



21 a 23 de novembro de 2022
IFF – Campus Itaboraí

Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v17n22023p73-86

Submetido em: 29 jan. 2023

Aceito em: 30 dez. 2023

Desenvolvimento de tecnologia para estimativa da recarga hídrica sob diferentes condições de cobertura vegetal

Development of technology for estimating water recharge under different vegetation cover conditions

Desarrollo de tecnología para estimar la recarga hídrica bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal

ANDRE LEONARDO TAVARES PAULA  <https://orcid.org/0000-0002-4763-6562>

Instituto Federal Fluminense

Doutorando em Modelagem e Tecnologias aplicadas em Recursos Hídricos pelo Instituto Federal Fluminense, Brasil.

E-mail: andre.leonardo@gsuite.iff.edu.br

VICENTE DE PAULO SANTOS DE OLIVEIRA  <https://orcid.org/0000-0002-5981-0345>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor Titular do Instituto Federal Fluminense, Brasil.

E-mail: vicentepsoliveira@gmail.com

ELIAS FERNANDES DE SOUSA  <https://orcid.org/0000-0002-9323-3203>

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Doutorado em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Professor Titular da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil.

E-mail: sousa.elias.fernandes@gmail.com

THIAGO RODRIGUES FARIA  <https://orcid.org/0009-0009-3810-102X>

Instituto Federal Fluminense

Doutorando em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos pelo Instituto Federal Fluminense, Brasil.

E-mail: r.thiago@gsuite.iff.edu.br

ANTONIO JOSÉ DA SILVA NETO  <https://orcid.org/0000-0002-9616-6093>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Doutorado em Engenharia Mecânica pela North Carolina State University, Estados Unidos. Professor Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

E-mail: ajsneto@iprj.uerj.br

Resumo: A influência da cobertura vegetal sobre o balanço hídrico do solo tem sido estudada com mais rigor diante da necessidade de resiliência do ambiente a eventos extremos de precipitação e estiagem. A Região Hidrográfica IX-RJ sofre um intenso processo de degradação do solo em áreas de morro com pastagem degradada. Os planos de recuperação de mananciais e produção de água necessitam de estudos mais precisos sobre essa influência com dados regionais visando à eficiência no uso do recurso público. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito da cobertura vegetal sobre a recarga hídrica do subsolo com base em uma simulação hidrológica com parâmetros de modelagem calibrados e validados em campo. Para isso foi desenvolvido um dispositivo eletrônico para monitoramento da umidade do solo e da precipitação. Estão sendo estudadas as coberturas vegetais predominantes da RH-IX: pastagem degradada, pastagem manejada e floresta. Os resultados podem embasar os planos de recuperação de manancial para abastecimento público e ações de redução da pegada hídrica.

Palavras-chave: Instrumentação Hidrológica. Recarga hídrica. Segurança Hídrica.

Abstract: The influence of vegetation cover on soil water balance has been studied more rigorously due to the need for environmental resilience to extreme precipitation and drought events. Hydrographic Region IX - RJ undergoes an intense process of soil degradation in hill areas with degraded pasture. Watershed recovery plans and water production require more precise studies on this influence with regional data aiming at efficiency in the use of public resources. In this context, the objective of this research is to evaluate the effect of vegetation cover on subsurface water recharge based on hydrological simulation with calibrated and field-validated modeling parameters. For this purpose, an electronic device was developed for monitoring soil moisture and precipitation. The predominant vegetation covers of RH-IX are being studied: degraded pasture, managed pasture, and forest. The results can support watershed recovery plans for public water supply and actions to reduce water footprint.

Keywords: Hydrological Instrumentation. Water Recharge. Water Security

Resumen: La influencia de la cobertura vegetal en el balance hídrico del suelo ha sido estudiada con mayor rigor debido a la necesidad de resiliencia ambiental ante eventos extremos de precipitación y sequía. La Región Hidrográfica IX - RJ sufre un intenso proceso de degradación del suelo en áreas de montaña con pastos degradados. Los planes de recuperación de cuencas hidrográficas y producción de agua requieren estudios más precisos sobre esta influencia con datos regionales para lograr eficiencia en el uso de recursos públicos. En este contexto, el objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la cobertura vegetal sobre la recarga hídrica del subsuelo basándose en una simulación hidrológica con parámetros de modelado calibrados y validados en campo. Para ello, se ha desarrollado un dispositivo electrónico para el monitoreo de la humedad del suelo y de la precipitación. Se están estudiando las coberturas vegetales predominantes de RH-IX: pasto degradado, pasto manejado y bosque. Los resultados pueden respaldar los planes de recuperación de cuencas hidrográficas para el suministro público de agua y acciones para reducir la huella hídrica.

Palabras clave: Instrumentación Hidrológica. Recarga de Agua. Seguridad del Agua

1 Introdução

O favorecimento da cobertura vegetal é uma solução baseada na natureza (SbN) para aumentar a infiltração de água no solo e reduzir riscos relacionados ao clima (UNESCO, 2018). Quando a água percola abaixo da zona radicular, ocorre a recarga do manancial, caracterizando um serviço ecossistêmico, dotado de valor econômico (UNESCO, 2021). A Agenda Global 2030 é um compromisso assumido por líderes de 193 países no ano de 2015 e inclui 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (UN, 2015). O favorecimento da cobertura vegetal e da infiltração de água no solo está relacionado ao ODS 15, meta 1 “reverter a degradação da terra, assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas

terrestres e de água doce interiores e seus serviços”, assim como ao ODS 6, meta 6, “proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água” e ao ODS 13, meta 1, “Reforçar a resiliência a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais”.

Segundo Souza *et al.* (2020), a pastagem é a cobertura vegetal predominante na Região Hidrográfica IX do Estado do Rio de Janeiro. A permanência do gado no pastejo extensivo reduz a cobertura vegetal, aumenta a erosão em áreas declivosas e favorece as perdas de água e solo (MACEDO,1999). A necessidade de reforçar a resiliência a riscos relacionados ao clima tem fomentado iniciativas de recuperação da cobertura vegetal na região, tanto pastagem (BRASIL, 2012) quanto floresta (INEA, 2021).

A densidade da cobertura vegetal, seja de porte arbóreo ou rasteiro, pode afetar características do solo como a porosidade, a velocidade de infiltração básica e a curva de retenção de água, as quais podem ser avaliadas por amostragem de experimentos de campo (RECH *et al.* ,2015) e (DURVAL NETO *et al.*, 2013). Contudo, esses experimentos realizados por amostragem de solo não captam outras influências da vegetação, como a interceptação pela cobertura vegetal, os caminhos preferenciais e a evapotranspiração.

A tecnologia de Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), através da utilização de sensores, microcontroladores e softwares, tem proporcionado maior acessibilidade ao monitoramento de parâmetros ambientais em tempo real (CHAMARA *et al.*, 2022). Com essas tecnologias de monitoramento implementadas no ambiente é possível identificar a umidade do solo em tempo real juntamente com a precipitação.

O objetivo desta pesquisa é avaliar o efeito da cobertura vegetal sobre a recarga hídrica do subsolo utilizando parâmetros de modelagem calibrados e validados em campo. A princípio, estão sendo estudadas as coberturas vegetais predominantes da RH-IX: pastagem degradada, pastagem manejada e floresta. Para tal foi desenvolvido um dispositivo eletrônico para monitoramento da umidade do solo, da precipitação e da frente de molhamento.

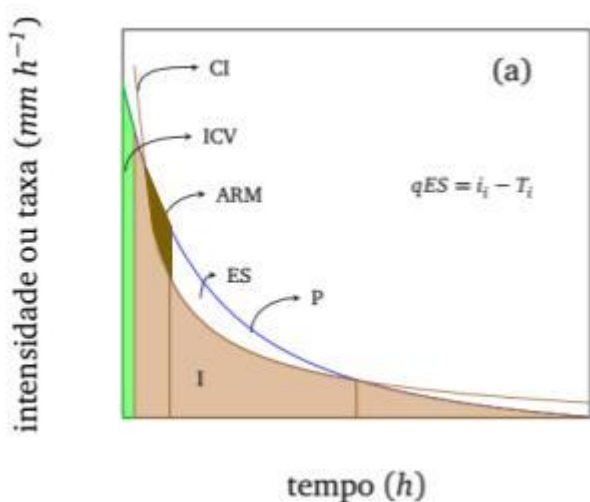
2 Revisão Teórica

2.1 Recarga hídrica

A dinâmica da água no solo foi descrita por PRUSKI *et al.* (2001) envolvendo os seguintes componentes: Capacidade de Infiltração (CI), Interceptação pela Cobertura Vegetal (ICV), Capacidade de

Infiltração (CI), Precipitação (P), Armazenamento de água na superfície do solo (ARM), Escoamento Superficial (ES), Precipitação (P) e Lâmina Infiltrada (I).

Figura 1: Relação entre os componentes associados ao balanço hídrico no solo.



Fonte: PRUSKI *et al.* (2001).

Um exemplo de balanço hídrico climatológico sequencial é o Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (SISDAGRO). Ele tem como parâmetro de entrada a capacidade de armazenamento de água no solo, o tipo de vegetação, a localidade e o período de interesse. Com base em dados climatológicos ele faz o balanço hídrico retornando os períodos de excesso ou *deficit* de água no solo. Entretanto, não calcula se o excesso gerou recarga hídrica ou escoamento superficial. A Recarga hídrica no subsolo (R) representa a parte da lâmina Infiltrada (I) que percola abaixo da zona radicular, não estando mais disponível para a evapotranspiração.

Para estimar a recarga potencial de um aquífero, Ferreira e Rodrigues (1982) desenvolveram um modelo matemático do balanço hídrico do solo sequencial na escala diária (BALSEQ). É um modelo de baixa demanda computacional que faz uma soma sequencial da água no solo considerando a profundidade radicular. A bacia hidrográfica é classificada segundo a cobertura vegetal, o tipo de solo e altimetria, de forma que o cálculo seja feito somente nas áreas em que o nível freático esteja abaixo da profundidade radicular.

Pontes *et al.* (2016) utilizaram esse mesmo modelo para simular a recarga hídrica em bacias hidrográficas em Minas Gerais. A estimativa da infiltração teve por base o escoamento superficial, estimado pelo método do Número da Curva (CN-SCS) e coeficiente de evapotranspiração da cultura (Kc) obtidos em outras regiões e precisaram de dados históricos locais de chuva e vazão para calibrar os parâmetros. Essa

estimativa foi satisfatória para avaliação da recarga hídrica potencial de uma determinada área na bacia hidrográfica, no entanto, para avaliar o efeito da cobertura vegetal sobre a recarga hídrica é importante reduzir as incertezas nas estimativas da infiltração, da evapotranspiração e das características físico-hídricas do solo.

Filoso (2017) e Tucci (1997) revisaram a literatura sobre o efeito da cobertura vegetal na vazão de rios. O principal fator de influência foi a profundidade radicular e a densidade de plantas. Em geral, os estudos avaliados incluíram simulações hidrológicas para previsão de cheias e utilizaram o método do número da curva, o qual é calibrado com base no escoamento superficial (MISHRA e SINGH, 2003).

Uma simulação hidrológica completa de uma bacia hidrográfica necessita de modelos sobre o movimento da água no solo, tanto em perfil quanto no sentido lateral. Geralmente, essas simulações possuem escala de cálculo de minuto e demandam dias de cálculo computacional para simular um ano de precipitação. Os softwares SWAT e MOHID Land são exemplos que permitem modelar a infiltração e o fluxo de água no solo, demandando parâmetros como condutividade hidráulica, umidade de saturação e os coeficientes da curva de retenção da água no solo. Os dados de saída da simulação podem ser obtidos com a adição de estações fluviométricas virtuais em qualquer ponto da bacia hidrográfica, entretanto a recarga hídrica em determinada área não é obtida diretamente como no modelo BALSEQ, sendo necessário realizar cálculos externos ao software baseados na umidade do solo ao longo do ano.

2.2 Monitoramento hidrológico em tempo real

No trabalho de López *et al.*, (2022), foi desenvolvido um dispositivo de monitoramento da umidade do solo e do nível do aquífero livre com baixo consumo de energia utilizando bateria recarregável por energia solar. O consumo de energia alcançado foi de onze miliamperes (11mA) no período entre medições (*deep sleep*). O modelo desenvolvido utilizou um microcontrolador Arduino pró mini, o qual apresenta consideráveis limitações quanto a quantidade de componentes e de entradas para sensores analógicos. Considerando-se as constantes atualizações dos produtos comerciais, percebe-se que os mesmos favorecem uma redução ainda maior no consumo de energia, permitindo implementações independentes da utilização de energia solar. Dessa forma, o monitoramento da umidade do solo poderia ser realizado abaixo da copa das plantas ou até mesmo oculto sob o solo para evitar roubo e depredação.

Sugawara (2008) desenvolveu uma miniestação meteorológica para estimativa da evapotranspiração e do balanço hídrico para a Região Norte Fluminense. O dispositivo era suprido por energia solar e teve um custo material de USD 1072,00. Entretanto, os excessos não foram diferenciados entre recarga e escoamento superficial.

O trabalho de Chamara *et al.* (2022) envolveu uma revisão bibliográfica de 115 artigos, publicados entre 2011 e 2021, sobre sistemas de monitoramento aplicados à agricultura e ao meio ambiente. Os resultados

demonstraram que as plataformas de desenvolvimento mais utilizadas foram Arduino (29%), ESP8266 (13%) e Raspberry PI (12%).

A empresa Espressif lançou o microcontrolador ESP 32 em 2016 para substituir o modelo ESP 2866 lançado em 2015, o qual foi bem representativo no estudo de Chamara *et al.* (2022). O ESP 32 disponibiliza mais entradas analógicas, um Real Time Clock (RTC) embutido, memória flash para gravar dados, conectividade wifi e bluetooth. O valor de compra é equivalente ao ESP 2866 e ao Arduino.

3 Material e Método

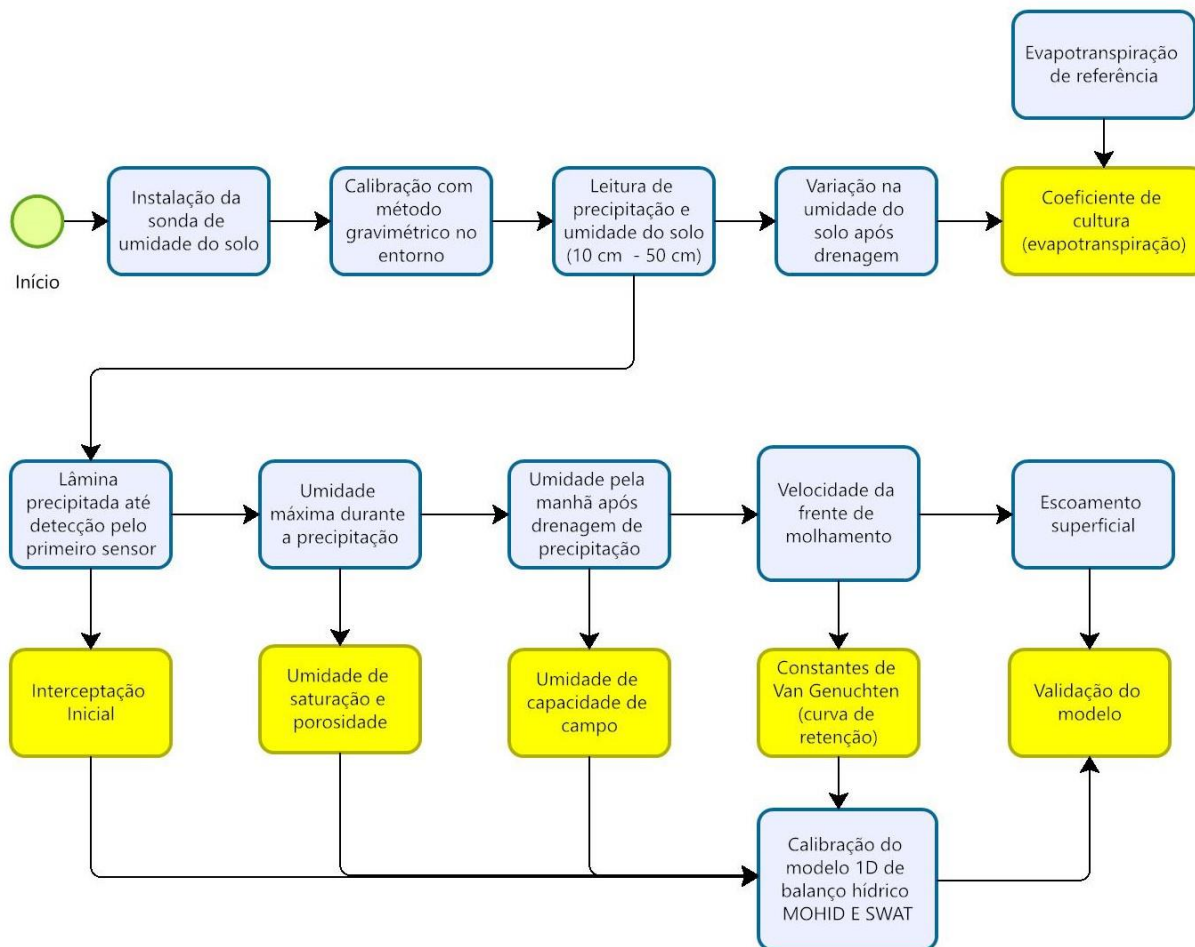
3.1 Dispositivo de monitoramento

O dispositivo inclui os seguintes sensores: pluviômetro, termo higrômetro, radiômetro, sensor de umidade do solo e um coletor para medir o escoamento superficial. Foi utilizado o microcontrolador ESP32 com armazenamento dos dados interno e transmissão via bluetooth quando solicitado via comando manual (botão). As leituras são realizadas pelo tempo de 1 segundo a cada 10 minutos e todo o sistema “dorme” nesse intervalo para reduzir o consumo de energia.

3.2 Determinação de parâmetros de modelagem

Os parâmetros do solo e da vegetação necessários para a simulação do balanço hídrico serão determinados em campo com base nos dados de precipitação e umidade do solo seguindo os passos do Fluxograma 1. Serão avaliadas três coberturas vegetais: Pastagem Degradada (PD), Pastagem Manejada (PM) e Floresta (F) em áreas de topo de morro. A área experimental está localizada no município de Conceição de Macabu, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Macabu. Os parâmetros identificados serão: a) Vegetação: coeficiente de cultura (k_c), profundidade radicular (z) e interceptação pela cobertura vegetal (ICV); e b) Solo: Porosidade, umidade de saturação, capacidade de campo, condutividade hidráulica em solo saturado e constantes da função de Van Genuchten. Inicialmente, será realizado um teste de infiltração com infiltrômetro de anel duplo para determinar esses parâmetros do solo, os quais serão validados com os dados do monitoramento durante os eventos de precipitação.

Figura 2: Processo de calibração e validação dos parâmetros:



3.3 Modelagem e simulação

A recarga (R) será calculada conforme a equação 1, adaptada de Libardi (2005), subtraindo-se o valor da precipitação (P) pelos valores do escoamento superficial (ES), da interceptação pela cobertura vegetal (ICV), da evapotranspiração (ET) e do *deficit* de água no solo (DEF). O *deficit* de água no solo (DEF) corresponde à lâmina de água necessária para que a tensão superficial entre em equilíbrio com o potencial gravitacional (capacidade de campo).

$$(1) \quad R = P - ES - ICV - ET - DEF, \quad R \geq 0$$

Na modelagem, o ES será estimado com base no modelo de infiltração de Green Ampt (1911), correspondendo ao valor da precipitação que ultrapassou a capacidade de infiltração estimada pelo modelo. Esse modelo presume que, durante a precipitação, ocorre uma frente de molhamento, acima da qual o solo encontra-se saturado e abaixo da qual o solo está na umidade inicial, resultando nas equações da lâmina infiltrada (2) e taxa de infiltração (3). A condutividade hidráulica será considerada a velocidade de infiltração básica identificada no teste de infiltração com duplo anel.

$$(2) \quad Inf = L (\Theta_s - \Theta_i)$$

$$(3) \quad T_i = k(\Psi + L)/L$$

em que: T_i = taxa de infiltração, Inf = lâmina de água infiltrada, k = condutividade hidráulica em solo saturado, Ψ = potencial matricial do solo, L = profundidade da frente de molhamento, Θ_i = umidade inicial e Θ_s umidade de saturação.

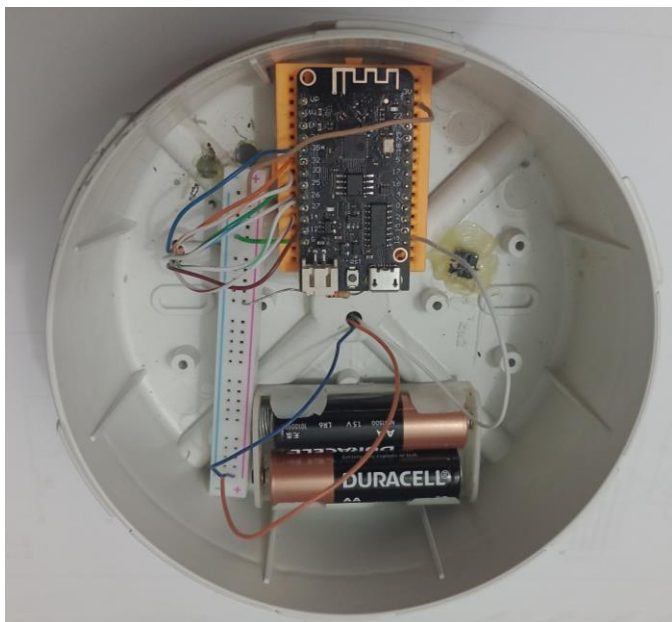
A simulação do balanço hídrico será feita na direção vertical, em escala de tempo diária para dias sem precipitação a fim de reduzir a demanda computacional e horária para dias com precipitação, a fim de aumentar a precisão na estimativa da infiltração. A recarga diária (R) será a informação de saída da simulação para cada cobertura vegetal.

4 Resultados parciais

4.1 Dispositivo de monitoramento:

Foram avaliados três modelos de placa de desenvolvimento que utilizam o microcontrolador ESP32 com menor preço. WEMOS LOLIN32 Lite (Figura 3) apresentou menor consumo de energia durante a pausa entre as medições (2mA para *light sleep* e 0,07mA para *deep sleep*) em comparação a 12mA em *light sleep* e 10 mA em *deep sleep* para os modelos DOIT ESP32 – ESP-WROOM-32 e NodeMCU ESP32S. Além das características já citadas, o modelo WEMOS LOLIN32 Lite apresenta a vantagem de possuir largura menor que as outras opções, possibilitando que os sensores sejam conectados em uma protoboard. Dessa forma, foi possível montar o dispositivo de forma compacta (Figura 3) sem a necessidade de placa de circuito para anexar outros módulos, pois o ESP32 já disponibiliza o RTC e o armazenamento de dados internamente.

Figura 3: Placa de desenvolvimento WEMOS LOLIN32 Lite instalada na caixa hermética.



Fonte: Autores(2023)

O pluviômetro foi construído basicamente com um coletor no qual se mede a pressão da coluna d'água, de forma que seja possível conferir os resultados após a precipitação (Figura 4). Foi utilizado um sensor

XGZP010DB1R (Figura 5), o qual opera em uma faixa de 0 a 10 kPa (0 a 1019,7 mmH₂O). Desta forma, é possível identificar a precipitação ocorrida entre os períodos de leitura, mantendo a precisão e a possibilidade de conferência dos valores totais de precipitação. O tubo armazenador do pluviômetro tem um metro de comprimento, diâmetro interno de 47,8mm e seção transversal de 18cm². Portanto, o volume máximo de água acumulado é de 1800 cm³. O diâmetro do coletor é de 10cm e a sua seção transversal é de 78,5 cm². Logo, dividindo-se o volume máximo pela área do coletor, obtém-se a lâmina máxima de precipitação acumulada que equivale a 230mm.

Figura 4: Tubo coletor com diâmetro nominal de 100mm na captação e 50mm no armazenamento.



Fonte: Autores (2023)

Figura 5: Sensor De Pressão Xgzp010db1r Dip6 10Kpa 1,5 Psi



Fonte: Autores (2023)

Foi escolhido o sensor de umidade do solo capacitivo modelo V1.2 (Figura 6) devido à estabilidade de leitura observada em bancada e ao baixo custo em relação aos outros sensores capacitivos disponíveis no mercado. Brum (2022) calibrou esse modelo de sensor capacitivo para três tipos de solo obtendo uma

correlação satisfatória dentro da faixa de medição. O autor observou que é necessário aplicar uma camada de material isolante no circuito integrado ao sensor, o que foi feito com adesivo epóxi. O circuito localiza-se próximo ao sensor que fica inserido no solo para que o cabo não interfira na leitura, o que aumenta a necessidade de proteção contra umidade.

Figura 6: Sensor capacitivo de umidade do solo v1.2



Fonte: <https://www.eletrogate.com/sensor-capacitivo-de-umidade-do-solo>

Dentre os modelos de termo higrômetro mais acessíveis do mercado, foi escolhido o DHT22. Um sensor digital pré-calibrado que tem capacidade de medição de temperaturas até 80°C com resolução de 0,5 °C e limite de umidade relativa de 100% conforme manual do fabricante.

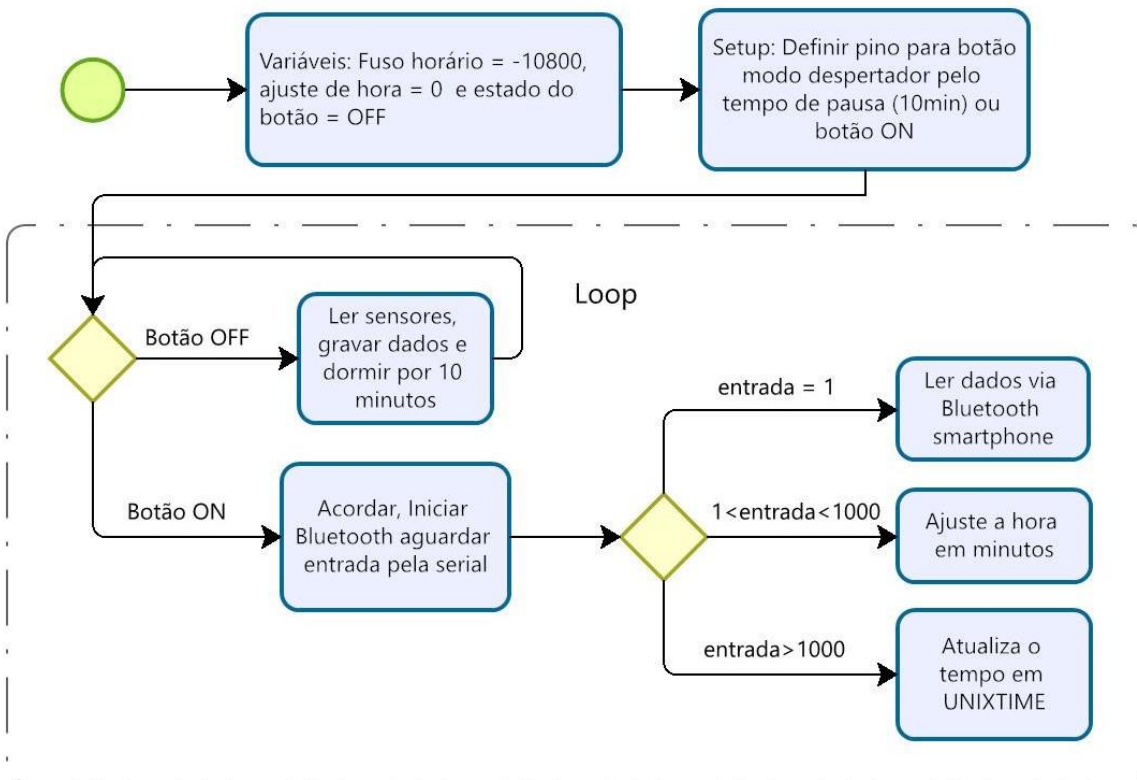
A coleta do escoamento superficial será feita utilizando-se uma barreira quadrada de chapa de aço com 15 cm de largura e 1 metro de cada lado. Ela será inserida no solo na posição de um losango com a declividade, de forma que a água proveniente da área acima seja desviada e a água escoada da área interna seja concentrada na parte inferior da chapa. Neste ponto será colocado um tubo coletor que irá destinar a água para um depósito em um local mais baixo do terreno. No depósito será instalado o mesmo sensor de pressão utilizado no pluviômetro, o Xgzp010db1r Dip6 10Kpa 1,5 Psi.

O consumo de energia foi satisfatório para implementação no campo, tendo autonomia estimada em 447 dias. O dispositivo utiliza duas pilhas pequenas AA em série, fornecendo 3 volts ao sistema e 1700 mAh.

4.2 Software:

Foi desenvolvido um modelo de software (Figura 7) na plataforma Arduino IDE. É dividido em 4 etapas: Definição de variáveis, comandos de inicialização (Setup), comandos de leitura repetitiva (loop) e subrotina de transmissão de dados via bluetooth (BT).

Figura 7: Modelo do software do microcontrolador ESP32



Fonte: Autores(2023).

Inicialmente, são iniciadas duas variáveis para o ajuste de horário. A variável “ajuste” e a variável “offset”, que corresponde ao fuso horário da região. No caso de Brasília o fuso é de menos três horas (-3h ou -10800s) em relação ao Tempo Universal Coordenado (UTC), que é o sucessor do Tempo Médio de Greenwich (GMT). O sistema computacional utiliza o tempo em segundos passados desde 1 de janeiro de 1970 às 00:00:00 UTC denominado UNIX TIME.

Quando o software entra no loop verifica se o botão está ligado, o que ocorre somente quando o usuário for a campo baixar os dados da estação. Se estiver desligado ele segue com a leitura e gravação dos dados dos sensores e volta a dormir. Se estiver ligado, ele aciona a subrotina “BT”, ativa o bluetooth e aguarda a comunicação serial, a qual é feita utilizando um smartphone com aplicativo de comunicação serial via bluetooth. A entrada do usuário é convertida em um número inteiro. Se esse valor for igual a “1”, ele acionará a subrotina “readFile” para leitura do arquivo. Se o valor da entrada estiver entre 1 e 1000 o sistema receberá como um ajuste em segundos, adicionando esse valor à variável “ajuste”. Se o valor estiver acima de 1000, o software irá interpretar com o novo horário como UNIX TIME.

4.3 Simulação e modelagem

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a influência da cobertura vegetal na recarga hídrica, incluindo artigos tanto na escala de bacia hidrográfica quanto em fluxo vertical. Foi possível concluir que a

influência da cobertura vegetal sobre a recarga hídrica pode ser avaliada de forma mais direta por um balanço hídrico sequencial diário. Após identificar os dias com excesso de água, segue-se com uma simulação da infiltração utilizando o modelo de Green Ampt (1911) para estimar qual fração do excesso origina recarga hídrica e qual fração origina escoamento superficial.

5 Discussão

Embora o termo higrometro DHT22 seja utilizado em trabalhos científicos recentes e semelhantes (DENIZ *et al.*, 2022), este sensor necessita de um tempo de leitura de pelo menos 1 segundo, considerado longo em relação aos outros sensores utilizados neste trabalho, aumentando o consumo de energia. O preço desse sensor representa 18% do custo de material do dispositivo, entretanto o modelo de preço imediatamente inferior (DHT11) está limitado à umidade relativa de 80%. Em testes de campo deve-se conferir a calibração do sensor após ocorrência de umidade de 100%, pois nesta condição a condensação do vapor de água pode afetar a leitura da umidade relativa. Na programação com *deep sleep* o *delay* de um segundo foi posicionado antes da leitura da temperatura para que o sensor tenha o tempo recomendado para fazer a leitura.

Embora os parâmetros de modelagem do solo possam ser estimados com funções de pedotransferência com base na composição de amostras, esse procedimento pode não considerar os caminhos preferenciais da água no solo, um aspecto importante da cobertura vegetal para a recarga hídrica (ALAOUI, 2015).

6 Considerações finais

O conhecimento científico sobre os serviços ecossistêmicos do ambiente é fundamental para a sustentabilidade no uso do solo. O dispositivo desenvolvido permitirá o monitoramento da umidade do solo abaixo da copa das árvores assim como da precipitação na região de interesse. O modelo de balanço hídrico proposto será capaz de estimar qual fração do excesso origina recarga hídrica e qual fração origina escoamento superficial com um baixo custo computacional, o que pode possibilitar seu uso em plataformas online de informação geográfica.

Referências

ALAOUI, A. **Modelling susceptibility of grassland soil to macropore flow.** Journal of Hydrology, Volume 525, 2015, Pages 536-546, ISSN 0022-1694.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC** (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília : MAPA/ACS, 2012. 173 p. ISBN 978-85-7991-062-0

BRUM, M. **Calibração de sensores capacitivos de baixo custo utilizando a plataforma arduíno.**

Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 2022. 104p.

CHAMARA, N. & I. *et al.* (2022). **Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future.** *Agricultural Systems*. 203. 103497. 10.1016/j.agsy.2022.103497.

DENIZ, M., de SOUSA, K.T., GOMEZ, I.C. *et al.* **Development and application of an autonomous data logger to measure environmental variables in livestock farming.** *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 8699–8712 (2022). <https://doi-org.ez135.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13762-021-03734-z>

DURVAL N. N. N. *et al.* **Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem.** *Rev. bras. eng. agríc. ambient.*. Vol. 17(9):995-1004. DOI: 10.1590/S1415-43662013000900013

FERREIRA, J.P.L., RODRIGUES, J.D. (1988). **BALSEQ — A Model for the Estimation of Water Balances, Including Aquifer Recharges, Requiring Scarce Hydrologic Data.** In: Simmers, I. (eds) *Estimation of Natural Groundwater Recharge.* NATO ASI Series, vol 222. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7780-9_19

FILOSO, S., Bezerra, M.O., Weiss, K.C.B., Palmer, M.A., 2017. **Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review.** *PLOS ONE* 12, e0183210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183210>

GREEN, W.H.; Ampt, G. A. (1911) - **Studies on soil physics-Part I-The flow of air and water through soils.** *J of Agric. Sci* IV, May:1-24.

INEA (2021) **RESOLUÇÃO INEA Nº 244 DE 18 DE NOVEMBRO DE 2021.** <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2021/11/RESOLU%C3%87%C3%83O-INEA-N%C2%BA-244-1.pdf>

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo.** Editora da Universidade de São Paulo, 335 p, 2005

LÓPEZ, E.; *et al.* **A Low-Power IoT Device for Measuring Water Table Levels and Soil Moisture to Ease Increased Crop Yields.** *Sensors* 2022, 22, 6840. <https://doi.org/10.3390/s22186840>

MACEDO, M.C.M. **Degradação de pastagens: conceitos e métodos de recuperação.** Anais Simpósio Sustentabilidade da pecuária de leite no Brasil. Juiz de Fora. 1999. P.137-150.

MISHRA, S.K. and Singh, V.P. (2003) **Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology.** Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>

PONTES, L. *et al.* (2016). **Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial.** *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 11. 915 - 928. 10.4136/ambiente.1856.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. **Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

RECH, C. A. *et al.* **Efeito de diferentes sistemas de manejo de pastagem na qualidade física do solo.** (2015).

SOUZA *et. al.* (2020) - **Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine** - Remote Sensing, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735.

SUGAWARA, M. T. **Sistema automatizado para estimação da evapotranspiração de referência e do balanço hídrico para região Norte Fluminense utilizando redes neurais artificiais (RNA`s)** – 2008. 61 f.: il.

TUCCI, Carlos & Clarke, Robin. (1997). **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 2. 10.21168/rbrh.v2n1. p. 135-152.

UNESCO (2018). **United Nations World Water Development Report - WWDR**.
<https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018>

UNESCO (2021). **United Nations World Water Development Report - WWDR**.
<https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021>

VAN GENUCHTEN, M. Th., LEIJ, F. J. and YATES, S. R. 1991. **The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils**, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California

Agradecimentos

Agradecimentos às instituições FAPERJ, CPNq e CAPES e à empresa ROVEQ.