

**INVERSÃO TÉRMICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ÁREA DE TRANSIÇÃO
URBANO/NATURAL, EM SANTA MARIA/RS: UMA ABORDAGEM TOPOCLIMÁTICA**

THERMAL INVERSION AND EVAPOTRANSPIRATION IN URBAN/NATURAL TRANSITION AREA, IN SANTA MARIA/RS: A
TOPOCLIMATIC APPROACH.

Aline Nunes da Silva

Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-graduação em Geografia
Av. Roraima, 1000 – Prédio 17, Subsolo, Sala 1018
Camobi, 97105900 – Santa Maria, RS - Brasil
silva.aline@acad.ufsm.br

Cássio Arthur Wollmann

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências
Av. Roraima, 1000 – Prédio 17, Subsolo, Sala 1018
Camobi, 97105900 – Santa Maria, RS - Brasil
cassio_geo@yahoo.com.br

Amanda Comassetto Iense

Bacharel e Mestre em Geografia
Programa de Pós-graduação em Geografia, UFSM
comassettoamanda@gmail.com

RESUMO

Entender a dinâmica e as características climáticas dentro da escala topoclimática auxilia na compreensão dos processos climáticos locais, bem como nas relações e trocas entre os elementos climáticos existentes em diferentes tipos de ambiente. Considerando que os fatores climáticos e geográficos que se apresentam em ambientes naturais e urbanos não se manifestam da mesma forma, esta pesquisa tem como objetivo investigar a ocorrência da inversão térmica e da evapotranspiração, dentro da escala topoclimática, na zona norte da área urbana de Santa Maria/RS. A área de estudo está localizada em uma área com três tipos de transições diferentes: a altimétrica, demarcada pelo Rebordo do Planalto Meridional; a natural/urbana, que divide o bairro entre a malha urbana e uma Unidade de Conservação; e a transição entre biomas, que separa remanescentes de Mata Atlântica do bioma Pampa. A análise foi realizada a partir dos dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica, coletados a partir de dois pontos com diferentes altitudes dentro da área de estudo. O ponto PSO dentro da malha urbana, a 103 metros de altitude acima do nível do mar, e o ponto PNMM, referente a Unidade de Conservação Parque Natural Municipal dos Morros, a 376 metros acima do nível do Mar. Com a análise dos dados térmicos foram identificadas ocorrências de inversão térmica na área de estudo. Também foram calculados os valores de evapotranspiração potencial através do Balanço Hídrico Climático, utilizando o método de Thornthwaite e Mather (1957). Os resultados encontrados nesta pesquisa apontam para a interferência do meio urbano na variabilidade dos atributos climáticos dentro do topoclima local.

ABSTRACT

Understanding the dynamics and climatic characteristics within the topoclimatic scale helps to understand local climatic processes, as well as the relationship and exchanges between climatic elements existing in different types of environments. Considering that the climatic and geographic factors that appear in natural and urban environments do not manifest themselves in the same way, this research aims to investigate the occurrence of thermal inversion and evapotranspiration, within the topoclimatic scale, in the northern zone of urban area of Santa Maria/RS. The study area is located in an area with three different types of transitions: altimetry, demarcated by the Edge of The Meridional Plateau; natural/urban transition, which divides the neighborhood between the urban grid and a natural protected area; and the biomes transition, which separates Atlantic Forest remnants from the Pampa biome. The analysis was performed using air temperature and rainfall data collected at two points at different altitudes within the study area. The PSO point, within the urban grid, at 103 meters above sea level, and the point PNMM, referring to the natural protected area Parque Natural Municipal dos Morros, at 376 meters above sea level. With the analysis of thermal data, occurrences of thermal inversion were identified in the study area. Potential evapotranspiration values were also calculated through the elaboration of the Climate Water Balance, using the method of Thornthwaite and Mather (1957). The results found in this research point to the interference of the urban environment in the variability of climatic attributes in the local topoclimate.

1. Introdução

O conhecimento da dinâmica e das características climáticas locais é importante para a compreensão dos processos climáticos locais, bem como as relações e trocas entre os elementos climáticos existentes em diferentes tipos de ambiente. Inserido neste contexto, o clima local e o topoclíma possuem definições que se equivalem, estando ambos relacionados com as características de elementos inerentes a uma área, onde o clima local pode corresponder ao clima de um tipo de ocupação do solo diferenciado ou aos aspectos topoclimáticos locais (ANDRADE, 2005; SERAFINI JÚNIOR et al., 2012).

Por estar inserida dentro do conceito de lugar e em uma escala climática local, topoclíma não se refere somente a variabilidade espaço-temporal causada pela distribuição de elementos climáticos, mas trata-se também de um objeto de estudo sócio-natural. Neste sentido, o estudo da topoclimatologia deve considerar o meio urbano como o espaço onde ocorrem as maiores alterações provenientes de atividades humanas (ROMERO, et al. 2017).

Dentre essas alterações, o processo de urbanização é o que pode ser mais bem observado pois reorganiza o espaço através da artificialização do meio. Essas modificações alteram o balanço energético e hidrológico local que se refletem em mudanças atmosféricas observadas dentro da mesma escala. Sant'Anna Neto e Rampazzo (2014, p.13) destacam que toda massa edificada da cidade, que constituem seus fixos e atribuem vias de fluxos, tem uma lógica própria de organização e constante movimento que, em contato com a atmosfera imediata altera o processo de troca de energia.

Já o meio natural resiste dentro do ambiente urbano a partir da instituição de áreas protegidas, ferramenta utilizada na conservação dos serviços ecossistêmicos e do significado cultural de áreas naturais. As áreas protegidas servem como medidas preventivas ao terminar com a ação antrópica em áreas naturais, possibilitando a manutenção e recuperação de seus atributos que sofreram danos. Ainda, essas áreas tem como objetivo proteger ou conservar os recursos naturais e a biodiversidade, bem como os serviços provenientes do ecossistema, que são essenciais para a população local (GASTON, et al. 2008).

Inseridas dentro da área urbana, algumas áreas verdes podem ser identificadas enquanto espaços de proteção ambiental, como é o caso de Parques urbanos classificados como Unidades de Conservação conforme a Lei Federal Nº 9.985 de 18 de julho de 2000, que estabelece o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). Nestas áreas o uso dos recursos naturais é permitido, porém, mantendo as funções ambientais. Neste sentido, investigar a variabilidade

topoclimática e as trocas de energia que possam haver entre os ambientes naturais e urbanos é fundamental para o desenvolvimento de planos de ação que discutam o crescimento do meio urbano em comum acordo com a proteção e conservação da biodiversidade do meio natural.

A temperatura do ar, por exemplo, é uma variável que se modifica conforme se apresentam os fatores climáticos locais e a circulação atmosférica regional. Esta variação causa efeitos diretos em processos fisiológicos de espécies de animais e plantas, associando a produtividade agrícola com as variações de temperatura (VALERIANO; PICINI, 2000). A variabilidade da temperatura do ar recebe influência da altitude, latitude e longitude. Isso faz com que haja um valor calculado de gradiente térmico vertical médio que aponta uma diminuição de $-0,65^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar a cada 100 metros elevados na atmosfera (FRITZSONS, et al., 2015; BARRY; CHORLEY, 2013). Dessa forma, caracteriza-se o processo de inversão térmica como sendo a inversão do comportamento térmico padrão da atmosfera, onde a temperatura do ar se eleva a medida que toma distância do solo.

Em locais de acentuada topografia, noites claras e de ventos fracos favorecem o desenvolvimento de circulações atmosféricas locais, incluindo fluxos de ar ascendentes e descendentes, como a formação de piscinas de ar frio nas áreas mais baixas (Jimenez et al. 2015). O ar mais resfriado em contato com o solo desloca-se pelas encostas até os vales onde se acumula, ocasionando o nevoeiro de radiação. Em caso de intenso resfriamento noturno, este ar frio na base da camada atmosférica pode atingir a saturação, dando início ao processo de condensação, onde os nevoeiros tapam completamente as áreas de vales (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O processo de condensação do calor latente, resultado do processo de evaporação que ocorre durante a formação de nuvens e produção de chuva, representa cerca de 75% da perda de energia liberada para a atmosfera (BARRY; CHORLEY, 2013). Neste sentido, o processo de evapotranspiração ocorre quando há a passagem da água para o estado gasoso, resultante da perda de calor latente condicionado ao saldo de energia disponível na superfície. Considerando o fluxo vertical do vapor d'água para a atmosfera, os fatores controladores que se apresentam são o saldo de energia disponível, a velocidade do vento e o teor de umidade na camada adjacente à superfície (PEREIRA et al, 2009).

A evapotranspiração e a precipitação destacam-se como os dois processos mais importantes do ciclo hidrológico. A precipitação pluviométrica e a sua variabilidade espaço-temporal agem como uma forma de controle no balanço hídrico, influenciando diretamente na paisagem e no meio ambiente de uma região. Além disso, a vegetação tem um papel fundamental no balanço de

energia e no fluxo de volumes de água que é retida pelas plantas antes de atingir o solo, e também na infiltração ou escoamento superficial da chuva que atinge a superfície (TUCCI; CLARKE, 1997).

Ao considerar estudos topoclimáticos que investigam a ocorrência de inversão térmica destacam-se Galvani et al. (2005; 2008), Lima et al. (2010), Kattel et al. (2012), Silva et al. (2017) e Baratto et al. (2018). Fritzens et al. (2015) ao estudarem o gradiente térmico no Rio Grande do Sul, identificaram uma menor temperatura do ar nos vales durante o período de outono-inverno, devido a uma maior permanência das inversões térmicas neste período. Já Lima et al. (2010), ao estudarem a ocorrência de inversão térmica no Pico das Bandeiras, no Parque do Alto Caparaó, observaram que os fatores topográficos como a altitude, a forma e a orientação de vertentes e o relevo influenciam na variação vertical da temperatura do ar. Em condições de inversão térmica, estes fatores potencializam o acúmulo de ar frio nas áreas de menor altitude, invertendo o perfil térmico da camada mais baixa da atmosfera.

Buriol et al. (2014), ao estudarem a espacialização da evapotranspiração potencial mensal e anual na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí, no Rio Grande do Sul, identificaram que a altitude, a latitude e a continentalidade influenciam na variação espacial da evapotranspiração conforme a época do ano. Ainda, Werlang e Werlang (2021), ao analisarem o balanço hídrico no bairro Camobi, em Santa Maria, Rio Grande do Sul observaram a ocorrência de excesso de água no solo em praticamente todos os meses do ano, não sendo caracterizado déficit hídrico e maior um maior volume de evapotranspiração durante o período veranil, com registro de armazenamento de água no solo.

Neste sentido, a presente pesquisa visa investigar a inversão térmica e a evapotranspiração, dentro da escala topoclimática, na zona norte da área urbana de Santa Maria. Esta área está inserida em uma zona de transição entre duas unidades morfoesculturais, a Depressão Periférica e a Serra Geral, evidenciada pela presença do Rebordo do Planalto Meridional (SARTORI, 2009). Além disso, zona norte da área urbana de Santa Maria apresenta é importante no que diz respeito a preservação e conservação da biodiversidade local por estar localizada entre os dois principais biomas que ocorrem no território sul-rio-grandense, o bioma de Floresta Mata Atlântica (remanescentes) e o bioma Pampa, servindo como um corredor para as espécies que transitam entre estes biomas.

O recorte espacial utilizado nesta pesquisa é representativo do bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro que, localizado na zona norte da área urbana de Santa Maria, é o que melhor destaca essa transição altimétrica, que também separa os ambientes urbano e natural dentro na área urbana (Figura 1).

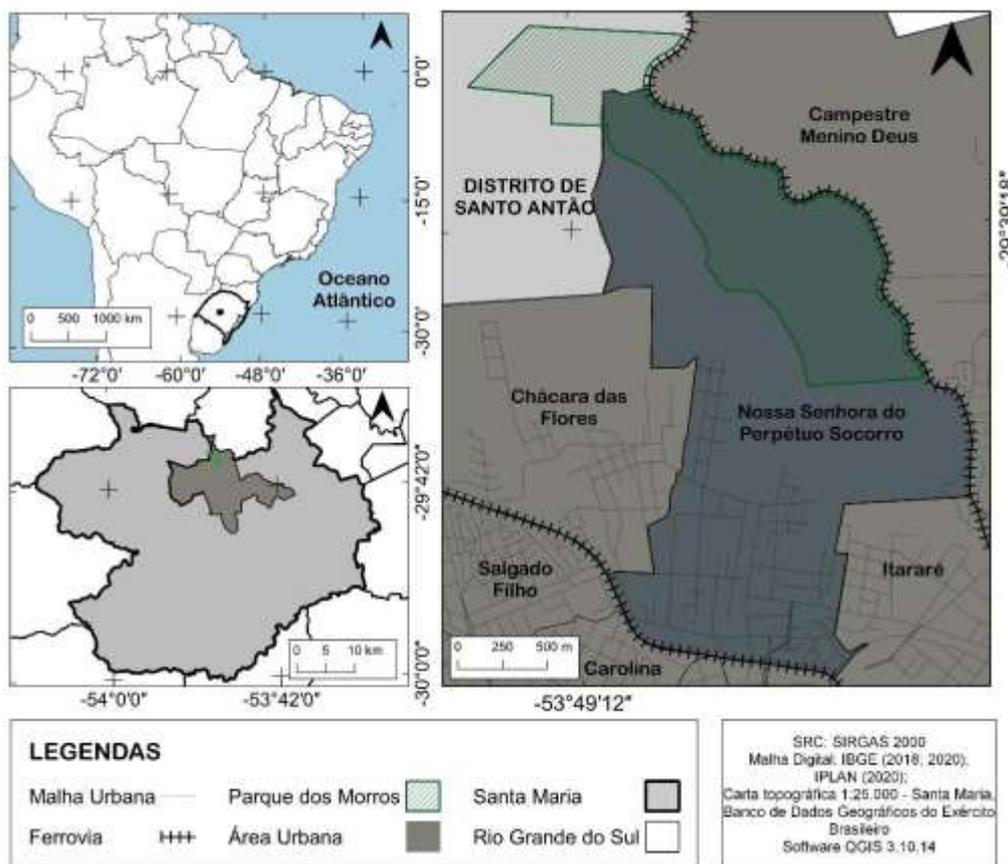


Figura 1. Localização da área de estudo dentro do município de Santa Maria/RS. Fonte próprio autor, 2022.

O bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro possui uma área total de 4.6943 km², destacando-se como o bairro com maior perímetro (11,709 km) e sendo segundo bairro com maior número de habitantes da zona norte de Santa Maria (6.151 habitantes) (IPLAN, 2020). A menor cota altimétrica encontrada no bairro é de 100 metros de altitude acima do nível do mar, localizada dentro da porção do bairro definida como ambiente urbano. Já a maior cota altimétrica do bairro está situada no acima do Rebordo do Planalto Meridional, a 381 metros de altitude acima do nível do mar, conferindo ao bairro uma diferença altimétrica de 281 metros.

A porção mais alta da área de estudo corresponde ao meio natural, onde se encontra o Parque Natural Municipal dos Morros (PNMM), a primeira Unidade de Conservação de Proteção Integral instituída no município de Santa Maria. Com área total de 152 ha, cerca de 75% desta encontra-se inserida dentro do bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, na zona norte da área urbana de Santa Maria. A porção norte do bairro, área equivalente ao PNMM, está inserida na zona núcleo da Reserva Biosfera Mata Atlântica (RBMA), enquanto o restante do bairro encaixa-se em

sua zona de amortecimento. Assim, a área total do bairro se apresenta como de fundamental importância para a conservação dos recursos naturais, estando inserida em áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade em nível estadual, nacional e internacional (SANTA MARIA, 2013).

2. Materiais e Métodos

Para a realização desta análise foram coletados os dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica em dois pontos em diferentes altitudes dentro do bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, zona norte da área urbana de Santa Maria/RS. O primeiro estando inserido dentro da malha urbana (PSO), em uma altitude de 103 metros de altitude acima do nível do mar, enquanto o segundo ponto localiza-se dentro dos limites do Parque Natural Municipal dos Morros (ponto PNMM) a 376 metros acima do nível do mar, conforme apresentado na Figura 02.

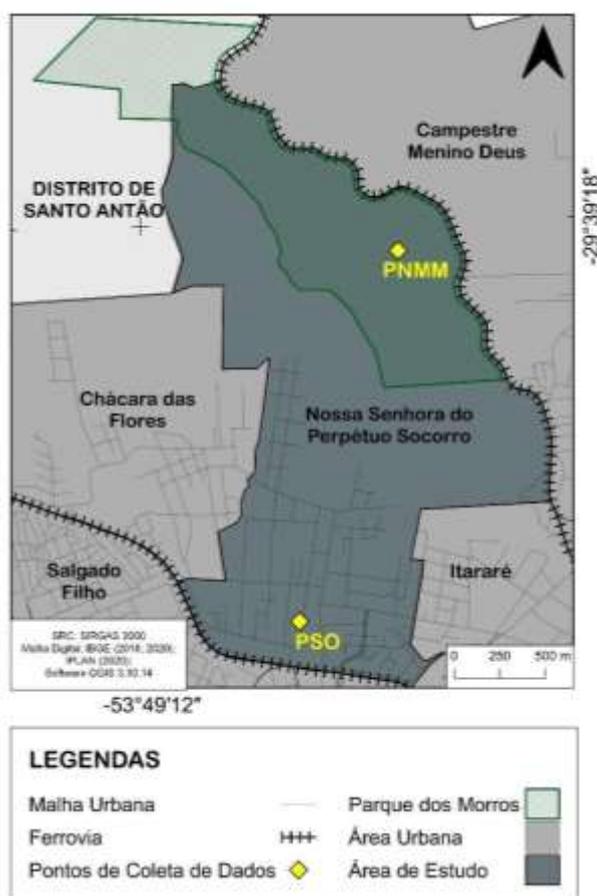


Figura 2. Localização dos pontos de coleta de dados dentro da área de estudo. Fonte próprio autor, 2022.

Para o registro dos dados de temperatura do ar foram utilizados dois aparelhos termohigrógrafos, modelo HT 500 da marca Instrutherm. Os aparelhos foram fixados a mini-abrigos meteorológicos, construídos com chapas de ferro galvanizado, com dimensões de 11,5 cm de altura e 18 cm de diâmetro, pintados com tinta de cor branca, conforme proposto por Armani e Galvani (2006). Os dados de precipitação pluviométrica foram coletados com o auxílio de dois pluviômetros de material plástico com capacidade total de 150 mm. Os valores pluviométricos foram registrados de forma manual pela própria gestão da UC ou por oficiais da Guarda Municipal durante suas rondas. A Figura 03 mostra os equipamentos utilizados para a coleta de dados.



Figura 3. Equipamentos utilizados para a coleta de dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica utilizados nesta pesquisa. Fonte trabalho de campo, 2019.

Os instrumentos registraram os dados horários de temperatura do ar. Já os dados pluviométricos foram coletados de forma diária ou no fim de cada evento pluviométrico. O período de coleta dos dados foi de setembro de 2018 a dezembro de 2019, tendo sido realizada a análise dos dados referentes ao período compreendido entre os meses de dezembro de 2018 a novembro de 2019.

Foram calculados os valores de temperatura média diária e mensal de PSO e PNMM, através da média aritmética. Para identificar as ocorrências de inversão térmica foram utilizados os

dados horários e os valores médios mensais. A inversão térmica foi analisada de forma horária, onde foram compreendidas como ocorrências de inversão térmica os registros de temperatura do ar onde o valor registrado de temperatura do ar no ponto PNMM foi pelo menos 1,0°C mais alta do que no ponto PSO no mesmo horário. Este valor foi definido levando em consideração o erro do aparelho, que é de 1,0°C segundo o fabricante. Frente ao grande número de dados, foi utilizado o Software Microsoft Excel 2016 para tabular o número de horas em que houve inversão térmica.

Também foram identificados os maiores valores de inversão térmica para cada mês de registro de dados na área de estudo. Dessa forma, 12 episódios de inversão térmica foram definidos para a análise sinótica realizada com o auxílio das cartas sinóticas de superfície disponibilizadas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Assim foram definidos as condições meteorológicas e os sistemas atmosféricos atuantes durante os episódios de inversão térmica mais significativos.

A análise da precipitação pluviométrica foi realizada a partir dos valores acumulados totais mensais dos pontos PSO e PNMM. Os valores de evapotranspiração foram encontrados através da elaboração Balanço Hídrico Climático (BHC), utilizando o método de Thornthwaite e Mather (1957). O cálculo foi realizado através do programa BHnorm, elaborado em planilha no Software Microsoft Excel por Rolim et al. (1998) utilizando os valores médios mensais de temperatura do ar (°C) e os valores totais mensais de precipitação pluviométrica (mm) coletados nos pontos PSO e PNMM.

A análise evapotranspirativa foi realizada com base nos gráficos do balanço hídrico mensal resultantes dos cálculos do programa BHnorm, os quais apontam a ocorrência de déficit, excedente, retirada e reposição hídrica pelo solo. Destaca-se que este valor de evapotranspiração é uma estimativa, onde no momento do cálculo não se leva em consideração a mudança de ambiente do urbano para o natural, mas sim a mudança no nível altimétrico do ponto de coleta de dados.

3. Resultados e Discussões

3.1. Inversão Térmica

Foram encontradas o total de 1.542 horas de inversão térmica que ocorreram na área de estudo entre os meses de dezembro de 2018 a novembro de 2019. A Figura 4 apresenta o número de horas de inversão térmica em cada mês analisado.

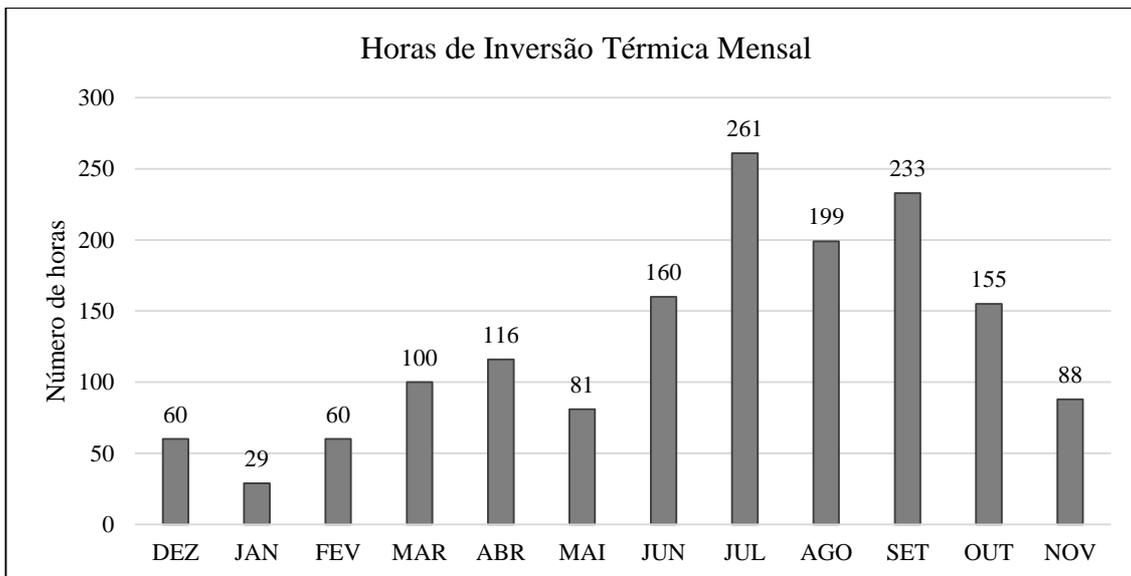


Figura 4. Gráfico dos valores totais mensais de horas de inversão térmica encontrados no bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro durante o período da pesquisa. Fonte próprio autor, 2022.

O valor médio de horas de ocorrência de inversão térmica na área de estudo calculado nesta pesquisa é de 128 horas mensais. Conforme apresentado no Gráfico 02, janeiro foi o mês apresentou o menor número de registro de horas com ocorrência de inversão térmica, com 29 registros, valor correspondente a 3,8% do total de horas mensais. Ainda, os meses de dezembro, fevereiro, março, abril, maio e novembro registraram horas de inversão térmica abaixo da média.

O mês de julho se destaca com o maior número de horas de inversão térmica registradas durante o período da pesquisa, com 261 horas com ocorrência de inversão térmica, correspondendo a 35% do total de horas do mês. Também o mês de setembro apresenta um número significativo de horas de inversão térmica, 233 horas (32% do total de horas mensais), sendo este valor menor somente do que o mês de julho. Os demais meses, junho, agosto e outubro registraram valores acima da média de horas de inversão térmica.

Ademais, é evidente a variação no número de horas de inversão térmica registrada conforme as estações sazonais. Nos meses representativos para o verão (dezembro, janeiro e fevereiro), o número de horas de inversão térmica registradas é inferior em relação ao período invernal (junho, julho e agosto), o qual se destaca por ser o período com maior registro de inversão térmica durante a pesquisa.

Durante os meses referentes ao período outonal (março, abril e maio) o número de horas de inversão térmica registradas apresenta variação mensal menor em relação aos demais períodos.

O período primaveril (setembro, outubro, novembro) apresenta uma diminuição no número de horas de inversão térmica entre o primeiro e o último mês da estação, conforme ocorre maior aquecimento atmosférico com a aproximação do solstício de verão. Também é possível observar a variação horária nas ocorrências de inversão térmica e caracterizá-las de acordo com as estações do ano. O Figura 5 apresenta esta variação.

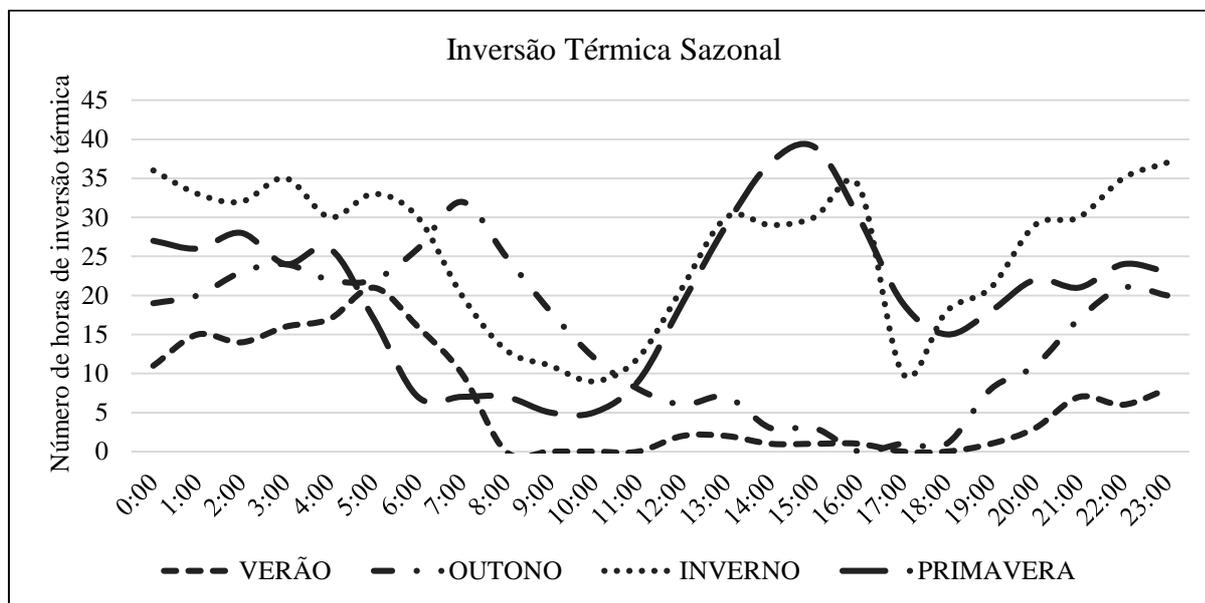


Figura 5. Gráfico da variação de sazonal do número de horas de inversão térmica na área de estudo. Fonte próprio autor, 2022.

Observa-se que a inversão térmica é um fenômeno comum na área de estudo, ocorrendo sobretudo, no período noturno, em todas as estações do ano. Durante o verão quase todos os registros de inversão térmica foram noturnos. Já o período outonal, que registra um maior número de horas de ocorrência de inversão térmica em relação ao verão, apresenta maior ocorrência durante o período noturno, com pico de horas de inversão térmica entre as 7 e 8 horas da manhã.

Durante o período invernal, observa-se registros de ocorrência de inversão térmica nas 24 horas do dia com maior número de ocorrências durante a tarde, entre as 15 e 16 horas. O menor número de ocorrência foi registrado entre as 8 e 11 horas da manhã. O mesmo ocorre durante o período primaveril, porém este durante este período a ocorrência de inversão térmica é predominantemente diurna, ao contrário das demais estações do ano.

Considerando as análises sinóticas realizadas com os episódios mensais de inversão térmica mais significativos para cada mês, observou-se um predomínio de centros de ação de alta pressão atmosféricas e suas respectivas massas de ar, durante as ocorrências de inversão térmica. No Quadro 1 encontram-se as datas de ocorrência de inversão térmica definidos para a análise sinótica bem como o valor máximo absoluto de inversão térmica registrado durante o episódio, os sistemas atmosféricos atuantes e a massa de ar dominante durante o período.

QUADRO 1. Dados dos episódios de inversão térmica e os sistemas atmosféricos observados.

DATA	INVERSÃO TÉRMICA	SISTEMA ATMOSFÉRICO	MASSA DE AR
04 dez. 2018	- 4,9°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
23 jan. 2019	-3,8°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
20 fev. 2019	-3,8°C	Anticiclone Tropical Atlântico	Tropical Atlântica
02 mar. 2019	-7,8°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
19 abr. 2019	-5,1°C	Anticiclone Tropical Atlântico	Tropical Atlântica
26 mai. 2019	-5,7°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
21 jun. 2019	-7,2°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
09 jul. 2019	-8,8°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
28 ago. 2019	-8,4°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
15 set. 2019	-7,3°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
11 out. 2019	-6,6°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha
02 nov. 2019	-3,7°C	Anticiclone Migratório Polar	Polar Velha

Fonte: Os autores, 2022.

Do total de episódios de inversão térmica definidos, 83,3% ocorreram sob a atuação do Anticiclone Migratório Polar, todos sob domínio da massa polar velha. Os demais, 16,6%, ocorreram durante a atuação do Anticiclone Tropical Atlântico, sob o domínio da Massa Tropical Atlântica. Neste sentido, observa-se que os maiores valores de inversão térmica na área de estudo são encontrados em situações de descaracterização da massa de ar polar (massa polar velha, aquecida ou tropicalizada) ou durante o predomínio da massa polar atlântica, ou seja, durante o processo de aquecimento da atmosfera.

Baratto et al. (2020) ao identificarem a ocorrência de inversão térmica na bacia hidrográfica do Rio do Boi, observaram que, à medida que aumenta a magnitude das inversões térmicas na área de estudo, diminui a frequência das ocorrências. Nesta pesquisa observa-se o oposto, onde os meses que apresentaram inversões térmicas de maior magnitude foram junho, julho e agosto, e os meses de maior ocorrência de horas de inversão térmica foram julho, agosto e setembro, caracterizando o meio/final do período invernal e início da primavera como o período de maior ocorrência de inversões térmicas com maior magnitude.

3.2. Balanço Hídrico Climatológico

Em relação ao balanço hídrico da área de estudo constatou-se uma diferença no volume de precipitação registrado entre os pontos de coleta de dados. O ponto PNMM registrou volume de chuva superior ao encontrado no ponto PSO, o que refletiu diretamente nos valores de evapotranspiração estimados para esta pesquisa. Os valores acumulados mensais de precipitação pluviométrica para a área de estudo estão apresentados na Figura 6.

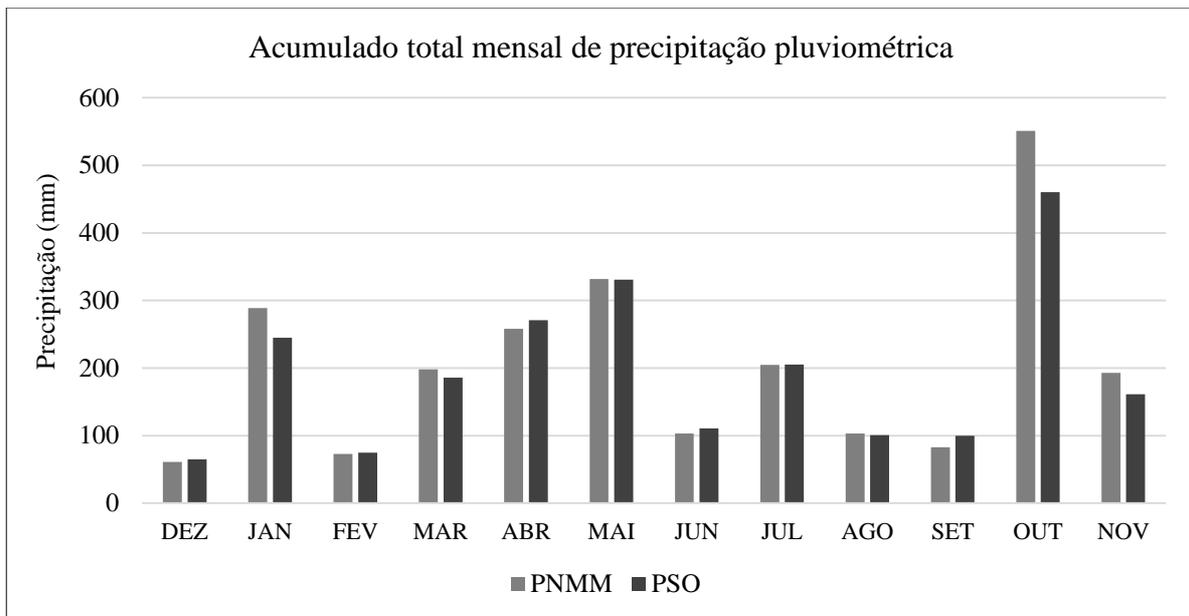


Figura 6. Gráfico do acumulado total mensal de precipitação pluviométrica nos pontos PSO e PNMM. Fonte próprio autor, 2022.

Conforme pode ser observado no Gráfico 03, em 6 dos 12 meses de coleta de dados pluviométricos, o ponto PNMM apresentou acumulado mensal de precipitação superior aos pontos PSO. O ponto PNMM teve seu mínimo de chuva registrado no mês de dezembro, bem como o ponto PSO, com 61 e 65 mm respectivamente. De forma destacada, e em conformidade com o que aponta Sartori (2016), outubro foi o mês que registrou maior acumulado mensal de precipitação. No acumulado anual, o ponto PNMM registrou volume de chuva superior ao ponto PSO, com 2447,5 mm e 2360,5 mm totais, respectivamente. Essa diferença no volume de precipitação entre os dois pontos pode ser explicada devido a influência do relevo na variabilidade espacial da chuva, ocasionando o efeito orográfico.

A precipitação pluviométrica, juntamente com a evapotranspiração, são os dois processos mais importantes dentro do ciclo hidrológico, assumindo papel fundamental no balanço hídrico. A Figura 7 apresenta os gráficos de Balanço Hídrico Normal Mensal e de Deficiência, Excedente, Retirada e Reposição Hídrica referentes ao ponto PSO, durante o período de análise.

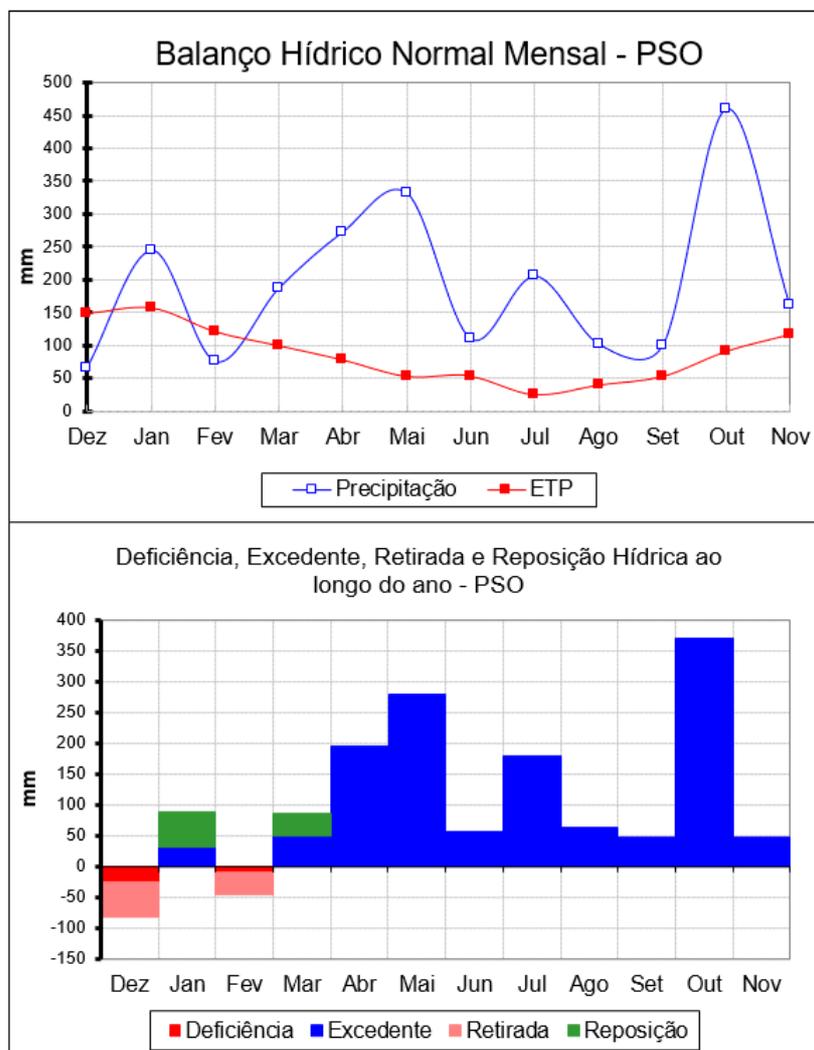


Figura 7. Gráfico do balanço hídrico climatológico normal do ponto PSO durante o período da pesquisa. Fonte próprio autor, 2022.

Com os gráficos apresentados na Figura 8 observa-se claramente que durante os meses de dezembro a fevereiro houve um período de carência hídrica para o ponto PSO. Conforme apresentado anteriormente no gráfico apresentado na Figura 7, o acumulado total de precipitação durante o mês de dezembro na área de estudo foi o menor de todo o período de análise. O mês de fevereiro também se mostrou um mês com déficit hídrico para o ponto PSO, mas não tão expressivo quanto o mês de dezembro. Dessa forma, ainda que a deficiência hídrica fosse suprida pela precipitação no próximo mês, inclusive com registro de saldo hídrico positivo nos meses de janeiro e março, o período de carência hídrica se mantém até o mês de março.

Durante os demais meses, é registrado saldo significativo de excedente hídrico, com os maiores valores observados nos meses de maio e outubro. O ponto PNMM por sua vez apresenta

uma menor carência hídrica em relação ao ponto PSO, ainda com ocorrência de déficit hídrico durante o mesmo período observado, conforme demonstrado na Figura 9.

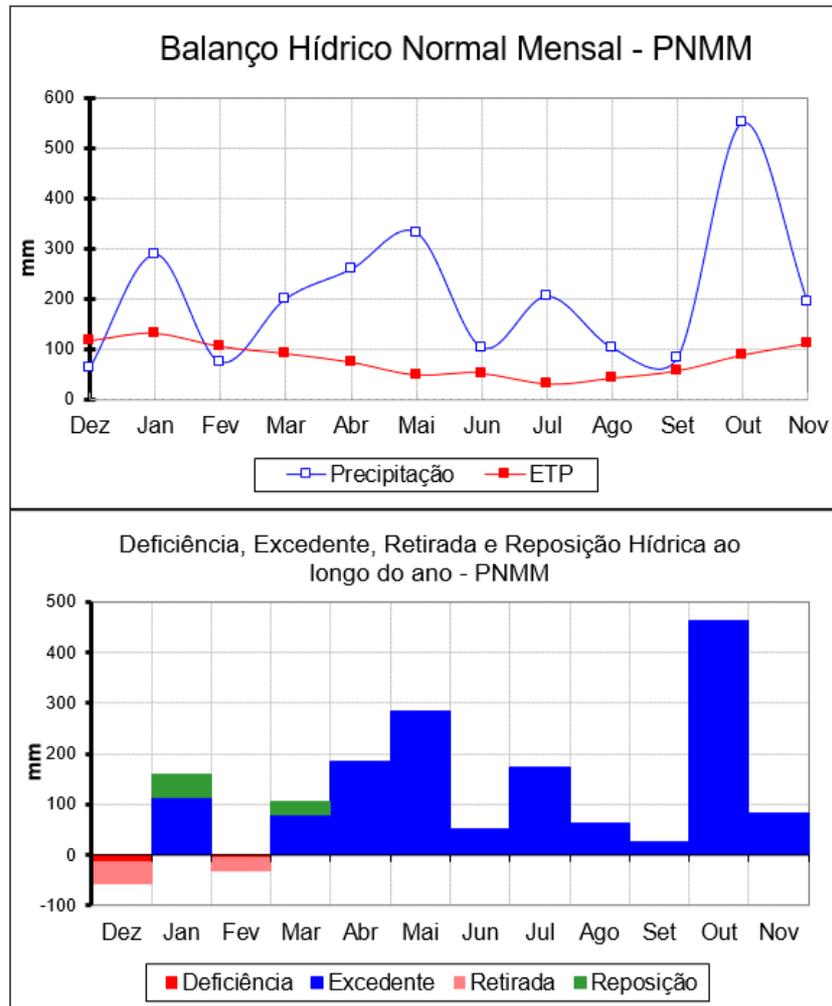


Figura 8. Gráfico do balanço hídrico climatológico do ponto PNMM durante o período da pesquisa. Fonte próprio autor, 2022.

O Balanço Hídrico Mensal do ponto PNMM mostra que a deficiência hídrica neste ponto de coleta foi muito menor em relação ao ponto PSO, ainda assim registrou-se um período de carência hídrica entre os meses de dezembro e março. De forma similar ao ocorrido no ponto PSO, para o restante do período de análise observa-se a condição de excedente hídrico para o Parque Natural Municipal dos Morros.

Além do pequeno volume de chuva registrado para o período de carência hídrica em ambos os pontos, o mês de dezembro caracteriza-se pela ocorrência do solstício de verão no hemisfério sul. Camargo e Camargo (2000) ressaltam que os maiores registros em volumes de evapotranspiração normalmente ocorrem durante o verão. É neste período em que ocorre maior entrada de radiação solar, e são registrados dias mais longos, conseqüentemente, ocorre o aumento da temperatura do ar e da evapotranspiração.

A diferença no valor de déficit hídrico entre os dois pontos também pode ser explicada a partir da localização de ambos os pontos, em áreas que apresentam diferentes tipos de uso de solo, conseqüentemente, porcentagens diferentes de área permeável. O ponto PSO por estar inserido na malha urbana de Santa Maria possui menor quantidade de superfície permeável, o que dificulta o armazenamento hídrico por parte do solo, e aumenta a evaporação da umidade da superfície impermeabilizada. Além de registrar temperaturas mais altas, o que reflete em uma maior evaporação da umidade do solo e maior transpiração por parte das plantas.

O ponto PNMM por sua vez está localizado em área natural, com solo totalmente permeável que caracteriza maior capacidade de armazenamento hídrico. Ainda, a vegetação abundante em PNMM funciona como proteção para o solo em relação radiação solar direta, mantendo a umidade retida por mais tempo. Ainda, apresenta registro de temperatura do ar menor em relação ao ponto PSO.

O processo de transferência da água do solo para atmosfera possui como fonte principal a radiação solar. A mesma, dentro do processo de balanço de energia, também é responsável pelo aquecimento do ar. Neste sentido, a diferença encontrada para os valores de evapotranspiração entre os pontos PNMM e PSO podem ser correlacionadas com as diferenças de temperatura do ar mensais calculadas para cada ponto. Observa-se também a correlação entre os valores de evapotranspiração potencial (mm) e o total mensal de horas de inversão térmica registradas para a área de estudo (Figura 9).

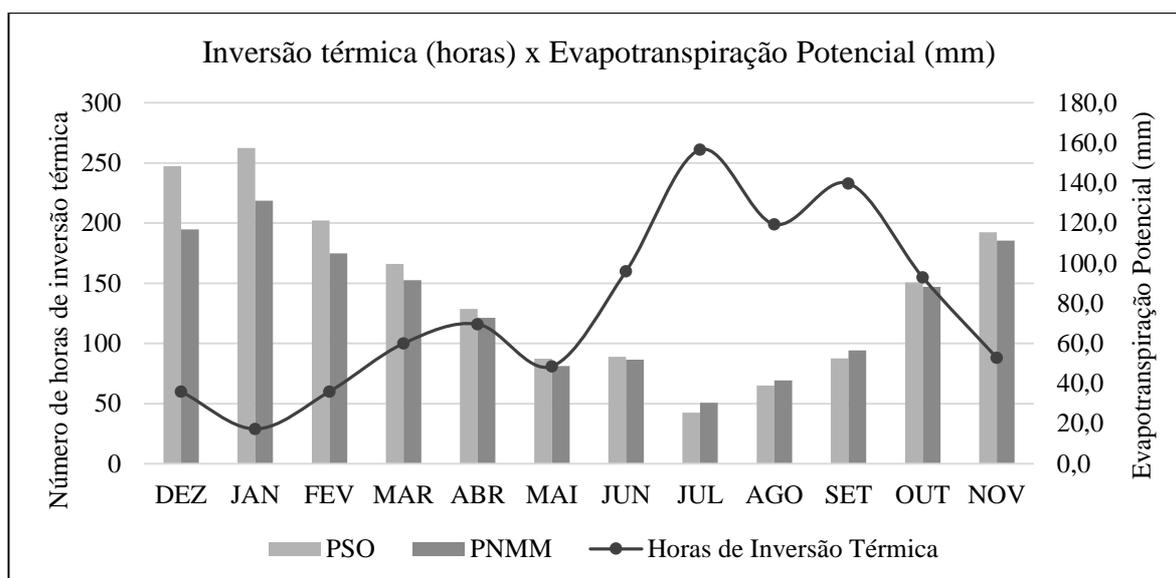


Figura 9. Gráfico de relação entre o número total mensal de horas de inversão térmica na área de estudo e os volumes de evapotranspiração potencial encontrados para os pontos PSO e PNMM . Fonte próprio autor, 2022.

Observa-se que os valores mensais de evapotranspiração potencial dos pontos PSO e PNMM são inversamente proporcionais ao número de horas mensais de inversão térmica. O coeficiente de correlação encontrado para a evapotranspiração potencial de PSO e o número de horas de inversão térmica é de -0,84, e para a evapotranspiração potencial de PNMM e o número de horas de inversão térmica é de -0,81. Estes valores corroboram a correlação inversa demonstrada no Gráfico 18.

Ainda, Wang et al. (2017) apontam que quanto maior for a taxa de evapotranspiração, menor é a relação entre altitude e temperatura pois a camada do ar em altitude sofre aquecimento pelo processo de liberação do calor latente, associada com a condensação do vapor d'água. No Gráfico 04 é possível observar que a evapotranspiração potencial é maior no ponto PSO durante os meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho e novembro. Nos meses de julho, agosto e setembro o ponto PNMM apresentou maiores valores de evapotranspiração potencial em relação ao ponto PSO. Também, os meses de julho, agosto e setembro foram os que registraram maior número de horas de inversão térmica na área de estudo.

Para compreender esta mudança deve-se que a altura do Sol e o seu ângulo de elevação acima da linha do horizonte para o hemisfério sul é menor durante o inverno (solstício de inverno), aumentando gradativamente com a chegada da primavera (equinócio de primavera). A figura 10

apresenta um esquema que demonstra a inversão térmica durante este período, a partir de um perfil topográfico da área de estudo.

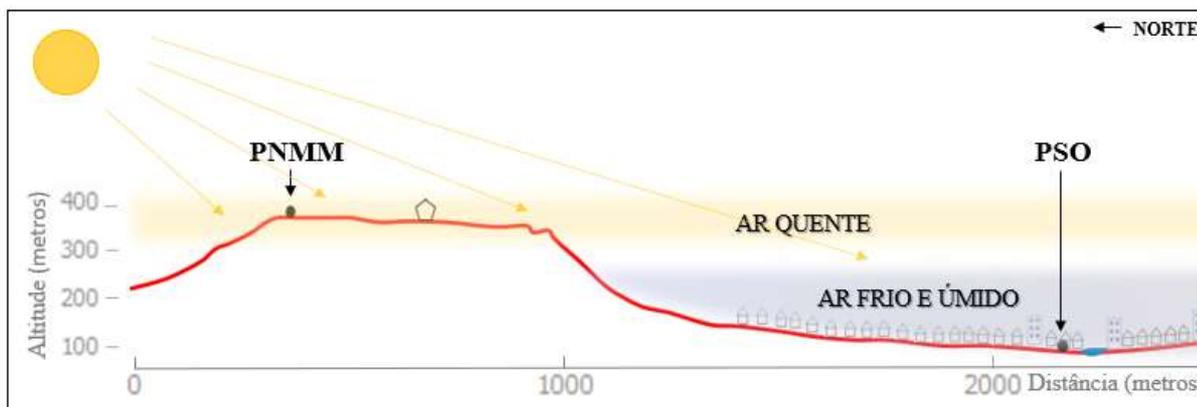


Figura 10. Esquema representativo da ocorrência de inversão térmica na área de estudo. Fonte próprio autor, 2022.

Durante os episódios de inversão térmica, o ar frio e úmido se estabelece na camada mais baixa da atmosfera, represado por uma camada superior com ar mais aquecido e menos úmido. Ainda, a ocorrência de episódios de inversão térmica está interligada a situações de estabilidade atmosférica, dessa forma o ar frio e úmido se mantém concentrado na camada inferior gerando saturação de vapor d'água naquela parcela de ar e nevoeiro. Assim, a ocorrência do processo de evapotranspiração cessa durante um determinado período de tempo, fazendo com que o solo imerso nesta parcela de ar retenha maior umidade. Na camada atmosférica superior está o ar mais aquecido e menos úmido e sem presença de nebulosidade, fazendo com que o processo de evapotranspiração ocorra com maior intensidade.

Neste processo de nevoeiro prolongado, que ocorre na área mais baixa da topografia (no caso da área de estudo, a malha urbana), não permite a chegada da radiação solar na superfície. Assim, a parcela de ar na camada mais baixa se aquece a partir da radiação difusa da atmosfera, não gerando elevações significativas na temperatura. Entende-se também que a malha urbana, com suas características de construções e impermeabilidade do solo alteram o balanço de radiação onde, ao mesmo tempo que geram um maior aquecimento durante o período de insolação, resfria-se com a mesma intensidade durante o período de balanço negativo.

A evapotranspiração potencial, enquanto um elemento meteorológico estimado através de outros atributos meteorológicos (neste caso, a temperatura média do ar e o acumulado total mensal de precipitação) sofre com a influência dos mesmos fatores que estes. Neste sentido, observa-se

nesta pesquisa a influência da vegetação, latitude, bem como da topografia local para a variabilidade da evapotranspiração na área de estudo, bem como anteriormente apontado por Buriol et al. (2014).

4. Considerações Finais

A partir do monitoramento dos episódios de inversão térmica é possível afirmar que a ocorrência deste fenômeno é comum na área de estudo, tendo sido registrado durante todos os meses do ano, observado na forma de nevoeiro ou não. Quanto à frequência, as inversões térmicas ocorreram em maior número durante o período noturno. Os meses em que houveram maior número de ocorrência de horas de inversão térmica na área de estudo foram julho, agosto e setembro, período referente ao meio-fim do período invernal e início da primavera.

Na análise sinótica dos episódios de inversão térmica observou-se a predominância de Anticiclones, seja o Migratório Polar ou o Tropical Atlântico, em 100 % das ocorrências analisadas. Ainda, as inversões térmicas de maior magnitude registradas na área de estudo durante o período da pesquisa foram observadas em situações de aquecimento atmosférico, sob domínio da massa polar velha ou massa polar atlântica.

O volume de precipitação pluviométrica registrado na área de estudo durante o período da pesquisa foi bastante expressivo, com o valor acumulado anual mais elevado no Parque Natural Municipal dos Morros do que na área urbanizada, apontando para a ocorrência de efeito orográfico. Já para os valores de evapotranspiração da área de estudo observou-se um balanço hídrico similar entre os dois pontos de coleta, com registro de período de carência hídrica na área de estudo durante os meses mais quentes. O meio urbano registrou uma maior taxa de evapotranspiração durante a maior parte do período de análise, com exceção dos meses de julho, agosto e setembro. Neste mesmo período foi registrado o maior número de horas de ocorrência de inversão térmica na área de estudo.

Nesse sentido, ao investigar a variabilidade térmica e o balanço hídrico entre ambientes urbanos e naturais dentro da escala topoclimática, este trabalho aponta que não somente a topografia local controla a variabilidade topoclimática dos atributos climáticos na área de estudo. Características inerentes ao meio urbano, como a tipologia do uso do solo e os materiais utilizados nas construções, amplificam as diferenças nos processos de aquecimento e resfriamento da camada de ar próxima a superfície, refletindo dentro da escala topoclimática.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradecemos ao auxílio prestado pela equipe gestora do Parque Natural Municipal dos Morros, bem como à Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Santa Maria e a Guarda Municipal, pelo acompanhamento em todos os trabalhos de campo e zelo pelos equipamentos instalados no PNMM.

Referências

ANDRADE, H. O Clima Urbano - Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra**, [S. l.], v. 40, n. 80, 2005. DOI: 10.18055/Finis1479. Disponível em: <<https://revistas.rcaap.pt/finisterra/article/view/1479>>. Acesso em: 7 dez. 2021.

BARATTO, J.; WOLLMANN, C. A.; GALVANI, E.; HOPPE, I. L. Variabilidade da temperatura do ar no Parque Nacional dos Aparados da Serra em Diferentes Escalas Climáticas. Anais. In: **Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**. Juiz de Fora, 2018.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman; 2013.

BURIOL, G. A., ESTEFANEL, V., SWAROWSKY, A., TODESCHINI, R. Espacialização da evapotranspiração potencial mensal e anual na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí – RS, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.l.], v. 14, out. 2014. ISSN 2237-8642. Disponível em <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/36708/23315>>. Acesso em 29 de out. 2021.

BRASIL. Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, 2000. Disponível em: <[L6938 \(planalto.gov.br\)](http://planalto.gov.br)>. Acesso em 29 de out 2021.

FRITZSONS, E.; WREGE, M. S.; MANTOVANI, L. E. Altitude e temperatura: estudo do gradiente térmico no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, 2015.

GALVANI, E.; LIMA, N. G. B. ; SERAFINI JUNIOR, S. ; ALVES, R R. . Avaliação da temperatura do ar no perfil topoclimático do Parque Estadual de Intervales - SP, entre as altitudes de 150 a 950 metros. In: **Anais V Seminário Latino-Americano de Geografia Física e I Seminário Ibero Americano de Geografia Física**, 2008, Santa Maria, RS. Santa Maria, RS: Departamento de Geografia, UFSM, 2008. v. 1. p. 4243-4252.

GASTON, K. J.; JACKSON, S. E.; CANTU-SALAZAR, L.; CRUZ-PINON, G. The ecological performance of protected areas. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 39, 2008. p. 93-113.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DE SANTA MARIA – IPLAN. **Mapas e Dados Estatísticos de Santa Maria**. 2020. Disponíveis em <<http://iplan.santamaria.rs.gov.br/estatistica/estatistica.php>>. Acesso em 29 de out. 2021.

KATTEL, D. B.; YAO, T.; YANG, K.; TIAN, L.; YANG, G.; JOSWIAK, D. Temperature lapse rate in complex mountain terrain on the southern slope of the central Himalayas. **Theoretical And Applied Climatology**, [s.l.], v. 113, n. 3-4, p.671-682, 12 dez. 2012. DOI 10.1007/s00704-012-0816-6.

LIMA, N. G. B.; GALVANI, E. FALCÃO, R. M. Análise da temperatura do ar no perfil topoclimático do Pico da Bandeira, Parque Nacional Alto Caparaó, Brasil, entre as altitudes de 1106 m a 2892 m. IN: **Anais VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física**. Anais... Coimbra: Universidade de Coimbra, 2010.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Porto Alegre: Guaíba Agropecuária, 2002, 478p.

ROMERO, H. A.; ESPINOZA, G.; OPAZO, D.; SEPÚLVEDA, D. Topoclimatología cultural y cambios de clima

em la zona andina del Norte de Chile. In: SANCHEZ, R.; HIDALGO, R. ARENAS, F. **Re-conociendo las geografias de América Latina y el Caribe**. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2017. p. 93-131.

SANTA MARIA. Decreto Executivo nº 074, de 06 de setembro de 2016. Cria o Parque Natural Municipal dos Morros – PNMM, dispõe sobre seus limites, zona de amortecimento e dá outras providências. **Prefeitura Municipal de Santa Maria**, Santa Maria, RS. Disponível em: <<https://www.santamaria.rs.gov.br/ambiental/729-parque-natural-municipal-dos-morros>>. Acesso em 29 out. 2021.

_____. Secretaria Municipal do Meio Ambiente. Santa Maria, **Plano de Manejo do Parque dos Morros**. Volumes I, II, III, IV, V e VI. 2013.

SANT'ANNA NETO, J. L.; RAPAZZO, C. R. Geoindicadores urbanos para o estudo dos processos termodinâmicos do clima das cidades de pequeno e médio porte. In: SANT'ANNA NETO, J. L.; AMORIM, M. C. de C. T.; SILVA, C. A. **Clima e gestão de território**. Jundiaí/SP, Paco Editorial: 2016. p. 07-29.

SARTORI, P. L. P. Geologia e geomorfologia de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**. v. 38, jan-jul 2009. p. 19-42.

SERAFINI, S. J.; GALVANI, E; LIMA, N.G.B de; ALVES, R.R. Adequação da escala climatológica para planos de manejos: o Parque Estadual Intervalas como estudo de caso. In: GALVANI, E; LIMA, N. G. B. de (ORG.). **Climatologia Aplicada: Resgate aos estudos de casos**. 1. Ed., vol.1. Curitiba: Editora CRV, 2012.

SILVA, A. N.; WOLLMANN, C. A.; HOPPE, I. L. Perfil topoclimático do Cerro do Botucaraí, em Candelária/RS, de abril e maio de 2016. **Ciência e Natura**, v. 39, Ed. Esp. PROCAD/CAPES, 2017, p. 09-26.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, p.135-152, 1997

VALERIANO, M. M.; PICINI, A. G. Uso de Sistema de Informações Geográfica para a geração de mapas de médias mensais de temperatura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 255-262, 2000.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, 2006. Disponível em: <http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>. Acesso em: 23 mar 2020.

WERLANG, M. K.; WERLANG, E. P. Balanço hídrico e classificação climática de Thornthwaite do bairro Camobi, Santa Maria, RS. **Geografia Ensino e Pesquisa**, 25, e07. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/40437> >. Acesso em 15 de fev. 2022.