

ANÁLISE TEMPORAL DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL EM UMA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA

Gabriela Gomes¹

Liliane Moreira Nery²

Darllan Collins da Cunha e Silva³

Exploração das mudanças climáticas globais e variações climáticas regionais ao longo do tempo

Resumo

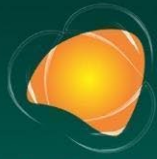
Mudanças no balanço energético superficial podem induzir eventos climáticos regionais e globais, como ondas de calor e chuvas intensas. O fluxo de calor sensível é crucial para modelar os processos dinâmicos da atmosfera urbana e os fluxos de energia de superfície turbulenta, regulando o balanço energético atmosférico e influenciando a circulação atmosférica. Estimar e analisar esse fluxo é fundamental para entender as trocas de energia e água que afetam o balanço energético superficial urbano. O objetivo deste estudo foi calcular e analisar o fluxo de calor sensível na Área de Proteção Ambiental de Itupararanga entre 1986 e 2021, utilizando parte da arquitetura do algoritmo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) por meio do *software* ArcGIS 10.8. Os resultados mostraram uma redução significativa na máxima do calor sensível, com aproximadamente 70,76%, enquanto a média reduziu em 50,96%. No entanto, a mínima apresentou um aumento de 42,29%. O fluxo de calor sensível na APA sofreu um decréscimo considerável, possivelmente devido às mudanças no uso e cobertura da terra e às condições climáticas da região. O ano de 1994 registrou os menores valores da série histórica, influenciado por condições climáticas atípicas. Este estudo oferece informações valiosas para gestores públicos na formulação de políticas que promovam a qualidade do ambiente urbano e contribuam para a mitigação do controle climático.

Palavras-chave: Balanço Energético; Sensoriamento Remoto; Análise Espacial

¹ Mestranda em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Departamento de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, gabriela.gomes98@unesp.br.

² Doutoranda em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Departamento de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, liliane.nery@unesp.br.

³ Prof. Dr. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, Departamento de Engenharia Ambiental, darllan.collins@unesp.br.



INTRODUÇÃO

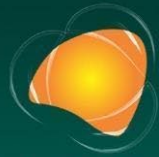
A superfície terrestre regula as trocas de umidade, calor e momento (interação entre o vento e a superfície terrestre, diminuindo a velocidade do ar pelo atrito) entre ela e a atmosfera, desempenhando um papel crucial na formação dos padrões climáticos globais, que por sua vez têm um impacto significativo em nossa sociedade (Ozdogan et al., 2010). Mudanças no balanço energético superficial podem levar a eventos climáticos regionais e globais, como ondas de calor e chuvas intensas.

Compreender a partição da energia da radiação líquida (R_n) entre a atmosfera, o subsolo e a água é essencial para estudos climáticos e previsões meteorológicas, fornecendo informações úteis para aprimorar a gestão dos recursos hídricos (Rubert et al., 2022). Os fluxos de água e calor na superfície, compostos por calor latente (LE) e sensível (H), são influenciados por fatores como vegetação, clima e atividades humanas (Chen et al., 2024). Essas variáveis determinam as trocas energéticas entre a superfície e a atmosfera, impactando o ambiente e o clima.

O fluxo de H é essencial para modelar os processos dinâmicos da atmosfera urbana e os fluxos de energia de superfície turbulenta, esse componente regula o balanço energético atmosférico e afeta a circulação atmosférica (Sampaio et al., 2021). O fluxo de H representa o principal sumidouro de energia na superfície urbana, e a configuração urbana influencia de maneira complexa tanto na radiação líquida (como fonte) quanto no fluxo de calor sensível (como sumidouro) (Yang et al., 2023).

A mudança climática é uma das questões mais urgentes da atualidade, embora suas causas sejam ainda alvo de debate, devido à interação entre a variabilidade climática natural e as atividades humanas (Parbaleh; Kaboli, 2023). As atividades antrópicas, junto à complexidade das superfícies urbanas, impactam as trocas de energia e a dispersão de poluentes. As observações são cruciais para melhorar a compreensão dos processos atmosféricos e fornecem a base para o desenvolvimento e avaliação de modelos urbanos (Kotthaus; Grimmond, 2014).

Portanto, estimar e analisar o fluxo de H é essencial para compreender as trocas de energia e água que afetam diretamente o fluxo de energético superficial urbano. Visto isso, o objetivo deste trabalho é obter e analisar o fluxo de calor sensível na Área de Proteção Ambiental de Itupararanga entre 1986 e 2021.



METODOLOGIA

A área de estudo compreende a Área de Proteção Ambiental (APA) de Itupararanga (Figura 1) e abrange a extensão geográfica da bacia hidrográfica que origina a represa de Itupararanga, conhecida como "Alto Sorocaba", com uma área de aproximadamente 936 km². A APA foi criada pela Lei Estadual nº 10.100, 01 de dezembro de 1998 e alterada pela Lei Estadual nº 11.579, 02 de dezembro de 2003.

O clima é caracterizado por verões chuvosos e invernos com períodos de estiagem e sua vegetação é caracterizada como Floresta Ombrófila Densa, originária do Bioma Mata Atlântica. A Bacia Hidrográfica encontra-se no limite de duas grandes Províncias Geomorfológicas: Planalto Atlântico e Depressão Periférica (Fundação Florestal, 2009). A represa de Itupararanga é formada pelos Rios Sorocamirim, Sorocabuçu e Una.

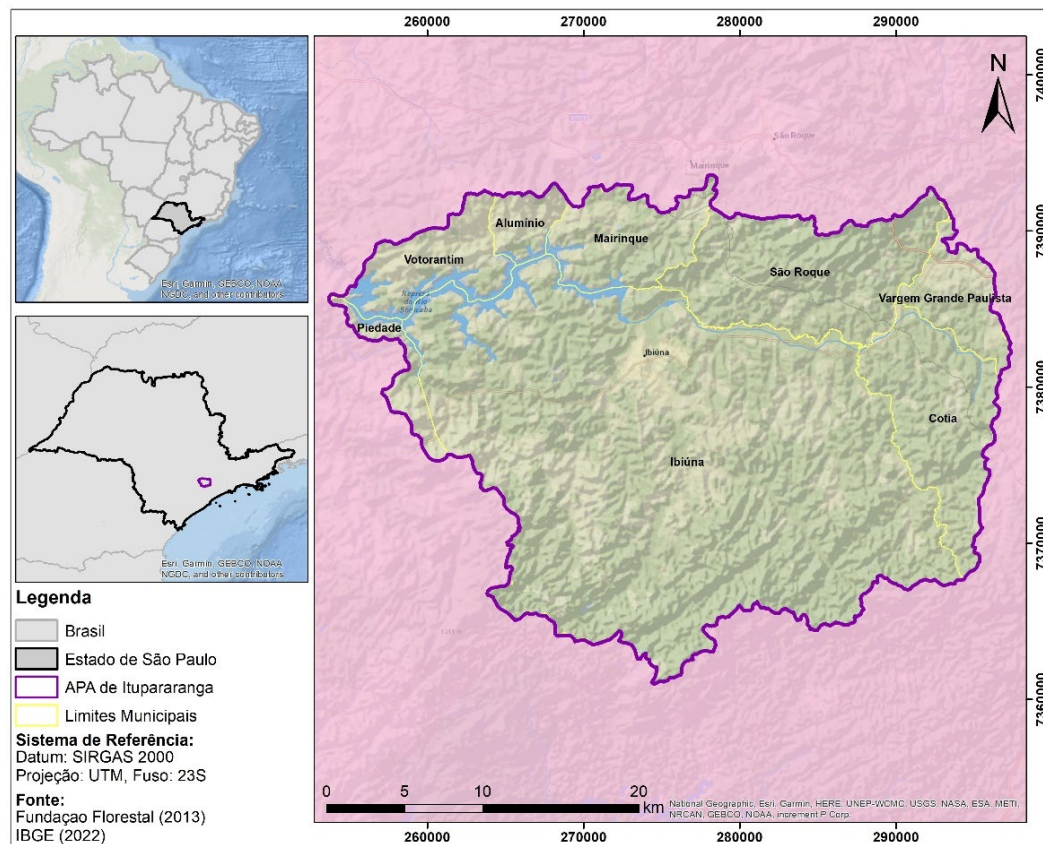
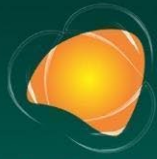


Figura 1: Localização APA de Itupararanga.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Para o cálculo do calor sensível foi utilizado parte da arquitetura do algoritmo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL), desenvolvido por Waters et al. (2002) por meio do *software* ArcGis 10.8. O fluxo de calor sensível é a troca de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera por meio de condução e convecção, causando variação de temperatura no ar próximo à superfície, sem mudança de fase. O fluxo de calor sensível foi calculado conforme Bastiaanssen et al. (1998) pela Equação (1).

$$H = \frac{\rho_{ar} \times C_p \times dT}{R_{ah}} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ar} é a densidade do ar (kg/m^3);

C_p é o calor específico do ar (1004 J/kg/K);

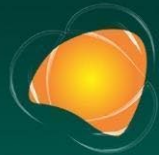
dT é a diferença de temperatura entre duas alturas verticais ($z_1 = 0,1\text{m}$ e $z_2 = 2\text{m}$);

R_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s/m).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando temporalmente o fluxo de calor sensível na APA (Figura 2), observa-se que houve uma diminuição considerável entre 1986 e 2021. A máxima do calor sensível obteve a maior redução, sendo de aproximadamente 70,76%, enquanto a média reduziu em 50,96%, no entanto a mínima apresentou um crescimento de 42,29%.

Dos anos analisados, 1986 apresentou a maior máxima ($319,27 \text{ W/m}^2$) e média ($60,81 \text{ w/m}^2$), enquanto os anos de 1994 e 2014 obtiveram as menores máximas e médias (Tabela 1), com destaque para 1994 que apresentou uma máxima de $85,80 \text{ W/m}^2$ e média de $20,77 \text{ W/m}^2$. Não obstante, esse ano em específico apresentou a maior mínima, sendo essa de $-33,42 \text{ W/m}^2$. Esse comportamento em 1994 pode ser explicado por um inverno mais intenso que ocorreu nesse ano. As ondas de ar frio registradas em 1994 causaram impactos significativos, incluindo geadas e neve, na região sul do Brasil, com algumas dessas massas avançando em direção ao norte e alcançando até o sul da Amazônia (Marengo et al., 1997).



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

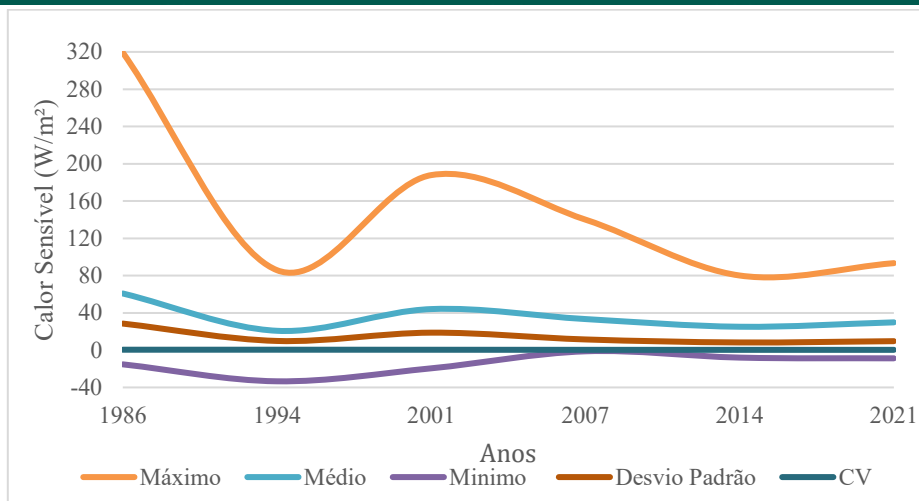


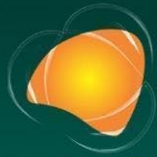
Figura: Calor Sensível na APA de Itupararanga entre 1986 e 2021.

Analisando a Tabela 1, verifica-se uma diminuição considerável no desvio padrão de aproximadamente 66,22%, evidenciando um decréscimo na variabilidade ou dispersão dos dados do calor sensível na APA de Itupararanga. O coeficiente de variação apresentou valores que oscilaram entre 0,48 e 0,32, expondo uma redução durante os anos analisados da dispersão relativa dos dados do calor sensível em torno da média.

Tabela 1: Calor Sensível na APA de Itupararanga entre 1986 e 2021.

Anos	Calor Sensível (W/m ²)				
	Máxima	Média	Mínima	Desvio Padrão	CV
1986	319,27	60,81	-15,22	28,51	0,47
1994	85,80	20,77	-33,42	9,87	0,48
2001	187,81	44,07	-19,49	18,77	0,43
2007	140,03	33,36	-1,24	11,48	0,34
2014	80,09	25,11	-8,00	8,27	0,33
2021	93,35	29,82	-8,78	9,63	0,32

Analisando os dados temporalmente (Tabela 1), observa-se que de modo geral o fluxo de calor sensível na APA sofreu um decréscimo considerável, podendo essa redução estar atribuída às condições climáticas da região influenciadas principalmente pelas mudanças no uso e cobertura da terra (UCT). As mudanças no uso e cobertura da terra, ao modificar as características biofísicas da superfície terrestre, influencia diretamente as alterações climáticas em nível regional (Liu et al., 2019). Alteram



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

as interações superfície-atmosfera, modificando o tempo e a intensidade dos fluxos de energia, o que afeta a partição da energia disponível e, conseqüentemente, o balanço hídrico (Caballero et al., 2022).

O uso e cobertura da terra podem mudar em resposta ao clima, funcionando como *feedback*. Além dos ciclos naturais, atividades humanas introduzem modificações adicionais no UCT, influenciando as respostas meteorológicas (Gogoi et al., 2019). O efeito mais evidente das atividades humanas em escala regional e local são as mudanças no UCT, que alteram o balanço energético da superfície, o que impacta temperatura da superfície e modifica o microclima da região (Gogoi et al., 2019).

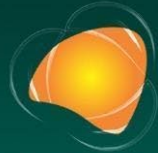
Mudanças na disponibilidade hídrica na região também pode ter contribuído para essa redução observada no calor sensível, pois segundo Sales et al. (2022), alterações na disponibilidade de água no ambiente afetam o saldo de radiação, onde ambientes mais úmidos geralmente exibem um fluxo de calor latente mais elevado e um fluxo de calor sensível reduzido, o que leva a temperaturas mais moderadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fluxo de calor sensível apresentou um decréscimo na Área de Proteção Ambiental de Itapararanga entre 1986 e 2021 em mais de 50%. O ano de 1994 apresentou os menores valores da série histórica, influenciado por condições climáticas atípicas que ocorreram nesse ano.

A redução do calor sensível observada na área de estudo pode estar relacionada a diversos fatores, sendo as mudanças no uso e cobertura da terra ocorridas durante os anos analisados, serem umas das principais causas. Pois, as mudanças no uso e cobertura da terra são fatores determinantes para as variações significativas no calor sensível e no armazenamento de calor no balanço energético da superfície urbana.

Este estudo oferece subsídios para gestores públicos na implementação de políticas que promovam a qualidade do ambiente urbano e contribuam para a mitigação do controle climático.

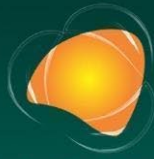


AGRADECIMENTOS

Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES) - Código: 001

REFERÊNCIAS

- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p. 198-212, 1998. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4).
- Caballero, C. B.; Ruhoff, A.; Biggs, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Science of the Total Environment*, v. 808, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>
- Chen, J.; Chen, H.; Du, X.; Wang, R. Retrieval of Surface Energy Fluxes Considering Vegetation Changes and Aerosol Effects. *Remote Sensing*, v. 16, n. 4, p. 668, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/rs16040668>
- FUNDAÇÃO FLORESTAL. Plano de manejo da Área De Proteção Ambiental (APA) Itupararanga. 2009. Disponível em: <https://fflorestal.sp.gov.br/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-apa-itupararanga/>. Acesso em: 10 de set. 2024.
- Gogoi, P. P.; Vinoj, V.; Swain, D.; Roberts, G.; Dash, J.; Tripathy, S. Land use and land cover change effect on surface temperature over Eastern India. *Scientific Reports*, v. 9, n. 8859, 2019. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45213-z>
- Liu, Z.; Liu, Y.; Baig, M. H. A. Biophysical effect of conversion from croplands to grasslands in water-limited temperate regions of China. *Science of the Total Environment*, v. 648, p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.128>
- Marengo, J.; Cornejo, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C. Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *American Meteorological Society*, 125, p. 2759-2786, 0493(1997)1252.0.CO;2.
- Ozdogan, M.; Rodell, M.; Beaudoin, H. K.; Toll, D. L. Simulating the Effects of Irrigation over the United States in a Land Surface Model Based on Satellite-Derived Agricultural Data. *Journal of Hydrometeorology*, v. 11, n. 1, p. 171-184, 2010. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JHM1116.1>
- Parbaleh, A.; Kaboli, H. S. Detection of trend changes in surface energy budget caused by urbanization and land cover/use changes in Dezful plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, v. 82, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10990-4>.
- Sales, R. S. B.; Sales, D. S.; Mendonça, J. C. Balanço de energia e ilhas de calor no perímetro urbano de Campos dos Goytacazes, RJ: Um estudo de caso. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 6, p. 3093-3105, 2022.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

Sampaio, R. J.; Rodriguez, D. A.; Randow, C. V.; Silva, F. P.; Araújo, A. A. M.; Filho, O. C. R. Sensible heat flux assessment in a complex coastal-mountain urban area in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 133, p. 973-987, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00812-2>

SÃO PAULO. **Lei nº 10.100, de 01 de dezembro de 1998**. Declara Área de Proteção Ambiental entorno da represa de Itupararanga. Disponível <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1998/lei-10100-01.12.1998.html>. Acesso em: 17 de set. 2024.

SÃO PAULO. **Lei nº 11.579, de 02 de dezembro de 2003**. Altera a Lei nº 10.100, de 01 de de 1998. Disponível <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2003/lei-11579-02.12.2003.html>. Acesso em: 17 de set. 2024.

Waters, R. et al. SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land. Idaho implementation, Advance Training and Users Manual, Department of Water Resources: Boise, ID, USA, 2002.

Yang, J.; Wu, Z.; Menenti, M.; Wong, M. S.; Xie, Y.; Zhu, R.; Abbas, S.; Xu, Y. Impacts of urban morphology on sensible heat flux and net radiation Exchange. **Urban Climate**, v. 50, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101588>