



## Projeção e análise dos impactos das mudanças climáticas no balanço hídrico na bacia hidrográfica do Moxotó (Pernambuco)

Igor Maciel Tibúrcio<sup>1\*</sup>, Veríssimo Ribeiro Pinheiro Neto<sup>2</sup>, Raphaela Karine dos Santos Bello<sup>3</sup>, Nara Tôrres Silveira<sup>4</sup>, Sidney Henrique Campelo de Santana<sup>5</sup>, Joélia Natália Bezerra da Silva<sup>6</sup>, Josiclêda Domiciano Galvêncio<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil (\*Autor correspondente: igor.tiburcio@ufpe.br)

<sup>2</sup>Graduando em Geografia-Bacharelado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

<sup>3</sup>Graduando em Geografia-Bacharelado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

<sup>4</sup>Doutoranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Instituto Federal do Piauí, Brasil.

<sup>5</sup>Professor do Instituto Federal do Amapá, Brasil

<sup>6</sup>Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

<sup>7</sup>Professora da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

*Histórico do Artigo:* Submetido em: 02/02/2024 – Revisado em: 02/04/2024 – Aceito em: 28/05/2024

### RESUMO

Diante do aumento evidente dos eventos climáticos extremos, torna-se imperativo estudar e antecipar os cenários de mudanças climáticas, principalmente no semiárido, onde sabe-se que há uma maior sensibilidade às alterações no clima. Só assim será possível mitigar e adaptar-se a estes fenômenos. Este trabalho se concentra na projeção desses cenários para a bacia hidrográfica do Rio Moxotó. No cenário atual, a bacia já enfrenta desafios significativos no balanço hídrico, marcado por alta evapotranspiração real e pouca disponibilidade hídrica. As projeções a partir de 2041 indicam um agravamento destes problemas, especialmente quando consideramos a dinâmica do uso do solo na bacia, isso somado a taxa de evapotranspiração real projetada de 87%, o que elevaria exponencialmente a vulnerabilidade da região a eventos extremos de seca.

**Palavras-Chaves:** SUPer, Mudanças Climáticas, Ciclo hidrológico, Secas.

### Projection and Analysis of the Impacts of Climate Change on the Water Balance in the Moxotó Hydrographic Basin (Pernambuco – Brazil)

### ABSTRACT

Given the evident increase in extreme weather events, it is imperative to study and anticipate climate change scenarios, especially in the semi-arid, where it is known that there is a greater sensitivity to climate change. Only then will it be possible to mitigate and adapt to these phenomena. This work focuses on the projection of these scenarios for the Moxotó river basin. In the current scenario, the basin already faces significant challenges in the water balance, marked by high real evapotranspiration and low water availability. Projections from 2041 indicate a worsening of these problems, especially when we consider the dynamics of land use in the basin, this added to the projected real evapotranspiration rate of 87%, which would exponentially increase the vulnerability of the region to extreme drought events.

**Keywords:** SUPer, Climate Change, Hydrological Cycle, Drought.

## 1. Introdução

Tendo em vista os grandes fenômenos climáticos que têm acontecido em todo o mundo, as mudanças climáticas têm sido muito debatidas, faz-se, cada vez mais necessário, compreender os impactos para buscar mitigá-los. O que antes eram projeções, têm-se tornado uma realidade, as mais recentes projeções apontam

Tibúrcio, I. M., Pinheiro-Neto, V. R., Bello, R. K. dos S., Tôrres Silveira, N., Santana, S. H. C. de., Silva, J. N. B., Galvêncio, J. D., (2024). Projeção e Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico na Bacia Hidrográfica do Moxotó-PE. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.6, n.1, p.62-70.



para um cenário irreversível de mudanças ao qual a humanidade precisará adaptar-se. Segundo o IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, 2022), é inegável que as ações humanas estejam modificando o clima, pois, as últimas 4 décadas foram as mais quentes consecutivamente desde 1850.

Mudanças climáticas são alterações na temperatura e no clima, alterações essas que podem ocorrer de forma natural, entretanto, têm sido aceleradas pelas atividades antrópicas. A partir disso, tornaram-se cada vez mais frequentes eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas, inundações e elevação do nível dos oceanos, acarretando também problemas de saúde na população, como doenças respiratórias e transmissíveis, e afetando também o setor agrícola, o que é preocupante para a segurança alimentar da população (Alpino et al. 2020).

Segundo Artaxo (2020), em decorrência do desmatamento e queima de combustíveis fósseis houve alteração na composição da atmosfera, aumentando assim a presença de gases que alteram o balanço energético da atmosfera, promovendo assim o aumento das temperaturas em todo o planeta. Infelizmente, apesar de todos os esforços das instituições internacionais, ainda se têm cenários nada otimistas para o clima, tendo em vista a complexidade que é reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Segundo a Fundação Getúlio Vargas (2020), 38% da matriz energética brasileira corresponde ao petróleo, tendo em segundo lugar a energia hidrelétrica com 29% e o gás em terceiro com 10%, a nível mundial o petróleo, gás e carvão representam 84% da matriz energética, estando assim distante de uma matriz sustentável, logo é necessário atentar-se às inevitáveis alterações que estão ocorrendo e que ocorreram no clima, visto que as emissões dos GEEs(Gases do efeito estufa) continua longe de ser solucionada.

Segundo Artaxo (2020), em decorrência do desmatamento e queima de combustíveis fósseis houve alteração na composição da atmosfera, aumentando assim a presença de gases que alteram o balanço energético da atmosfera, promovendo assim o aumento das temperaturas em todo o planeta. Infelizmente, apesar de todos os esforços das instituições internacionais, ainda se têm cenários nada otimistas para o clima, tendo em vista a complexidade que é reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Segundo a Fundação Getúlio Vargas (2020), 38% da matriz energética brasileira corresponde ao petróleo, tendo em segundo lugar a energia hidrelétrica com 29% e o gás em terceiro com 10%, a nível mundial o petróleo, gás e carvão representam 84% da matriz energética, estando assim distante de uma matriz sustentável, logo é necessário atentar-se às inevitáveis alterações que estão ocorrendo e que ocorreram no clima, visto que as emissões dos GEEs(Gases do efeito estufa) continua longe de ser solucionada.

O semiárido nordestino é marcado pelo histórico de grandes secas, com datações ainda no período imperial, como a grande seca de 1887 a 1879. O livro *Vidas Secas* (1933) de Graciliano Ramos retrata bem a história de uma família sertaneja em meio às adversidades do sertão, no livro é muito explícito como a escassez hídrica atormenta os que ali vivem. Ab'Saber (2003) apresenta o bioma caatinga como um dos 3 espaços semiáridos da América do Sul, o que contrasta com o cenário continental de grandes extensões de terras úmidas, também é destacada a variabilidade climática do bioma, onde podem as chuvas chegarem com antecedência, como também, ter-se longos períodos de estiagem.

O balanço hídrico é o quantitativo de água que entra e sai do solo em um determinado intervalo de tempo, baseado na lei de conservação da massa, em diferentes escalas, sejam continentes, bacias hidrográficas (Tomasella e Rossato 2005; Anache, 2017). Para compreender o balanço hídrico é necessário entender alguns componentes fundamentais, como a evapotranspiração, que pode ser evapotranspiração potencial (ETp) e evapotranspiração real (ETr). A ETp é o quantitativo de água que pode ser transpirada pela vegetação em cenário onde não há restrição hídrica, já a ETr é perda de água para atmosfera de uma superfície natural em qualquer situação de umidade, a compreensão destes componentes do balanço hídricos são fundamentais para análise de déficit hídrico em bacias hidrográficas (Camargo e Camargo, 2000; Teixeira, 2018; Moura, et al., 2019). No semiárido encontram-se elevados valores de evapotranspiração potencial, isso devido à grande incidência de radiação solar e elevadas temperaturas, já é característico do bioma uma baixa precipitação, isso

somado a elevada evapotranspiração torna o bioma muito suscetível a escassez hídrica (Solomatine; Wagener, 2011; Sell et al., 2022).

O modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) é um modelo semi-distribuído em tempo contínuo, operando em escala diária, e em escala espacial reduzida, dividindo uma bacia hidrográfica em sub-bacias, estas sendo novamente divididas em unidades de resposta hidrológica (Arnold et al., 2012). Tratando-se de estudos em escala de bacia hidrográfica, o modelo SWAT é o mais difundido no mundo, e muito utilizado em estudos no Brasil (Arnold et al., 2012; Bressiani et al., 2015).

O SUPer (Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco) é um sistema de processamento em nuvem que utiliza o modelo SWAT 2012, os usuários a partir de um cadastro podem acessar o SUPer onde se encontram 13 grandes bacias hidrográficas do estado de Pernambuco, com séries de dados a partir de 1961, trazendo assim um robusto conjunto de dados para fins de pesquisa e gestão dos recursos hídricos.

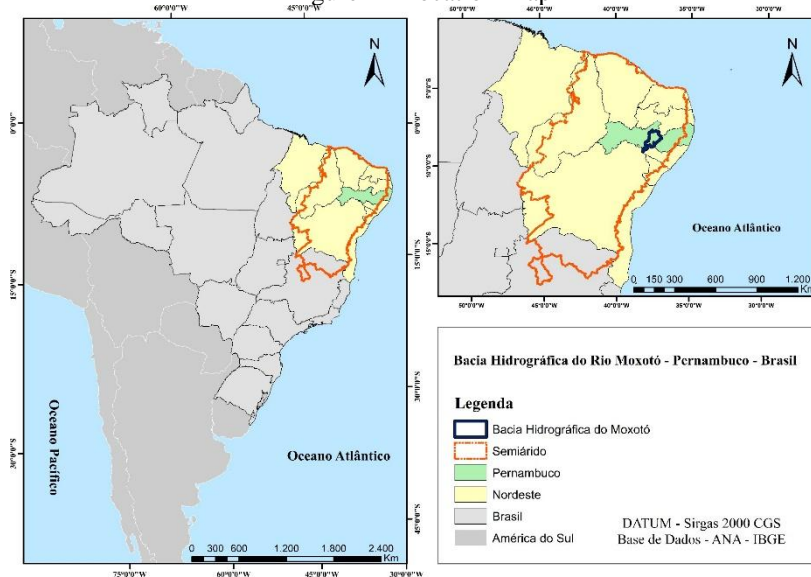
## 2. Material e Métodos

### 2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Moxotó localiza-se no semiárido nordestino, com sua maior porção pertencente ao estado de Pernambuco e uma pequena parte no estado de Alagoas. O rio Moxotó possui sua nascente no município pernambucano de Sertânia, possui 226 km de extensão. A bacia hidrográfica possui 9.744,01 km<sup>2</sup> de área, de tal forma que é considerada uma das maiores da região. Os municípios pernambucanos com sede na bacia são Arcoverde, Custódia, Ibimirim, Manari e Tacaratu, enquanto os parcialmente inseridos são Buíque, Floresta, Jatobá, Igaraci e Tupanatinga, residem na área da bacia mais de 223 mil habitantes (Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2015).

**Figura 1 – Mapa de localização**

Figure 1 - Location Map



**Fonte:** Autor

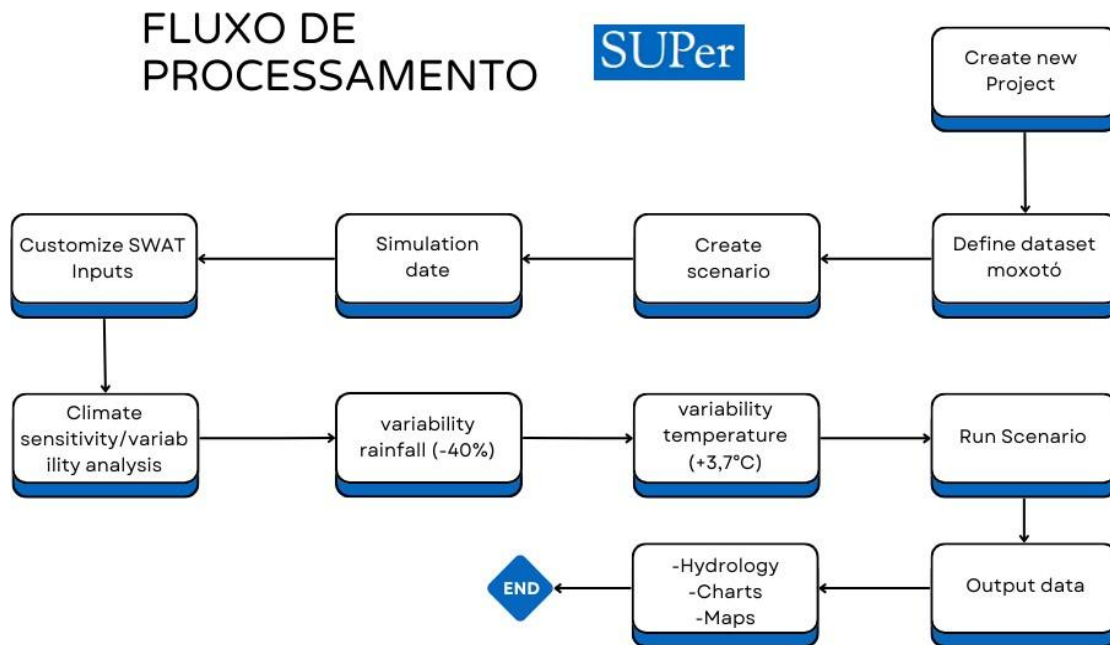
Source: The authors (2024)

A área analisada possui um clima semiárido, conforme a classificação climática de Köppen, a região apresenta uma média anual de precipitação que varia de 300 mm a 900 mm, com a maioria das chuvas ocorrendo nos meses de janeiro a maio, a temperatura média na área é de aproximadamente 25 °C (APAC, 2015).

Para a análise de mudanças climáticas na bacia utilizou-se como dados de entrada alteração na precipitação e na temperatura da área, segundo as estimativas da Fiocruz (2022), a partir de 2041 a precipitação pode diminuir até 40% e a temperatura aumentar em 3,7 ° C. Diante disso, foram utilizados esses dados para gerar um cenário de mudanças climáticas a partir do período basal recomendado pelo IPCC para análise de mudanças climáticas que correspondem de 1961 a 1990. A partir da série de dados hidroclimatológicos presentes no SUPer foi possível analisar as diferenças entre o período basal e o período 1991 a 2020, como também, o cenário de mudanças climáticas para 2041.

O processamento no SUPer é feito em nuvem, através do Site SUPer | Sistema de Unidades de resposta hidrológica para Pernambuco (tamu.edu), o fluxo de processamento no SUPer é simples, desde a criação do projeto, onde é delimitada a área desejada, até a inserção de dados entrada, no presente trabalho foram gerados 3 dados de saída no super, os dados de referência de 1961 a 1990 e 1991 a 2020, para fins de comparação entre as duas climatologias, como também, foi gerado 1961 a 1990 com as variações em decorrência das mudanças climáticas projetadas a partir de 2041.

**Figura 2** – Fluxo de processamento SUPer  
Figure 2 – SUPer processing flow



**Fonte:** Autor  
Source: The authors

O ciclo hidrológico no SWAT/SUPer foi gerado através da seguinte equação (1):

$$Sw_f = Sw_i + \sum_{t=i}^t (P - Q_s - ET - W_s - Q_{GW}) \quad (1)$$

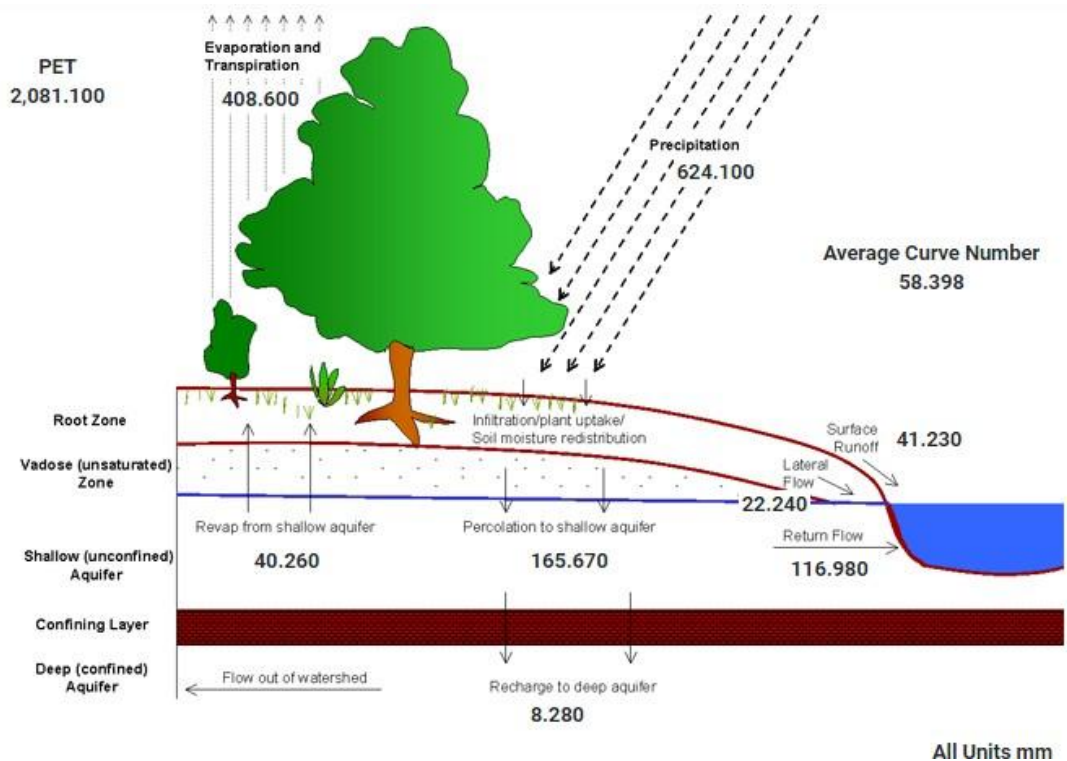
Onde  $S_{wf}$  e  $S_{wi}$  são respectivamente a quantidade final e inicial no solo,  $t$  representa o tempo em dias,  $P$  é a precipitação,  $Q_s$  é o escoamento superficial,  $ET$  é a evapotranspiração,  $W_s$  é a percolação e o  $Q_{gw}$  é o fluxo de base, todas as unidades exceto o tempo estão mm.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Análise decadal do balanço hídrico basal 1961 a 1990 e 1991 a 2020

O balanço hídrico na bacia hidrográfica do Moxotó entre 1961 e 1990 apresentou uma precipitação média anual de 624 mm, tendo assim uma evapotranspiração potencial 2081 mm e uma evapotranspiração real de 408 mm, isso mostra que cerca de 65,38% da precipitação é perdida por evapotranspiração, 165 mm o que equivale a 26,44% da precipitação é percolada, 41 mm escoam na superfície e o escoamento de base é de 116 mm, ou seja, 18,58% do total de precipitação (Figura 3).

**Figura 3** – Balanço hídrico basal  
Figure 3 – Basal water balance



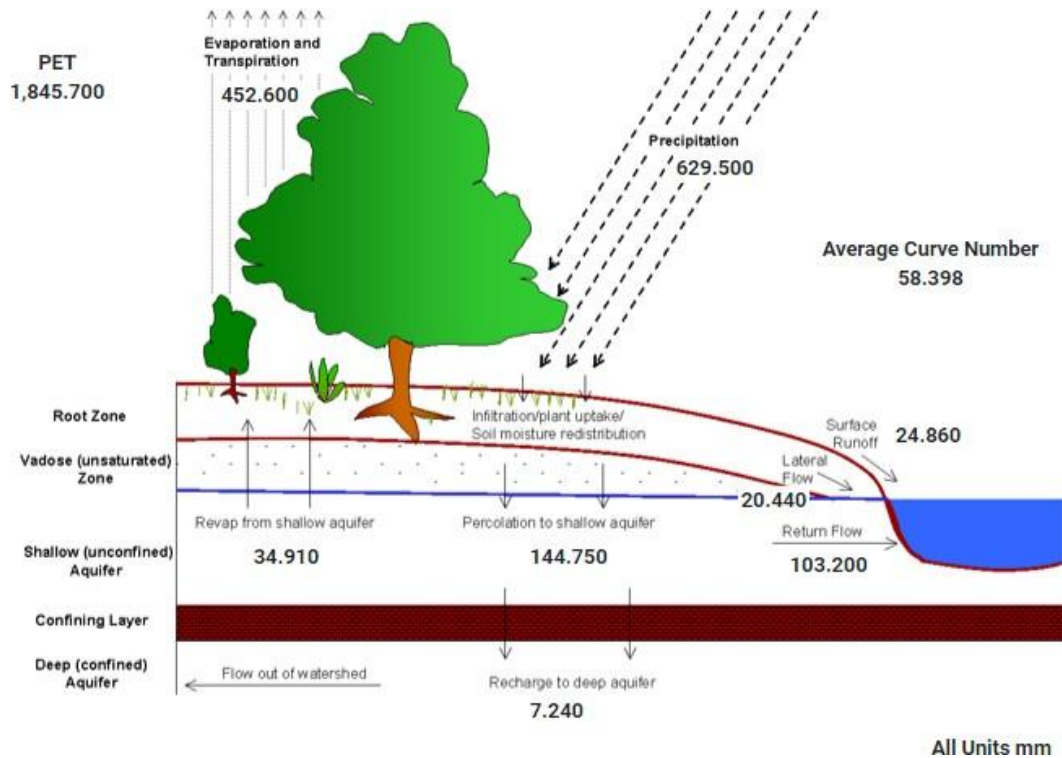
Fonte: SUPeR  
Source: SUPeR

O escoamento de base é fundamental para a manutenção da vida no semiárido, tendo em vista os elevados valores de evapotranspiração, o que garante a sobrevivência e o cultivo e afins na região são as águas subterrâneas.

Ao analisar a segunda climatologia, que vai do ano de 1991 ao ano de 2020, observa-se (Figura 4) uma

precipitação 629 mm, mostrando uma variação sutil de 5 mm, podem-se considerar que em termos de precipitação não houve relevante mudança, porém, tratando-se de evapotranspiração real temos um aumento considerável, onde antes havia uma evapotranspiração real de 65,38% da precipitação passou a haver uma evapotranspiração real de 71,86% da precipitação, o que já reduz a disponibilidade hídrica da bacia. Na evapotranspiração potencial foi observada uma diminuição, 1845 mm.

**Figura 4** – Balanço hídrico (1991-2020)  
Figure 4 – Water balance (1991-2020)



A percolação apresentou redução passando a ser 144mm e o escoamento superficial 24 mm, já o escoamento de base passou para 103 mm, correspondendo assim a 16,37% da precipitação.

É importante atentar-se a alguns indícios já presentes nesta comparação, entre as duas já é possível relacionar alguns dados entre os dois balanços hídricos e os usos do solo, tem-se o aumento da evapotranspiração real juntamente a redução na percolação indicam tanto que a temperatura aumentou, em decorrência das já presentes alterações climáticas, como também, têm-se agravado pela atividade agrícola que reduz a capacidade de percolação da precipitação.

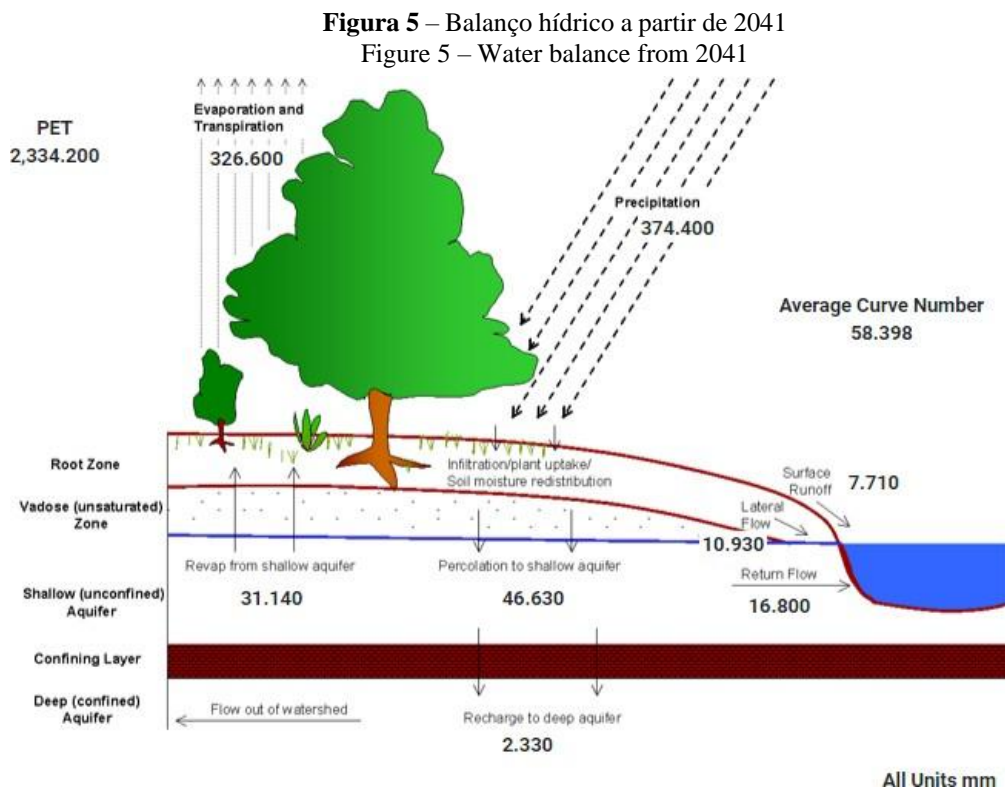
Dados semelhantes já foram achados também por meio de análises do balanço hídrico com o SUPer em trabalhos recentes, como no de Tibúrcio et al. (2023) onde uma pequena bacia que faz parte da bacia do rio Terra Nova, foi observado uma evapotranspiração real de 34%, com projeções de mudanças climáticas essa evapotranspiração real chegando a 40% da precipitação, Luz e Galvêncio (2022) encontram na bacia do riacho milagres uma evapotranspiração de 41% da precipitação, o que é relativamente comum para a região semiárida



do nordeste, porém nesta bacia analisada os valores são alarmantes mesmo se comparadas com outras bacias de perfil semelhante.

### 3.2 Balanço hídrico em Cenários de mudanças climáticas para o ano de 2041

No cenário de mudanças climáticas proposto (Figura 5), observou-se o seguinte balanço hídrico, evapotranspiração potencial mais elevada em comparação ao cenário de referência, evapotranspiração real de 87,16% da precipitação, o que é extremamente alarmante, tendo em vista o severo déficit hídrico que isso representa, uma percolação de 12% da precipitação, e um escoamento de base de 4,2% da precipitação.



Fonte: SUPer  
Source: SUPer

Esse cenário representa um futuro muito severo para a bacia hidrográfica do rio Moxotó, uma área que carece de um grande projeto que a prepare para este cenário, pois tendo em vista a demanda hídrica da região, neste cenário seria insuficiente para os que ali vivem. Com um escoamento de base tão baixo, os que residem na bacia não conseguiriam extrair água dos cacimbões, poços artesianos, etc.

## 4. Conclusão

Diante dos dados analisados neste trabalho, fica evidente que a bacia hidrográfica do rio Moxotó tem uma alta vulnerabilidade às mudanças climáticas, o balanço hídrico da bacia já se encontra com fortes indícios dos impactos das mudanças climáticas, pois se constata o aumento significativo da evapotranspiração

real.

Para a bacia hidrográfica do Moxotó é necessário desde já ações de controle e conscientização do uso da terra, como também, pensar numa gestão sustentável e eficiente dos recursos hídricos, também se faz necessário pensar estratégias para atender a população principalmente aqueles em situação de vulnerabilidade social nos períodos de estiagem.

Se faz necessário mais trabalhos científicos nas bacias hidrográficas buscando analisaresses impactos já notáveis como aqueles que ainda virão, pois cada bacia tem um grau diferente de suscetibilidade, inclusive pode haver diferenças dentro da própria bacia, diante dopreocupante cenário, são fundamentais estudos em menor escala dentro da bacia hidrográfica do rio Moxotó para uma melhor compreensão de como se desenvolvem os impactos das mudanças climáticas dentro dela, para assim traçar estratégias robustas de adaptação emitigação a estas mudanças.

## 5. Referências

Alpino, T. D. M. A., Santos, C. R. B., Barros, D. C. D., & Freitas, C. M. D. (2020). COVID-19 e (in) segurança alimentar e nutricional: ações do Governo Federal brasileiro na pandemia frente aos desmontes orçamentários e institucionais. *Cadernos de Saúde Pública*, 36, e00161320.

Artaxo, P. (2020). As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos avançados*, 34, 53-66.

Ab'Sáber, A. N. (2003). *Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas* (Vol. 1). Ateliê editorial.

Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2015). *Elaboração de planos de aproveitamento da estrutura hídrica no semiárido*. Recife: Agência Pernambucana de Águas e Clima

Anache, J. A. A. (2017). *Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.

Brito, P. V. D. S. (2021). *Análise de correlação entre a produção primária bruta do sensor MODIS e balanço hídrico do SWAT para bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, Pernambuco* (Bachelor's thesis, Brasil).

CAMARGO, Â. P. D., & CAMARGO, M. B. P. D. (2000). Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, 59, 125-137.

de Almeida Bressiani, D., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., & Mendiondo, E. M. (2015). Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9-35.

de Moura, M. S. B., Sobrinho, J. E., & da Silva, T. G. F. (2019). Aspectos metereológico do semiárido brasileiro.

Fundação Getulio Vargas - FGV. (n.d.). *Dados da matriz energética*. Fundação Getulio Vargas. Disponível



em <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>

Fundação Oswaldo Cruz. (n.d.). *Pernambuco vulnerável à mudança do clima*. Fundação Oswaldo Cruz. Disponível em <https://www.cpqrr.fiocruz.br/pg/pernambuco-vulneravel-a-mudanca-do-clima/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *The Sixth Assessment Report: The numbers behind the science*. Geneva, Switzerland.

Luz, G. G. D., Miranda, R. D. Q., & Galvíncio, J. D. (2023). Assessment of Water Availability and Environmental Influence on People's Lives in a Small Basin in the Hinterland of Pernambuco, Using the SUPER and UAV. *Applied Sciences*, 13(20), 11255.

Ramos, G. (2013). *Vidas secas*. Editora Record.

SELL, B. M., BRESSIANI, D., CECCONELO, S., & BESKOW, S. (2022). Desempenho estatístico do swat+ na modelagem hidrológica de uma grande bacia do pampa brasileiro. 8ª semana integrada da UFPel.

Tomasella, J., & Rossato, L. (2005). Balanço hídrico. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Paulo*.

Teixeira, L. M. N. (2018). Evapotranspiração em vegetação natural do bioma Caatinga obtida por balanço hídrico no solo e por sensoriamento remoto.

Tiburcio, I. M., Silveira, N. T., dos Santos, T. O., de Queiroga Miranda, R., & Galvíncio, J. D. (2023). Balanço Hídrico e Mudanças Climáticas no Semiárido Pernambucano: aplicabilidade do Sistema de Unidades de Respostas Hidrológicas para Pernambuco (SUPER). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1657-1670.