE, M. B. G. S. O Modelo SWAT e suas Possibilidades de Aplicações em APL Agrícolas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, n. 01, p. 115-126, 2012.

GILLIES, R. et al. A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference

Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *Int. J. Remote Sens.*, v.18, p.3145–3166, 1997.

KARLEN, D.L.; STOTT, D. A framework for evaluating physical and chemical indicators. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society American, Cap.4, p.53-72. (Special Publication, 35). 1994.

KORRES, W. et al. Spatiotemporal soil moisture patterns - A meta-analysis using plot to catchment scale data. *J. Hydrol.* 520, 326–341. 2015.

LABADZ, M.; GRIGORESCU, M.; COX, M. E. Modelling surface and shallow groundwater interactions in an ungauged subtropical coastal catchment using the SWAT model, Elimbah Creek, southeast Queensland, Australia. In *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World*, International Union of Soil Sciences, Brisbane, QLD, p. 52-55, 2010.

LI, S. et al. Response of soil moisture to hydro-meteorological variables under different precipitation gradients in the yellow river basin. *Water Resour. Manage.* 30 (6), 1867–1884. 2016.

LIMA, J. E. F. W. et al. Development of a spatially explicit approach for mapping ecosystem services in the Brazilian Savanna – MapES. *Ecological Indicators* 82 513–525. 2017.

LIMA, N. S. et al. A. H. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com sensor de pressão hidrostática e sistema manométrico. *Irriga*, v.18, p.540 - 557, 2013.

LINO, J.F.L. Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia do Rio Preto (SC) com o Modelo SWAT. 2009. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina. 2009.

LOPES, N. H. Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002 154f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo. 2002.

MARTINI, E. et al. Spatial and Temporal Dynamics of Hillslope-Scale Soil Moisture Patterns: Characteristic States and Transition Mechanisms. *Vadose Zone J.* 14 (4). <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2014.10.0150>. 2015.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: UFRGS, p. 31-39. 1992.

MEDEIROS, J. D. F.; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T. Variabilidade espacial do conteúdo de água no solo numa pequena bacia rural: Análise da estabilidade temporal do padrão espacial do conteúdo de água no solo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p.53-63, 2007.

MICHELLON, E. Políticas públicas, mercado de terras e o meio ambiente: uma análise a partir do Paraná. 2002. Tese (Doutorado em Economia). Instituto de Economia/UNICAMP, Campinas, 2002.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

MONTEIRO, A. L. et al. Avaliação de lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico irrigado utilizando modelagem computacional. *Engenharia Agrícola*, v.29, p.202 - 220, 2009.

MONTENEGRO, A. A. A. et al. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, v.109 p.139–149, 2013.

MONTENEGRO, A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrology Process*. 24, 2705–2723.2010.

MONTENEGRO, A. A. A. et al. Temporal dynamics of soil moisture and rainfall erosivity in a tropical volcanic archipelago. *Journal of Hydrology*, 563, 737–749p. 2018.

MONTENEGRO, S.; MONTENEGRO, A. A. A.; Ragab, R. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. *Irrigation Science*, v.28, p.301 - 316, 2010.

MORAES, M. M. G. et al. Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos REGA– Vol. 3, no. 1, p. 29-44. 2006.

MORBIDELLI, R. et al. An investigation of the effects of spatial heterogeneity of initial soil moisture content on surface runoff simulation at a small watershed scale. *Journal of Hydrology* 539. 589–598. 2016.

MORIASI, D.N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.

NILAWAR, A. P. et al. Satellite Soil Moisture Validation Using Hydrological SWAT Model: A Case Study of Puerto Rico, USA Hydrology, 4, 45; doi: 10. 3390/hydrology4040045. 2017.

OJHA, R. et al. Scaling of surface soil moisture over heterogeneous field subjected to a single rainfall event. J. Hydrol. 516, 21–36. 2014.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T.; Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. Revista Árvore, Viçosa, v.29, n.1, fevereiro 2005.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A; SEDIYAMA, G. C. Evapotranspiração. Piracicaba: FEALQ, 183 p., 1997.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 367p. 2002.

RAVEN, P.H., EVERT, R.F., EICHHORN, S.E. Biologia vegetal. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 832p. (2001).

PESSOA, M.C.P.Y. et al. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas, Jaguariúna, Embrapa/CNPMA, p.83, 1997.

RAJIB, M.A.; MERWADE, V.; YU, Z. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/in-situ soil moisture. Journal of Hydrology. 536, 192–207. 2016.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. Editora Manole Ltda. São Paulo. 188p. 1990.

ROMANO, N. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. Journal of Hydrology. 516, 6-20. 2014.

SANTOS, T.E.M.; MONTENEGRO, A.A.A.; SILVA JUNIOR, 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, p.113-125, 2008.

SANTHI, C. et al. GIS-based regional planning tool for irrigation demand assessment and savings using SWAT. Trans. ASABE 48(1): 137-147. 2005.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, M. E. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semiárido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.217– 225, 2009a.

SANTOS, F.X. et al. Determinação do consumo hídrico da cenoura utilizando lisímetros de drenagem, no agreste pernambucano. *Agrária (Recife. Online)*, v.4, p.304 - 310, 2009b.

SILVA, B. B. et al. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo, PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, p.57-64, 2013.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.16, n.1, p.27–36, 2012.

SOUZA, E.R. et al. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management* v.98, p.1 - 7, 2011.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. *Anais do Congresso XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2009.

THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff and soil loss. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 130, p. 23–30, 2009.

TIMM, L.C. et al. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. *Scientia Agricola* 63 (1), 55–64. 2006.

SENEVIRATNE, S.I. et al. Investigating soil moisture–climate interactions in changing climate: a review. *Earth Sci. Rev.* 99 (3), 125–161. 2010.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. Integration of the basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, v. 30, n 03, p. 453-462, 1994.

STRAUCH, M. et al. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 414-415 (2012) 413- 424. (2012).

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Conservation Service, SCS. *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. Manual, 1972.

VACHÉ, K. B.; EILERS, J. M.; SANTELMAN, M. V. Water quality modeling of alternative agricultural scenarios in the U.S. Corn Belt. *J. American Water Resour. Assoc.* 38(2): 773-787. 2002.

YANG, Y. et al. Estimation of Surface Soil Moisture from Thermal Infrared Remote Sensing Using an Improved Trapezoid Method. *Remote Sensing*.v.7, p.8250-8270, 2015.

ZHUO, L.; HAN, D. The Relevance of Soil Moisture by Remote Sensing and Hydrological Modelling. *Procedia Eng.* 154, 1368–1375.2016.

ZUCCO, G. et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. *Journal of Hydrology* 516,193-199,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.043>. 2014.

_____, LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997- institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989 – Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm.

_____, LEI Nº 6.938, DE 31 DE AGOSOTO DE 1981- Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm.

CAPÍTULO II

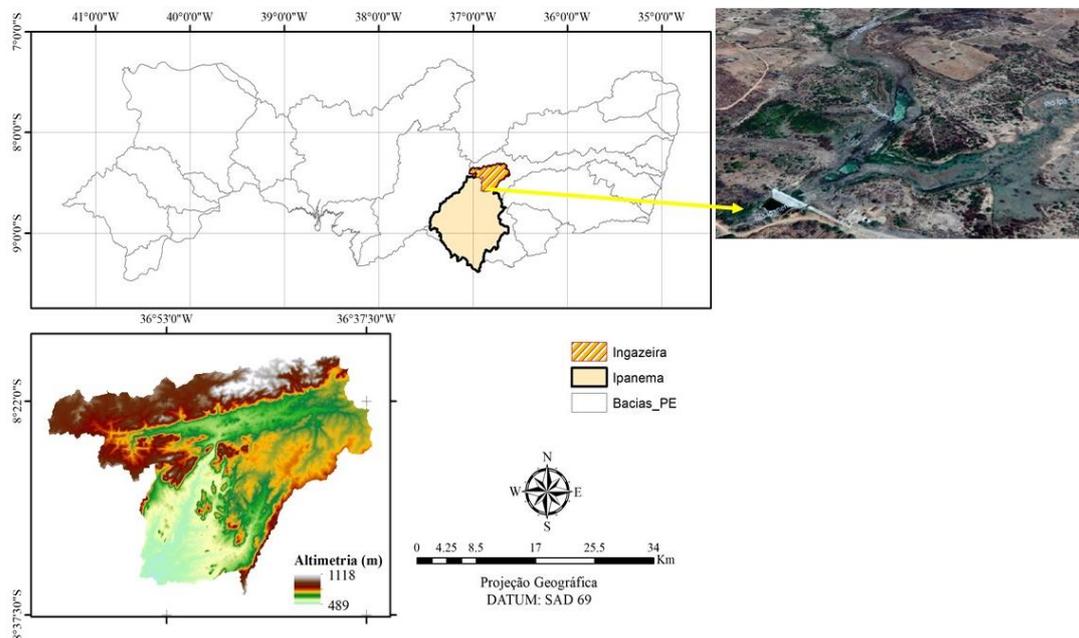
ESTUDO DE CASO RESERVATÓRIO INGAZEIRA

2.8.1. Estudo de caso Reservatório Ingazeira

Caracterização da área

O Açude Ingazeira foi concluído no ano de 1987, pertencente à Bacia do Ipanema localizado no município de Venturosa –PE, nas coordenadas 08° 36' 45,40" S e 36° 54' 43,71" W (Figura 1). Atualmente é operado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), sendo da Agencia de Águas e Clima de Pernambuco (APAC), a competência para definir os critérios e regras de operação (Lei 14.028 de 2010, Art.6°, XVI – Lei de criação da APAC).

Figura 1. Localização da Bacia Ingazeira e vista da superfície do Reservatório.



Nas Tabelas 1 e 2, podem ser observadas respectivamente, as informações referentes às características técnicas do Reservatório Ingazeira na Bacia do Ipanema, bem como os dados relativos à curva Cota x Área x Volume.

Tabela 1. Características Técnicas do Reservatório Ingazeira

Reservatório Ingazeira – Características Técnicas	
Área da bacia de drenagem	848,00 km ²
Área da bacia hidráulica	1,272 km ²
Volume de acumulação	4.800.000 m ³
Cota do sangradouro	480,15 m
Volume mínimo operacional	307.250 m ³
Cota da tomada d'água	472,50 m

Fonte: APAC (2017)

Na Tabela 2 podem ser observados os valores da curva cota vazão e área vazão obtidas no reservatório Ingazeira, de acordo com as leituras observadas ao longo do período de funcionamento do reservatório.

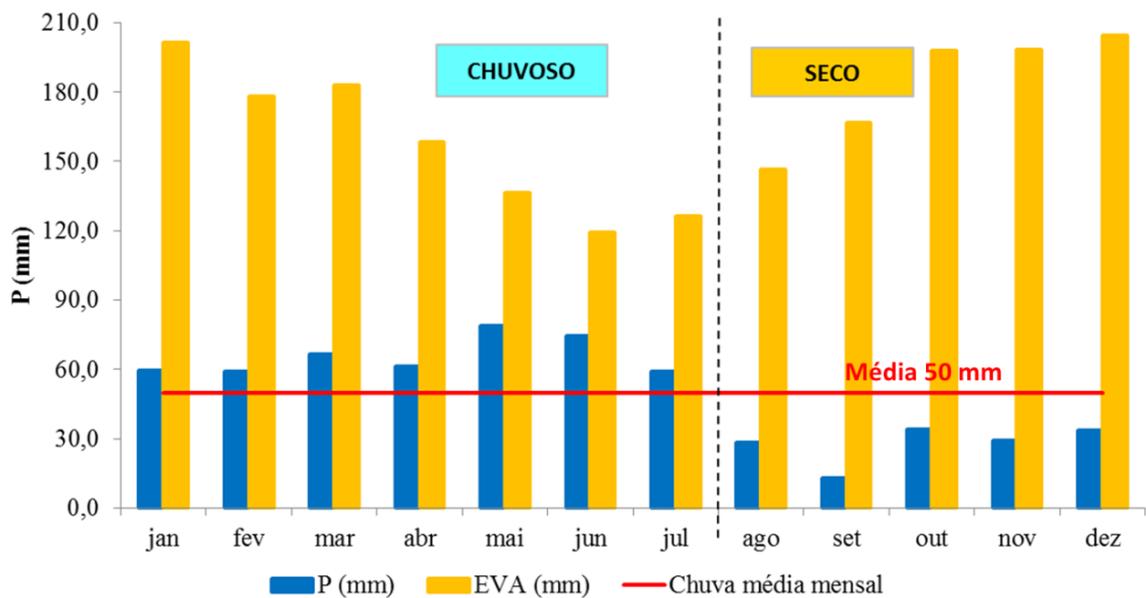
Tabela 2. Dados da curva Cota x Área x volume do reservatório Ingazeira

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
468,0	0	0
470,0	61.000	61.000
472,5	136.000	307.250
475,0	339.000	901.000
477,5	674.000	2.167.250
480,0	1.272.000	4.599.750
482,5	1.910.000	8.577,250

Fonte: APAC (2017)

A APAC avaliou a chuva e evaporação (mensais médias) na bacia do açude Ingazeira com distinção do período chuvoso ou úmido (janeiro a julho) e seco ou de estiagem (agosto a dezembro) (Figura 2).

Figura 2. Chuva e evaporação (mensais médias) na bacia do açude Ingazeira com distinção do período chuvoso ou úmido (janeiro a julho) e seco ou de estiagem (agosto a dezembro).



Fonte: APAC

O CONSU Ingazeira

Os Conselhos Gestores de Açude (CONSUs) são organismos constituídos para atuar na área de influência de um ou mais reservatórios. Atuam, de modo particular, nas zonas do agreste

e do sertão de Pernambuco, onde os rios são intermitentes e a água disponível é acumulada nos açudes e barragens. São constituídos por representantes dos usuários das águas, do poder público e da sociedade civil.

Em 25 de março de 2009 foi homologada a criação do Conselho Gestor do Açude Ingazeira (CONSU Ingazeira) através da Resolução nº 02 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH). O Consu/Ingazeira, entre outras atribuições, atua na discussão de ações relacionadas ao uso das águas do açude Ingazeira, que atende aos municípios de Venturosa e Pedra, no Agreste pernambucano.

Em 20 de dezembro de 2016 foi realizada a última plenária pela Comissão Eleitoral do processo de renovação do CONSU Ingazeira, realizada na Casa Paroquial, localizado no município de Venturosa, e tendo por base a Resolução CRH Nº 04/2009 e o seu estatuto, convocando os interessados em participar do processo de renovação do CONSU Ingazeira.

Segundo o Art. 5º o CONSU Ingazeira é constituído por 15 membros titulares e composto da seguinte forma:

I – 6 dos seus membros são de representantes do Poder Público da União, do Estado, que tenham interesse em participar da gestão, e do Município inserido no território de influência do açude Ingazeira. II - 3 de entidades civis; III - 6 de usuários de água, indicados por suas respectivas organizações.

A Alocação de Água

A Alocação de água faz parte do processo de solução de conflitos pelos usos da água, que consiste no processo de definição de quantidades de água ou vazões a serem alocadas em cada sub-bacia e trechos de rio para atender os consumos de água atuais e futuros. Nesse processo, parte da disponibilidade hídrica total da bacia deve ser mantida nos rios para atender usos não consuntivos e requisitos ambientais, quando possível uma vez que o Rio Ipanema é intermitente.

O Reservatório Ingazeira é de domínio estadual, as alocações de água nestes reservatórios competem a APAC e as alocações de água em reservatórios dentro do Estado, porém, de domínio federal, compete a ANA. Os reservatórios Federais são aqueles que se situam em rios que cortam mais de um estado, ou que, situando-se em rios estaduais, foram construídos por órgãos federais, ex: DNOCS.

No dia 19 de dezembro de 2017, foi realizada reunião para alocação de água do Açude Ingazeira, na Câmara de Vereadores de Venturosa-PE (Figura 3), que teve como pauta: 1. Situação do reservatório; 2. Alocação de água 2017/2018; 3. Encaminhamentos para efetivar a alocação; e 4. Termo de alocação de água.

Figura 3. Reunião de Alocação de Água do Reservatório Ingazeira, realizada na Câmara de Vereadores do município de Venturosa-PE



Durante a reunião, foi apresentada a nota técnica nº 10/2015/COMAR/SER, que versa sobre a metodologia de alocação de água em açudes Isolados. A APAC vem utilizando como base (com alguns ajustes, quando necessário, em função das particularidades de cada reservatório) a metodologia publicada nesta nota técnica, que foi tema de uma oficina da ANA no Simpósio da ABRH de 2015, em João Pessoa-PB, para as instituições estaduais, entre outras, envolvidas na gestão dos recursos hídricos.

Pode ser observado na Tabela 3 como se dá a distribuição do uso da água no reservatório Ingazeira, segundo estudo contratado pela APAC por meio da empresa VIASAT processamento de dados LTDA, sobre o cadastramento de usuários de água para o açude Ingazeira no ano de 2013.

Devido às informações obtidas no referido relatório da VIASAT serem provenientes do ano de 2013 e pela falta de valores atualizados quanto as atuais demandas do reservatório, a APAC atribuiu ($Q_{atribuída}$) algumas vazões para o ano de 2017, as quais foram utilizadas nos cálculos para estimativa da depleção de água no açude. Verifica-se ausência de informações referentes à piscicultura no Açude Ingazeira, a qual é de grande relevância, havendo estabelecida uma Colônia de Pescadores. Saliente-se inclusive que o atual presidente do CONSU Ingazeira é pescador, e presidente da referida Colônia.

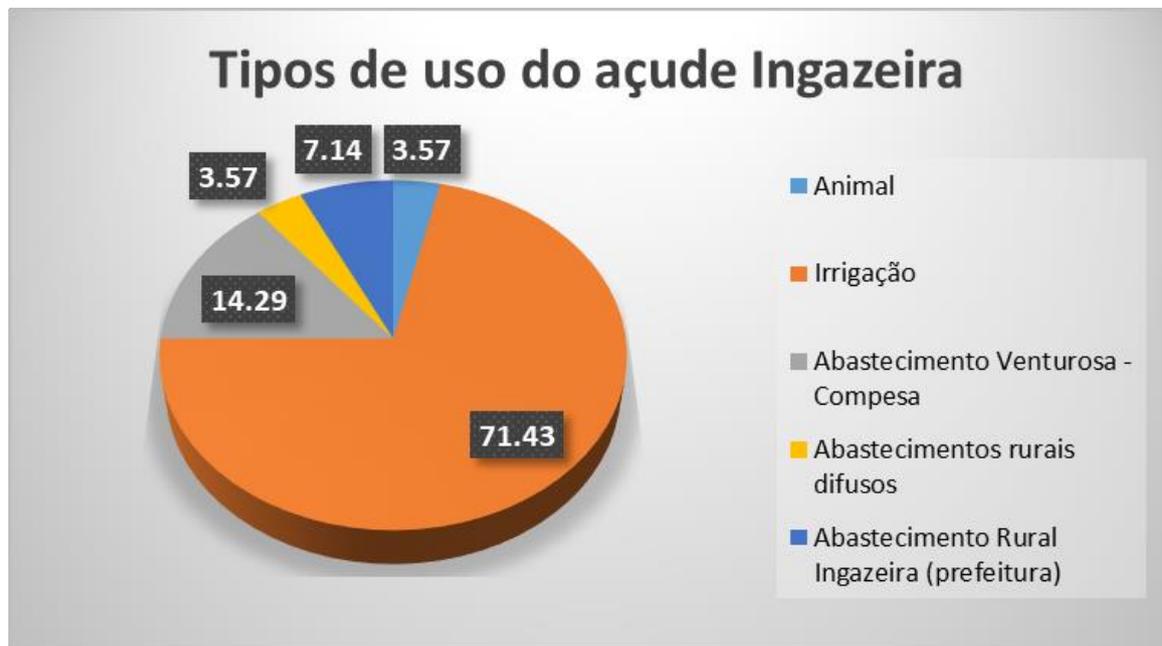
Tabela 3. Usos múltiplos da água no açude (Ingazeira)

TIPO DE USO	Q (m ³ /ano)	Q (L/s)	Q _{atribuída} (L/s)
Animal	10.671,88	0,34	0,50
Irrigação	210.711,2	6,66	10,00
Abastecimento Venturosa – Compesa	45.625,00	1,44	2,00
Abastecimentos rurais difusos	3.559,25	0,11	0,50
Abastecimento Rural Ingazeira (prefeitura)	31.222,1	0,99	1,00
TOTAL			14,00

Fonte: APAC, relatório de usuários de açudes: Açude Ingazeira. 2013.VIASAT

Na Figura 4 pode ser visualizada a distribuição percentual desses usos, em função da vazão atribuída, notando-se a maior parcela ficou por conta da irrigação.

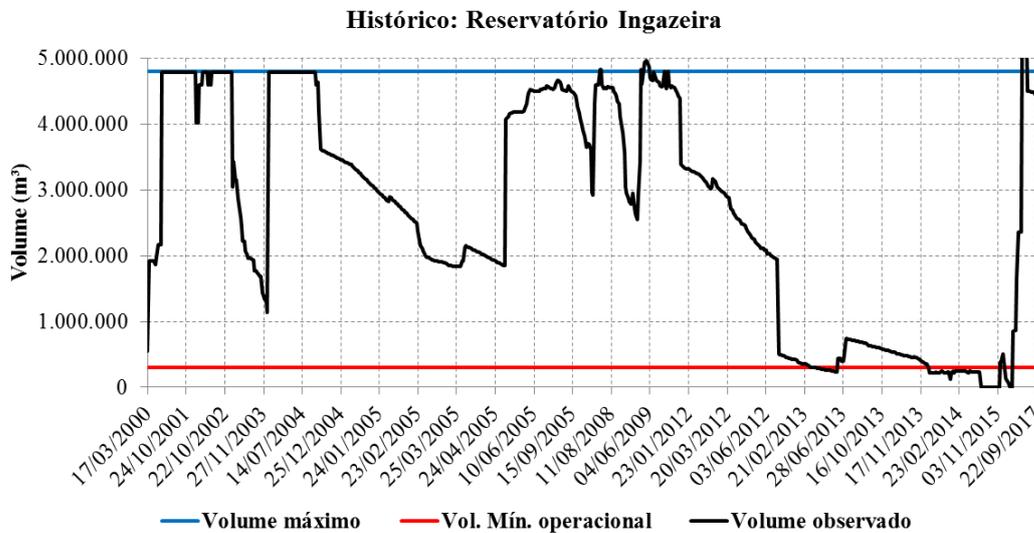
Figura 4. Tipos de usos do Açude Ingazeira.



Fonte: APAC (2017).

Na Figura 5, pode ser observado o histórico do volume do reservatório a partir do ano de 2000. Salienta-se que as chuvas ocorridas no primeiro semestre de 2017 foram suficientes para que o reservatório atingisse sua capacidade máxima, após um período crítico de seis anos de estiagem, sem recarga significativa.

Figura 5. Histórico de volume do Reservatório da Ingazeira



Fonte: APAC

A metodologia proposta pela ANA (Nota Técnica nº 10/2015/COMAR/SER) e utilizada como base pela APAC, trata entre outras coisas, do estabelecimento de Estados Hidrológicos para os reservatórios. No caso específico de açudes isolados e em períodos de escassez prolongada, regras de alocação baseadas na vazão de referência (vazão regularizada, no caso de açudes) não são suficientes para evitar dificuldades aos usos, notadamente aos usos prioritários. Com tais regras, a regulação tende a ser conservadora em anos com índices pluviométricos generosos e excessivamente otimista em situações de seca prolongada. Na primeira situação, elas poderão levar a perdas hídricas relevantes oriundas da alta evaporação potencial existente na região, por exemplo, e, na segunda, à ocorrência de conflitos entre os usuários, caso não se efetive a recarga do volume acumulado conforme estatisticamente previsto ao final do período úmido.

Portanto, uma gestão planejada dos usos precisa de ferramentas que permitam calcular, para cada período hidrológico, os volumes garantidores dos usos no reservatório. Poder-se-ia, com tais instrumentos, promover a regulação com valores temporários para os usos, o planejamento de ações para a gestão e a consequente mitigação de conflitos deflagrados pela redução da disponibilidade, onerando determinados usos.

Relacionando as demandas estimadas com o volume em depósito no final do período úmido, poder-se-ia otimizar os usos hídricos, por exemplo, permitindo irrigação mais intensiva em períodos mais favoráveis, com maior volume armazenado, e restringindo progressivamente tal uso, de forma a aumentar a garantia aos usos prioritários. Ou seja, independentemente da regularidade dos usos existentes quanto à outorga, as condições para efetiva utilização da água

poderia ser função da situação do volume acumulado ao final do período úmido e este vinculado a curvas-guia representativas dos Estados Hidrológicos.

A partir dessas considerações, sugere-se a utilização do conceito Estados Hidrológicos para guiar a gestão do sistema hídrico em açudes isolados, orientando tanto o marco regulatório quanto as alocações de água.

Os Estados Hidrológicos devem refletir a situação hídrica do sistema em estudo, capaz de atender a diferentes demandas de uso em determinado tempo. São retratados, assim, a partir da análise do deplecionamento esperado do volume acumulado (valor verificado no início do período de estiagem), alcançando o volume mínimo operacional ao final do Ciclo de Descarga - CD. A seguir, são descritas as curvas-guia utilizadas para caracterização dos Estados Hidrológicos dos reservatórios:

a. **Normal (curva-guia Verde)** - volume capaz de atender à demanda total existente (usos prioritários e não prioritários), pelo período futuro igual a um Ciclo de Descarga, considerando mínimas vazões afluentes. Valores abaixo desta curva devem orientar processos de alocação de água cujos limites de negociação são estabelecidos por esta curva e pela curva “Alerta”.

b. **Alerta (curva-guia Amarela)** - volume capaz de atender à demanda dos usos prioritários e 50% da demanda dos usos não prioritários, pelo período futuro igual a um Ciclo de Descarga, considerando mínimas vazões afluentes. Valores abaixo desta curva devem orientar processos de alocação de água cujos limites de negociação são estabelecidos por esta curva e pela curva “Prioritários”.

c. **Prioritários (curva-guia Vermelha)** - volume capaz de atender à demanda dos usos prioritários, pelo período futuro igual a um Ciclo de Descarga, considerando mínimas vazões afluentes. Valores abaixo desta curva não estão sujeitos a deliberação por processos de alocação de água, indicarão a necessidade de intensificação do monitoramento de usos, de restrição formal e plena aos usos não prioritários, efetivação de planos de contingência e de ações emergenciais para atendimento às cidades e a núcleos populacionais rurais afetados e, em caso de racionamento preventivo, restrição formal também a usos prioritários.

Mesmo calculadas para todo o período do Ciclo de Descarga, as curvas-guia devem retornar ao seu valor inicial no início do período de estiagem do ano subsequente, orientando novas condições de uso em função da situação observada ao final do período úmido.

A diversidade das situações encontradas na realidade local poderá exigir a adaptação dos valores de referência das curvas “Alerta” e “Prioritários”. Um aspecto comum a quaisquer limites aos usos definidos por essas curvas é a necessidade de implementação de ações de

monitoramento do volume acumulado e dos usos, bem como o acompanhamento de ações estruturais e não estruturais para a efetivação das regras acordadas.

No dia da reunião de Alocação (19/12/2017), o Reservatório de Ingazeira encontrava-se no Estado Hidrológico Normal (Tabela 4), ou seja, o volume existente no açude, teoricamente, seria capaz de atender em 100% as vazões previstas ($Q_{atribuída}$) até o final do próximo período chuvoso, ou seja, 31 de julho de 2018, mesmo que não haja recarga significativa do reservatório.

Tabela 4. Estado Hidrológico do Reservatório Ingazeira e condição de uso da água em 19 de dezembro de 2017.

Estado Hidrológico Ingazeira	Volume (hm^3)	Cota (m)	Uso	Condição de uso	
				L/s	%
Verde (NORMAL)	$\geq 1,995$	$\geq 477,16$	Abastecimento Público	$\leq 3,50$	$\leq 100\%$
			Dessedentação Animal	$\leq 0,50$	$\leq 100\%$
			Irrigação no entorno	$\leq 10,00$	$\leq 100\%$
			Defluência de jusante	-	-
Leitura da régua em 19/12/2017	3,578	478,95	-	-	-

Fonte: APAC, (2017).

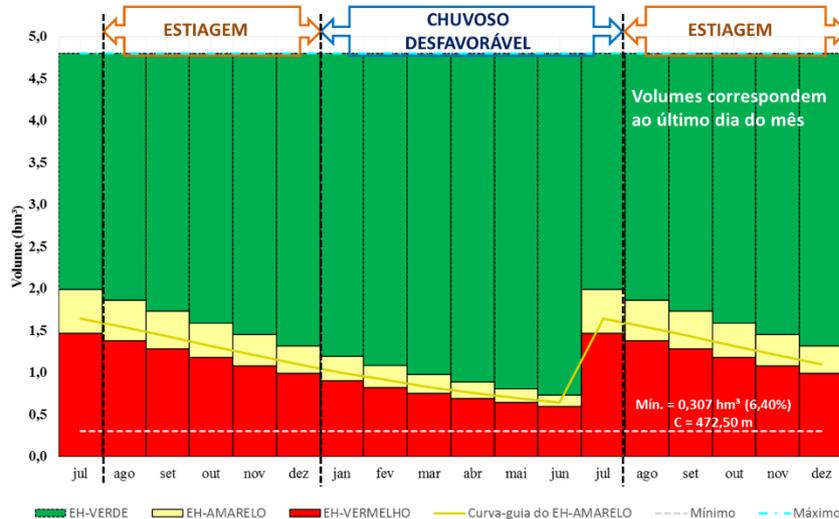
O Quadro 1 e a Figura 6, ilustram as faixas referentes aos Estados Hidrológicos do Açude Ingazeira (Verde ou Normal, amarelo ou Alerta e Vermelho ou Prioritários).

Quadro 1. Estados hidrológicos e condição de uso no Açude Ingazeira

Estado Hidrológico	Vol. (hm^3)	Cota (m)	Uso	Condição de uso	
				L/s	%
Verde (NORMAL)	$> 1,995$	$> 477,16$	Todos	$\leq 14,00$	$\leq 100\%$
Amarelo (ALERTA)	entre 1,468 e 1,965	entre 476,12e 477,16	Consumo Humano	$\leq 3,50$	$\leq 100\%$
			Dessedentação animal	$\leq 0,50$	$\leq 100\%$
			Irrigação no entorno	$\leq 5,0$	$\leq 50\%$
			Defluência jusante	-	-
Vermelho (PRIORITÁRIOS)	$< 1,468$	$< 476,12$	Consumo Humano	$\leq 3,50$	$\leq 100\%$
			Dessedentação animal	$\leq 0,50$	$\leq 100\%$
			Irrigação no entorno	$\leq 2,50$	$\leq 25\%$
			Defluência jusante	-	-

Fonte: APAC

Figura 6. Estados Hidrológicos do Reservatório Ingazeira para um Ciclo de Descarga de 19 meses em função das demandas previstas ($Q_{atribuida} = 14,0 \text{ L s}^{-1}$)



Fonte: APAC

Segundo metodologia da ANA, nota Técnica nº 10/2015/COMAR/SER, que versa sobre Vazões afluentes, a existência de séries de vazões médias mensais afluentes ao reservatório, oriunda da bacia hidrográfica efetiva a montante, é imprescindível para os estudos hidrológicos e deve proporcionar as seguintes definições:

- a. Ciclo hidrológico anual - períodos seco e úmido consecutivos, nesta sequência, definido a partir das vazões médias mensais afluentes com garantia de 95% de ocorrência, a partir da série histórica. O período úmido é definido pelos meses com afluência responsável por aproximadamente 80% do provável volume reservado no Ciclo, a partir do mês que contabilize volume mínimo acumulado de cerca de 10% do volume total previsto, após o mês com menor afluência na série histórica.
- b. Ciclo de descarga – número mais frequente de meses consecutivos, calculado a partir da série histórica do volume armazenado, sem que tenha sido observada recuperação deste volume com valor igual ou maior ao registrado no fim do período úmido do ano imediatamente anterior, subtraídos os meses do último período úmido.
- c. Vazão regularizada - vazão máxima que pode ser retirada do reservatório, de forma constante, sem que o volume mínimo seja atingido, normalmente com garantias iguais a 99%, 95% e 90%.
- d. Vazões máximas e mínimas mensais, calculadas conforme a seguir:
 - i. Vazões máximas registradas nos períodos úmidos da série histórica de vazões afluentes.

ii. Vazões mínimas mensais com 95% de garantia de ocorrência na série história de vazões afluentes.

Na ausência de informações mais detalhadas ou séries de vazões afluentes mais extensas (acima de 20 anos), propõe-se definir o ciclo hidrológico anual a partir do regime pluviométrico da bacia hidrográfica a montante, quando possível, e utilizar, no semiárido, os seguintes valores iniciais: a. Para o CH: período úmido e seco com duração de 6 meses.

b. Para o CD: 2 períodos de estiagem e 1 período úmido, consecutivos.

c. Para as vazões mínimas mensais, afluência nula.

Essas séries de vazões podem estar disponíveis em estudos hidrológicos realizados para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos para a bacia hidrográfica ou para o Estado, ser calculadas a partir de informações fluviométricas disponíveis no portal HIDROWEB, da ANA, ou estimadas pela conversão chuva-vazão, a partir de informações pluviométricas da bacia hidrográfica a montante do reservatório.

No caso de sistemas integrados por mais de um reservatório, é importante que sejam definidas, também, para o CH, as mínimas vazões regularizadas oriundas de reservatórios a montante, ou outras fontes, com garantia igual a 100% de afluência ao reservatório sob alocação. Esses valores, casos disponíveis, devem ser agregados às vazões afluentes da bacia hidrográfica efetiva a montante do reservatório, após subtraídas perdas de trânsito no percurso até sua chegada ao espelho d'água a jusante

A APAC adotou como base a metodologia da ANA neste ano de 2017 e o Açude Ingazeira foi apenas o segundo a ser realizada a alocação com esta metodologia, que ainda está em fase de adaptação para os reservatórios de Pernambuco.

Simulações de vazões afluentes aos reservatórios têm sido desenvolvidas pela APAC, utilizado (em 2017) os modelos SMAP e MODHAC, os quais permitem inserir o exutório da bacia de drenagem em qualquer ponto do rio, porém estes modelos são concentrados. Atualmente está sendo utilizado o HYDRO-BID, que é um modelo distribuído por sub-bacias, porém neste modelo, os exutórios das bacias já estão estabelecidos nas bifurcações entre rios, não sendo possível inserir, por exemplo, um exutório (que represente a bacia de drenagem) em uma estação fluviométrica ou em um reservatório. Porém, para esta metodologia da ANA (aqui para Pernambuco) o ganho que isso poderia trazer é reduzido, pois os reservatórios que possuem CONSU e nos quais são realizadas as alocações ficam todos no semiárido, onde a Q95 é zero ou praticamente zero, devido aos rios apresentarem regimes intermitentes.

No modelo SWAT há opções como inserir pontos do exultório em qualquer parte da área de drenagem, que seria umas das grandes vantagens do modelo visto que alguns modelos não têm essa opção por serem limitados quanto ao tamanho das sub-bacias, o que possibilita ter o exultório exatamente no ponto onde está a estação fluviométrica.

REFERÊNCIAS

AGENCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. Disponível em: <
<http://www.apac.pe.gov.br>>. Acesso diversificado durante toda pesquisa

CAPITULO III

DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO, BALANÇO CLIMATOLÓGICO E DINÂMICA
DA VEGETAÇÃO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO, BALANÇO CLIMATOLÓGICO E VEGETAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE INGAZEIRA

RESUMO: O conhecimento das condições reais de uma dada bacia hidrográfica é de grande valor para o planejamento agrícola. Sendo assim, procurou-se realizar a caracterização hidrológica da dinâmica da umidade do solo e sua relação com a vegetação, balanço climatológico e índices climáticos na Bacia do Rio Ipanema-PE. O estudo foi desenvolvido para a bacia do açude da Ingazeira, pertencente ao município de Venturosa em Pernambuco. A umidade do solo foi medida para os 12 meses dos anos de 2011 até 2017 em duas profundidades, 20 e 40 cm, e diferentes coberturas vegetais, solo descoberto (SD20 e SD40), cobertura natural (CN20 e CN40), barramento com palma (BP20 e BP40) e cobertura morta (CM20 e CM40) na Bacia experimental do Mimoso. A caracterização do comportamento das umidades do solo nos diferentes tipos de cobertura do solo para as duas profundidades, bem como a comparação com a precipitação nos meses de cada ano foi realizada com base na análise multivariada utilizando componentes principais (PCA). O balanço hídrico climático mensal foi estimado pelo método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) e os resultados obtidos foram as classificações climáticas e os índices climáticos. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) e a temperatura de superfície do solo (Ts) foram obtidos com base nos produtos MOD13A2 e MOD11A2, respectivamente, do sensor Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer – MODIS, a bordo do satélite Terra, da NASA. Ambos os produtos possuem resolução espacial de 1 km e são formados por uma composição de imagens de 8 dias. Os dados meteorológicos foram coletados de uma estação automática pertencente ao INMET. Foram encontradas diferenças entre as umidades em função da cobertura vegetal e uma diminuição acentuada nos totais de precipitação registrados na área da bacia, no período de 2011 a 2017 juntamente com uma tendência de aumento das temperaturas e crescente aumento do índice de aridez, resultando na diminuição da umidade e aumento na evapotranspiração na área da bacia apresentando deficiência hídrica para a região. Assim, verifica-se que o monitoramento e levantamento hidrológico forneceu uma ordem de grandeza da umidade do solo e suas correlações com os dados hidro-climáticos, contribuindo para melhor gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Ipanema-PE.

PALAVRAS-CHAVE: Cobertura vegetal. Precipitação. Sonda de nêutrons. Sensoriamento remoto.

DYNAMICS OF SOIL MOISTURE, CLIMATOLOGICAL AND DYNAMIC BALANCE OF VEGETATION IN SEMI-ARID REGION

ABSTRACT: Knowledge of the actual conditions of a given river basin is of great value for agricultural planning. Thus, we attempted to perform the hydrological characterization of the soil moisture dynamics and its relationship with vegetation, climatological balance and climatic indexes in the Ipanema River Basin-PE. The study was developed for the basin of the Ingazeira dam, belonging to the municipality of Venturosa in Pernambuco. Soil moisture was measured for the 12 months of the years 2011 to 2017 in two depths, 20 and 40 cm, and different vegetation cover, uncovered soil (SD20 and SD40), natural cover (CN20 and CN40), palm bush (BP20 and BP40) and mulch (CM20 and CM40) in the Mimoso experimental basin. The characterization of the soil moisture behavior in the different soil cover types for the two depths, as well as the comparison with the precipitation in the months of each year was performed based on the multivariate analysis using principal components (PCA). The monthly climatic water balance was estimated by the method proposed by Thornthwaite and Mather (1955) and the results obtained were the climatic classifications and the climatic indexes. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the soil surface temperature (Ts) were obtained based on the products MOD13A2 and MOD11A2, respectively, of the Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer - MODIS sensor, aboard the NASA satellite Terra. Both products have spatial resolution of 1 km and are formed by an 8-day image composition. The meteorological data were collected from an automatic station belonging to INMET. Differences were found between the moisture content and the vegetation cover and a marked decrease in precipitation totals recorded in the basin area from 2011 to 2017, together with a tendency of increasing temperatures and increasing aridity index, resulting in a decrease of the humidity and increase in the evapotranspiration in the area of the basin presenting water deficiency for the region. Thus, it is verified that hydrological monitoring and surveying provided an order of magnitude of soil moisture and its correlations with hydro-climatic data, contributing to better management of water resources in the Ipanema-PE river basin.

KEYWORDS: Vegetal cover. Precipitation. Neutrons probe. Remote sensing.

INTRODUÇÃO

As chuvas irregulares, pouco frequentes, os longos períodos de estiagem, o clima e as mudanças de uso da terra adicionam complexidade nos processos hidrológicos das regiões semiáridas (MONTENEGRO e RAGAB, 2010). A precipitação tem papel preponderante na disponibilidade de biomassa em áreas secas e por isso altamente correlacionada com a cobertura vegetal.

Em ambientes semiáridos a análise da cobertura vegetal é complexa face ao alto grau de variabilidade interanual da precipitação. Mudanças detectadas nas propriedades físicas da superfície da terra pode ser resultado de uma elasticidade da resposta à precipitação (BRADLEY e MUSTARD, 2005), não estando relacionadas diretamente com efeitos da ocupação humana nessas áreas.

Por isso é necessário além do estudo de propriedades físicas do solo a utilização de outros índices que possam ajudar no refinamento dos resultados obtidos, como o índice de aridez.

Aridez é a característica do clima que relaciona a insuficiência de precipitação necessária para manter uma vegetação. Nesse caso, o grau de aridez de certa região depende da quantidade de água proveniente da precipitação e da perda máxima possível de água através da evapotranspiração potencial (ALVES et al., 2012). O Índice de Aridez é de importante utilização em estudos que englobam áreas secas, bem como estudos da desertificação, uma vez que a susceptibilidade a este processo está diretamente associada ao nível de aridez do local.

Para análise das mudanças da cobertura e uso do solo técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas em estudos temporais (FOODY, 2010; GÓMEZ et al., 2011). Atualmente, existem diversos sensores remotos com resoluções espaciais, temporais e espectrais diferentes que vêm sendo utilizados para compreensão desses processos (AMIRI et al., 2009; CARREIRAS et al., 2006). Nessas aplicações o principal interesse é compreender as mudanças ocorridas na paisagem ao longo do tempo em função do balanço hídrico.

Pesquisas teóricas e experimentais sobre a umidade do solo em função do tempo tem sido largamente realizadas interferindo em diversos processos hidrológicos, em diferentes escalas espaciais (BORGES et al., 2014; KORRES et al., 2015; LOPES et al., 2015).

Em estudo na bacia Mid-Atlantic Piedmont, verificou-se que um índice de umidade topográfica explica consistentemente a maior parte da variação na umidade da superfície do

solo. A força dessa relação sugere a aplicabilidade do índice de umidade como um guia para a amostragem estratificada. e como base para modelagem nesta região (TAGUE et al., 2010).

A água do solo é uma parte determinante na interação entre as águas superficiais e subterrâneas, ambas importantes para o crescimento das culturas e para as decisões de planejamento agrícola. Além disso, afeta a mitigação do risco de inundação e aumenta a produtividade (HUA et al., 2017).

O conhecimento da umidade do solo é muito importante para a agricultura, uma vez que a mesma é responsável por controlar o desenvolvimento das culturas, auxiliando no estudo dos processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera, modelagem hidrológica e planejamento dos sistemas de drenagem (ARAÚJO et al., 2010). O monitoramento dessa variável é de suma importância para planejamento das atividades agrícolas, em virtude disso, dá-se a importância de séries temporais com dados consistentes.

O balanço hídrico é essencial em diversas áreas do conhecimento, tais como a agrícola, florestal e hidrológica. O entendimento do ciclo hidrológico auxilia no processo de planejamento e manejo dos recursos hídricos, em estudos ambientais e projetos de obras hidráulicas (MARINHO FILHO et al., 2012).

O Balanço Hídrico Climático (CLIMWB) é muito utilizado na caracterização climática e também pode oferecer importante contribuição na identificação da demanda de água para irrigação de uma região (LOPES et al., 2017) como em escala de bacia hidrográfica (LOUZADA et al., 2018).

Moghaddam e Mohammadkhan (2017) simularam o índice de umidade Thornthwaite (ET) para as zonas dentro de uma província central do Irã durante os períodos de 50 anos no século 21, e estimaram o efeito interativo do ET, e estimativa do balanço hídrico mensal de Thornthwaite na sub-bacia Mighan durante o mesmo período.

Os processos de mudanças da cobertura e uso da terra são parte das discussões globais sobre o meio ambiente, há algumas décadas. Os sistemas terrestres respondem às alterações antrópicas, causando mudanças em seus ciclos que, em resposta, vão afetar as atividades humanas (LIANA e SHIMABUKURO, 2007).

Ante o exposto, o objetivo desse estudo é analisar a conectividade hidrológica da dinâmica da umidade do solo, vegetação, balanço climatológico e índices climáticos em sub-bacia hidrográfica do açude da Ingazeira localizada na região semiárida de Pernambuco.

MATERIAL E MÉTODOS

O município de Venturosa está localizado na Mesorregião do Agreste Pernambucano, Microrregião do Vale do Ipanema, com área de 338.121 km². Sua geografia, situada a uma latitude 08°34'29" sul e a uma longitude 36°52'27" oeste, estando a uma altitude de 530 metros, limita-se geograficamente, ao Norte com o município de Alagoinha, ao Sul com os municípios de Caetés e Capoeiras, ao Leste com os municípios de Pesqueira e Alagoinha e ao oeste com o município de Pedra.

O clima é classificado como BSh segundo a Köppen. Predomina o clima do tipo Tropical Semiárido, com uma estação seca bem definida e uma curta estação chuvosa no verão, temperaturas elevadas a maior parte do ano, com médias que vão de 26 °C a 28 °C nos meses de setembro a abril, e de 18 °C a 25 °C nos meses de maio a agosto. O período chuvoso geralmente se inicia com chuvas nos meses de novembro a fevereiro (Trovoadas), intensificando-se entre os meses de março a abril. A precipitação média anual é de 450 mm ano⁻¹.

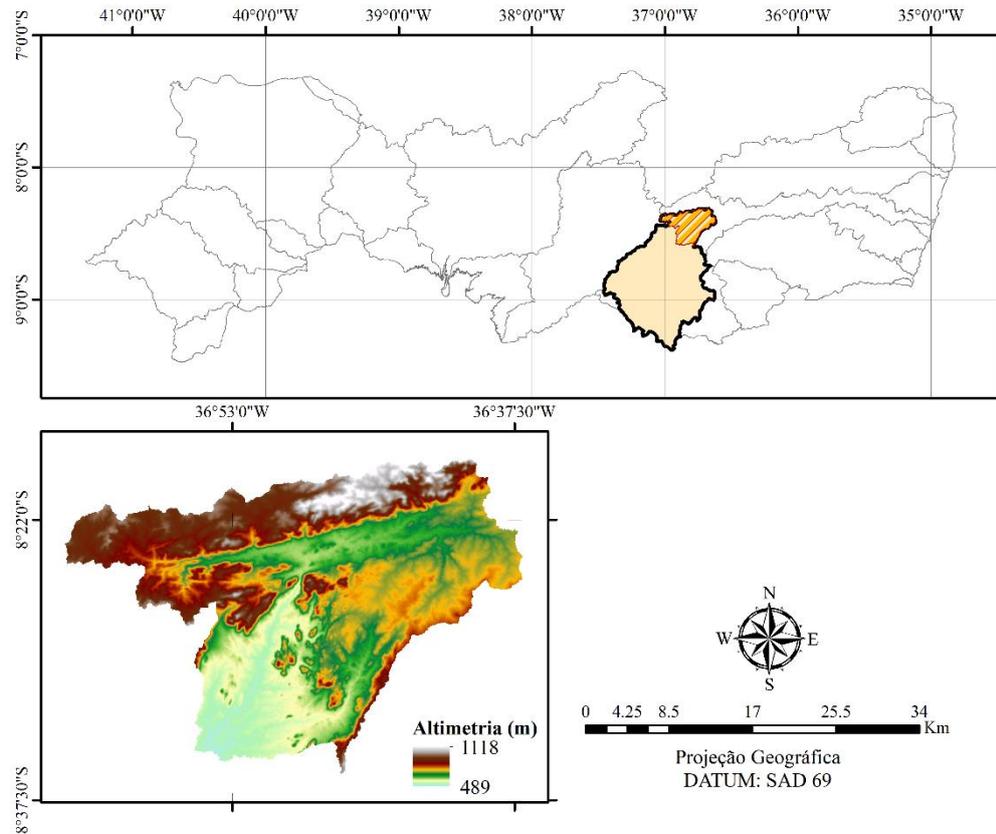
Tipicamente formada por Caatinga Hiperxerófila, constituída por uma vegetação arbórea de pequeno porte, arbustos e cactos em sua maior parte, com trechos de Floresta Caducifólia, boa parte já modificada por desmatamentos, plantações e pastagens.

A bacia do Ingazeira está inserida no Planalto da Borborema (rochas de embasamento cristalino que englobam o subdomínio de rochas metamórficas), com domínio hidro geológico totalmente do tipo Fissural, ideal para a confecção de poços tubulares para captação de água subterrânea. O solo da bacia é classificado como argiloso/arenoso/pedregoso/rochoso, com ocorrência mineral de granito.

O município situa-se nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema. Seus principais tributários são os rios Ipanema, dos Bois e Cordeiro, e os riachos do Meio, Carrapateira, da Luiza, das Cabeceiras, Chã de Souza, da Pedra Fixa e Simão. Todos os cursos d'água são intermitentes. O Açude Ingazeira tem capacidade de acumulação de 4.800.000 m³ de água.

Na bacia do Açude Ingazeira foi realizado o balanço hídrico normal climatológico, a caracterização da umidade do solo, dos índices de aridez, o índice de precipitação padronizada, e índices de vegetação na bacia do açude da Ingazeira.

Figura 1. Localização do município de Venturosa-PE, na bacia do Ingazeira.

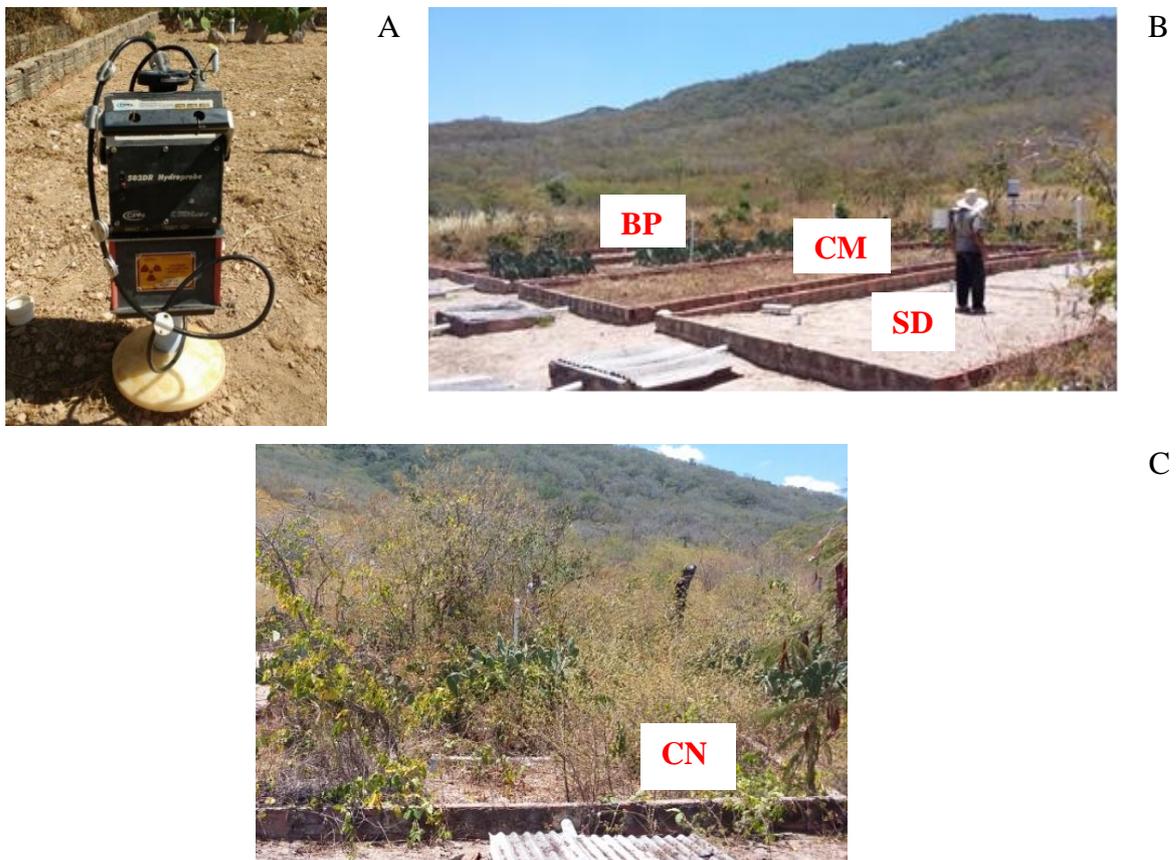


Umidade do solo

A umidade do solo foi medida para os 12 meses dos anos de 2011 até 2017 em duas profundidades, tem sido regularmente realizado o monitoramento da umidade do solo com sonda de nêutrons (Modelo CPN 503 DR), nas parcelas distribuídas na bacia do Alto Ipanema, ampliando a série histórica já existente na bacia (Figura 2), realizada por BORGES et al., 2014; LOPES et al., 2015; SANTOS et al., 2011; SANTOS et al., 2017).

Em cada parcela experimental há oito tubos, com profundidade de 0,60 metros para ser aferida a leitura, dessa forma a umidade do solo é medida de 0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 metros de profundidade, nesta mesma ordem com a sonda, há quatro tipos de tratamento nas parcelas: Cobertura Natural (CN), Cobertura Morta (CM), Barramento em Palma (BP) e Solo Descoberto (SD).

Figura 2. Medição da umidade do solo. Em A: sonda de nêutrons; B: solo descoberto (SD), cobertura morta (CM), barramento em palma (BP); C: cobertura natural (CN).



Foi calculado o índice de umidade do solo (WI), comparando-se as medidas de sonda de nêutrons observadas na da bacia e do WI do satélite (Equação 1) como em Montenegro e Ragab (2010). Para estimativa da umidade do solo via imagens de satélite com pixels de dimensão de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Foram utilizadas informações da camada de solo de 0-10 cm, fornecidos diariamente pelas simulações numéricas de um modelo de superfície do projeto Latin América Flood and Drought Monitor (LAFDM), como utilizados por Lima e AghaKouchak (2017) e Reboita et al., (2017).

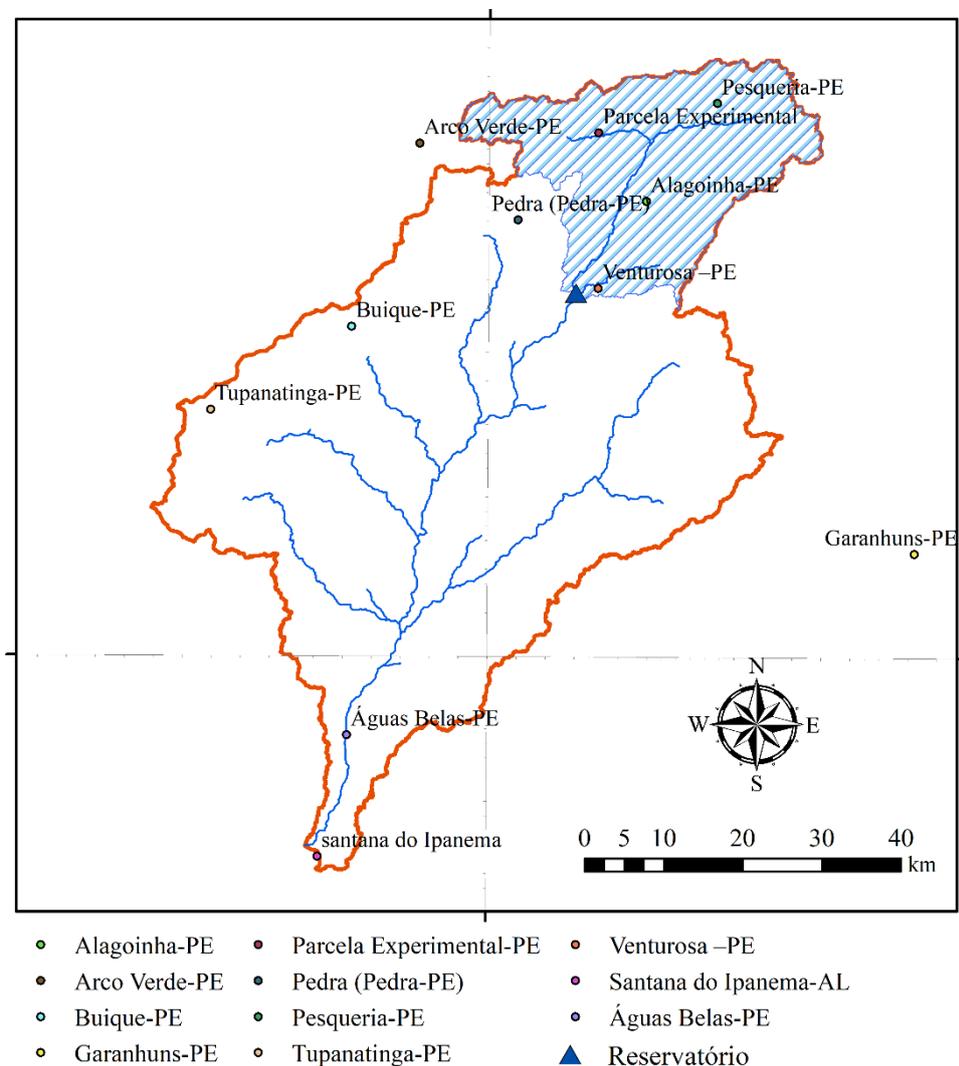
$$WI = \frac{(SM_{i,j} - SM_{Minj})}{(SM_{Max} - SM_{Min})} \quad (1)$$

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% com o Software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2008), a fim de avaliar a diferença entre as coberturas vegetais na camada de 20 cm, onde há uma maior dinâmica da umidade. Realizou-se uma análise exploratória não espacial nos dados em busca de algum indicativo de necessidade de transformação, devido a não normalidade dos dados ou à presença de outliers. Foram construídos os box-plot, para a profundidade de 20,40

e 60 cm e posteriormente, apenas para a camada de 20 cm, para averiguar a distribuição da umidade de acordo com as coberturas vegetais.

Foi também mensurada a precipitação mensal na bacia. Para medição da precipitação foram utilizados sete pluviômetros monitorados pela APAC, que estão situados nas cidades de Venturosa, Pedra, Garanhuns, Pesqueira, Arcoverde, Buíque, Tupanatinga e Alagoinha e os do Laboratório de Água e Solo/UFRPE, estas estações foram utilizadas para o cálculo do índice de precipitação padronizada (SPI), (série de 1985 a 2017). A espacialização das estações pode ser observada na Figura 3.

Figura 3. Mapa das estações Pluviométricas da Bacia do Açude Ingazeira-PE.



A caracterização do comportamento das umidades do solo nos diferentes tipos de cobertura do solo para as duas profundidades, bem como a comparação com a precipitação nos meses de cada ano, foi realizada com base na análise multivariada utilizando componentes principais (PCA), após a estatística descritiva da medição.

Os autovalores e autovetores foram gerados a partir da matriz de covariância das variáveis originais, utilizando o R (R Development Core Team, 2013). Para fins de comparação dos dados, foram utilizadas as componentes que somadas explicavam mais de 70% da variância total para cada ano.

Balanco hídrico mensal climatológico

Para cálculo do balanço hídrico (BHC), a série histórica dos dados de volume do reservatório foi analisada a partir de uma série sem falhas dos anos de 2011-2017 da estação agroclimatológica de Alagoinha-PE, a qual foi determinada como a mais representativa da bacia pelo método de Thiessen.

Para geração automatizada dos polígonos de Thiessen, foram consideradas as coordenadas geográficas dos pontos pluviométricos instalados na bacia e estações pluviométricas da ANA, instaladas no entorno da área de drenagem da bacia. No entanto, para o cálculo da média foram considerados somente os pluviômetros que estão dentro da bacia. Para a obtenção da média de Thiessen, com geração de mapa foi utilizado o software ArcGis 10.1 por meio da ferramenta ArcToolBox (Analysis Tools – Proximity), no qual foi considerado apenas a área de influência dos pluviômetros que estão dentro da bacia, com suas respectivas áreas, percentual de cada área, e precipitação média anual.

O balanço hídrico (BHC) foi obtido pelo método de Thornthwaite; Mather (1955), assumindo uma capacidade de água disponível no solo (CAD) de 100 mm (diretamente relacionado à vegetação semidecidual característica), procedimento realizado com o auxílio da planilha eletrônica “BHnorm61”, elaborada por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998). Foram considerados os dados médios mensais de precipitação e a temperatura média mensal.

Para tanto, não foram realizados procedimentos para preenchimentos de falhas nas bases de dados. Em seguida, calculou-se a evapotranspiração potencial (ETP) pelo método de Thornthwaite, seguindo as considerações realizadas por Pereira et al. (1997). Inicialmente, calculou-se a evapotranspiração potencial padrão (ETPp, mm/mês) pelas equações empíricas (2,5):

Quando: $0 < T_n < 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$,

$$\text{ETPp} = 16 \times \left(10 \frac{T_n}{I} \right)^a \quad (2)$$

Em que: T_n - temperatura média do mês n , em °C; e I - é um índice que expressa o nível de calor da região. O subscrito n representa o mês, ou seja, $n=1$ é janeiro; $n=2$ é fevereiro; etc.

O valor de I depende do ritmo anual da temperatura, integrando o efeito térmico de cada mês, sendo calculado pela equação (3):

$$I = 12 \times (0,2Ta)^{1,514} \quad (3)$$

O expoente “ a ”, sendo uma função de I , também é um índice térmico regional, e é calculado pela equação (4):

$$a = 0,49239 + 1,7912 \times 10^{-2} \times I - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 \quad (4)$$

Quando: $T_n \geq 26,5$ °C,

$$ETP_p = -415,85 + 32,24 T_n - 0,43 T_n^2 \quad (5)$$

Índice de aridez

Elaborado por Thornthwaite (1948) e ajustado posteriormente por Penman (1953), este índice pode ser calculado pela equação (6):

$$I_a = \frac{Pr}{ETP} \quad (6)$$

Em que: I_a - representa o índice de aridez, Pr - corresponde à precipitação anual e ETP - à evapotranspiração potencial anual (mm).

A partir do cálculo do índice de aridez para a estação selecionada foi determinada a susceptibilidade à desertificação (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação quanto ao nível de susceptibilidade à desertificação com o auxílio do uso do Índice de Aridez, adaptada da metodologia de Matallo Júnior (2001).

Níveis de susceptibilidade à desertificação	Índice de Aridez
Superior a moderada	$IA > 0,65$
Moderada	$0,51 < IA < 0,65$
Alta	$0,21 < IA < 0,50$
Muito alta	$0,05 < IA < 0,20$
Inferior a muito alta	$IA < 0,05$

Índice de precipitação padronizada e índices de vegetação

Para detecção e avaliação da severidade da seca meteorológica, foi calculado o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), com base em metodologia proposta por McKee et al. (1993).

De acordo com essa técnica, a caracterização do regime de precipitação pluvial é realizada por meio do ajuste das séries empíricas à distribuição gama.

Como metodologia é frequentemente utilizada operacionalmente para definir estágios de seca e desencadear ações, é importante entender os intervalos de confiança associados à sua estimação (CARBONE et al., 2018; MESCHIATTI et al., 2016; PATEL et al., 2018; STEINEMANN et al., 2015).

Visando garantir melhor representatividade, para obtenção do SPI, foi realizada a média a dos sete postos pluviométricos presentes na bacia, utilizando Thiessen. O SPI foi calculado para diferentes escalas de tempo (6, 12, 24 e 48 meses).

Cada uma dessas escalas tem uma importância do ponto de vista de estudo de secas. O SPI-6, por exemplo, é útil para avaliar a sazonalidade da precipitação, pois compara a precipitação acumulada em um período de 6 meses (ex.: janeiro a junho) com a média de toda a série histórica para esse mesmo período. Já os SPI-24 e SPI-48 permitem a detecção de secas em longo prazo, trazendo informações importantes de ponto de vista de níveis de reservatórios. Os valores de SPI são classificados conforme McKee et al. (1993), segundo Tabela 2:

Tabela 2. Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI segundo Mckee, Doesken, Kleist (1993).

Valores de SPI	Classes
< -2,0	Seca extrema
-1,99 a -1,50	Seca severa
-1,49 a -1,00	Seca moderada
-0,99 a -0,49	Seca leve
-0,49 a 0,49	Seca normal
0,49 a 0,99	Levemente úmido
0,99 a 1,49	Moderadamente úmido
1,49 a 1,99	Severamente úmido
> 2,0	Extremamente úmido

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) e a temperatura de superfície do solo (Ts) foram obtidos com base nos produtos MOD13A2 e MOD11A2, respectivamente, do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS, a bordo do satélite Terra, da NASA. Ambos os produtos possuem resolução espacial de 1 km e são formados por uma composição de imagens de 8 dias.

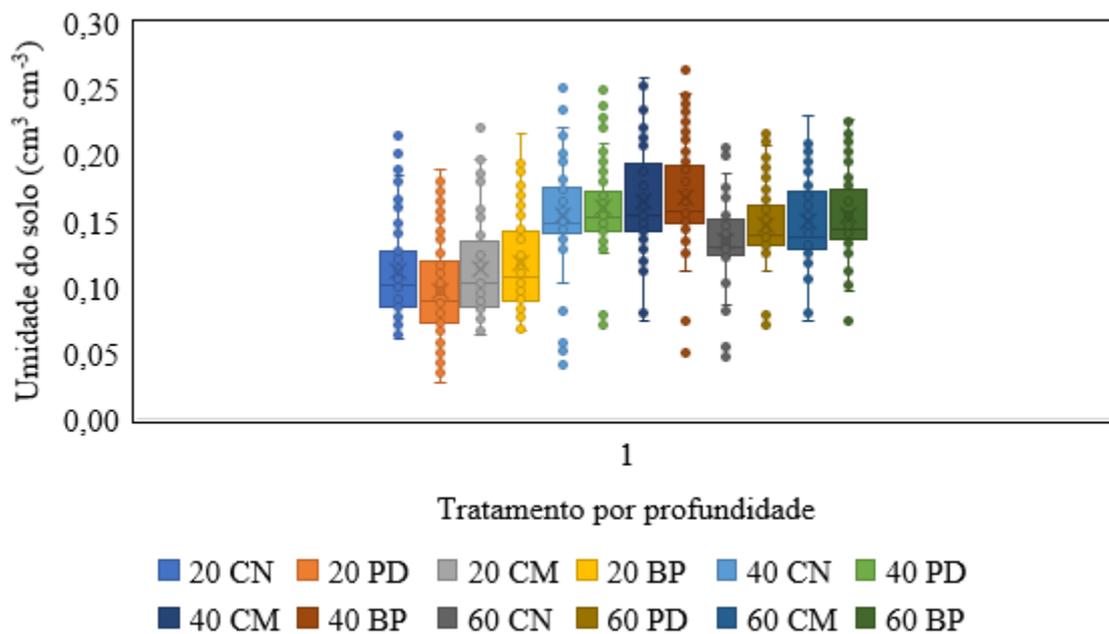
Visando verificar a dinâmica do IVDN e da Ts em função da sazonalidade da precipitação na bacia, foram obtidos mapas temáticos semestrais, do período de 2011 a 2017, totalizando quatorze mapas de IVDN de Ts.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Umidade do solo

A dinâmica da umidade em diferentes profundidades e tipos de coberturas do solo em escala mensal para o período base de 2011 a 2017, pode ser vista na (Figura 4).

Figura 4. Dinâmica da umidade do solo nas camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm no Argissolo Amarelo Distrófico típico, para condições de cobertura natural (CN), parcela com solo descoberto (PD), parcela com cobertura morta (CM) e parcela com barramento de palma (BP) por meio de sonda de nêutrons no período de 2011 a 2017.



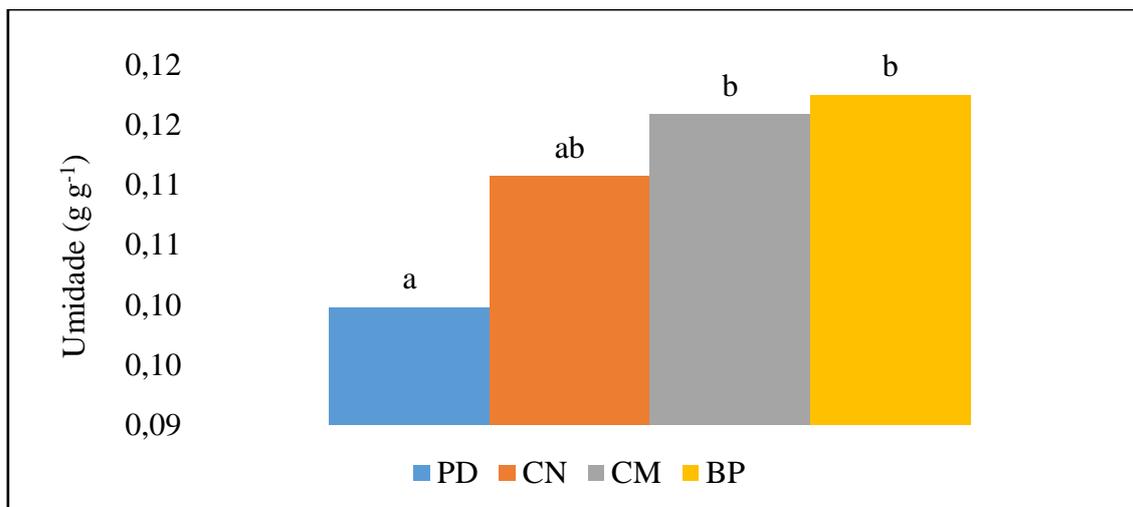
Os valores de umidade na camada de 20-40 cm foram mais elevados que os observados na profundidade de 0-20 cm e 40-60 cm, para ambos os tratamentos durante todo o período investigado (Figura 4). Tal resultado já era esperado quando comparado com a camada superficial (0-20 cm) que está mais propícia a uma maior dinâmica de secamento e umedecimento, e os processos de aquecimento do solo, de evaporação e de evapotranspiração são mais intensos.

Outro fator que deve ser levado em consideração é o aumento do teor de argila ao longo do perfil, que passou de 29,09% (na camada de 0 a 20 cm) para 40,43% (na camada de 20 a 40 cm), citados por Silva (2015).

Valores discrepantes “outliers” foram observados e removidos durante toda série histórica (2011-2017), nos tratamentos (20CN e 20 CM); (40CN, 40PD, 40 BP); (60CN, 60PD, 60 BP), tal comportamento pode estar associado aos processos hidrológicos envolvidos (interceptação, escoamento superficial, infiltração, índice de vegetação, saldo de radiação, temperatura da superfície do solo, evaporação e evapotranspiração real).

Como a área de 0-20 cm de profundidade é potencialmente explorada do ponto de vista da agricultura e é onde ocorre a maior variabilidade da umidade em virtude das condições atmosféricas e climáticas, analisou-se estatisticamente a dinâmica da umidade nas diferentes coberturas vegetais na respectiva profundidade (Figura 5).

Figura 5. Valores médios da umidade do solo na profundidade de 20 cm para diferentes condições de cobertura vegetal, medida por sonda de nêutrons.



Analisando os tratamentos experimentais proposto no presente trabalho, pode-se verificar de uma forma geral, que as parcelas com cobertura morta (CM) e barramento de palma forrageira (BP) apresentaram níveis de umidade elevados dos demais tratamentos ($p > 0,05$), mostrando-se ser um sistema de captação in situ eficiente para as condições locais avaliadas, principalmente pós o estabelecimento de chuvas, atenuando os processos de perda de água para atmosfera. Já a condição de parcela com solo descoberto (PD) apresentou um desempenho inferior entre os tratamentos.

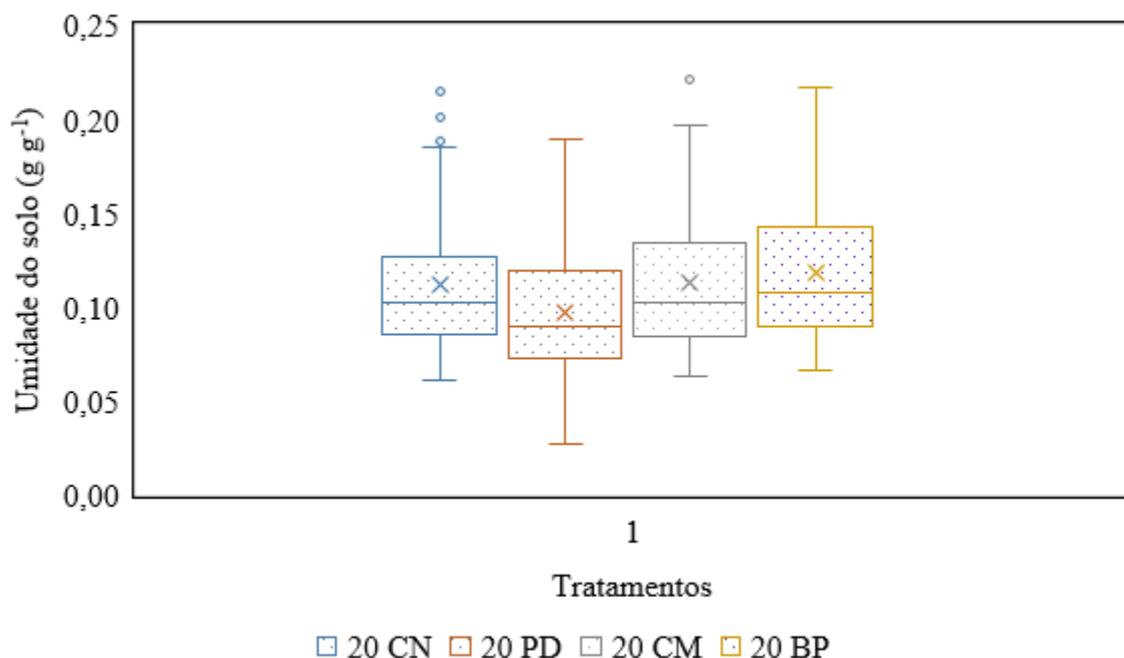
Santos et al. (2010) investigaram a variabilidade temporal do conteúdo de água no solo sob diferentes condições de superfície no semiárido do Estado de Pernambuco, e observaram

que o efeito da cobertura morta na evapotranspiração foi significativa no período seco, e que a cobertura morta associada a barreiras de pedra permitiu maior retenção de água no solo em relação aos outros tratamentos e aumentou a produtividade do feijoeiro na estação seca.

Shen et al. (2012) verificaram que a cobertura morta favoreceu significativamente na umidade do solo na profundidade de 20 a 80 cm, em condições de agricultura de sequeiro no cultivo do milho, no norte da China. Peres et al. (2010) avaliaram o efeito de duas densidades de cobertura do solo (0 e 1,5 kg m⁻² de palha de cana-de-açúcar), nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, e observaram que na camada mais superficial, a presença da palha reduziu as perdas de água praticamente à metade daquela verificada na condição de solo descoberto.

A fim de avaliar a distribuição e a variabilidade da umidade do solo a 20 cm de profundidade para as diferentes condições de cobertura, realizou-se uma análise exploratória dos dados por meio Box-plot (Figura 6).

Figura 6. Dinâmica da umidade do solo nas camadas de 0-20 cm, no Argissolo Amarelo Distrófico típico, para condições de cobertura natural (CN), parcela com solo descoberto (PD), parcela com cobertura morta (CM) e parcela com barramento de palma (BP) por meio de sonda de nêutrons no período de 2011 a 2017.



Pode-se observar que a parcela descoberta apresentou os menores valores de umidade durante o período investigado. A parcela com cobertura natural apresentou de uma forma geral comportamento assimétrico positivo (valores médios maiores que a mediana). Tal

comportamento também foi observado para as condições de parcela em cobertura morta e barramento em palma, devido à ocorrência de umedecimentos bruscos na estação chuvosa.

Melo e Montenegro (2015) avaliaram a dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido pernambucano, e observaram que as diferentes condições de cobertura vegetal e características dos solos da bacia induzem a variações espaciais da umidade, sendo essa influência menos expressiva sobre seus padrões temporais.

Contudo, observa-se que a umidade do solo apresentou variabilidade temporal acentuada para todas as condições de coberturas estudadas, porém ficou evidente que o tipo de cobertura influencia diretamente na amplitude interquartilica e da amostra.

A análise dos componentes principais foi utilizada para resumir o comportamento das umidades do solo nos diferentes tipos de cobertura do solo, para as duas profundidades (20 e 40 cm), estudadas nos diferentes anos de pesquisa. Foram encontrados dois componentes principais que explicam mais de 70% da variância total para cada ano.

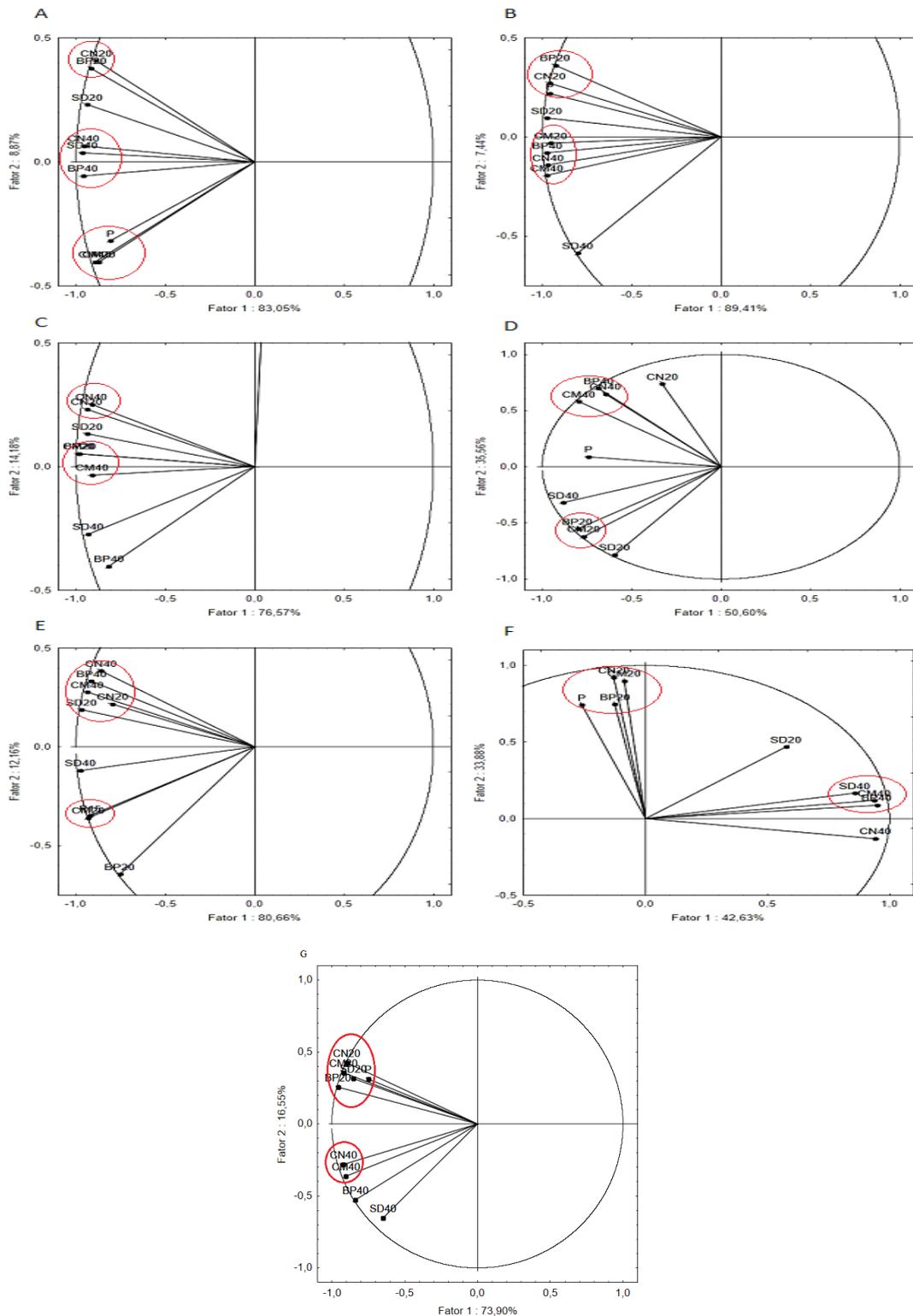
Na Tabela 3, observa-se o resumo das componentes principais para cada ano estudado com as variâncias acumuladas em cada componente.

Tabela 3. Resumo das componentes principais para os anos de avaliação da umidade.

Ano	Componente	Autovalor	Variância	Acumulada
2011	1	7,47	83,04	83,04
	2	0,80	8,87	91,91
2012	1	7,59	84,35	84,35
	2	0,69	7,72	92,07
2013	1	6,55	72,83	72,83
	2	1,32	14,69	87,52
2014	1	6,46	71,76	71,76
	2	1,02	11,35	83,11
2015	1	7,26	80,66	80,66
	2	1,09	12,16	92,76
2016	1	3,84	42,63	42,62
	2	3,04	33,88	76,51
2017	1	6,65	73,89	73,89
	2	1,48	16,54	90,43

Analisando o círculo de correlações na Figura 7A com as variáveis para o ano de 2011 pode-se ver que a umidade na cobertura natural aos 20 cm (CN20) é semelhante a umidade aos 20 cm encontrada com o barramento de palma (BP20).

Figura 7. Distribuição no círculo de correlações das umidades para o ano de 2011 (A), 2012 (B), 2013 (C), 2014 (D), 2015 (E), 2016 (F), 2017 (G).



Já aos 40 cm a umidade na cobertura natural (CN40) assemelhasse a do solo descoberto (SD40) e a do barramento de palma (BP40), fato este justificado depois do efeito de precipitações, que aumentam a umidade do solo em profundidade por contribuição da

infiltração de água para camadas mais inferiores. Aos 20 cm a umidade no solo descoberto (SD20) não apresenta correlação com essas mesmas variáveis.

Aos 40 cm, devido a profundidade, ocorre também uma redução da evapotranspiração, o que faz com que independentemente de quais dessas três coberturas de solo seja encontrada uma umidade mais homogênea, o que não ocorre a 20 cm, onde se tem maior evapotranspiração e umidade mais fortemente correlacionada com o índice de vegetação do solo, que está intrinsecamente ligado com aumento de precipitação e redução de temperatura em 2011 (Tabela 4).

A cobertura morta foi a que mais preservou a umidade do solo, tanto a 20 (CM20) como a 40 cm (CM40). Prova disso é sua alta correlação com a precipitação, que foi da ordem de 984,40 (Tabela 4). A cobertura morta diminui a evapotranspiração, fazendo com que a umidade seja preservada no perfil do solo. A presença da cobertura morta durante o cultivo altera o processo evaporativo da água do solo e conseqüentemente, a evapotranspiração da cultura.

Saglam et al. (2017) encontraram que a cobertura morta tem efeito na conservação da umidade do solo, na temperatura, além de reduzir a evaporação, favorecendo um maior desenvolvimento das plantas. Pereira et al. (2018), também encontram que é possível economizar água na irrigação visto a menor perda de água por evapotranspiração. Porém, principalmente em regiões semiáridas, o excesso de umidade pode provocar problemas como salinização sendo necessária uma preocupação com a drenagem do terreno.

Montenegro et al. (2013) verificaram que coberturas mortas à base de palha, com taxas de aplicação de 2 e 4 t ha⁻¹, foram eficientes no controle do escoamento superficial e da temperatura do solo, além de ter promovido maior umidade no solo durante diferentes eventos de chuva simulada.

Analisando o círculo de correlações na Figura 6B com as variáveis para o ano de 2012, pode-se observar que o barramento de palma (BP20) e a cobertura natural (CN20), ambos com umidade medida a 20 cm de profundidade, correlacionaram-se com a precipitação.

A utilização de plantas para formar um cordão vegetativo é uma técnica conservacionista em que as plantas devem ser cultivadas em fileiras e dispostas em curvas de nível (PAIVA e ARAÚJO, 2012). Em razão da adequação ao clima do semiárido do Nordeste, a palma forrageira é uma alternativa (WANDERLEY et al., 2012). Quando cultivada em cordões vegetativos, essa cultura incrementa o armazenamento de água no solo (LE HOUÉROU, 1996).

A umidade na cobertura morta a 20 e a 40 cm de profundidade (CM20 e CM40) está correlacionada com a cobertura natural a 40 cm (CN40) e ao barramento de palma a 40 cm (BP40). Essa distinção da umidade da CM20 das demais umidades aos 20 cm se deve ao fato de a cobertura morta proporcionar uma menor evaporação da água no solo, corroborando com uma correlação forte entre a cobertura morta e as umidades a 40 cm, onde a variação da temperatura do solo é reduzida.

Observa-se que para a condição de solo descoberto a umidade apresenta diferença para todas as outras coberturas nas duas profundidades, efeito este justificado pelo aumento da temperatura e redução da precipitação em 2012 (Tabela 4), que contribuiu para redução da vegetação (Figura 7A).

Analisando o círculo de correlações na Figura 7C com as variáveis para o ano de 2013, encontra-se uma manutenção do comportamento das umidades decorrente dos períodos de precipitação neste ano, que gerou excedentes hídricos (Figura 7C).

A umidade da cobertura natural a 20 e 40 cm de profundidade (CN20 e CN40) apresentou-se fortemente correlacionadas. O barramento de palma a 20 cm (BP20) a cobertura morta a 20 e a 40 cm (CM20 e CM40) e a precipitação (P) foram fortemente correlacionados.

Em um ano de chuvoso as maiores umidades são encontradas no solo com cobertura morta, o barramento de palma (BP20) apresenta entre essas umidades um indicativo de que a palma está a alguns anos sem corte, possibilitando uma melhor eficiência na proteção do solo.

Já na cobertura natural, a melhor distribuição das chuvas que aumentou em relação ao ano de 2012 (Tabela 4), provocou o melhor desenvolvimento da cobertura natural e potencial manutenção do índice de vegetação (Figura 7A). Chen et al. (2007) estudaram o efeito de diferentes condições de superfície na umidade do solo e geração de escoamento superficial e verificaram que a vegetação formada por gramíneas e plantas herbáceas foi efetiva na conservação da umidade. Silva et al. (2015) encontram que a cobertura natural difere do solo descoberto, este último tendo menor umidade, explicado pela maior taxa de evapotranspiração nessas condições.

Porém o aumento da cobertura natural pode resultar em efeito oposto se houver uma grande densidade de cobertura vegetal. Santos et al. (2011) investigaram a variabilidade temporal do conteúdo superficial da água no solo sob diferentes tipos de cobertura superficial do solo e evidenciaram que a parcela com cobertura natural foi a que apresentou maior redução da umidade do solo em relação as demais coberturas (solo descoberto, barramento em pedra e

palma forrageira), evidenciando o efeito da evapotranspiração real, uma vez que esta condição de superfície do solo possuía a maior densidade de cobertura vegetal; porém ao longo do tempo, a parcela descoberta foi a que apresentou o menor teor de umidade.

Analisando o círculo de correlações na Figura 7D com as variáveis para o ano de 2014, a umidade no barramento de palma (BP20) e cobertura morta (CM20) ambas a profundidade de 20 cm apresentam forte correlação entre si.

A umidade no barramento de palma (BP40), a cobertura natural (CN40) e a cobertura morta (CM40) com 40 cm de profundidade apresentaram forte correlação entre si. Diferente dos outros anos, a precipitação ocupou uma posição intermediária entre os dois grupos formados no círculo de correlações.

O ano de 2014 continuou apresentando ordem crescente dos valores de déficit hídrico em relação aos anos anteriores, que apresentaram altos valores de déficit hídrico, e esta tendência continuou ocorrendo nos anos subsequentes de 2015 a 2016, diferindo no ano de 2017 quando ocorreram maiores precipitações, o que justifica a posição intermediária da precipitação (Tabela 4).

Analisando o círculo de correlações na Figura 7E com as variáveis para o ano de 2015 observa-se que a umidade na cobertura natural (CN20 e CN40), na cobertura morta e barramento de palma (CM40 e BP40) com 40 cm de profundidade correlacionaram-se com a umidade do solo descoberto a 20 cm (SD20).

Essa alta correlação com o a umidade no solo descoberto pode-se atribuir a redução da precipitação, aumento da temperatura (Tabela 4) desse ano, que fez com que a umidade ficasse mais homogênea entre as diferentes coberturas em relação ao solo descoberto, existindo dessa maneira uma menor vegetação como pode ser observada na série histórica do índice de vegetação e seu efeito com a temperatura (Figura 7).

Para o círculo de correlações na Figura 7F com as variáveis no ano de 2016 a cobertura morta (CM20), cobertura natural (CN20), barramento com palma (BP20) todos a 20 cm de profundidade, apresentaram forte correlação com a precipitação.

O solo descoberto (SD40), cobertura morta (CM40) e o barramento com palma (BP40) todos a 40 cm apresentaram forte correlação entre si.

Analisando o círculo de correlações na Figura 7G com as variáveis para o ano de 2017, observa-se que todas as variáveis analisadas a 20 cm de profundidade estão correlacionadas entre si. A alta precipitação pode explicar esse comportamento, visto que este ano apresentou um acréscimo das chuvas e redução da temperatura (Tabela 4). Com a abundância de água não ocorre diferença entre as umidades para as diferentes condições, é na escassez que a capacidade de reter água de cada cobertura vegetal pode ser observada.

Analisando o comportamento da umidade durante os anos é possível encontrar um padrão de comportamento.

Quanto mais densa cobertura do solo maior a manutenção da umidade, quanto maior a precipitação menor a diferença entre aos diferentes tipos de cobertura. O solo descoberto perde mais umidade, primeiramente aos 20 cm de profundidade e depois aos 40 cm de profundidade.

Segundo Rodrigues et al. (2014), a umidade do solo é favorecida pela cobertura do solo. Atua, também, como agente isolante, impedindo oscilações bruscas da temperatura do solo e contribuindo para a menor evaporação da água armazenada com melhor aproveitamento do conteúdo de água no solo pelas plantas (BIZARI et al., 2009).

Balço hídrico normal climatológico

Na Tabela 4, são expressos os valores das variáveis utilizadas na determinação do balanço hídrico climatológico com as médias mensais para o período base (2011-2017).

Tabela 4. Dados mensais para o balanço normal climatológico para os anos de 2011 a 2017 da Bacia do rio Ipanema-PE (Ingazeira).

MESES	2011			2012			2013			2014			2015			2016			2017		
	T	P	ETP	T	P	ETP	T	P	ETP	T	P	ETP	T	P	ETP	T	P	ETP	T	P	ETP
Jan	25.4	104.6	129.2	25.45	65.8	129.0	27.0	0.0	155.3	25.9	0.0	137.3	26.3	0.0	142.7	26.5	92.0	146.8	26.90	35.5	155.1
Fev	26.0	96.7	124.5	25.07	48.6	110.0	27.0	0.0	139.6	25.9	11.0	122.8	25.9	92.0	120.5	26.1	8.0	124.5	27.04	9.1	139.8
Mar	25.9	116.4	133.6	25.83	8.9	131.8	27.5	5.0	161.3	26.2	133.0	138.5	26.6	78.0	143.9	26.7	55.0	146.6	27.30	60.7	157.1
Abr	25.2	168.2	116.5	25.74	4.3	123.6	26.6	134.0	136.5	26.2	101.0	130.7	26.7	19.0	138.3	25.4	5.5	118.0	26.22	68.5	130.8
Mai	23.4	241.4	94.8	25.02	20.9	114.5	24.2	25.0	102.2	23.6	66.0	95.7	25.7	11.0	124.3	24.3	179.5	103.0	24.75	162.4	110.2
Jun	22.2	55.5	77.3	23.68	52.8	91.8	22.6	102.0	78.4	22.8	28.0	81.8	23.4	26.5	86.9	23.0	28.9	81.3	22.65	53.6	79.0
Jul	20.9	109.4	66.7	21.82	52.0	72.9	21.3	190.0	66.8	22.3	46.5	78.9	22.2	84.4	74.2	23.4	9.1	88.8	20.63	103.4	60.3
Ago	21.3	19.4	71.7	22.12	28.0	77.0	22.1	77.0	76.5	21.8	55.0	74.0	22.4	12.0	78.2	23.0	4.3	85.4	22.09	44.8	76.0
Set	22.4	33.7	81.5	23.57	1.4	92.8	23.5	2.0	91.8	24.0	10.0	98.6	24.7	3.0	106.3	24.9	0.0	109.1	22.53	16.7	79.7
Out	24.4	5.9	111.3	24.97	0.7	117.6	25.0	5.0	117.5	24.0	85.5	104.5	25.9	0.5	131.2	25.9	21.0	131.8	24.90	3.8	116.0
Nov	25.0	20.5	117.7	26.52	0.0	140.2	25.1	30.0	118.2	25.5	27.0	124.3	26.8	0.0	144.6	26.5	0.0	139.6	26.05	0.8	132.4
Dez	26.0	12.7	137.8	26.61	8.0	148.3	25.8	67.0	134.9	25.8	16.0	134.6	26.7	14.0	148.7	27.0	0.0	154.4	27.04	0.0	156.1
TOTAIS		984.4	1262.6		291.5	1349.3		637.0	1378.9		579.0	1321.8		340.4	1439.9		403.3	1429.5		559.3	1392.4
MÉDIAS	24.0	82.0	105.2	24.7	24.3	112.4	24.8	53.1	114.9	24.5	48.3	110.1	25.3	28.4	120.0	25.2	33.6	119.1	24.8	46.6	116.0

T-Temperatura do ar (°C); P-Precipitação (mm); ETP-Evapotranspiração potencial (mm).

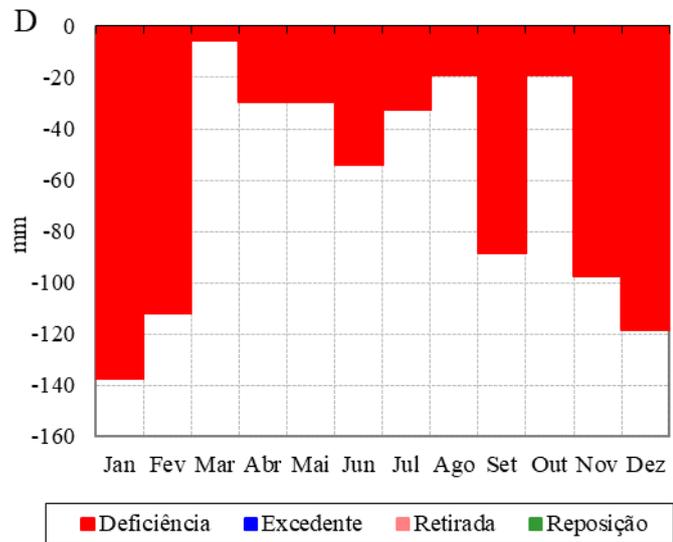
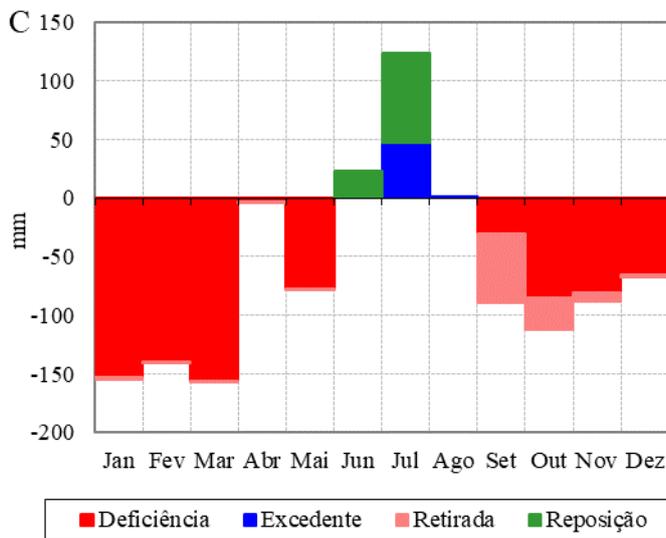
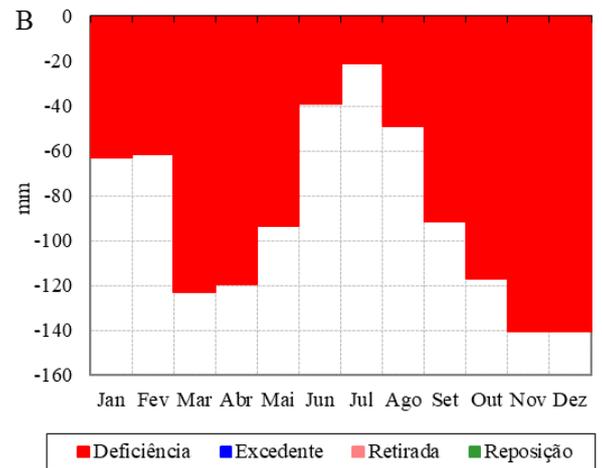
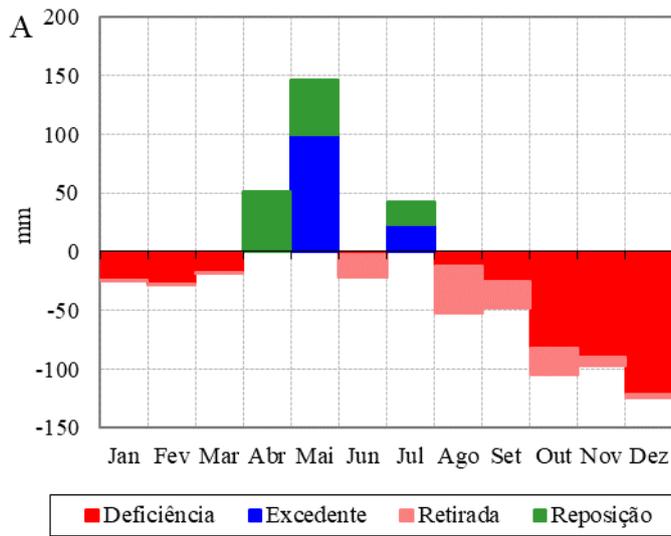
A precipitação total para o período de 2011 (Tabela 4) foi de 984,4 mm, representando o ano com maior índice pluviométrico da série histórica, e consequente redução de temperatura e da taxa de evapotranspiração potencial. Os meses caracterizados com maiores índices pluviométricos foram: janeiro, fevereiro, março, abril, maio e julho, contribuindo para geração de excedente e reposição de água no solo, decorrente das chuvas, com valor correspondente à 122,1 mm durante esse período (Figura 8A). Os meses com o menor registro de precipitação foram: junho, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro, com um somatório de apenas 147,7 mm (15% da precipitação total) revelando-se um período com deficiência hídrica de 400,2 mm. Meses também no qual a quantidade de precipitação não foi suficiente para suprir a demanda hídrica do solo, portanto não houve reposição durante esses meses.

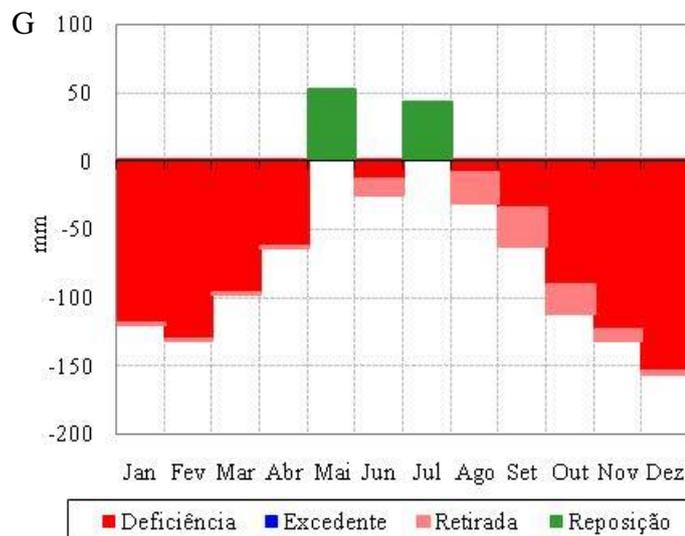
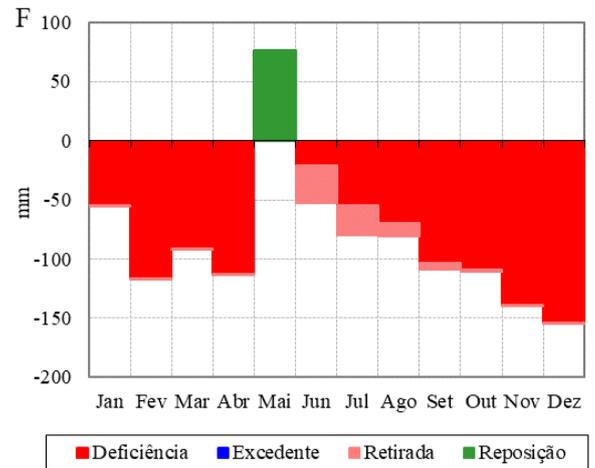
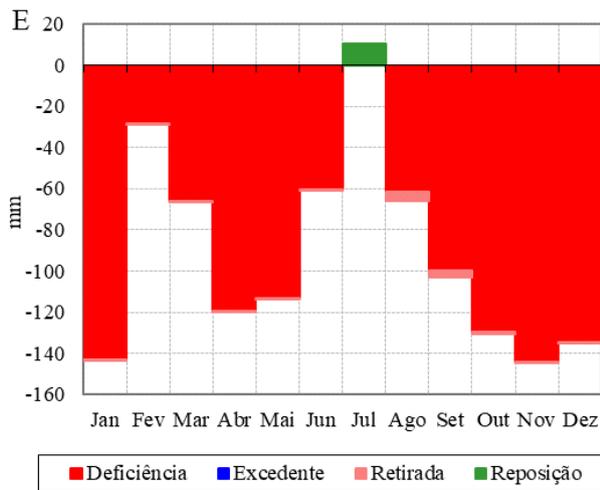
Para o período de 2012 (Tabela 4), a precipitação total foi de 291,5 mm, representando o ano com menor índice pluviométrico da série histórica, e consequente aumento das temperaturas e da taxa de evapotranspiração potencial. Os meses caracterizados com maiores índices pluviométricos foram: janeiro, fevereiro, junho e julho, o que não gerou uma precipitação representativa para o balanço hídrico no solo nesse período. Os meses com o menor registro de precipitação foram: agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro, março, abril e maio, com um somatório de apenas 72,2 mm (24,76% da precipitação total), revelando-se um período com deficiência hídrica da ordem de 1057,9 mm (Figura 8B). Montenegro et al. (2013) investigaram uma série histórica da Bacia em estudo, e com base nos resultados observados a chuva acumulada no ano de 2012 superou apenas os anos de 1915 (158,0 mm) e 1998 (242,4 mm), sendo esses anos considerados atípicos, e que realmente o período de estiagem é cíclico, sendo de importância para um planejamento e um gerenciamento mais adequado para enfrentamento da seca.

Para o ano de 2013 (Tabela 4), a precipitação total para o período foi de 637,0 mm, e os meses caracterizados com maiores índices pluviométricos foram: abril, junho e julho, no qual nota-se, reposição e excedente hídrico, o que se deve à concentração das chuvas, gerando um excedente hídrico total de 47,3 mm (Figura 8C). No restante dos meses do referente ano, ocorreram precipitações inferiores e altas taxas de evapotranspiração potencial (Tabela 4), gerando um período com déficit hídrico de 789,3 mm, no qual ocorreu claramente deficiência hídrica, com a demanda diária das plantas (T_e), superior à transpiração real da cultura (T_r), gerando déficit hídrico. Com isso, pode ser que ocorram altas precipitações em um dia, fazendo com que a CAD seja alcançada e gere grandes excedentes hídricos, mas no dia seguinte, as retiradas de água podem voltar a ocorrer.

Na Figura 8 são representados os componentes do balanço hídrico (déficit e excedente hídrico, reposição e retirada da água do solo) para o período base de 2011 a 2017.

Figura 8. Extrato do balanço hídrico mensal, deficiência, excedente, retirada e reposição, da Bacia do Rio Ipanema-PE (Ingazeira) durante os anos de 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, respectivamente.





Em relação ao ano de 2014 (Tabela 4), a precipitação total foi de 579,0 mm, e com aumento das temperaturas e da taxa de evapotranspiração potencial. Os meses caracterizados com maiores índices pluviométricos foram: março, abril, maio e outubro. Já os meses com o menor registro de precipitação, foram: janeiro, fevereiro, junho, julho, agosto, setembro, novembro, dezembro, com um somatório de apenas 193,5 mm (33,41% da precipitação total) revelando-se um período com deficiência hídrica da ordem de 742,0 mm (Figura 8D).

Com base nos dados climáticos mensais dos anos de 2015 e 2016 (Tabela 4), observa-se que as precipitações totais para ambos os períodos foram: 340,40 e 403,3 mm, respectivamente, ocorrendo um aumento das temperaturas e da taxa de evapotranspiração e consequente redução da precipitação ao longo dos anos. Os meses caracterizados com maiores

índices pluviométricos foram: fevereiro e julho para o ano de 2015 e maio para o ano de 2016, no qual nesses dois últimos anos houve a reposição de água no solo.

O período chuvoso para ambos os anos acima não apresentou armazenamento significativo de água solo, em decorrência disso havendo déficit hídrico e retirada durante a maioria dos meses do ano. Verifica-se que os déficits hídricos totais para ambos os anos foram: 1099,5 e 1026,2 mm, apresentando maiores valores de deficiência hídrica durante os meses de janeiro e novembro para o ano de 2015 e dezembro para o ano de 2016, respectivamente (Figura 8E, 8F).

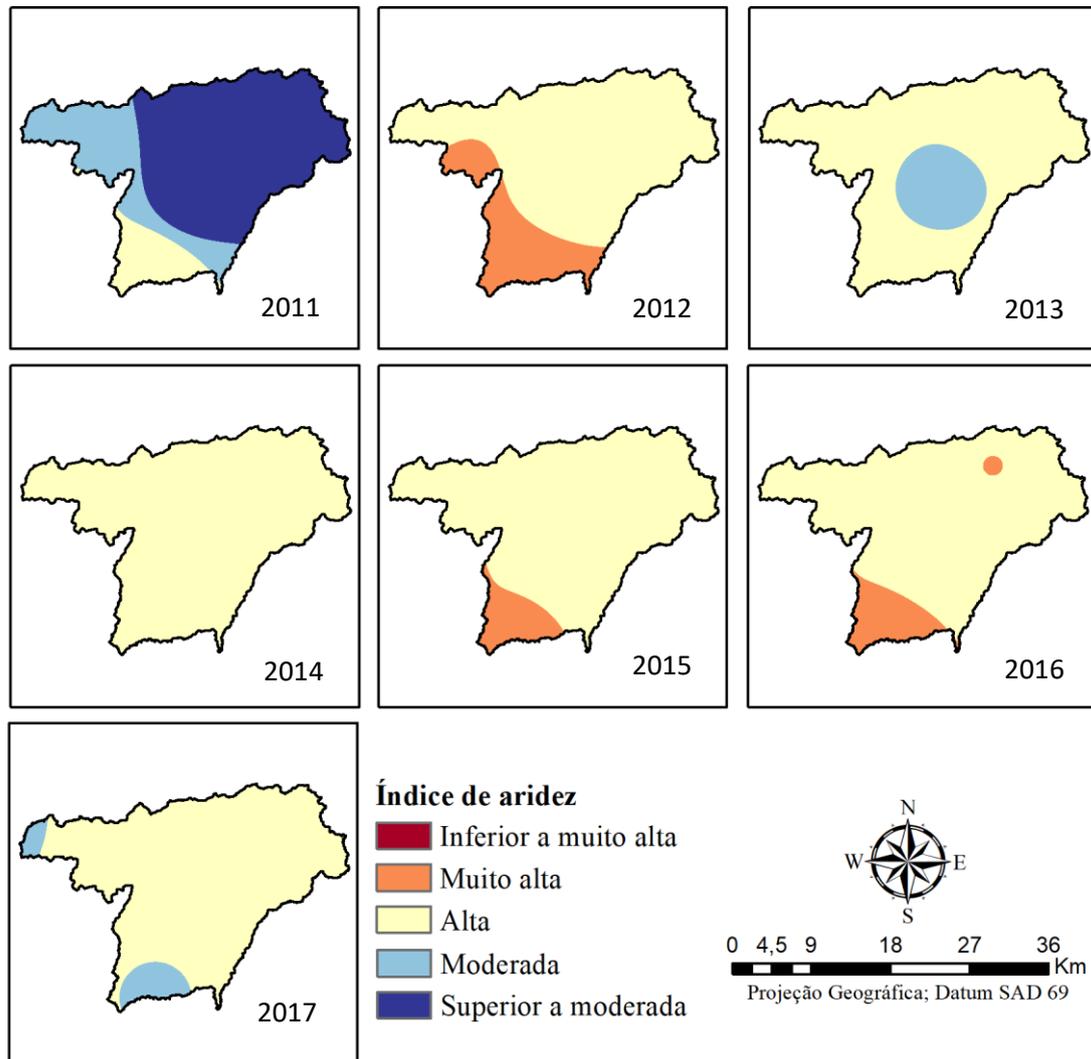
Para o ano de 2017 (Tabela 4), a precipitação total correspondeu um valor da ordem de 559,3 mm, tendo uma tendência de diminuição das temperaturas, redução da evapotranspiração potencial e consequente aumento da precipitação nesse ano. Os meses caracterizados com maiores índices pluviométricos foram: março, abril, maio, junho, julho e agosto, resultando numa reposição de água no solo decorrente das precipitações anteriores (Figura 8G). No restante dos meses do referente ano ocorreram baixas precipitações e altas taxas de evapotranspiração potencial (Tabela 4), gerando um período com déficit hídrico de 833,0 mm, no qual ocorreu claramente deficiência hídrica. Ocorre claramente também a retirada de água no solo que é explicada quando a relação de precipitação e evapotranspiração forem menores que zero, implicando redução do conteúdo de água no solo.

Percebe-se então que, mesmo em meses chuvosos dos respectivos anos ocorre uma maior distribuição de deficiência hídrica. Infere-se que esse fato pode ocorrer devido as altas temperaturas e a intensa radiação solar, o que contribui para o aumento da evapotranspiração potencial e real, favorecendo a deficiência hídrica na bacia hidrográfica.

Índice de Aridez

Na Figura 9, pode-se observar o histórico do Índice de aridez (IA) para a Tendência de Desertificação (TD) durante o período base de 2011 a 2017.

Figura 9. Mapas temáticos de índice de aridez na bacia do Rio Ipanema-PE.



Através dos resultados obtidos para o ano de 2011 (Figura 9A), observa-se que ocorreram os maiores eventos de precipitação e consequente redução nas temperaturas e taxa de evapotranspiração potencial (Tabela 4), apresentando ao Norte e Oeste da bacia classificação quanto à TD “Superior a moderada” com valores de IA superiores a 0,65. Ao Leste e parte do Sul da bacia a TD é classificada como “Moderada” com valores entre 0,51-0,65. No entanto, observa-se que ao Sul da bacia, as condições climáticas são mais críticas em relação ao déficit hídrico, resultando numa classificação “Alta” apresentando valores entre 0,21-0,50. O fator condicionante dessas condições é a alta taxa de evapotranspiração potencial em relação aos baixos totais pluviométricos, como observados na estação de Venturosa-PE, que está localizada próxima a zona de transição do Sertão Pernambucano, apresentando uma alteração a tendência desertificação, corroborando com trabalho de Lopes et al. (2017), que demonstraram que a

desertificação é realidade dessas regiões e está associada a vários fatores, incluindo variações climáticas e atividades humanas.

Para o ano de 2012 (Figura 9B), o cenário foi modificando ao longo da bacia hidrográfica, sendo perceptível o aumento do IA, com efeito a redução dos eventos de precipitação e acréscimo da taxa de evapotranspiração potencial (Tabela 4). Parte do Norte, Leste e Oeste da bacia representa 70% da área sendo classificada como “Alta” com valores entre 0,21-0,50. Ao Sul e parte do Leste da bacia, área de transição do Sertão Pernambucano, o IA é classificado como “Muito alto”, representando 40% da área da bacia com valores entre 0,05-0,20. O comportamento observado nessa bacia também foi constatado por estudos de Silva et al. (2017), no qual afirmaram que como a Bacia do Rio Ipanema está inserida no agreste pernambucano e apresenta clima semiárido, poderá ter seu processo de aridez acelerado, corroborando com resultados encontrados nessa pesquisa.

No tocante ao ano de 2013 (Figura 9C), continua sendo afetado pela redução intensa no nível das precipitações e aumento da taxa de evapotranspiração potencial (Tabela 4), refletindo no IA acentuado em quase toda bacia hidrográfica, ocasionando uma deficiência hídrica no solo, neste tipo situação é necessário que haja um gerenciamento de recursos hídricos para futuras explorações agrícolas. Sendo assim, durante este período base de 2013, apenas na parte central da bacia ocorreu precipitações efetivas de modo a contribuir com um IA classificado como “Moderado” representando valores entre 0,51-0,65.

Com os resultados para o ano de 2014 (Figura 9D), observa-se que as condições climáticas são críticas, baixos índices pluviométricos e alta demanda da taxa de evapotranspiração potencial (Tabela 4), contribuindo para o aumento do IA em toda bacia hidrográfica, elevando a tendência a desertificação, sendo classificada como “Alta” e apresentando valores entre 0,21-0,50. Com base no exposto para o ano base de 2014, eventos críticos nessa escala a partir da categoria “Moderada” já limitam o potencial agrícola e hídrico da região, afetando o gerenciamento de recursos hídricos na bacia hidrográfica (GUEDES et al., 2016).

Em relação aos anos de 2015 e 2016 (Figura 9F e 9E), nota-se que o IA de ambos períodos avaliados têm comportamento similar, sendo afetados pelo efeito das condições climáticas, baixos índices pluviométricos, altas temperaturas e taxa de evapotranspiração potencial (Tabela 4). Observa-se na bacia hidrográfica para ambos os anos, apresentam classificação semelhantes com característica de tendência a desertificação de “Alta” para “Muito alta”, seguindo da parte Norte ao Sul da bacia, com valores entre 0,21-0,50 (Alta) e 0,05-0,20 (Muito alta).

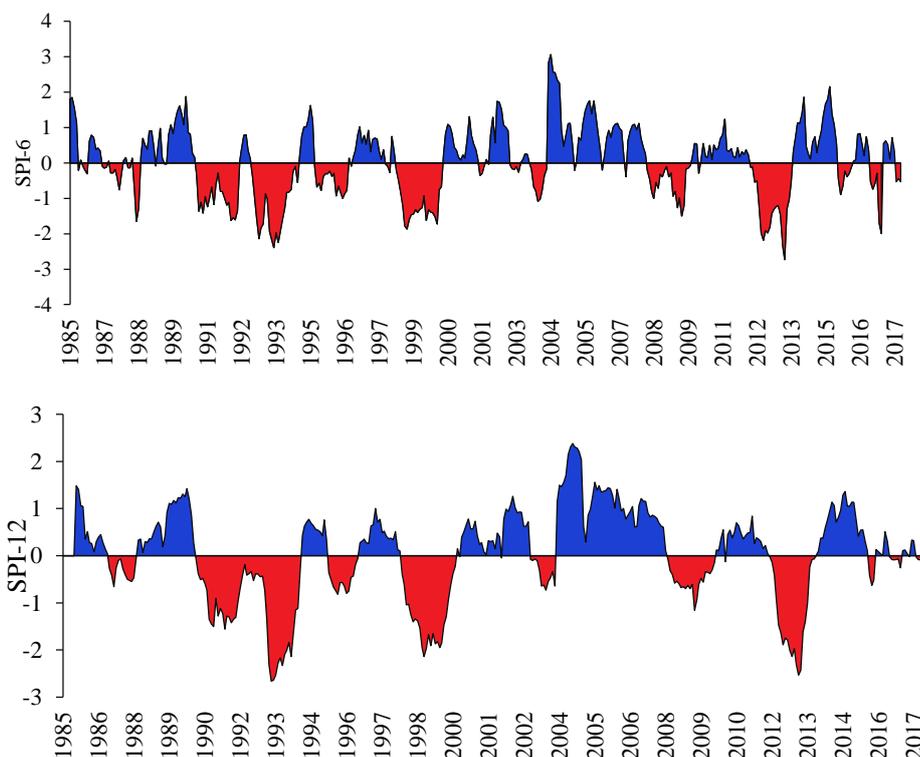
Para o ano de 2017 (Tabela 4), a precipitação total correspondeu um valor da ordem de 559,3 mm, valor considerável, em relação aos anos anteriores, tendendo a diminuição das temperaturas, redução da evapotranspiração potencial e conseqüente aumento da precipitação nesse ano, classificando este ano quanto à TD “moderada a Alta” com valores de IA variando entre 0,21 a 0,65.

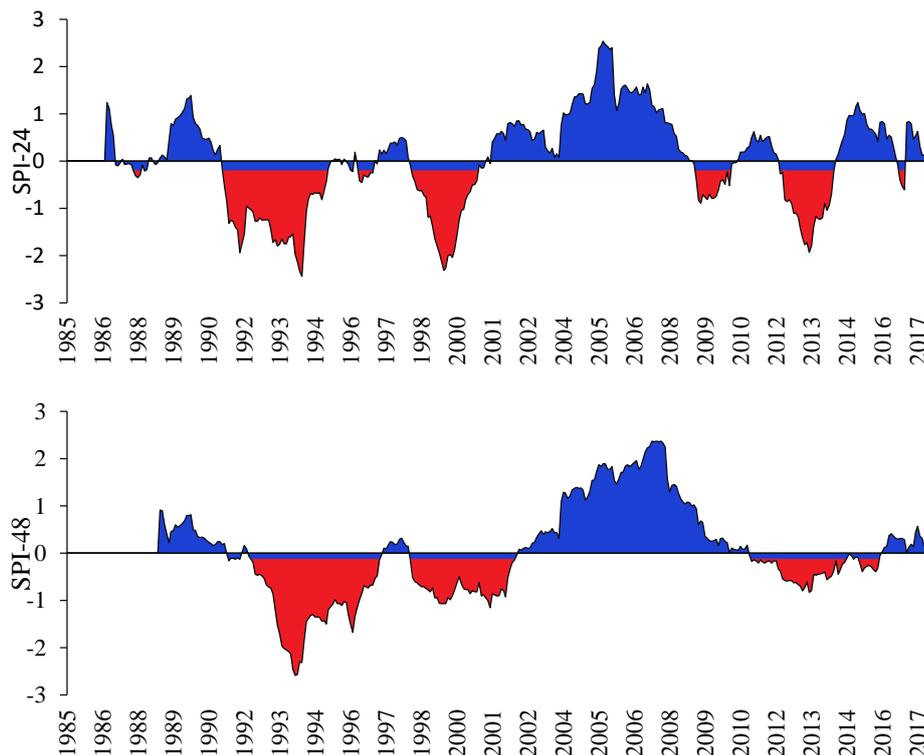
É perceptível o aumento dos valores de “Ia” ao longo dos anos, enfatizando que a tendência dessa região é uma diminuição acentuada da precipitação e conseqüente umidade local da bacia hidrográfica. Com isso, pode-se caracterizar a disponibilidade da água e o planejamento para o uso. Pode também destacar os períodos anuais críticos, com perdas ou excedentes hídricos (SOUZA et al., 2014).

Índice de precipitação padronizada e índice de vegetação

O SPI, por comparar a precipitação normalizada para um determinado período de tempo com a média da série histórica referente àquele mesmo período, permite identificar quando houve seca ou cheia em uma determinada estação. Nota-se a presença de anos críticos ao longo de toda a série, bem como a tendência de agrupamento desses períodos conforme a escala temporal do SPI aumenta (Figura 10).

Figura 10. Distribuição temporal do SPI para o período de 1985 a 2016 na Bacia do Rio Ipanema-PE.



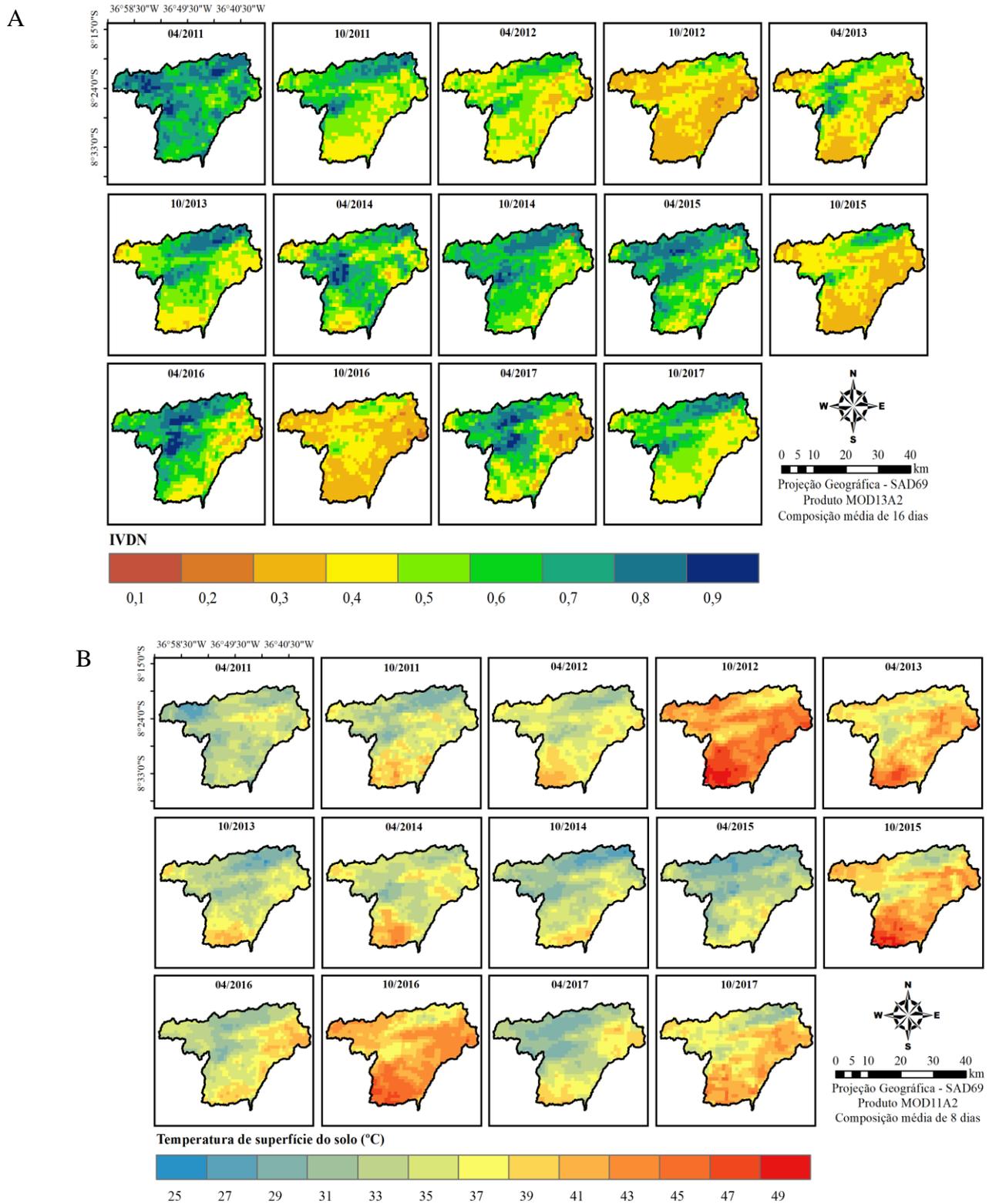


De acordo com Rossato et al. (2017), a região Nordeste do Brasil enfrentou uma de suas maiores secas no ano de 2012. Esse comportamento pode ser detectado em todas as escalas de SPI estudadas. Após um período de relativa cheia, a seca volta a expressar preocupação em 2016, coincidindo com período de baixos índices pluviométricos. Nesse sentido, Asfora et al. (2017) alertam a preocupação de entidades governamentais com a seca severa que acomete Pernambuco desde 2011. O Estado vem apresentando grandes desvios negativos na precipitação acumulada para esses últimos 7 anos, com grandes impactos em diversos setores, principalmente na faixa semiárida.

Considerando as escalas de SPI maiores (24 e 48 meses), a Bacia do Rio Ipanema vinha seguindo por quase uma década em um período de relativa disponibilidade hídrica, situação que passou por alterações em decorrência da estiagem prolongada dos últimos anos. Vale ressaltar que o SPI leva em conta apenas a precipitação pluviométrica. Impactos causados pela elevação de temperatura, que causam efeitos nas mudanças climáticas, não são considerados nesse índice. Sendo assim, os reais danos causados pelas secas podem ser ainda mais severos se levados em conta outros fatores climáticos.

Os impactos da seca podem ser melhor visualizados e compreendidos, também, por meio da temperatura de superfície do solo e índices que demonstram vigor vegetal (Figura 11A), como o IVDN, que varia de -1 a 1. Quanto mais próximo de 1, mais vegetada e mais saudável é a vegetação da área (LINS et al., 2017).

Figura 11. Índice de vegetação IVDN (A) e temperatura de superfície do solo (B) na Bacia do Rio Ipanema (Ingazeira), para o período de 2011 a 2017.



Visualizando conjuntamente as imagens e o SPI-12, o ano de 2011 no primeiro semestre, apresenta um confortável estado hídrico, já que o IVDN apresenta valores próximo a 1 e

temperaturas variando entre 25 e 37 °C (Figura 11B). É possível presumir que o segundo semestre do ano de 2012, apresentou diminuição do índice de vegetação, evidenciando período seco, corroborando com as altas temperaturas observadas para esse mesmo período (37 a 49 °C, Figura 11B).

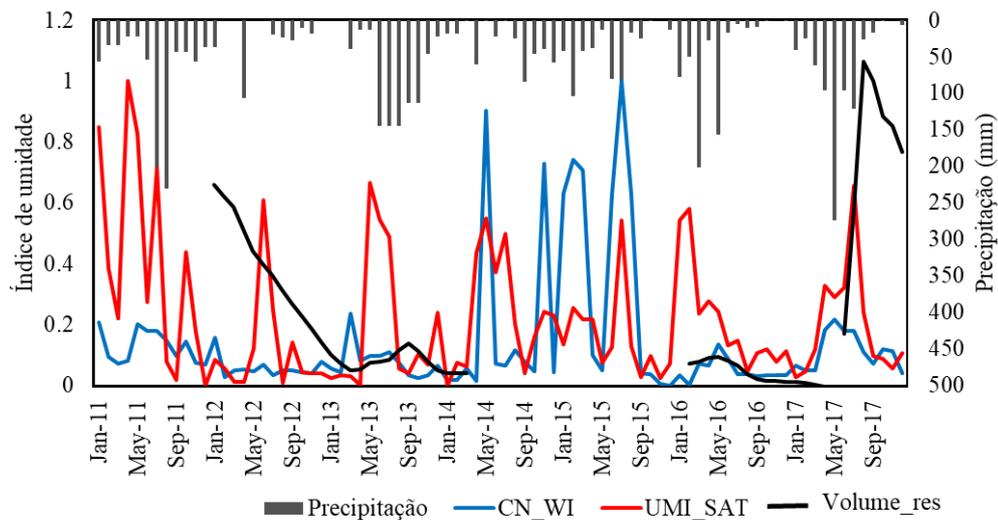
O ano de 2014 apresentou precipitações maiores dentro dessa fase de estiagem, inclusive no semestre mais seco do ano. Com isso, o mês de outubro de 2014 (10/2014) apresentou valores de IVDN maiores, menores temperaturas no solo, quando comparado ao mesmo período nos outros anos, quando as consequências da seca já foram mais evidentes. Os anos de 2015 e 2016, foram marcados por grande escassez hídrica, evidenciado pela baixa precipitação (340,4 e 403,3 mm) e alta evapotranspiração (1439,9 e 1429,5 mm) (Tabela 4), ocasionando redução no índice de vegetação.

No ano de 2017, esse índice vegetativo já exhibe aumento, principalmente no segundo semestre comparando aos anos de 2015 e 2016. Isso se deve a recuperação da vegetação após período de chuvas no ano de 2017 (559,3 mm, tabela 4), comparando-se ao período de chuvas ocorrido em 2014 (579,0 mm, tabela 4). Ademais, percebe-se a boa representatividade da variação sazonal da precipitação na bacia, com base nos mapas. Épocas mais secas, naturalmente, tendem a exibir menor vigor vegetal em toda a bacia, associado a elevadas taxas de temperatura na superfície do solo.

A umidade do solo baseia-se nos parâmetros observados e na relação entre a temperatura da superfície terrestre (LST) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), os dados geoespaciais que permitem gerar informações adequadas relacionadas ao conteúdo de umidade do solo, dependem desses índices (SCHIRMBECK et al.,2017).

O índice de umidade do solo mede a condição de umidade em diferentes níveis no solo (Figura 12). Observa-se que há uma conexão entre o volume observado no reservatório e as umidades em ambas metodologias aplicadas. Quando há menor umidade no solo, nota-se redução no nível deste.

Figura 12. Comparativo das umidades por satélite e sonda de nêutrons e volume (m³) do Reservatório de da Bacia do Ingazeira.



Nos anos de 2012 seguindo a 2013, nota-se menores valores de umidade, relacionando-a com o NDVI, onde estes valores variaram entre 0,1 a 0,4 (Figura 11A), quando este é colocado no intervalo (0 a 0,3), é considerado solo nu, esses anos aconteceram déficit hídrico no balanço climatológico (Figura 8); quando o NDVI está na faixa de (0,3 a 0,6), responde à função linear de dois componentes: solo e vegetação, e quando o NDVI é maior ou igual a 0,6 é considerado vegetação, como ocorre nos anos de 2011 e 2017, nos locais mais a parte leste e sul da bacia, demonstrando notória recuperação da vegetação daquela área, essa umidade também pode ser observada por meio do balanço hídrico na Figura 8A e 8F.

CONCLUSÕES

Foram encontradas diferenças entre as umidades em função da cobertura vegetal e uma diminuição acentuada nos totais de precipitação registrados na área da bacia, no período de 2011 a 2016, juntamente com uma tendência de aumento das temperaturas e crescente aumento do índice de aridez, resultando na diminuição da umidade do solo e aumento na evapotranspiração na área da bacia, apresentando deficiência hídrica para a região.

Assim, verifica-se que o monitoramento e levantamento hidrológico forneceram valores representativos da umidade do solo, e suas correlações com os dados hidro-climáticos, contribuindo para melhor gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Ipanema-PE (Ingazeira).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J. A.; SILVA, M. C.; SILVA, S. V. Indicadores Climáticos das Áreas de desertificação nos Cariris Velhos da Paraíba. *Revista Geonorte*, Edição Especial 2, v.1, n.5, p.585-597, 2012.

AMIRI, R.; et al. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote Sensing of Environment*, v.113, p.2606-2617, 2009.

BORGES, T. K. DE S. et al. E. Influência de práticas conservacionistas na umidade do Solo e no cultivo do milho (*Zea Mays L.*) em semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38:1862-1873, 2014.

BRADLEY, B. A.; MUSTARD, J. F. Identifying land cover variability distinct from land cover change: Cheat grass in the Great Basin. *Remote Sensing of Environment*, v.94, p.204-213, 2005.

BIZARI, D. R. et al. Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistemas plantio direto e convencional. *Ciência Rural*, v. 39, n. 7, p. 2073-2079, out, 2009.

CARBONE, G.J.; LU, J.; BRUNETTI, M. Estimating uncertainty associated with the standardized precipitation index. *Int. Journal of Climatology*, 38 (Suppl.1): 607–616 (2018).

CARREIRAS, J. M. B. et al. Assessing the extent of agriculture/pasture and secondary succession forest in the Brazilian Legal Amazon using Spot Vegetation data. *Remote Sensing of Environment*, v.101, p.283-298, 2006.

CHEN, L. et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena*, v.70, p.200-208, 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um programa para análises e ensino de estatística. *Revista Symposium*, 6:36-41. 2008.

FOODY, G. M. Assessing the accuracy of land cover change with imperfect ground reference data. *Remote Sensing of Environment*, v.114, p.2271-2285, 2010.

GUEDES, R. V. S. et al. Identificação e classificação espaço-temporal de eventos críticos chuvosos ou secos ocorridos em Pernambuco. *Ciência e Natura* v.38, p.413-428, 2016.

GÓMEZ, C.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A. Characterizing the state and processes of change in a dynamic forest environment using hierarchical spatio-temporal segmentation. *Remote Sensing of Environment*, v.115, p.1665-1679, 2011.

GOMES, R. L. R. et al. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos*, v.9, 2015.

HUA, W. et al. Measurement and Simulation of Soil Water Contents in an Experimental Field in Delta Plain. *Water*, 9, 947; doi: 10.3390/w9120947. 2017.

KORRES, W. et al. Spatio temporal soil moisture patterns - A meta-analysis using plot to catchment scale data. *Journal of Hydrology*. v.520, p.326–341. 2015.

LE HOUÉROU, H. N. The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *J. Arid Environ*, 33:135-159, 1996.

LIANA, A. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukur, Y. E.; Ceballos, J. C. (ed.) *O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil*. São José dos Campos: Silva Vieira, 2007. Cap. 14, p.185-205. 2007.

LOPES, I. et al. Balanço Hídrico em Função de Regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. *Irriga, Botucatu*, v. 22, n. 3, p. 443-457, julho-setembro, 2017.

LOPES, I. SANTOS, S. M. dos; LEAL, B. G.; MELO, J. M. M. de. Variação do índice de aridez e tendência climática à desertificação para a região semiárida do nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.10, p.1014-1026, 2017.

LOUZADA, F.L. R. DE O.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Climatological Water Balance With data estimated by tropical rainfall measuring mission for the Doce River Basin. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.38, n.3, p.376-386, may/jun. 2018.

MATALLO JÚNIOR, H. Indicadores de Desertificação: histórico e perspectivas. –Brasília: UNESCO, 2001.

MONTENEGRO, A.A.A. et al. Impacto of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, 109:139-149, 2013.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de ciências ambientais*, v.6, n.2, p.35-47, 2012.

MELO, R.O.; MONTENEGRO, A.A.A. Dinâmica temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.20, n.2, p.430-441, 2015.

- MESCHIATTI, M. C.; BLAIN, G. C. Increasing the regional availability of the Standardized Precipitation Index: an operational approach. *Bragantia*, Campinas, v. 75, n. 4, p.507-521, 2016.
- MONTENEGRO, A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrology Process* 24, 2705–2723, 2010.
- MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semiarid regions: A case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, v.434-435, p.55-68, 2010.
- MOGHADDAM, T. E.; MOHAM MADKHAN, S. An estimation of Thornthwaite monthly water-balance in Mighan sub-basin1. *Natural Environment Change*, Vol. 3, No. 1, Winter e Spring 2017.
- PAIVA, A.Q.; ARAÚJO, Q.R. Fundamentos do manejo e da conservação dos solos na região produtora de cacau da Bahia. In: VALLE, R.R., ed. *Ciência, tecnologia e manejo do cacauero*. 2. ed. Brasília, Ceplac/CEPEC/SEFIS, 2012.p.115-134.
- PATEL, N.R.; SURYANARAYANA, T.M.V.; SHETE, D.T. *Analyzing Extreme Events Using Standardized Precipitation Index during the 20th Century for Surat District, India*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapotranspiração*. Piracicaba: FEALQ, 183p. 1997.
- PEREIRA, A. L.; MOREIRA, J. A. A.; KLAR, A. E. Efeito de níveis de cobertura do solo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). *Irriga*, v.7, p.42-52, 2018.
- PERES, J.G.; SOUZA, C.F.; LAVORENTI, N.A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. *Engenharia Agrícola*, v.30, n.5, p.875-886, 2010.
- PENMAN, H. L. The physical bases of irrigation control. In: *Hort. Congr.*, 2, London, Royal Horticultural Society, p.913-924. 1110. 1953.
- REBOITA, M. S. et al. Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de minas gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.21, 2017.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.2013. URL. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acessado em: 23/04/2018.

- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, São José dos Campos, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.
- ROSSATO, L. et al. Impact of Soil Moisture on Crop Yields over Brazilian Semiarid. *Frontiers in Environmental Science*. November. Volume 5. 2017.
- SAGLAM, M. et al. Modeling the effect of biodegradable paper and plastic mulch on soil moisture dynamics. *Agricultural Water Management*, v. 193, p. 240-250, 2017.
- SANTOS, D.P. et al. Rios Urbanos Limpos: Possibilidade e desafios. In: Arminda Saconi Messias; Lilian Costa. (Org.). *VARIAÇÃO TEMPORAL DA UMIDADE EM BACIA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO*. 1ed. Recife: FASA, v. 9, p. 716-723. 2017.
- SANTOS, T. E. M. dos; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.7, p.670-679, 2011.
- SANTOS, T.E.M.; SILVA, D.D.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of the Pernambuco State. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1733-1741, 2010.
- SHEN, J.Y. et al. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summer maize plants. *Plant Soil Environmental*, v.4, n.58, p.161–166, 2012.
- SILVA, J. R. L. Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de Pernambuco. Recife: UFRPE, Tese de Doutorado, 120 f., 2015.
- SILVA, J. R. L. et al. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 2, p. 293-303, 2015.
- SILVA, R. O. B. da; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SOUZA, W. M. de. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.22, p.579-589, 2017.
- SOUZA, S.O. et al. Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica do Rio Caravelas (BA) como Subsídio ao Planejamento Agrícola. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.07, n.01, p.083-092, 2014.
- SCHIRMBECK, L. W.; FONTANA, D. C.; SCHIRMBECK, J.; MENGUE, P. V. Understanding TVDI as an index that expresses soil moisture. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v.7, 82-90 (2017).

STEINEMANN, A.C.; IACOBELLIS, S.F.; CAYAN, D. R. Developing and evaluating drought indicators for decision-making. *Journal Hydrometeorology* 16(4): 1793–1803. 2015.

TAGUE, C. et al. Plot - and watershed-scale soil moisture variability in a humid Piedmont watershed. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 46, W12541, doi: 10.1029/2009WR008078, 2010.

THORNTWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, New York, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The water balance: publications in climatology*. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

WANDERLEY, W.L. e Consumo, digestibilidade e parâmetros ruminais em ovinos recebendo silagens e feno sem associação à palma forrageira. *R. Bras. Saúde Prod. Anim.*, 13:444-456, 2012.

CAPÍTULO IV

GESTÃO DE RECURSOS HIDRICOS EM BACIA DO SEMIÁRIDO UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM BACIA DO SEMIÁRIDO UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

RESUMO: na atual conjuntura de escassez hídrica, os desafios da gestão ambiental frente aos impactos das mudanças climáticas tornaram mais urgente a necessidade do progresso tecnológico e os resultados da pesquisa científica mais acessíveis e prontos para uso. O monitoramento, a análise e o gerenciamento adequados dos recursos naturais (especialmente a água) exigem a implementação de uma abordagem multidisciplinar conjunta, a fim de criar estratégias racionais e políticas aplicadas para melhores cenários de gestão. Sendo uma abordagem laboriosa, a calibração manual do modelo hidrológico em um contexto semiárido requer um conhecimento profundo da bacia hidrográfica e, tanto quanto possível, dados de entrada de campo para obter simulações confiáveis. Neste estudo, as abordagens de calibração manual e análise de sensibilidade relativa do modelo SWAT (Soil and Water Tool) foram aplicadas para o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica de 3997,4 km² (no rio Ipanema) localizada entre os estados de Pernambuco e Alagoas. Assim, o presente trabalho tem por objetivo calibrar o modelo hidrológico e analisar o balanço hídrico e a vazão da bacia hidrográfica do rio Ipanema com o modelo SWATA análise de sensibilidade dos parâmetros selecionados foi feita com o uso do algoritmo SUFI2, que combina as técnicas de Latin-Hypercube e One-factor-At-a-Time (LH-OAT). Os parâmetros CN2, Esco e GWQMN mostraram ter grande importância na simulação do escoamento. Para avaliar o desempenho do modelo, dados mensais de vazão simulados foram comparados com os observados no exultório na bacia usando o índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NASH) e coeficiente de determinação (R²). O modelo SWAT foi calibrado e validado com eventos de vazão na sub-bacia do Rio Ipanema. Os coeficientes estatísticos de NASH e R² para as simulações mensais foram de 0,85 e 0,88, respectivamente. Os resultados sugerem que o modelo SWAT é uma ferramenta promissora para avaliar o balanço hídrico em bacias hidrográficas brasileiras.

PALAVRAS-CHAVE: SWAT; análise de incertezas; balanço hídrico

ABSTRACT: in the current climate of water scarcity, the challenges of environmental management to the impacts of climate change have made the need for technological progress and the results of scientific research more accessible and ready for use more urgent. Proper monitoring, analysis and management of natural resources (especially water) require the implementation of a joint multidisciplinary approach to create rational and applied policies for better management scenarios. Being a laborious approach, manual calibration of the hydrological model in a semi-arid context requires a thorough knowledge of the river basin and, as far as possible, field input data for reliable simulations. In this study, the manual calibration and relative sensitivity analysis of SWAT (Soil and Water Tool) were applied to the water balance in a 3997.4 km² river basin (in the Ipanema river) located between the states of Pernambuco and Alagoas. Thus, the present work aims to calibrate the hydrological model and analyze the water balance and the flow of the Ipanema river basin with the SWAT model. The sensitivity analysis of the selected parameters was done using the SUFI2 algorithm, which combines the techniques of Latin-Hypercube and One-factor-At-a-Time (LH-OAT). The parameters CN2, Esco and GWQMN showed to be of great importance in the simulation of the flow. To evaluate the performance of the model, monthly simulated flow data were compared with those observed in the basin in the basin using the Nash-Sutcliffe (NASH) efficiency coefficient and determination coefficient (R²). The SWAT model was calibrated and validated with flow events in the Ipanema River sub-basin. The statistical coefficients of NASH and R² for the monthly simulations were 0.89 and 0.68, respectively. The results suggest that the SWAT model is a promising tool to evaluate the water balance in Brazilian watersheds.

KEY WORDS: SWAT; analysis of uncertainties; Water budget.

INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura de escassez hídrica, os desafios da gestão ambiental frente aos impactos das mudanças climáticas tornaram mais urgente a necessidade do progresso tecnológico e os resultados das pesquisas científicas mais acessíveis e prontos para uso. O monitoramento, a análise e o gerenciamento adequados dos recursos naturais (especialmente a água) exigem a implementação de uma abordagem multidisciplinar conjunta, a fim de criar estratégias racionais e políticas aplicadas para melhores cenários de gestão (CAU et al. 2015).

A escassez de água exige que se formulem políticas para garantir uma alocação Inter setorial eficiente do recurso, ao mesmo tempo em que se reverta a degradação do mesmo. No entanto, a maioria das questões relacionadas aos efeitos das políticas alternativas de alocação de água, continua sem resposta. A decisão de políticas de alocação de água apropriadas pode se beneficiar diretamente da melhoria ou evolução da modelagem de alocação de água em nível de bacia (MORAIS et al. 2006).

Com o desenvolvimento de tecnologias computacionais, ferramentas de modelagem matemática são apontadas para a simulação de processos ambientais que se caracterizam por considerável complexidade e alto nível de integração. Muitas vezes, essas ferramentas contêm parâmetros e exigem uma quantidade significativa de dados que muitas vezes são difíceis de obter (PISTOCCHI et al., 2000).

Os modelos hidrológicos dependem principalmente do ciclo da água, que é amplamente aplicado para alcançar sustentabilidade a longo prazo para qualquer projeto hidrológico. A vazão é o principal elemento deste ciclo, que necessita de uma estimativa confiável para resolver problemas de quantidade e qualidade no projeto de recursos hídricos. Contudo a umidade do solo é o parâmetro essencial em um modelo hidrológico que controla a estimativa da vazão, portanto ela é analisada para melhorar a compreensão e capacidade do modelo hidrológico, no entanto a medição rotineira da umidade do solo em grandes bacias hidrográficas é onerosa e mais difícil de ser realizada, devido a instalação de equipamentos, manutenção e a coleta de dados.

Além da necessidade de dados de entrada de alta resolução (o melhor possível) para rodar ou inserir no modelo SWAT, para simular os processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia semiárida (MORIASI et al., 2007), também é necessária extrema atenção no processo de calibração para manter um controle racional sobre o balanço de massa e simulação confiável, especialmente no contexto semiárido, com chuvas esporádicas de alta variabilidade temporal e espacial e com eventos de escoamento de curta duração (BUSCHE, 2012).

O SWAT é um modelo de tempo contínuo que opera em um passo de tempo diário na escala da bacia, o objetivo deste é prever os impactos a longo prazo em grandes bacias. Ele pode ser usado para simular em escala da bacia o ciclo de água e nutrientes em paisagens cujo uso dominante da terra é a agricultura. Também pode ajudar a avaliar a eficiência ambiental das melhores práticas de gestão e políticas de gestão alternativas.

Uma identificação preliminar de sub-bacias é realizada com base em critérios topográficos, seguida por uma discretização adicional usando as considerações de uso da terra e tipo de solo. Áreas com o mesmo tipo de solo e uso da terra formam uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU), uma unidade computacional básica considerada homogênea na resposta hidrológica à mudança da cobertura da terra.

Geralmente, a escolha do modelo hidrológico depende de vários critérios, como o tipo de questão de gestão de recursos hídricos a ser estudada, bem como a variabilidade das características físicas da bacia hidrográfica (cobertura e elevação da terra) que podem interferir nos processos hidrológicos. Outros fatores podem ser levados em consideração ao escolher o modelo apropriado, incluindo disponibilidade do modelo, facilidade de manuseio e disponibilidade e consistência dos dados necessários (SURFLEET et al., 2012).

Embora existam vários modelos para a simulação dos processos em bacias hidrográficas, os modelos contínuos de distribuição de tempo demonstraram altos níveis de precisão (ERCAN et al., 2014). Muitos autores (ERCAN et al., 2014; FONTES JUNIOR, 2016; NILAWAR et al., 2017) demonstraram que, embora qualquer modelo hidrológico tenha provado seu valor, é necessário parametrizar, calibrar e validar adequadamente o modelo.

A análise de sensibilidade é tão vital quanto o processo de calibração para a aplicação de modelos hidrológicos (GASSMAN et al., 2007). Muitos especialistas em modelagem (FOSCARINI et al., 2010; LENHART et al., 2002) mencionaram que a análise de sensibilidade como um instrumento para a avaliação de parâmetros de entrada em relação ao seu impacto na saída do modelo levará a um enfoque dos parâmetros durante a calibração e, em seguida, uma melhor redução da incerteza do modelo.

Recentemente, um número consistente de pesquisas computacionais está se concentrando no desenvolvimento de procedimentos de calibração automatizada baseados principalmente em técnicas de otimização numérica (como: GLUE e SUFI) (MADSEN, 2003). A otimização geralmente usa um critério de otimização global por meio de vários parâmetros de saída que podem ser avaliados simultaneamente; os valores normalizados (por variável) das

funções objetivo são então traduzidos através do ajuste dos parâmetros observados para os seus respectivos simulados usando métodos estatísticos (VAN GRIENSVEN e BAUWENS, 2003).

A alocação da água para usos múltiplos poderia se beneficiar do uso de procedimentos que contemplassem a complementaridade existente entre o caráter estocástico da disponibilidade hídrica, geralmente representada por uma estimativa de vazão associada a um determinado risco de falha, e as diferentes garantias requeridas pelos vários tipos de uso, otimizando assim a aplicação da água para fins de produção. (ASFORA e CIRILO, 2005).

Mas para a realização de um adequado gerenciamento da bacia hidrográfica, necessita-se de várias informações. Moraes et al. (2018) afirmam que ferramentas de integração para monitoramento dos dados por parte de instituições nacionais, estaduais e municipais devem contribuir para sua disponibilização através de ferramentas SIG para o gerenciamento e monitoramento ambiental em bacias, no entanto, o longo prazo exigido e os custos de medições e monitoramento são grandes empecilhos. Desta forma, a modelagem surge como alternativa para a obtenção de informações sobre a dinâmica de uma bacia hidrográfica.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo analisar o balanço hídrico e a vazão da bacia hidrográfica do Rio Ipanema com o modelo SWAT. Adicionalmente, avaliar quais os parâmetros do SWAT são mais sensíveis na simulação do escoamento superficial.

MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O Rio Ipanema tem suas nascentes em território pernambucano, atravessa o Estado de Alagoas e deságua na margem esquerda do rio São Francisco. Sua bacia hidrográfica está inserida entre as coordenadas 8°18'04" e 9°52'24" de latitude sul, e 36°36'28" e 37°27'54" de longitude oeste, compreendendo 34 municípios, sendo 18 alagoanos e 16 pernambucanos, com uma população aproximada de 750 mil habitantes. Faz fronteira com a bacia do rio Ipojuca, ao norte, o rio São Francisco, ao Sul, as bacias dos rios Capiá e Moxotó, ao oeste, e a bacia do rio Traipú, a leste (Figura 1).

Figura 1. Localização da bacia do Ipanema (Estados de Alagoas e Pernambuco).

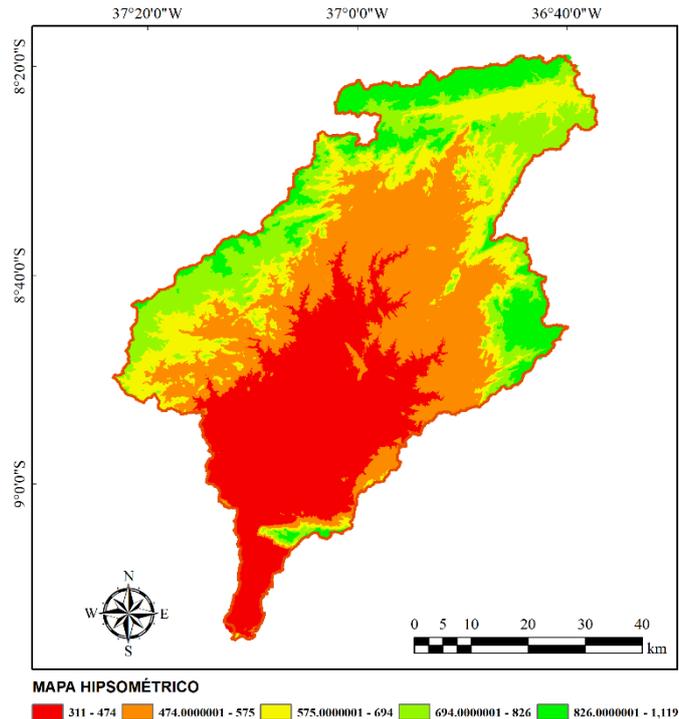


Figura 1. Localização da bacia do Ipanema (Estados de Alagoas e Pernambuco).

A bacia do Rio Ipanema contempla como características gerais uma área de 7.845,1 km², sendo 1.670,8 km² em Alagoas (21,3%) e 6.174,3 km² em Pernambuco (78,7%), contendo a bacia delimitada para este estudo apenas cerca de 3.997,4 km².

A nascente do rio Ipanema se situa no município de Pesqueira, seu curso percorre parte dos estados de Alagoas e Pernambuco (aproximadamente 139 km) e, na direção norte-sul, até desaguar no rio São Francisco. Seus principais afluentes são: pela margem direita, riacho do Mororó, riacho Mulungu, riacho do Pinto, riacho Mandacaru e rio Topera; e, pela margem esquerda, rio dos Bois, riacho da Luíza, rio Cordeiro e rio Dois Riachos. O rio Cordeiro é o principal tributário do rio Ipanema, cuja nascente se localiza no município Venturosa. Alguns dos municípios da bacia têm seus limites definidos por cursos d'água: Tupanatinga, pelos riachos do Pinto e Mandacaru; Itaíba, pelo riacho Mandacaru e o rio Ipanema; Águas Belas, pelo rio Ipanema, rio Cordeiro, riacho do Defunto e rio Dois Riachos; e Iati, pelo rio Dois Riachos.

Clima

A bacia hidrográfica do Rio Ipanema apresenta uma precipitação média anual variando espacialmente de 500 a 1.300 mm (IBGE, 2009). Tem déficit hídrico considerado elevado,

atingindo valores máximos no extremo sudoeste, da ordem de 965 mm anuais, e mínimo no extremo nordeste, menores que 400 mm anuais.

Apresenta excedentes hídricos nos meses de junho a agosto, na região nordeste da bacia, entre outubro e novembro no Sudoeste e no mês de maio na parte noroeste. No Sudeste, não há excedente hídrico durante o ano. As temperaturas são sempre superiores a 18° C, com amplitude térmica mensal menor que 5° C, a média anual varia entre 21° C no extremo norte até 26° C no extremo sul para uma insolação média de 2.800 h (IBGE, 2009)

Segundo Falcão (2009), os eventos pluviométricos no semiárido alagoano, concentram-se nos meses de fevereiro a maio, somente nesses quatro meses, ocorreram 59,5% do total de eventos pluviométricos erosivos monitorados na região. Em oposição, temos os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro que não apresentaram registro de evento pluviométrico expressivos.

A vegetação predominante na bacia do Rio Ipanema é a Caatinga, caracterizada por uma grande variação em seu regime foliar durante o ano, inclusive na bacia no seu trecho mais alto, pastagem plantada associada à própria vegetação natural, parcelas cultivadas com forrageiras, tais como milho e palma, utilizada na alimentação animal durante os períodos de seca e a restinga na região próxima à foz do rio Ipanema.

Na bacia do Rio Ipanema a agricultura familiar de subsistência faz-se presente, destacando-se como culturas o feijão e o milho, sendo em menor escala, o algodão, o amendoim e a mandioca. Apresenta-se também em locais de serra e na foz do rio Ipanema algumas pequenas culturas frutíferas, como o caju, a pinha, a manga, a jabuticaba, a laranja, umbu e a mangaba (LOPES et al., 2005).

Os solos predominantes da região semiárida do Nordeste Brasileiro são pouco férteis, devido principalmente, a baixa disponibilidade de Nitrogênio e Fósforo (Luvisolos e Neossolos Litólicos, Latossolo e Argissolo) (SAMPAIO et al., 1995).

Apresentação do modelo

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi desenvolvido no início dos anos 90 pelo USDA-ARS (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - Serviço de Pesquisa Agrícola) e foi continuamente modificado e atualizado (ARNOLD et al., 2011). É um modelo hidrológico da escala de bacia. Ele usa uma interface GIS chamada ArcSWAT e permite a estimativa dos componentes do balanço hídrico e o transporte de nutrientes, pesticidas e sedimentos. Ele pode ser usado para simulação e análise de diferentes cenários, tais como a formulação de várias práticas de gestão e construção de cenários climáticos para análise de

mudanças climáticas (ABBASPOUR et al., 2007; ABOUABDILLAH et al., 2010; ARNOLD et al., 2012).

Dados de entrada utilizados no Modelo SWAT

Foram utilizados dados disponíveis de clima da bacia do Rio Ipanema do portal Hidro web (HIDROWEB, 2018, INMET, 2018, APAC e as estações da rede REHISA), das estações climatológicas contendo dados mensais de temperatura, umidade relativa, insolação e velocidade do vento de cada um dos postos selecionados no intervalo de tempo do projeto, conforme Tabela 1.

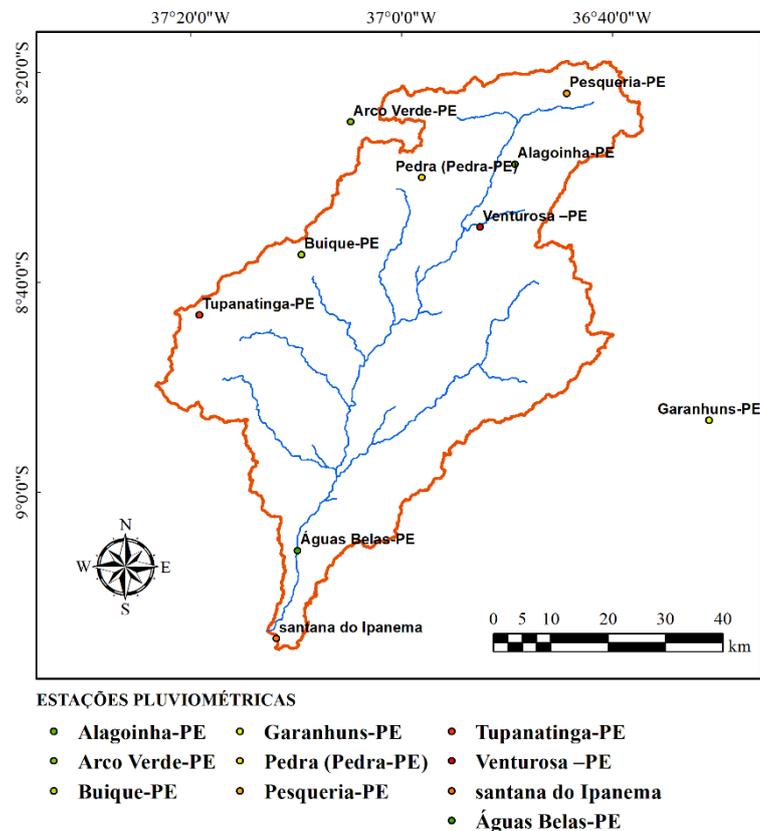
O período de dados utilizado para modelagem é desde 01 de janeiro de 1999 até 31 de dezembro de 2017. Cada posto apresenta codificação, nome e coordenadas, o usuário tem como opção a seleção de cada um dos postos para a simulação.

Tabela 1. Postos Climatológicos selecionados para o projeto

Estação	Tipo de estação	Latitude (Graus)	Longitude (Graus)
Pesqueira - PE	Pluvi	-8.4	-36.8
Alagoinha - PE	Pluvi	-8.5	-36.8
Venturosa - PE	Pluvi	-8.4	-36.5
Pedra (208) - PE (APAC)	Pluvi	-8.7	-36.9
Águas Belas - PE	Pluvi	-9.1	-37.1
Arcoverde - PE	Pluvi	-8.4	-36.1
Arcoverde – PE (INMET)	Clima	-8.4	-37.1
Pesqueira – PE (LAS)	Clima	-8.4	-36.8
Garanhuns – PE (INMET)	Clima	-8.9	-36.5
Garanhuns – PE (APAC)	Pluvi	-8.9	-36.5
Buíque-PE (APAC)	Pluvi	-8.6	-37.2
Tupanatinga-PE (APAC)	Pluvi	-8.7	-37.3
Santana do Ipanema (HIDROWEB)	Fluvi	-9.4	-37.2
Santana do Ipanema (HIDROWEB)	Pluvi	-9.4	-37.2

Na Figura 2 está a localização espacial dos postos pluviométricos e a área de cobertura da série de dados, na bacia e próximos a ela.

Figura 2. Localização espacial dos postos pluviométricos na bacia do Rio Ipanema (Santana do Ipanema).

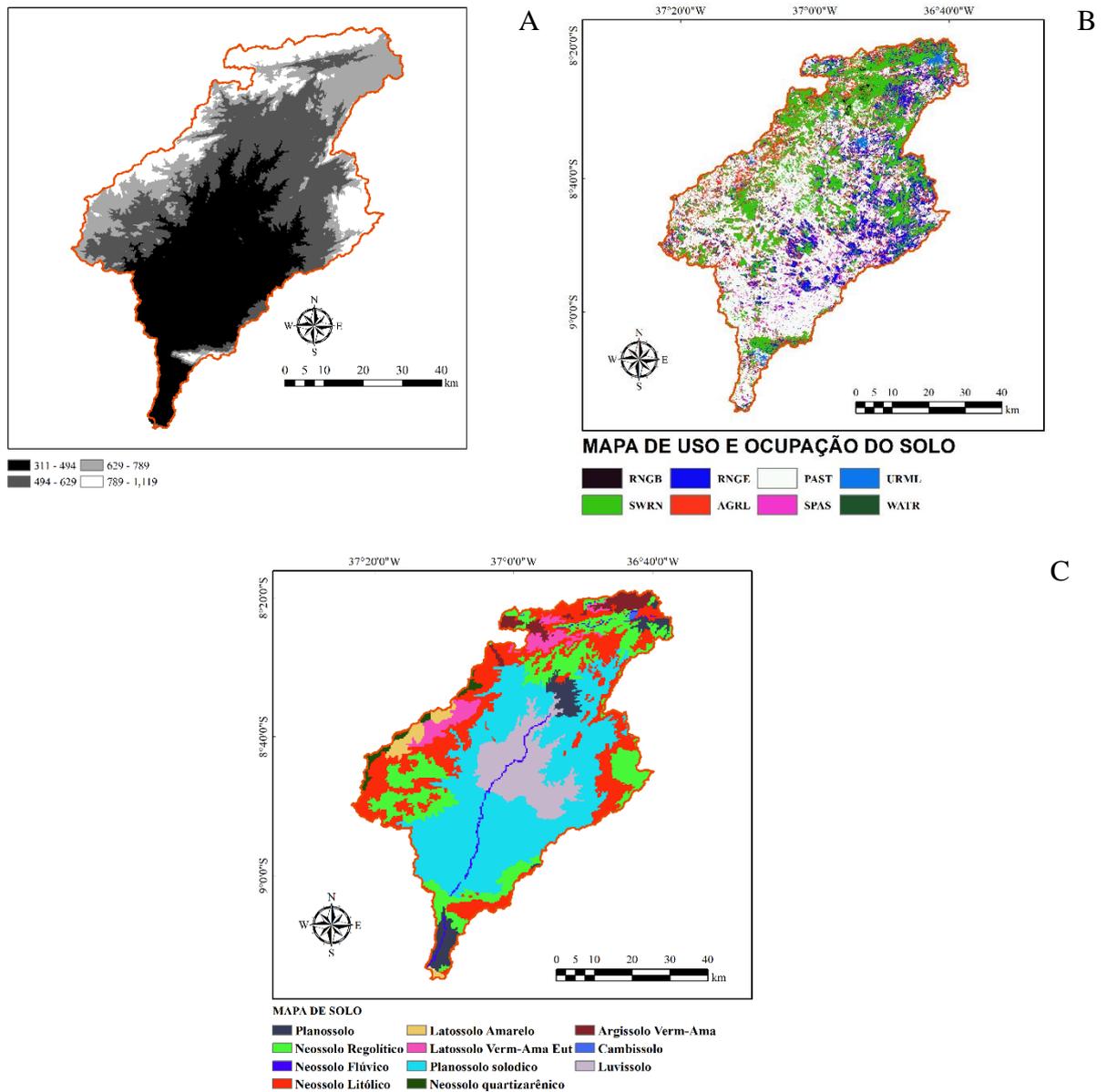


Entre as variáveis físicas exigidas pelo SWAT, estão relevo, pedologia e uso e cobertura do solo. Nesse trabalho foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 3A) do sensor orbital Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) com resolução espacial de 30 m, foram utilizadas as cartas SC24X-B e SC24 X-D (Estado de Pernambuco) obtidas no site da EMBRAPA (Brasil Relevo) (MIRANDA, 2005).

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 3B) utilizado é do Projeto MapBiomias – Coleção 2.0 (2016), obtidas no Instituto Nacional de Pesquisas (INPE), são mapas no formato matricial (pixel de 30x30m). A legenda destes mapas assim como o período coberto evolui ao longo das coleções.

O mapa pedológico (Figura 3C) onde foi utilizado o mapa de solos do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE) (Silva et al., 2001), em escala de 1:100.000, e o de Alagoas (ZAAL) (Santos et al., 2013) no qual a distribuição espacial percentual das classes de solos encontrada para a área de estudo foi de: Planossolo 3,89%, Neossolo Regolítico 16,49%, Neossolo Flúvico 0,98%, Neossolo Litólico 21,65%, Latossolo amarelo 1,72%, Latossolo Vermelho Amarelo 3,44%, Planossolo solódico 37,79%, Neossolo Quartzarênico 1,10% Argissolo Vermelho Amarelo 2,49%, Cambissolo 0,11% e Luvisolo 10,35%.

Figura 3. Mapa modelo de elevação digital do (3A); Mapa de uso e ocupação do solo (3B); Mapa de solos (3C)



Para verificar o balanço hídrico e a vazão da bacia do rio Ipanema foi utilizado o modelo SWAT integrado a um sistema de informação geográfica (SIG). O ciclo hidrológico utilizado para as simulações no modelo fundamenta-se na equação do balanço hídrico (NEITSCH et al., 2011). Os processos hidrológicos simulados pelo modelo consistem em: interceptação; infiltração; redistribuição de água no solo; evapotranspiração; escoamentos sub-superficial e superficial; armazenamento de água no solo; fluxo de base e escoamento em canais e tributários. O escoamento superficial pode ser estimado pelo método de infiltração de Green & Ampt ou do Soil Conservation Service (SCS) (NEITSCH et al., 2011).

Para o estudo aplicou-se o método SCS com dados diários de precipitação. Assim, o escoamento superficial foi calculado pelo método da Curva Número (CN) do SCS (USDA, 1986). Os valores de CN são definidos em função do grupo hidrológico do solo, classificados como A, B, C, ou D e dependem das características do solo, condições de uso e cobertura do solo; umidade antecedente do solo e declividade. A classificação hidrológica dos solos foi de acordo com Sartori et al. (2005).

Os componentes do escoamento são calculados pelo modelo por meio da equação do balanço hídrico e dos modelos de fluxos adaptados as condições de escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo. Os volumes de água, calculados com base nesses parâmetros são conduzidos até a rede de drenagem e, ao longo desta, até o ponto mais a jusante da bacia, no qual é contabilizado o valor total de produção de água (BONUMA et al. 2013).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial o modelo disponibiliza três métodos: i) Penman-Monteith (ALLEN, 1986; ALLEN et al., 1989; MONTEITH, 1965); ii) Priestley e Taylor (PRIESTLEY-TAYLOR, 1972) e iii) Hargreaves e Samani (HARGREAVES et al., 1985). Para este estudo, utilizou-se o Penman-Monteith, o qual requer dados diários de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Este método combina componentes que avaliam a energia necessária para sustentar a evaporação, o estreito mecanismo requerido para remover o vapor de água e os termos aerodinâmicos e de resistência superficial.

Para a calibração e análise de sensibilidade foi usado SWAT-CUP versão 5.2 (Procedimentos de calibração e incerteza), com SUFI-2 (Versão 2) (ABBASPOUR, 2015). Os dados meteorológicos de entrada utilizados no SWAT foram os dados diários de precipitação dos anos de 2008 a 2017 de dez estações pluviométricas (Tabela 1), sendo os anos de 2008 a 2013 utilizados para calibração do modelo (com três anos de aquecimento). Para a análise de sensibilidade e calibração foram utilizados 5 parâmetros (Tabela 2), relacionados com o processo chuva-vazão com os respectivos alcances utilizados.

Tabela 2. Parâmetros de calibração com faixas de valores e métodos de cálculos para o SUFI2.

Método	Parâmetro	Descrição	Mín.	Máx.
r	CN2.mgt	Curve Number - Soil Conservation Service (SCS)	-0.2	0.2
v	ESCO.bsn	Fator de compensação da evaporação do solo	0.845237	0.883797
a	ALPHA_BF.gw	Fator alfa do fluxo de base (1/dia). Profundidade limite da água do aquífero raso	0.305347	0.328845
a	GWQMN.gw	para ocorrer o fluxo de retorno mm H ₂ O	2.238628	2.282004
v	REVAPMN.gw		30.4426	291.6028

v	EPCO.bsn	0.121334	0.72358
v	SOL_AWC.sol	-0.07505	0.670747
v	SURLAG.bsn	5.661605	14.17358

v - substituição, r - multiplicação, a - absoluto

Assim eliminando ou reduzindo limitações da calibração com a determinação dos parâmetros do modelo mais influentes para combinar o escoamento simulado com o escoamento observado (DU et al., 2013). Para a validação foram utilizados os eventos de vazão de 2016 a 2017 registrados na Bacia do Ipanema (Santana do Ipanema-AL).

Calibração e Validação com dados de umidade

Foram realizados monitoramentos mensais da umidade do solo, em parcelas experimentais com sonda de nêutrons (modelo CPN 503 DR). Estas parcelas têm dimensões de 4,5 x 11 metros (45 m²), envolvendo pelos mesmos quatro tipos diferentes de cobertura do solo e três diferentes profundidades (0-20, 20-40, e 40-60 cm), sendo a parcela utilizada para modelagem a de cobertura natural que melhor representa a condição vegetal da bacia e a camada de solo utilizada foi a de 20 cm, onde há maior dinâmica da umidade do solo. A sonda está localizada na sub-bacia1 que é uma sub-bacia da Bacia Representativa do Alto Ipanema. Este monitoramento segue uma série histórica com início em 2011 seguindo até 2017, realizado pelo laboratório de Água e solo da UFRPE.

Para calibração e validação do modelo utilizando os dados de umidade, foram utilizados dados de umidade da camada 0,20 m, com tipo de vegetação cobertura natural, foram utilizados dados mensais de 2011 a 2017, utilizando o período de 2011 a 2013 para calibração e 2016 a 2017 para validação.

No período de validação dos dados (2016-2017), foi realizada análise conjunta com os dados de umidade, aferidos na sonda de nêutrons (θ_{SN}), dados mensais fornecidos diariamente pelas simulações numéricas de um modelo de superfície do projeto Latin América Flood and Drought Monitor (LAFDM) (θ_{LAFDM}) e a umidade de saída do modelo SWAT (θ_{SWAT} , para verificar uma possível conexão e análise desses dados. Assim, analisou-se a correlação entre os dados simulados e os medidos e os índices Nash–Sutcliffe (NS) e PBIAS

Análise do desempenho das simulações para a bacia

Visando o desempenho da calibração e validação do modelo SWAT, foram utilizadas as estatísticas de precisão: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (E) e PBIAS (ANDRADE et al., 2013; ARAGÃO et al., 2013). O índice de concordância Nash-Sutcliffe é calculado pela seguinte equação:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (1)$$

Em que:

X_{obs} e vazão observada no dia i ($m^3 s^{-1}$);

X_{mod} e vazão simulada no dia i ($m^3 s^{-1}$);

\bar{x}_{obs} é vazão média observada ($m^3 s^{-1}$);

A PBIAS foi usada para avaliar a tendência da percentagem de fluxos simulados em relação aos observados (Equação 2):

$$PBIAS = 100 * [\sum (sim - obs) / \sum (obs)] \quad (2)$$

Onde:

sim é a média do evento simulado;

obs é a média do evento observado.

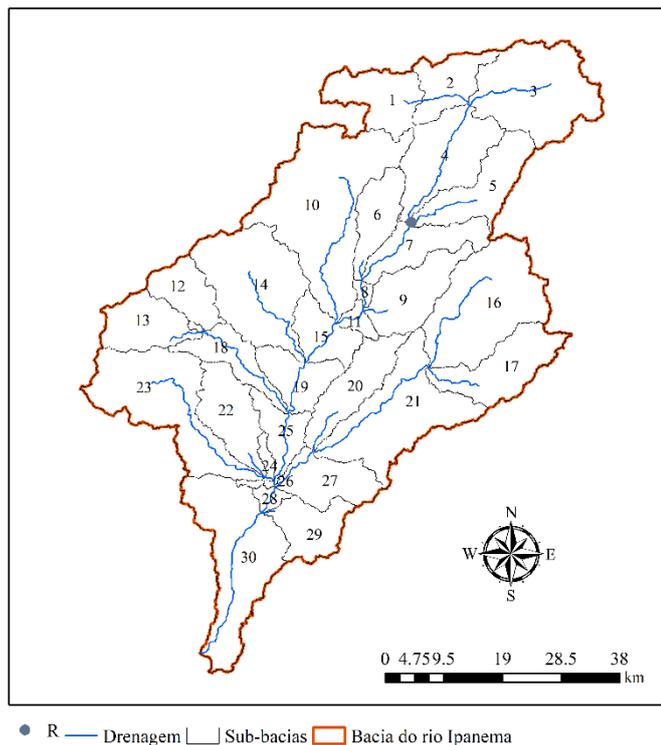
o melhor coeficiente é a realidade e as tendências nas estimativas são baixas, indicando a representatividade do modelo com as seguintes classificações observadas

Quanto ao coeficiente PBIAS e NASH as indicações a representatividade do modelo, são consideradas de acordo com as seguintes classificações como em Moriasi et al. (2007); Aragão et al. (2013); e Bressiani et al. (2015), faixa de valores NS e a respectiva avaliação do desempenho do modelo SWAT para a escala mensal, que são: $0,75 < NS$ e $PBIAS < \pm 10$ o modelo é considerado muito bom; $0,65 < NS \leq 0,75$ e $\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$, o modelo é considerado bom; $0,50 < NS \leq 0,65$ e $\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$, o modelo é considerado satisfatório, $NS \leq 0,5$ e $PBIAS \geq \pm 25$ é considerado insatisfatório.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram delineadas 30 sub-bacias (Figura 4) para a área da bacia do Ipanema, com as sobreposições de mapas de uso da terra e solo, foram delineadas 2942 unidades de respostas hidrológicas (HRU's), estes mapas foram dispostos com a mesma resolução espacial. Para a obtenção deste número de sub-bacias foi selecionado um limiar de 700 ha para a delimitação.

Figura 4. Delineamento das sub-bacias da bacia do Mimoso realizado no ArcSWAT



Calibração e validação com eventos de vazão

A calibração foi realizada com 1000 simulações utilizando dados de janeiro de 2008 a dezembro de 2013, período no qual o período de 2008 a 2010 foi utilizado como período de aquecimento e não considerado na avaliação da predição do modelo. Na avaliação preliminar, os resultados de vazão simulada no SWAT foram comparados mensalmente com o valor observado. O intervalo de um parâmetro é ajustado dependendo da análise de sensibilidade para corresponder a vazão observada e simulada.

Baseado em estudos anteriores com o modelo SWAT (PARK et al., 2014; RAPOSO et al., 2013) foram selecionados 8 parâmetros do modelo para serem realizadas a análise de sensibilidade e calibração (Tabela 3) pelo SWAT-CUP.

Tabela 3. Valor de calibração dos parâmetros do SWAT, utilizando o SWAT-CUP

PARÂMETRO	SWAT-CUP
CN2.mgt	-0,20
ESCO.bsn	0,87
Alpha_BF.gw	0,32
GWQMN.gw	2,27
REVAPMN.gw	161,02
EPCO.bsn	0,42
SOL_AWC.sol	0,298
SURLAG.bsn	9,92

A partir destes parâmetros, foram identificados os mais sensíveis em relação aos eventos de escoamento médio mensal. A análise de sensibilidade mostrou oito parâmetros: CN2.mgt, ALPHA_BF.gw, ESCO.bsn, GWQMN.gw, REVAPMN.gw, EPCO.bsn, SOL_AWC.gw e SURLAG.bsn, listando os resultados dos cálculos de análise de sensibilidade. Estes parâmetros destacam a influência no escoamento superficial e dos processos subterrâneos Aragão et al. (2013), influenciados por fatores de uso e ocupação e climáticos Park et al. (2014). O modelo SWAT hidrológico SWAT, assim como outros modelos hidrológicos distribuídos apresenta combinações diferentes de valores de parâmetros que podem culminar na mesma saída do modelo (DU et al., 2013).

Dois dos cinco parâmetros de entrada estão relacionados aos processos de escoamento superficial (CN2, ESCO), destacando a importância destes componentes. O parâmetro CN2.mgt denota a influência da umidade inicial do solo no escoamento superficial da bacia, também observado como parâmetro mais sensível. É recorrente em vários trabalhos, a sensibilidade destes parâmetros, principalmente por utilizarem o escoamento como variável de calibração, porém os demais parâmetros podem variar de parâmetros das equações de água subterrânea, aos de solo e vegetação dependendo da bacia, sua localização e variabilidade climática (Fontes Júnior et al., 2016).

O valor da CN₂ no processo de calibração de acordo com a (Tabela 3), o qual independe se o fator é multiplicativo ou substitutivo, estes valores tem o efeito de reduzir o escoamento superficial gerado a partir da precipitação (STRAUCH et al., 2012), fazendo com que o modelo não consiga representar os eventos de maiores picos de vazão, e sim, representar as vazões médias e baixas nos períodos analisados.

Segundo Fukunaga et al. (2015), os valores da inicialização do CN₂ seriam elevados não refletindo devidamente as propriedades físicas do solo, como a capacidade de infiltração e práticas de manejo do solo. O que é compreendido nos estudos realizados por Silva et al., (2015) e Santos et al. (2011), em parcelas de erosão na encosta da bacia, existe uma alta variabilidade no conteúdo de água no solo, influenciada pelas formas de utilização do solo, com e sem práticas conservacionistas, e as propriedades do solo da bacia. Quanto ao ALPHA_Bf.gw o valor da calibração (0.32) pelo SWAT-CUP, tem-se uma resposta lenta da recarga, fazendo com que a calibração pelo SWAT-CUP não alcance os picos de vazão medidos.

Na Tabela 4 encontram-se os índices de concordância entre observado e estimado, onde a calibração automática do SWAT obteve uma classificação de índice muito bom com valor de NS de 0,68, esse valor é considerado bom para a calibração automática.

Tabela 4. Valores dos métodos estatísticos para a calibração dos dados de escoamento superficial

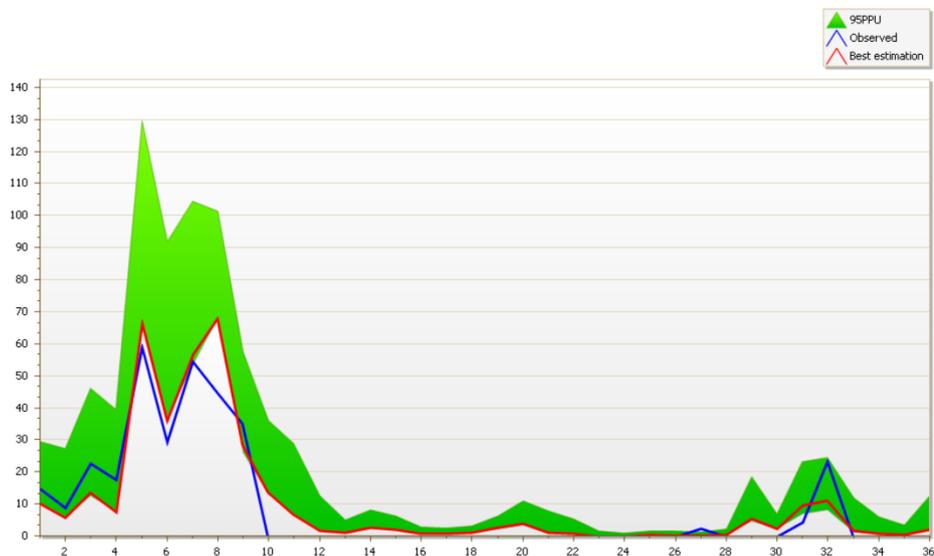
MÉTODO ESTATÍSTICO	CALIBRAÇÃO MENSAL
Nash-Sutcliffe	0,85
PBIAS (%)	- 16,2
Coef. de determinação (R^2)	0,88

Moriasi et al. (2007) sugerem que em simulações hidrológicas de escala mensal de valores, coeficientes acima de 0,5 são adequados. Para Ma et al. (2014), as incertezas nos índices (Nash - Sutcliffe e PBIAS) são as combinações das incertezas nos dados de entrada, na estrutura do modelo, parâmetros do modelo e dados mensurados.

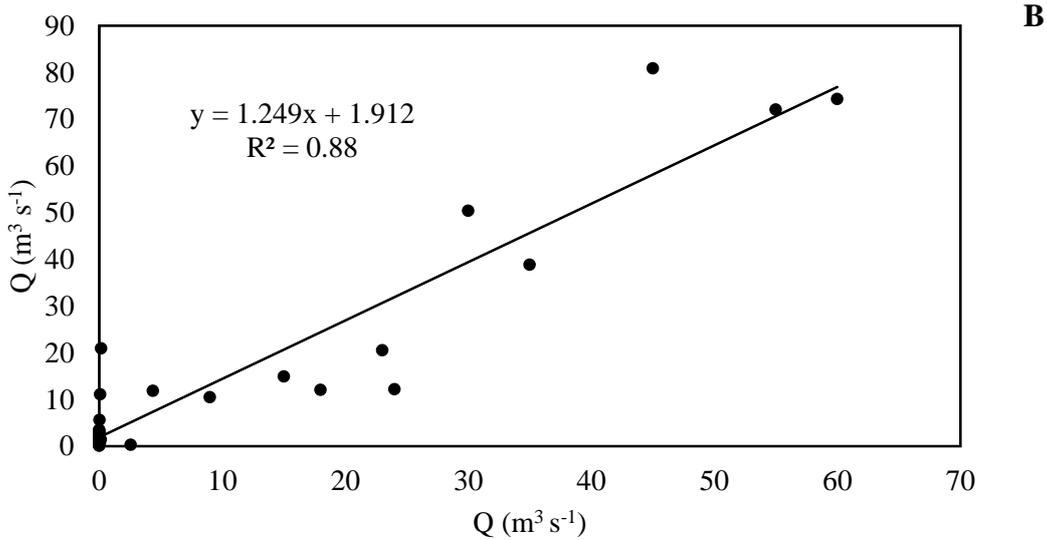
Já o índice PBIAS, apresentou-se não satisfatório para a calibração no SWAT-CUP, havendo uma subestimação do modelo em relação ao escoamento observado (Tabela 4).

A calibração produziu coeficiente de determinação $R^2 = 0,89$ para a Bacia do Rio Ipanema observada na Figura 5.

Figura 5. Hidrograma da Calibração mensal (A) da bacia do Rio Ipanema; em B dispersão dos dados.

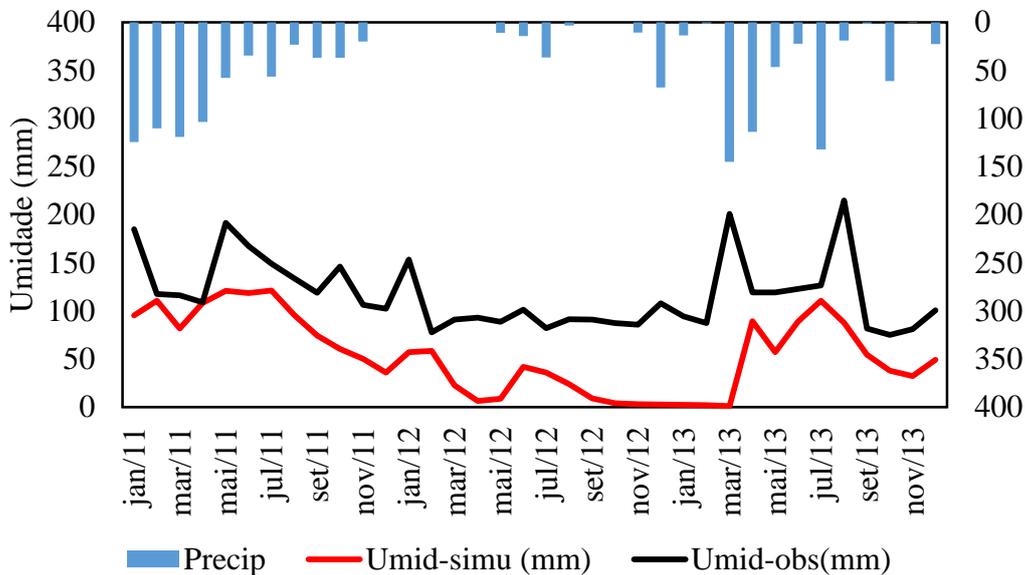


A



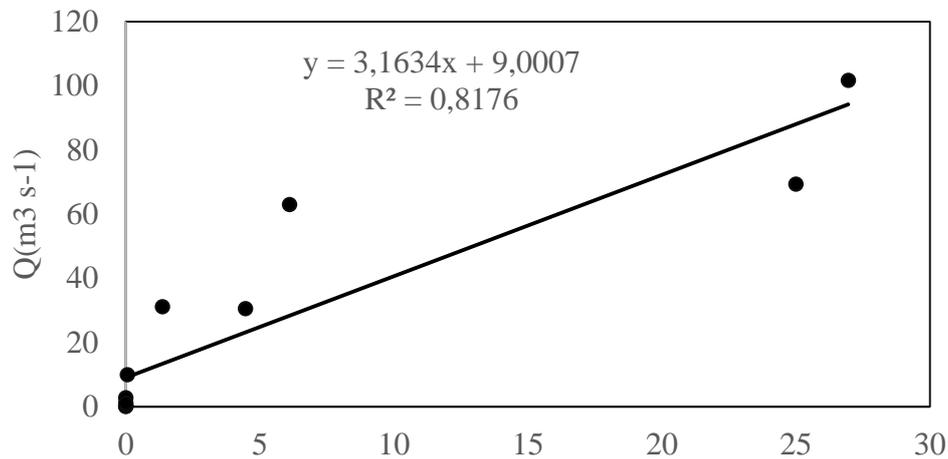
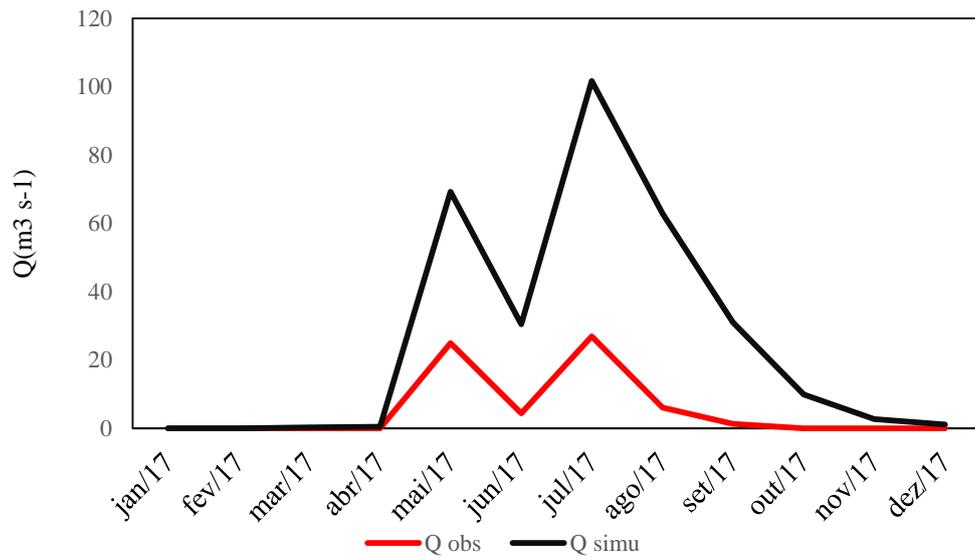
A comparação temporal entre a umidade do solo estimada pelo SWAT e sonda de nêutrons é observada na Figura 6. Na bacia do Reservatório Ingazeira (sub-bacia 5) (131 km²), o valor da umidade do solo aferido na sonda de nêutrons é superior na maioria dos meses ao valor da umidade do solo estimada pelo SWAT.

Figura 6. Comparação de umidade no solo do SWAT e da Sonda de Nêutrons (mm) durante o período (janeiro 2011 - dezembro 2013).



O mesmo intervalo de parâmetros de calibração é usado para realizar a validação de dois casos diferentes usando dados do ano de 2017. No primeiro caso, os valores de umidade do solo gerados pelo modelo são usados diretamente para a validação. O valor de R² estimado pelo modelo é 0,44 para a Bacia hidrográfica do Rio Ipanema (Figura 7).

Figura 7. Validação das vazões do Swat no período janeiro a dezembro 2017).

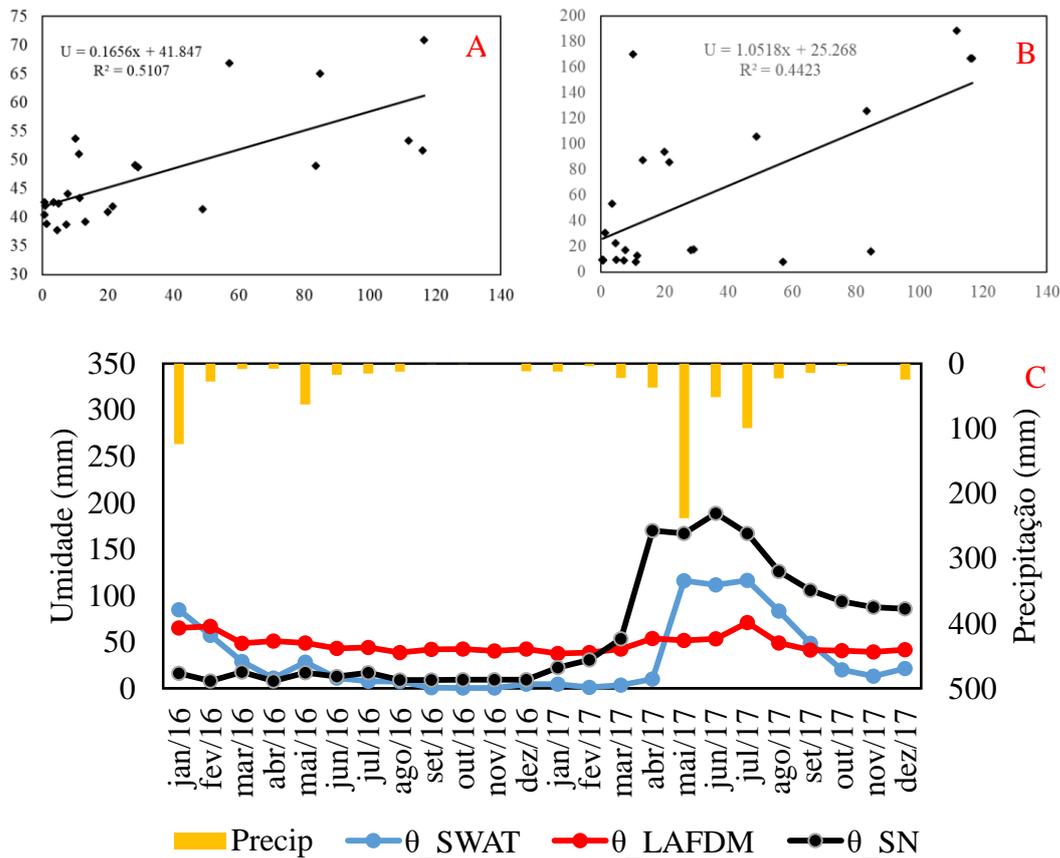


A comparação dos resultados de validação revela uma baixa influência dos valores de umidade do solo do SWAT e da sonda de nêutrons na estimativa da vazão. Embora o viés seja visto na umidade do solo, a vazão ainda é menos influenciada devido à sensibilidade do parâmetro.

A umidade do solo é menos sensível que ao restante dos parâmetros, portanto, indica a menor influência na vazão. Às vezes uma vazão observada não corresponde a vazão simulada pelo modelo SWAT devido à incerteza envolvida na previsão do modelo ou em dados climáticos como precipitação e temperatura, resultando em um valor de R^2 reduzido. No entanto, o alto valor estimado de R^2 significa uma correlação aceitável entre vazão observada e estimada sob diferentes usos do solo, topografia e condições climáticas (NILAWAR et al., 2017).

No período de validação dos dados (2017), foi realizada análise conjunta com os dados de umidade, aferidos na sonda de nêutrons (θ_{SN}), dados mensais fornecidos diariamente pelas simulações numéricas de um modelo de superfície do projeto Latin América Flood and Drought Monitor (LAFDM) (θ_{LAFDM}) e a umidade de saída do modelo SWAT (θ_{SWAT} , para verificar uma possível conexão e análise desses dados. Assim, analisou-se a correlação entre os dados simulados e os medidos (Figura 8) e análise dos índices Nash–Sutcliffe (NS) e PBIAS (Tabela 5).

Figura 8. Análise conjunta de dados com os valores da umidade de saída do modelo SWAT; Em A: correlação entre SWAT e LAFDM; em B: correlação entre SWAT e sonda de nêutrons; em C: distribuição das umidades no período de validação.



A análise na Tabela 5, mostra que em relação a correlação entre dos dados simulados e observados, o método que apresentou melhor desempenho foi o LAFDM ($R^2 = 0,5$), embora esses valores não sejam considerados aceitáveis. Com relação a melhor representação dos picos avaliados pelo coeficiente NS, a sonda de nêutrons conseguiu melhor desempenho que o LAFDM, embora esse índice seja classificado como insatisfatório.

Tabela 5. Valores dos métodos estatísticos para validação dos dados de umidade

MÉTODOS	R ²	NS	PBIAS
LAFDM	0,5	-3,5	30,1
SONDA DE NEUTRONS	0,4	0,4	44,9

Os valores do índice PBIAS indicam subestimativa do modelo para ambos os métodos, em alguns pontos, a umidade observada não corresponde a umidade simulada no SWAT devido à incerteza envolvida na previsão do modelo ou em dados climáticos como precipitação e temperatura, resultando em valores reduzidos dos índices.

Estudos utilizando dados de umidade de satélite vêm sendo utilizado como forma de aperfeiçoar a calibração do modelo SWAT como em Nilawar et al. (2017), tornando-se importantes para minimizar as incertezas do modelo, atrelado a isso, está a importância da calibração de satélite com equipamento instalado no local para melhoria na estimativa desses valores.

Balço hídrico

As simulações no modelo SWAT foram realizadas para o período 01 de janeiro de 2017 a 30 de abril de 2018. A Tabela 6, lista as médias mensais simuladas dos principais componentes do balanço hídrico da bacia do rio Ipanema para o período simulado.

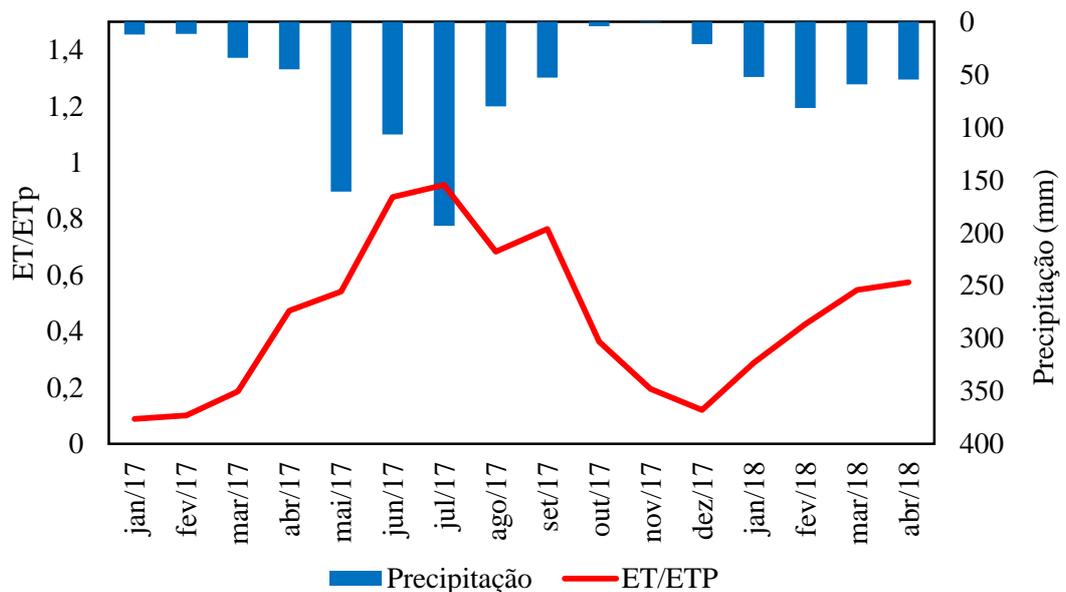
Tabela 6. Principais componentes do balanço hídrico simulado

MÊS	PREC	PET	ET	SW	PERC	SURF	GW	WYLD	LAT
-----mm-----									
1	11,96	121,13	10,83	6,57	0,00	0,02	0,00	0,15	0,1
2	11,36	104,55	10,62	7,18	0,00	0,02	0,00	0,17	0,13
3	34,09	113,89	21,26	19,55	0,00	0,08	0,00	0,44	0,34
4	45,05	97	45,95	18,00	0,01	0,09	0,00	0,68	0,57
5	160,88	74,35	40,29	95,79	26,02	13,79	0,00	16,38	2,58
6	106,65	59,25	51,97	99,75	45,13	3,52	6,273	12,44	2,42
7	193,37	49,37	45,45	103,70	119,05	20,24	36,83	63,02	5,02
8	80,14	80,19	54,76	99,27	22,35	6,07	56,34	65,65	1,63
9	52,83	92,44	70,57	79,47	1,06	0,59	39,59	42,72	0,88
10	4,38	118,55	43,15	40,13	0,43	0,00	22,07	23,71	0,11
11	0,59	117,66	22,97	17,53	0,15	0,00	4,89	6,10	0,02
12	21,13	115,88	13,96	24,28	0,02	0,15	0,07	1,4	0,23
1	52,43	109,74	31,65	43,28	0,52	0,60	0,01	1,97	0,66
2	81,53	103,98	44,30	65,23	12,32	1,67	0,49	3,871	1,22
3	59,40	110,57	60,54	46,05	11,21	5,68	7,37	14,93	1,36
4	54,62	81,37	46,78	53,22	0,00	0,10	7,18	8,33	0,56
MÉDIA	60,66	96,87	38,44	51,19	14,89	3,29	11,32	16,37	1,12
SOMA	970,48	1.549,9	615,08	818,99	238,25	52,62	181,12	261,99	17,84

A relação entre a evapotranspiração real e a potencial (ET/ETP) é apresentada na Figura 10 para o período simulado, observa-se a relação desta com o período de chuvas, que está estritamente relacionado com o desenvolvimento da vegetação e seu aumento devido ao aumento da transpiração. A evapotranspiração real é menor ou igual à evapotranspiração potencial, sendo ET um processo complexo e extremamente dinâmico, que envolve organismos vivos como o solo e a planta é muito difícil estabelecer um valor exato de evapotranspiração real. Entretanto, a conjugação de inúmeras informações associadas ao conceito de ETP, nos permite estimativas suficientemente confiáveis para a grande maioria dos nossos objetivos.

Percebe-se que a evapotranspiração mensal foi maior nos períodos mais quentes do ano (agosto, setembro). Os resultados simulados indicam que em média 63,4% da precipitação anual é perdida por evapotranspiração na bacia, havendo variação de ano para ano no período analisado.

Figura 9. Relação da evapotranspiração real e a potencial para o período de 01/01 de 2017 a 30/04 de 2018.



Os principais componentes do balanço hídrico considerados pelo modelo SWAT são: a quantidade total de chuva que precipita sobre a área da bacia durante o tempo de simulação (PREC), a evapotranspiração real da bacia (ET), e o volume de água que é propagado pelos canais da rede de drenagem até o exultório da bacia (produção de água ou water yield) (WY).

A produção de água inclui as contribuições do escoamento superficial (SUR), do escoamento sub-superficial (água que flui lateralmente pelo perfil de solo e entra no canal) (LAT) e do escoamento subterrâneo (água que retorna do aquífero raso e entra no canal) (GWQ) menos as perdas: água armazenada no solo nas HRU's (SW) ou percolada (PERC) no solo e

que se torna recarga do aquífero. O escoamento de base foi separado escoamento superficial usando a técnica do Filtro de Chapman como realizado por Collischonn e Dornelles (2015). Esta técnica estimou que 26% do escoamento total anual medido é escoamento de base.

Foi realizado balanço hídrico no período de 01/01/2017 a 30/04/2018 para a sub-bacia 5 (Tabela 7), na qual está localizado o reservatório Ingazeira, um dos principais reservatórios da bacia do Rio Ipanema, o qual tem capacidade de armazenamento de 4.800.000,00 m³. O reservatório possui conselho de usuários e atualmente foi realizada alocação de água pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

Tabela 7. Principais componentes do balanço hídrico simulado sub-bacia 5.

DATA	PREC	PET	ET	SW	PERC	SUR	GWQ	WYLD	LAT
-----mm-----									
1/1/2017	12,00	122,58	12,12	4,52	0,00	0,06	0,00	0,18	0,12
2/1/2017	4,00	105,77	7,21	1,29	0,00	0,01	0,00	0,04	0,03
3/1/2017	21,99	115,19	19,48	3,49	0,00	0,1	0,00	0,33	0,23
4/1/2017	36,89	98,14	29,76	10,08	0,00	0,15	0,00	0,54	0,39
5/1/2017	238,01	75,22	30,24	116,04	65,23	27,67	5,61	39,34	6,04
6/1/2017	51,38	59,99	50,34	111,77	3,41	1,24	36,45	41,32	3,24
7/1/2017	99,06	50,04	47,37	116,59	36,02	7,55	28,71	40,26	3,30
8/1/2017	22,49	81,23	54,12	83,52	0,93	0,26	18,46	20,15	0,57
9/1/2017	14,4	93,63	48,53	48,97	0,32	0,01	7,02	7,93	0,13
10/1/2017	3,2	119,99	32,17	20,00	0,00	0,00	2,77	3,44	0,03
11/1/2017	0,00	119,04	6,87	13,15	0,00	0,00	1,00	1,49	0,01
12/1/2017	24,69	117,2	15,98	21,55	0,00	0,1	0,39	1,07	0,21
1/1/2018	23,19	111,00	17,58	26,85	0,00	0,11	0,14	0,73	0,21
2/1/2018	52,68	105,15	41,87	36,73	0,06	0,23	0,06	1,11	0,64
3/1/2018	53,78	111,83	60,57	28,51	0,54	0,22	0,35	1,38	0,66
4/1/2018	96,46	82,33	68,33	53,48	1,41	0,39	0,74	2,63	1,38
MÉDIA	88,73	184,51	33,91	43,53	6,75	2,38	6,36	10,12	1,07
SOMA	754,22	1.568,33	542,54	696,54	107,92	38,1	101,7	161,94	17,19

Embora o período de tempo analisado seja curto, é possível notar que existe uma variabilidade mensal de precipitação. Os resultados simulados indicam que em média 72% da precipitação mensal é perdida por evapotranspiração na bacia, havendo variação de mês para mês no período analisado.

No caso de ambas as bacias hidrográficas, Santana do Ipanema (sub-bacia 30) e Reservatório Ingazeira (sub-bacia5), a avaliação da vazão é baseada em todo o período de simulação. Na sub-bacia do reservatório Ingazeira (Sub-Bacia 5), o modelo estima uma precipitação média anual de 754,22 mm, PET de 1568,33 mm, evapotranspiração (ET) de 542,54 mm, rendimento de água médio de 10,12 mm.

Para analisar a capacidade do modelo SWAT em simular vazão para outras sub-bacias, fez nova simulação hidrológica na sub-bacia 5, utilizando-se os parâmetros calibrados na bacia do Alto Ipanema, realizado por Fontes Junior (2016) (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros de calibração da Bacia do Alto Ipanema Fontes Jr., 2016

Parâmetros	SWAT-CUP
r_CN2.mgt	-4,733
v_ALPHA_BF.gw	0.063
v_GW_DELAY.gw	345
v_GWQMN.gw	143.333
v_REVAPMN.gw	321.53
v_GW_REVAP.gw	0.107
v_SHALLST.gw	812
v_RCHRG_DP.gw	0.013
v_SOL_K().sol	1,197
r_SOL_AWC().sol	0.182
v_ESCO.bsn	0.405
v_EPCO.bsn	0.423
v_SURLAG.bsn	22.39
v_EVLAI.bsn	0.567
v_CANMX.hru	76.333
r_SLSUBBSN.hru	0.158
v_CH_N2.rte	0.072
v_CH_K2.rte	182

O balanço hídrico gerado com os novos parâmetros na sub-bacia 5 para o período de 01/01/2017 a 30/04/2018 está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Principais componentes (mm) do balanço hídrico simulado para sub-bacia 5, parâmetros utilizados por Fontes Junior (2016), na Bacia do Alto Ipanema.

DATA	PREC	PET	ET	SW	PERC	SURQ	GW_Q	WYLD	LAT_Q
1/1/2017	12,0	122,58	11,63	6,57	0,0	0,06	0,0	0,18	0,12
2/1/2017	4,0	105,77	7,32	3,23	0,0	0,01	0,0	0,04	0,03
3/1/2017	21,99	115,19	20,68	4,23	0,0	0,1	0,0	0,33	0,23
4/1/2017	36,89	98,14	29,63	10,94	0,0	0,15	0,0	0,54	0,39
5/1/2017	238,01	75,22	30,13	108,75	31,46	71,87	0,0	76,66	4,79
6/1/2017	51,38	59,99	44,72	108,23	4,74	1,7	2,15	6,5	2,45
7/1/2017	99,06	50,04	44,38	112,22	38,19	8,97	4,49	17,41	3,52
8/1/2017	22,49	81,23	45,51	87,09	0,38	1,49	8,01	10,68	0,58
9/1/2017	14,4	93,63	43,47	57,83	0,1	0,01	5,84	6,55	0,13
10/1/2017	3,2	119,99	30,75	30,27	0,0	0,0	1,69	2,2	0,03
11/1/2017	0,0	119,04	9,18	21,12	0,0	0,0	0,0	0,37	0,01
12/1/2017	24,69	117,2	15,9	29,59	0,0	0,1	0,0	0,59	0,21

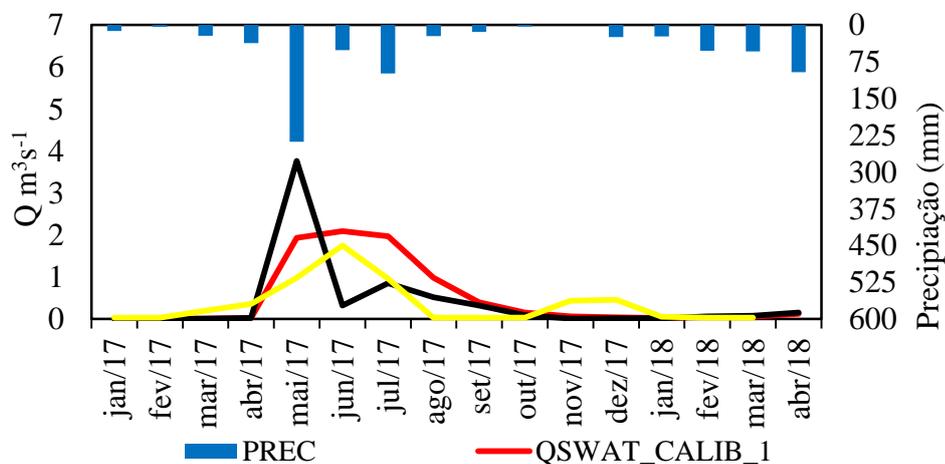
1/1/2018	23,19	111,0	17,16	35,25	0,0	0,17	0,0	0,58	0,21
2/1/2018	52,68	105,15	40,21	46,27	0,34	0,43	0,0	1,24	0,67
3/1/2018	53,78	111,83	59,58	37,95	0,98	0,83	0,13	1,78	0,7
4/1/2018	96,46	82,33	65,64	64,46	1,9	1,02	0,61	3,16	1,43
MÉDIA	47,12	98,02	32,24	47,75	4,88	5,43	1,43	8,05	0,97
SOMA	754,2	1.568,31	515,8	764	78,09	86,91	22,92	128,81	15,5

Em análise comparativa entre os balanços com diferentes calibrações, observou-se que com os parâmetros utilizados por Fontes Junior (2016), houve menor produção de água na bacia (8,05 mm) comparada ao desse estudo (10,12 mm). A produção de água inclui as contribuições do escoamento sub-superficial (0,97 mm), do escoamento subterrâneo (1,43 mm), este sendo maior nesse estudo (6,36 mm), o menor valor pode ser justificado, porque na calibração realizada na bacia menor (Alto do Ipanema), utilizaram-se dados de poços subterrâneos na calibração do modelo além do fator escala a ser considerado que pode ter influenciado no resultado da simulação.

O WYLD ainda inclui o escoamento superficial (5,43 mm), este foi comparado na Figura 11, observando-se que a simulação na bacia 5, teve seus picos melhores representados com a calibração no Alto do Ipanema, a linha em amarelo representa a vazão do reservatório localizado na bacia 5, para fins de observação, quando houve chuva e o alto pico de vazão (abril a julho de 2017) houve contribuição para aumento de água no reservatório, tanto do escoamento quanto da precipitação, sendo o volume mantido no reservatório.

Observam-se pequenas perdas por evaporação (agosto a dezembro de 2017), sendo período seguinte (janeiro a abril de 2018) restabelecido por baixas precipitações.

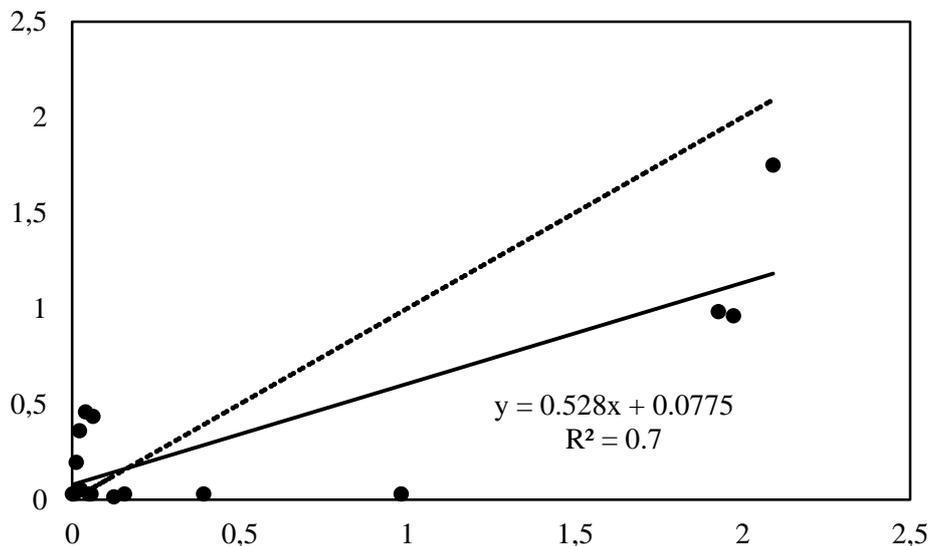
Figura 10. Vazões calibradas com parâmetros no Alto do Ipanema-PE (AI) e em Santana do Ipanema-AL (SI) e vazão observada do Reservatório Ingazeira localizado na bacia 5.



Comparando-se os acréscimos das vazões simuladas com parâmetros do Alto Ipanema e de Santana do Ipanema na Bacia do Ingazeira (sub-bacia 5), verificou-se acréscimos de até 95% no mês de maio, referente a bacia AI em relação a bacia SI, podendo ser justificado ao melhor ajuste dos parâmetros na Bacia do AI e a inserção dos poços subterrâneos na calibração. O maior decréscimo ocorrido foi no mês seguinte (84%), onde o modelo conseguiu obter maior sensibilidade à redução da precipitação.

Um breve comparativo entre os valores de vazão obtidos na simulação com a calibração da bacia SI com os dados observados no Reservatório Ingazeira, foi obtido boa correlação com R^2 de 0,7 apresentando o modelo como promissor para simulação nessa bacia.

Figura 11. Correlação entre a vazão simulada na Bacia SI e a vazão no reservatório incluído seus usos.



CONCLUSÕES

O modelo apresentou um ajuste aceitável para dados mensais, evidenciado por um NASH de 0,85, PBIAS de -16,2 e um R^2 de 0,88.

O estudo apresenta aplicabilidade do SWAT para calibração e validação de umidade do solo em partes da Bacia do Rio Ipanema.

A metodologia avaliou a assimilação da umidade do solo (sonda de nêutrons) no SWAT. Entretanto, ainda há uma margem para melhoria nos resultados entre vazões observadas e simuladas na bacia.

A análise de sensibilidade para a calibração de vazão mostrou variações entre o intervalo de parâmetros que havia sido inicializado para a calibração do modelo.

O procedimento SUFI-2 tenta minimizar a diferença entre os dados observados e medidos de vazão.

Os resultados sugerem que o modelo SWAT é uma ferramenta promissora para avaliar o balanço hídrico em bacias hidrográficas brasileiras.

A calibração em bacia de menor área poderá ser mais coerente para simulação em sub-bacias próximas, do que quando realizada calibração em bacia maior.

REFERENCIAS

ABBASPOUR, K.C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S. SWAT CUP calibration and uncertainty programs for SWAT In Proc Intl Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 07):1603-1609.2007

ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v. 524, p.733-752, 2015.

ABOUABDILLAH, A. et al. Modeling the impact of climate change in a Mediterranean catchment (Merguellil- Tunisia). *Fresenius Environ Bull* 19:2334–2347. 2010.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100010>. Acesso em: 25 mar. 2017.

ARAGÃO, R. et al. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1091-1102, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000700012>. Acesso em: 15 jan. 2014.

ARNOLD, J. G. et al. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *Am Soc Agric Biol Eng* 55:1491-1508.

ARNOLD, J.G. et al. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation-Version 2009 Texas Water Resources Institute Technical. Report 365. 2011.

ASFORA, M. C.; CIRILO, J. A. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. *REGA – Vol. 2, no. 2*, p. 27-38. 2005.

BONUMÁ, N. B. et al. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 29, p. 189-200. 2013.

BRESSIANI, D. A. et al. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *International Journal Agricultural & Biological Engineer*, v. 8, n. 3, p. 10-33, 2015.

BUSCHE, H.G.K. Modeling hydrological processes in a semi-arid mountainous catchment at the regional scale. 2012.

CAU, P.; MARRAS, P. A.; SORU, C. Influenza dei cambiamenti climatici sul bilancio idrologico della Regione Sardegna *IC Industry & Chemistry*: 12-16. 2015.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre, 2º Ed. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

DU, J. et al. Hydrological simulation by SWAT model with fixed and varied parameterization approaches under land use change. *Water Resource Management*, v. 27, n. 8, p. 2823-2838, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Recife: EMBRAPA Solos; Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sumula da 10ª reunião de levantamento de solos. Rio de Janeiro, 1979.

ERCAN, M.B. et al. Calibration of SWAT models using the cloud. vol 62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.002>. 2014.

FALCÃO, S. C. M. Avaliação da Produção de Sedimentos em Áreas de Diferentes Escalas na Bacia Experimental do Riacho Gravatá, Semiárido Alagoano. Dissertação de mestrado em Engenharia: Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2009.

FONTES JÚNIOR, R.V. de P. Experimentação e modelagem hidrológica aplicada à bacia do Alto Ipanema-PE, 156 p. 2016.

FOSCARINI, F. et al. Sensitivity analysis in fuzzy systems: Integration of SimLab and DANA. *Environ Model Software* 25:1256–1260. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.024>. (2010).

FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. *Catena*, v. 125, p. 206-213, 2015.

GASSMAN, P. et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Am Soc Agric Biol Eng* 50(4):1211–1250. 2007.

HIDROWEB Sistema de Informações Hidrológicas, Série histórica de dados (online). Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acessado em: 4 de fevereiro de 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acessado em 7 de maio de 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de dados climáticos. 2016.

JAIN, S. K. et al. Hydrologic modeling of a Himalayan mountain basin by using the SWAT model. Hydrology Earth System Science Discussion. Manuscript under review for journal Hydrology Earth System Science Discussion, started 28 March 2017. doi: 10.5194/hess-2017-100, 2017.

LENHART, T. et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 27:645–654 doi:[https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00049-9). 2002.

LOPES, E.A. et al. Controle de Meloidogyne Javanica através da Incorporação ao Solo de Seis Espécies de Plantas. Fitopatologia Brasileira, 2005.

MA, X. et al. Attribution of climate change, vegetation restoration, and engineering measures to the reduction of suspended sediment in the Keije catchment, southwest China. Hydrological Earth System Science, v .18, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/hess-18-1979-2014>. Acesso em: 10 jun. 2015.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Piracicaba - SP, 152 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2002.

MADSEN, H. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. Adv Water Resour 26: 205–216. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00092-1). 2003.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 27 mar. 2016.

MORAES, L. F.; CABONGO, O.; POLETO, C. Avaliação da rede de monitoramento de uma bacia hidrográfica do Rio Grande do Sul, Brasil. Acta Brasiliensis 2(2): 74-79, 2018.

MORAIS, M. M. G. et al. Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos. REGA – Vol. 3, no. 1, p. 29-44. 2006.

MORIASI, D.N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations in watershed simulations. TransASABE 50:885–900.2007.

MORIASI, D.N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.

NEITSCH, S. L. et al. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation version 2009. Temple, Blackland Research Center, Texas AgriLife Research T409, College Station, 618p. 2011.

NILAWAR, A. P. et al. Satellite Soil Moisture Validation Using Hydrological SWAT Model: A Case Study of Puerto Rico, USA Hydrology, 4, 45; doi:10.3390/hydrology4040045.2017.

PARK, M. J. et al. Assessment of future climate and vegetation canopy change impacts on hydrological behavior of chungju dam watershed using SWAT model. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 18, n. 1, p. 315-322, 2014.

PISTOCCHI, D.A.A.; BETTINI, S.; MISEROCCHI, R. Modellazione previsionale GIS based dell'inquinamento di origine diffusa da fonti agricole: Um caso di studio Ingegneria Ambientale.2000.

Projeto MapBiomias - Coleção 2.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em 20 de dezembro de 2017 através do link:
[http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection].

RAPOSO, J. R.; DAFONTE, J.; MOLINERO, J. Assessing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia-Cosata, Spain. Hydrogeology Journal, v. 21, n.2, p. 459-479, 2013.

SAMPAIO, E. V. S. B. et al. Capacidade de Suprimento de N e resposta à fertilização de 20 solos de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 1995.

SANTOS, J.C.P. dos. Zoneamento agroecológico de Alagoas. Rio de Janeiro, RL: EMBRAPA Solos; Recife, PE: EMBRAPA solos-UEP Recife, 2013.

SANTOS, T. E. M. dos; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.7, p.670-679, 2011.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>. Acesso em: 20 mar. 2015.

SILVA, F. B. R. ; SANTOS, J. C. P.; SILVA, A. B. Zoneamento agroecológico do Estado de Pernambuco. Documentos, vol. 35. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco, 2001. CD-ROM.

SILVA, J. R. L. Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de Pernambuco. Recife: UFRPE, Tese de Doutorado, 120 p., 2015.

STRAUCH, M. et al. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, v. 414/415, p.413-424, 2012.

SURFLEET, C.G., TULLOS, D.; CHANG, H.; JUNG, I-W. Selection of hydrologic modeling approaches for climate change assessment: A comparison of model scale and structures. *J Hydrol* 46:233-248. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.012>. 2012.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Conservation Service, SCS. National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. Manual, 1972.

VAN GRIENSVEN A.; BAUWENS, W. Multi objective autocalibration for semi-distributed water quality models. *Water Resour Manag* 39: 1348–1356.2003.