Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

PROPOSTA METODOLÓGICA DE MAPEAMENTO DE UNIDADES TOPOCLIMÁTICAS

MACHADO, Lilian Aline - lilian.aline.machado@hotmail.com
Universidade Federal de Minas Gerais /UFMG

ASSIS, Wellington Lopes - assisw@gmail.com
Universidade Federal de Minas Gerais /UFMG

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi apresentar uma metodologia para a elaboração de mapas topoclimáticos. Essa ferramenta cartográfica consiste na síntese das relações observadas entre as características geoecológicas e o comportamento atmosférico local. Para a identificação das unidades climáticas foram diagnosticadas as respostas térmica, hígrica e anemométrica em dois trabalhos de campo. Essas informações foram comparadas com as características geoecológicas e de ocupação urbana da área de estudo, localizada na porção norte do município de Nova Lima (MG). A delimitação das unidades foi feita com o auxílio da técnica de análise multicritérios, cruzando os dados dos principais atributos superficiais e atmosféricos do polígono amostral. O modelo matemático resultante foi vetorizado e adaptado às especificidades diurnas e noturnas observadas no diagnóstico do clima local. Foram identificados sete topoclimas distintos e uma unidade de transição. A principal distinção entre essas unidades está na dinâmica de variação dos parâmetros meteorológicos registrada ao longo do dia. Os resultados apontaram que a análise multicritérios é uma ferramenta útil para delimitação das unidades topoclimáticas, permitindo identificar padrões que caracterizam as respostas climáticas locais de uma maneira integradora.

Palavras- chaves: mapeamento climático, análise multicritérios, topoclima, Nova Lima (MG)

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR MAPPING TOPOCLIMATIC UNITS

ABSTRACT: The objective of this work was to present a methodology for the elaboration of topoclimatic maps. This cartographic tool consists of the synthesis of the observed relations between the geoecological characteristics and the local atmospheric behavior. The climatic units were delimited using data of temperature, humidity and wind registered in two field experiments. This information was compared with the geoecological and urban occupation characteristics of the study area, located in the northern area of Nova Lima (MG). The delimitation of the climatic units was done with the aid of the multi-criteria analysis technique, crossing the data of the main surface and atmospheric attributes of the sample polygon. The resulting mathematical model was vectored and adapted to the diurnal and nocturnal specificities observed in the local climatic diagnosis. Seven topoclimates and a transition unit were identified. The main distinction between these units are in the dynamics of variation of the meteorological parameters recorded throughout the day. The results pointed out that the multi-criteria analysis is a useful tool for the delimitation of the topoclimatic units, allowing to identify patterns that characterize local climatic responses in an integrating way.

Keywords: climate mapping, multi-criteria analysis, topoclima, Nova Lima (MG).

INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado das grandes cidades brasileiras implica em situações de baixa qualidade ambiental no meio urbano que resultam, por vezes, em condições insalubres. O conforto climático é um dos aspectos urbanos que merecem atenção quanto ao planejamento e organização do espaço por afetar diretamente a saúde e o bem-estar humano.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Segundo Monteiro (2003, p. 25), no espaço urbano, o homem " [...] na medida em que conhece e é capaz de detectar suas disfunções, pode, através do seu poder de decisão, intervir e adaptar o funcionamento do mesmo [...]". Nesse contexto, o mapeamento do clima urbano é instrumento essencial ao planejamento das ações de intervenção na superfície urbana a fim de se conduzir as características de conforto climático.

No entanto, não basta sobrepor os modelos de caracterização geoecológica e urbana, mas sim considerar, na análise geográfica, a interação desses fatores. Dessa forma, é possível compreender os processos envolvidos na interação superfície-atmosfera os quais devem fundamentar a visão prognóstica do planejador urbano a fim de se estabelecer bases para a ocupação urbana do espaço de forma congruente entre a conservação da qualidade ambiental e do bem-estar humano.

Monteiro (1990) estabelece as premissas do mapeamento do clima urbano considerando este como um sistema e destacando a necessidade de se observar as características do sítio urbano como base para os estudos. O autor utilizou-se da técnica de croquis e organogramas para a análise das complexas relações entre a superfície e a atmosfera e entre as diferentes escalas climáticas que se organizam e interagem sobre a cidade (MONTEIRO, 1976 e 1990).

Na Alemanha desde os anos 70 desenvolveram-se pesquisas voltadas ao mapeamento do clima como forma de auxílio ao planejamento urbano (REN et al.,2010). Climatologistas da cidade de Stuttgart, encabeçados pelo Dr. Baumüller, foram os primeiros a conduzir estudos da metodologia de Mapa do Clima Urbano (UCMap) para a mitigação dos problemas de poluição do ar, e aplicar o conhecimento climático ao planejamento ambiental e do uso da terra. O UCMap é uma ferramenta de informação e avaliação do clima com a finalidade de integrar fatos do clima urbano ao planejamento da cidade. Ele consiste em um sistema com uma série de camadas de entrada básicas e dois componentes principais: o mapa de análise do clima urbano (Urban Climatic Analysis Map - UC-AnMap) e o mapa de recomendações climáticas para o planejamento urbano (Urban Climatic Planning Recommendation Map- UC-ReMap).

O UC-AnMap representa as realidades climáticas locais em um panorama bidimensional, alimentado por camadas de entrada as quais compreendem mapas topográficos, plantas da cidade, planos de áreas de aproveitamento e fotografias aéreas (BAUMÜLLER et al., 1997; BAUMÜLLER et al., 2012). Os dados são obtidos por meio de estações meteorológicas, imagens aéreas de infravermelho e pela simulação de modelos de macro e mesoescala, especialmente na análise do fluxo de ventos e do balanço de energia (BAUMÜLLER et al., 1997). A organização e análise dos dados de entrada resulta na definição de topoclimas como unidades básicas do UC-AnMap, as quais compreendem a distribuição das unidades climáticas produzidas por distintos tipos de uso e cobertura da superfície urbana (BAUMÜLLER et al., 1997).

Para a cidade de Stuttgart, foram desenvolvidas onze categorias de topoclimas (BAUMÜLLER et al., 1997), incluindo topoclimas de corpos d'água, campo aberto, floresta, áreas verdes, cidade jardim, periferia, cidade, núcleo de cidade, empresas, indústria e estações. O limite entre as unidades não se

faz rígido, mas consiste em uma faixa onde há a possibilidade de observar-se a manifestação de ambos os tipos climáticos vizinhos (BAUMÜLLER et al., 1997).

O mapa de recomendações climáticas para o planejamento urbano (UC-ReMap) constitui-se em uma avaliação das características apresentadas no UC-AnMap em relação aos interesses relevantes ao planejamento (BAUMÜLLER et al., 1997). Os topoclimas similares são agrupados em zonas que apresentam a sensibilidade de certas áreas perante as mudanças de uso da terra. As zonas são representadas por diferentes cores e símbolos que apresentam pistas para a ação do planejador. O UC-ReMap apresenta a avaliação das características do clima urbano e identifica problemas e áreas climáticas sensíveis que necessitam de atenção estratégica quanto ao desenvolvimento futuro (REN et al., 2010).

Os estudos coordenados pelo Dr. Baumüller na cidade de Stuttgart, originaram a Cartilha Urbanística do Clima, documento voltado ao uso das autoridades como auxílio ao planejamento urbano local e adotado como documento necessário aos governos das cidades alemãs. Em meados dos anos 80, países europeus como a Suíça, Áustria, Suécia, Hungria, Checoslováquia, Polônia, Portugal e Reino Unido, desenvolveram estudos de mapas de clima urbano calcados na metodologia de Baumüller, também postos em prática, recentemente, em países sul-americanos e asiáticos (REN et al., 2010).

No Brasil, Souza (2010) adaptou a metodologia do UCMap para a elaboração de um mapa de análise do clima urbano para a cidade de João Pessoa, na Paraíba. O autor constatou incompatibilidades entre as premissas legislativas de uso e ocupação da terra da cidade e as características climáticas observadas no mapa, sugerindo a revisão do Plano Diretor Municipal.

Na cidade de São Paulo, Tarifa e Armani (2000) desenvolveram um estudo de mapeamento de unidades climáticas a fim de atualizar informações e integrar o projeto do Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Os autores delimitaram e analisaram as unidades climáticas urbanas em três níveis escalares: o primeiro integrou os conjuntos de climas locais e toda a mancha urbana contínua da metrópole paulistana; o segundo nível esteve associado às unidades topoclimáticas, onde as diferenças estariam associadas aos padrões de uso da terra, bem como às diferenças constatadas na concentração dos poluentes atmosféricos decorrentes dos meso e topoclimas naturais e urbanos; o terceiro nível, associado ao habitar, viver e trabalhar, teve foco sobre os ambientes microclimáticos.

A delimitação das unidades climáticas nos três níveis baseou-se na análise de mapas, dados de estações meteorológicas e sensoriamento remoto. O limite gráfico das unidades foi feito com base nas análises empreendidas pelos pesquisadores e o conhecimento técnico-científico desses sobre as relações superfície-atmosfera e suas especificidades no sítio urbano de São Paulo.

A análise dos dados e mapas levantados resultou em dois mapas: Unidades Climáticas Naturais e Unidades Climáticas Urbanas do Município de São Paulo. Tarifa e Armani (2000) definem os espaços climáticos naturais como um artifício analítico para entender melhor as interações superfície-atmosfera entre as várias escalas climáticas e o acompanhamento da evolução têmporo-espacial dos parâmetros meteorológicos. Os principais controles

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

climáticos naturais para definição dos climas locais e mesoclimas foram o Oceano Atlântico, a altitude e o relevo, com as suas diferentes formas e orientações.

Ao final, foram definidos cinco climas locais relacionados às características naturais da área, os quais foram subdivididos em meso ou topoclimas em função das diferentes características topográficas de cada clima local. Após a análise dos mapas e dados relativos à malha urbana e do comportamento dos elementos meteorológicos, foram definidas quatro macro-unidades climáticas urbanas. Estas unidades foram consideradas como "homogêneas" para cada dimensão das relações entre os controles climáticos urbanos (uso da terra, fluxo de veículos, densidade populacional, densidade das edificações, orientação e altura das edificações, áreas verdes, represas, parques e emissão de poluentes) e os elementos meteorológicos (temperatura da superfície, do ar, umidade, insolação, radiação solar, qualidade do ar, pluviosidade, ventilação). Portanto, existe uma série de níveis e dimensões destas unidades hierarquizadas numa "rede" de relações que se definem no espaço (comprimento, altura, largura) e no tempo (sazonal, mensal, diário e horário).

Assis (2010) realizou o mapeamento do clima urbano da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, confeccionando o Mapa de Unidades Climáticas Naturais e Urbanas do município. Os limites das unidades climáticas naturais foram definidos conjugando-se informações de controle climático local e homogeneidade estatística dos parâmetros meteorológicos sobre a topografia. Assim, procurou-se identificar a influência da morfologia do terreno e da cobertura vegetal na caracterização dos topoclimas e mesoclimas da área. Foram definidos dois climas locais relacionados com as características topográficas do terreno, a saber: o Clima Tropical de Altitude das Serras do Quadrilátero Ferrífero e o Clima Tropical de Altitude da Depressão de Belo Horizonte. Foram definidas, ainda, três unidades de mesoclimas e oito classes de topoclimas.

As unidades climáticas urbanas foram mapeadas por meio da sobreposição de diversas camadas de informações obtidas pelo autor em coletas de dados em campo organizados em cartogramas, mapa de uso da terra predominante, mapa de densidade demográfica, modelo digital de elevação e o mapa de unidades naturais. A elaboração das unidades topo e mesoclimáticas fundamentou-se na análise integrada dos fatores geoecológicos que compõem o tecido urbano e as respostas termais e hígricas dos trabalhos de campo. Não foram empregados algoritmos ou pesos estatísticos na espacialização das unidades, sendo o processo de delimitação feito de forma manual, observando-se o comportamento das isolinhas (isotermas, isohígras e isotacas) sobre os mapas de uso da terra, densidade demográfica e modelo digital de terreno.

Este trabalho tem o objetivo apresentar uma metodologia de mapeamento de climas urbanos, a qual envolve o uso de técnicas de geoprocessamento e da análise sistêmica do clima como fenômeno geográfico. A metodologia apresentada, bem como seu resultado materializado em um mapa síntese com as unidades topoclimáticas, é parte do mestrado desenvolvido por Machado (2016) cujo objetivo principal foi analisar as relações entre os componentes urbanos e geoecológicos em interação com a

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

atmosfera nos bairros localizados no limite político-administrativo entre os municípios de Nova Lima e Belo Horizonte (MG) (Figura 1). Esta região passa por um processo de rápida ocupação e adensamento urbanos permitidos após sucessivas mudanças na legislação municipal de uso e ocupação da terra.

O bairro Vila da Serra é ocupado por torres que beiram a trinta pavimentos. Atualmente os bairros Vale do Sereno, Piemonte, Jardim da Torre, Jardim das Mangabeiras e Jardinaves, são alvos do mesmo processo de expansão urbana e impermeabilização da terra. Contra todos os aspectos negativos de uma verticalização tão próxima a Serra do Curral, o poder público municipal não se opõe a este padrão de ocupação, favorecendo a consolidação do processo de expansão da metrópole belo-horizontina (MENEGALE, 2002). A prefeitura de Nova Lima (MG) estimula o crescimento da região estabelecendo incentivos fiscais por meio de alíquotas inferiores às cobradas no município de Belo Horizonte, ou a isenção fiscal por um período determinado, vantagens locacionais que somam-se à própria localização dos bairros, próximos à zona sul da capital mineira (CRAVEIRO, 2005; MENEGALE, 2002).

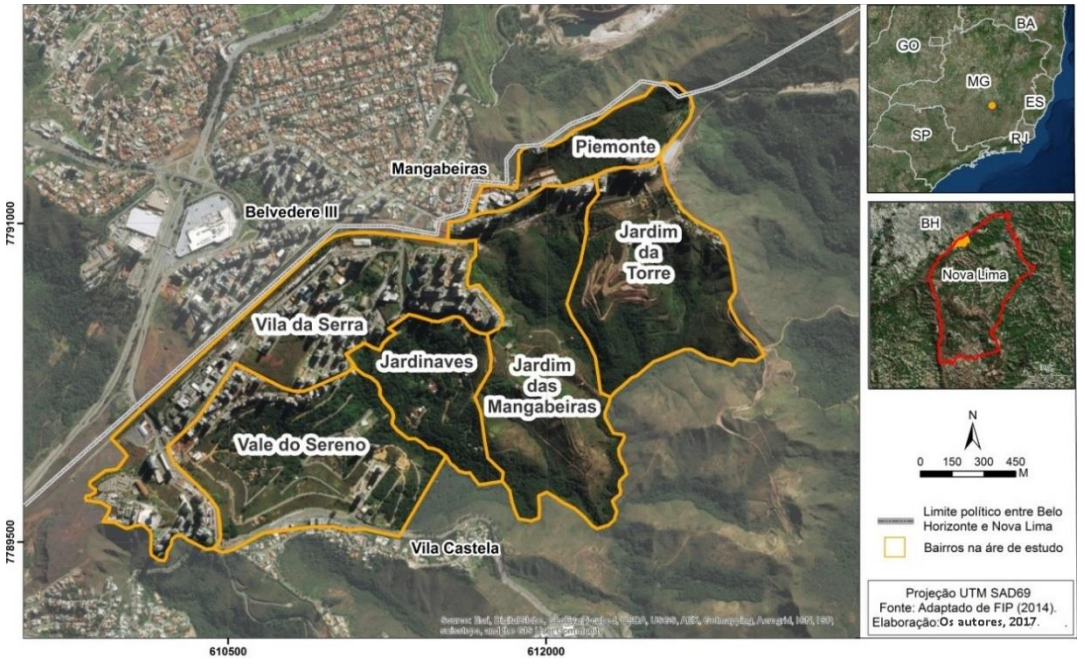


Figura 1 – Localização da área de estudo. Elaboração: os autores.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do mapa de unidades topoclimáticas foram estabelecidas as etapas apresentadas na figura 2. Primeiramente foi elaborada uma base cartográfica com o objetivo de levantar as características superficiais da área de estudo. Foram elaborados mapas de hipsometria, orientação das vertentes, uso e ocupação da terra e insolação. A hipsometria foi gerada a partir da extração automática de curvas de nível de imagens ASTER-GDEM no software ArcGIS 10.1. No mesmo software foi gerado o Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir das curvas de nível da área. O mapa de orientação das vertentes e insolação (radiação incidida na superfície) foram derivados do MDE por meio, respectivamente, das ferramentas "Aspect" e "Area Solar

Radiation[1]". Foi utilizado o levantamento de uso e ocupação da terra de FIP (2014), atualizando-se as delimitações das classes com imagens de satélite do software Google Earth.

Foram confeccionados, ainda, materiais gráficos de apoio à análise dos dados climáticos coletados em campo. Estes materiais consistiam em gráficos de iluminação dos pontos amostrais confeccionados no software Google ScketchUp[2] e gráficos de direção e frequência dos ventos obtidos nos trabalhos de campo por meio do software WRPlot.

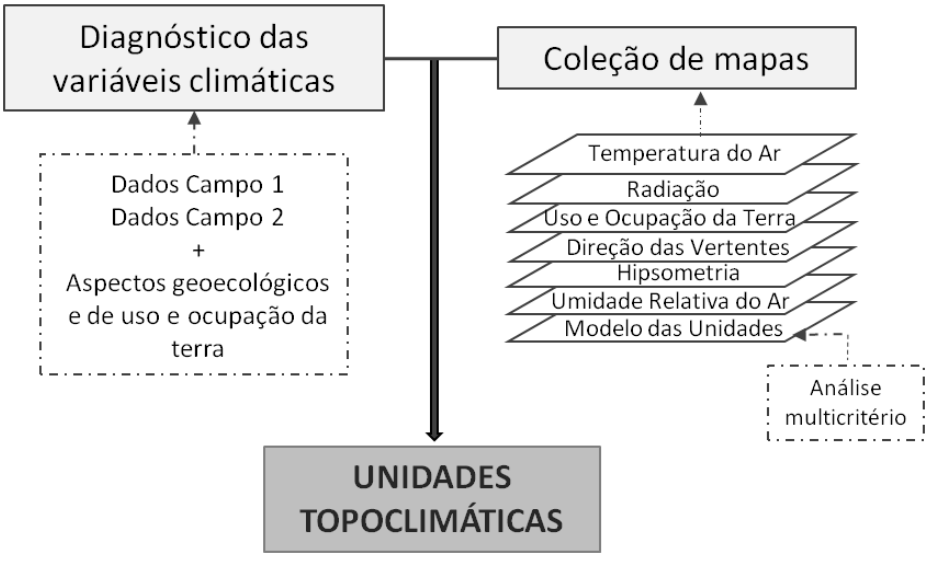


Figura 2 - Roteiro metodológico I: elaboração do mapa de unidades topoclimáticas.

Foram realizados dois trabalhos de campo com o objetivo de coletar dados meteorológicos para análise do comportamento atmosférico na área de estudo. No primeiro campo, realizado entre os dias 22 de agosto e 25 de setembro de 2016, foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar em intervalos de uma hora em dez pontos amostrais (Figura 3a). A escolha dos pontos considerou os diferentes arranjos superficiais presentes nos bairros da área de estudo. Os dados foram registrados por termo-higrômetros datalogger fabricados pela TFA Dostman/Wertheim, modelo 30.3015, instalados em abrigos meteorológicos de campo construídos para o trabalho de Assis (2010) (Figura 3b e c).

[1] Foi utilizado como período para o cálculo da radiação solar os meses de agosto e setembro de 2015, período de realização dos trabalhos de campo. Os dados finais gerados compreendem a média diária de Kw/m² desconsiderando-se o sombreamento provocado por edifícios e pela vegetação

[2] O Google ScketchUp calcula o fator de visão do céu (FVC) de cada ponto amostral. Esta técnica permite avaliar o quando o local é susceptível a dissipação/retenção de calor durante o período noturno.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

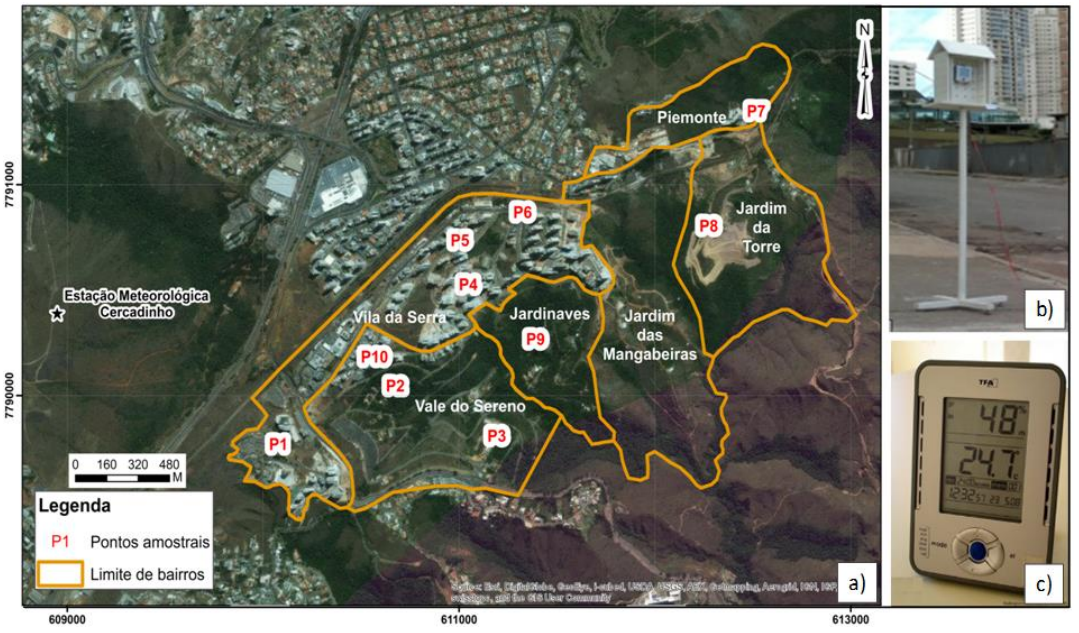


Figura 3 - (a) Localização dos pontos amostrais; Instrumentos de registro em campo das variáveis meteorológicas; (b) abrigo meteorológico de campo; e (c) termo higrômetro datalogger TFA.

No segundo campo, realizado entre as 13 horas do dia 25 de setembro e as 12 horas do dia 26 de setembro de 2016, foram coletados dados horários de temperatura, umidade relativa do ar e direção e velocidade dos ventos. Durante o período de cinco dias anteriores ao primeiro campo (17 de agosto de 2015) e cinco dias posteriores ao segundo campo (1 de outubro de 2015), foi realizada a análise rítmica dos dados baseada na metodologia de Monteiro (1971) com o objetivo de compreender a influência da sucessão de estados de tempo meteorológico sobre a dinâmica de variação dos elementos climáticos na área de estudo.

Os dados foram analisados considerando-se a estatística geral e a estatística por períodos do dia de cada campo, sendo esses períodos: manhã (das 6 às 12 horas), tarde (das 13 às 18 horas), noite (das 19 a 0 hora) e madrugada (da 0 às 5 horas). A análise por períodos foi importante para identificar as respostas atmosféricas às características da superfície associadas às variações diurnas de radiação. Os dados foram interpolados no software ArcGIS 10.1 gerando cartogramas com a distribuição da temperatura e umidade relativa do ar em médias gerais e por período. Após testes estatísticos realizados com os interpoladores oferecidos pelo software, foi adotado o interpolador Local Polinomial Interpolation por este ter sido o interpolador que apresentou as melhores correlações entre dados observados e simulados.

De posse dos dados coletados nos campos 1 e 2 e do material gráfico e cartográfico de apoio, foi realizado o diagnóstico do comportamento climático na área de estudo. Após realizado este diagnóstico, foi observado que as características geoecológicas que mais se relacionavam com a dinâmica de variação dos elementos climáticos consistiam na radiação solar, uso e

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

ocupação da terra e altimetria, as quais refletiam fortemente no comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar.

Assim, estes cinco mapas foram utilizados como bases de entrada para a delimitação das unidades topoclimáticas[3]. Para fundamentar a delimitação das unidades, foi elaborado um modelo matemático das unidades climáticas utilizando-se da metodologia de análise multicritérios. Esta metodologia consiste em uma álgebra de mapas temáticos, os quais são classificados em categorias que recebem uma nota de acordo com a avaliação do pesquisador quanto à prioridade de relação que tem a categoria com o objeto da modelagem. Cada mapa recebe um peso em porcentagem que, no conjunto dos mapas, deve somar 100%, sendo este um valor percentual.

A princípio foi necessário converter os mapas que estavam em formato vetorial para o formato matricial, o qual permite o cálculo dos valores atribuídos a cada célula do mapa. Durante o processo de conversão dos dados foi necessário criar classes para os mapas que apresentavam a distribuição de variáveis contínuas, como radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e hipsometria.

As notas atribuídas a cada classe desses mapas foram definidas a partir da relação da categoria com o comportamento térmico atmosférico (Tabela1). Portanto, uma classe de radiação alta, por exemplo, influenciaria a temperatura positivamente, recebendo notas mais altas, enquanto maiores umidades seriam relacionadas a temperaturas menores e, portanto, notas menores.

Embora na teoria locais mais altos sejam mais frios, foi observado na área de estudo que os topos estavam entre os locais mais aquecidos, por isso as mais elevadas altitudes receberam notas maiores. Ademais, a quantidade de radiação incidida na superfície expressa, de maneira indireta, relação com a altimetria e a orientação de vertentes, importantes fatores de influência do comportamento topoclimático na área estudo.

Tabela 1 - Nota atribuída a cada classe dos mapas de entrada da análise multicritérios

Nota	ATRIBUTOS				
	Radiação Solar (KW/h)	Temperatura do ar (°C)	Uso e ocupação da terra	Umidade relativa do ar (%)	Altimetria (m)
1	2,69 - 3,71	19,1 - 19,8	Floresta em estágio médio de regeneração	69,5 - 71,9	960 - 1014
2	3,72 - 4,03	19,8 - 20,2	Floresta em estágio inicial de regeneração	67,7 - 69,5	1014 - 1051
3	4,03 - 4,27	20,2 - 20,5	Semiurbano florestal	66,3 - 67,7	1051 - 1085
4	4,27 - 4,49	20,5 - 20,7	Semiurbano campestre/Campo cerrado	65,3 - 66,3	1085 - 1118
5	4,49 - 4,69	20,7 - 20,9	Área urbana com edificações de até 15 pavimentos	64,6 - 65,3	1118 - 1154
6	4,70 - 4,89	21,0 - 21,3	Área urbana com edificações de mais de 15 pavimentos		1154 - 1208
7	4,90 - 5,19	21,3 - 22,1			1208 - 1309

[3] Embora a orientação das vertentes tenha relação direta com o comportamento térmico atmosférico na área de estudo, esta mesma relação foi expressa no mapa de radiação solar, sendo ele escolhido para compor o modelo matemático das unidades topoclimáticas. As informações sobre a vegetação, fator correlato à dinâmica térmica atmosférica, estão embutidas no mapa de uso e ocupação da terra.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Os pesos adicionados para cada mapa temático foram definidos com base na análise diagnóstica dos dados coletados em campo, que apontou os fatores que mais se relacionavam com a distinção climática entre as diferentes localidades da área de estudo. Os valores percentuais adotados foram discutidos e testados considerando-se o diagnóstico feito na primeira etapa do trabalho e a opinião de especialistas. Em seguida, foi realizada a álgebra de mapas utilizando-se a seguinte fórmula:

Equação 1

$$[Radiação_solar * 0,3] + [Temperatura_do_ar * 0,25] + [Uso_e_ocupação_do_solo * 0,2] + [Umidade_relativa_do_ar * 0,15] + [Altimetria * 0,1]$$

O mapa gerado a partir da álgebra é apresentado na figura 4. Este modelo matemático serviu para uma primeira análise sobre as possíveis unidades topoclimáticas. Em seguida, foi adicionada uma coleção de mapas no software ArcGis 10.1 contendo as cinco bases cartográficas utilizadas na entrada da análise multicritério e o mapa resultante da mesma. A partir da sobreposição dessas informações e dos conhecimentos obtidos por meio da análise diagnóstica do clima da área, foram vetorizadas as unidades topoclimáticas finais. Esta vetorização foi feita de forma manual, considerando-se as unidades topoclimáticas apontadas pelo modelo matemático gerado através da análise multicritério, porém ajustando estas unidades às manifestações climáticas observadas ao longo do diagnóstico da área cujo modelo não foi capaz de delimitar.

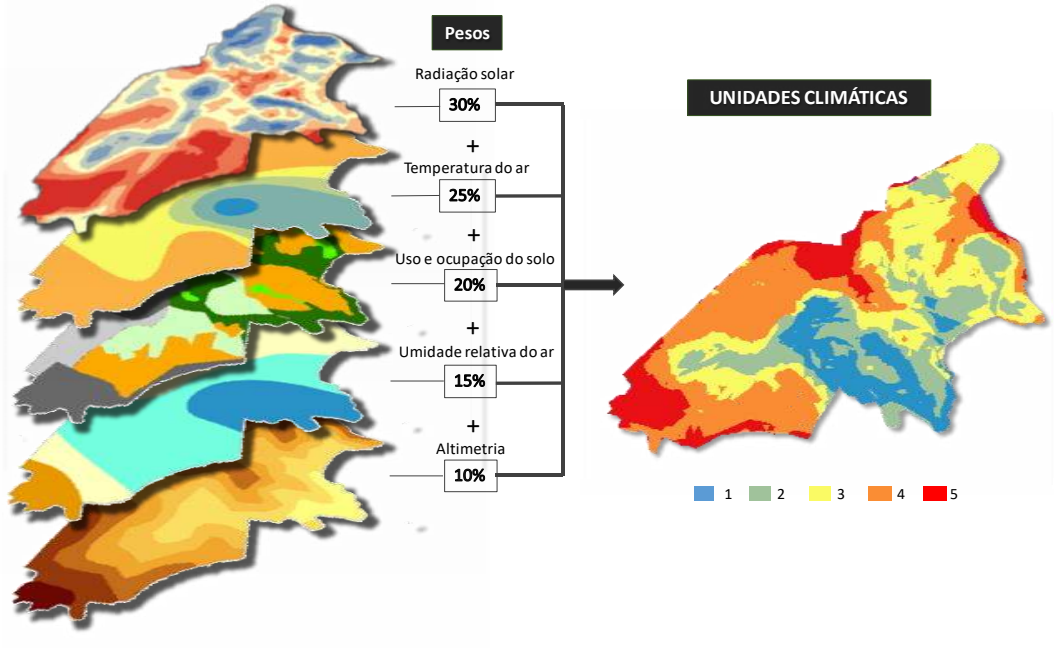


Figura 4 - Roteiro Metodológico II: elaboração do modelo matemático das unidades topoclimáticas.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A área de estudo, localizada nas bordas do Quadrilátero Ferrífero, compreende terrenos com variação altimétrica de cerca de 350 metros. As áreas mais baixas estão nos talvegues da sub-bacia do córrego Estrangulado, que em seu ponto mais baixo registra 960 metros de altitude, enquanto o ponto mais alto, o topo da Serra do Curral, registra 1310 metros de altitude (Figura 5a). As vertentes são direcionadas preferencialmente para o quadrante sul na porção leste da área de estudo, enquanto na porção oeste predominam direcionadas ao quadrante norte (Figura 5b).

A hipsometria, aliada à orientação das vertentes, resulta em um padrão de iluminação solar no qual os fundos de vale e vertentes voltadas para sul e sudoeste recebem menos insolação, enquanto as vertentes voltadas para norte e nordeste são as mais iluminadas durante o dia (Figura 5c). Concomitantemente, as vertentes ao sul e sudoeste são predominantemente ocupadas por vegetação arbórea de floresta em estágio primário e secundário de regeneração, potencializando o sombreamento superficial (Figura 5d).

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

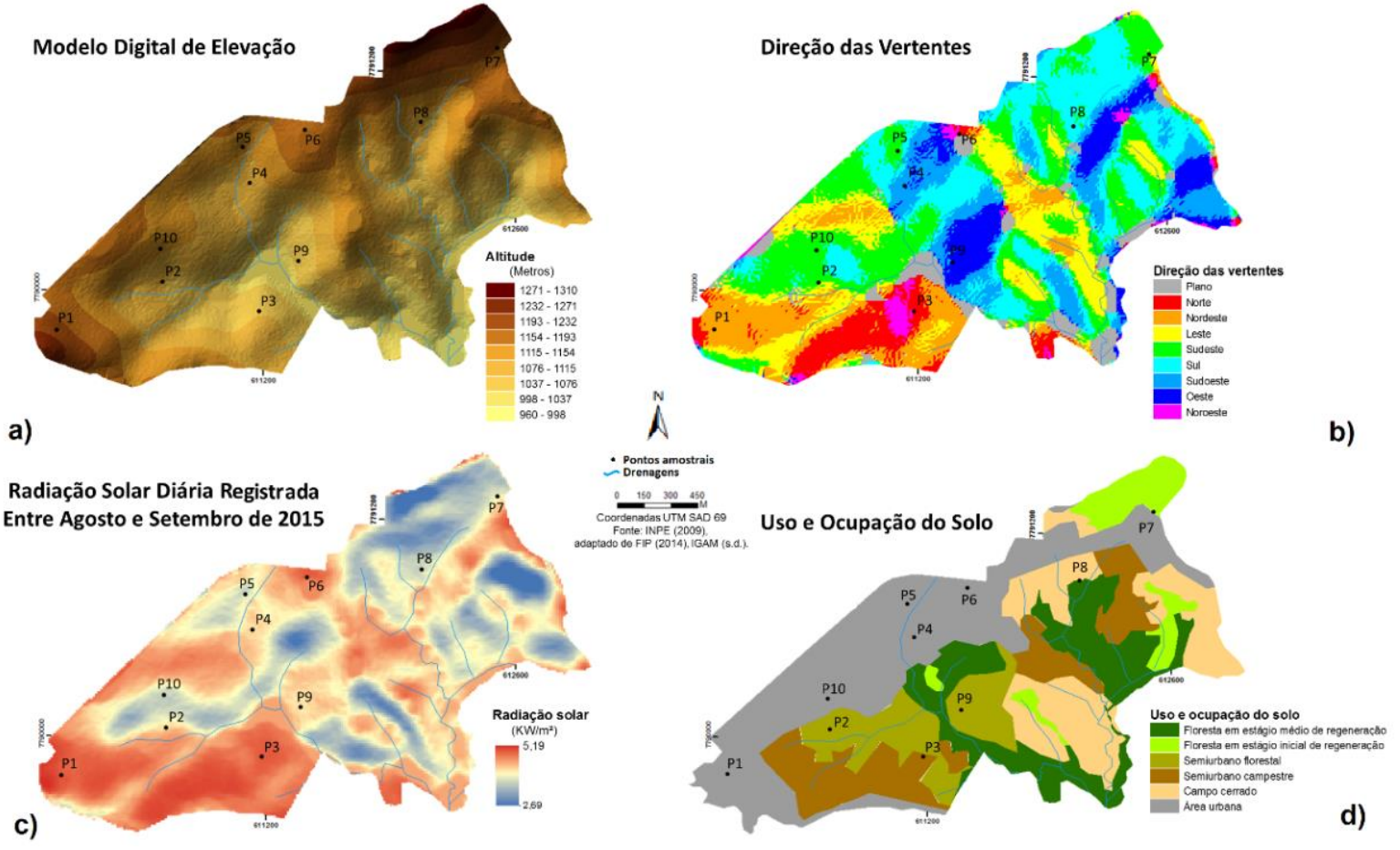


Figura 5: (a) Modelo digital de elevação; (b) direção das vertentes; (c) radiação solar diária registrada entre agosto e setembro de 2015; e (d) uso e ocupação da terra na área de estudo.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Sob condições predominantemente estáveis conferidas pela atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), foram identificados sete topoclimas singulares e uma unidade de transição entre eles. Estas unidades são apresentadas na figura 6 e suas principais características são detalhadas na tabela 2.

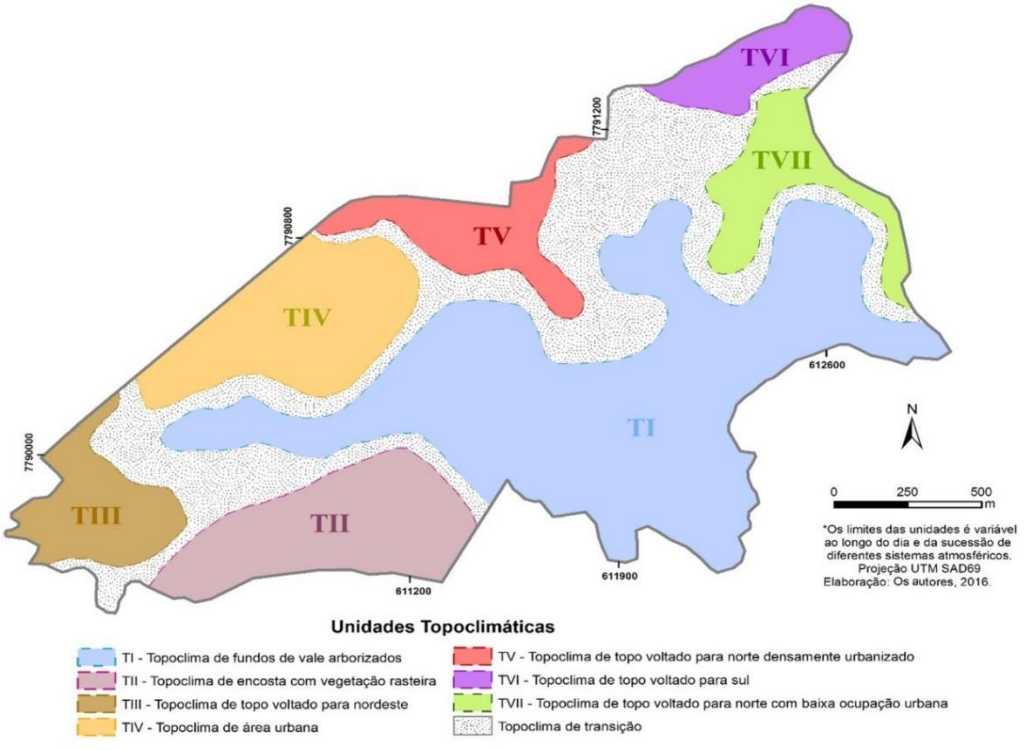


Figura 6: Mapa de unidades topoclimáticas identificadas na área de estudo.

A unidade T-I compreende áreas topograficamente rebaixadas, 960 a 1080 metros aproximadamente, bem arborizadas e no entorno dos cursos d'água da região. Nessa unidade a média térmica foi a mais baixa, variando de 19,1°C a 20,5°C, e a média de umidade relativa do ar foi a mais alta, variando de 69,4% a 71,9%.

Próximo da superfície a ventilação é reduzida pela vegetação arbórea. A camada do dossel das árvores é responsável pelo bloqueio da radiação solar que chega, na maior parte, em forma de radiação difusa na camada dos troncos. A orientação das vertentes, predominantemente voltadas para o quadrante sul, condiciona menor quantidade de radiação incidida no topo do dossel. Assim, durante o dia, o interior da floresta se mantém mais fresco do que nos arredores onde não há vegetação arbórea expressiva, já que a absorção de radiação de ondas curtas pela superfície é reduzida. A ocupação urbana nesta área, caracterizada pela distribuição esparsa de residências unifamiliares, não é suficiente para alterar as condições topoclimáticas de maneira a configurar um clima urbano. A absorção e emissão de radiação pelas superfícies asfálticas e de alvenaria nesta unidade correspondem a manifestações microclimáticas que são superadas pela resposta climática à densa arborização local

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 2: Características das unidades topoclimáticas

	Unidade	Altitude (metros)	Uso e ocupação do solo	Vertentes	Temperatura	Umidade Relativa do Ar
T-I	Topoclima de fundos de vale arborizados	960 a 1080	Florestas em estágio médio e inicial de regeneração e semiurbano florestal	Quadrante sul	19.1°C a 20.5°C	69.4% a 71.9%
T-II	Topoclima de encosta com vegetação rasteira	1025 a 1130	Campo cerrado e semiurbano campestre	Quadrante norte	20.5°C a 20.9°C	67.8% a 69.5%
T-III	Topoclima de topo voltado para nordeste	1150 a 1250	Urbano com edificações comerciais e residenciais entre 3 e 25 pavimentos	Nordeste	20.6°C a 20.9°C	65.4% a 66.4%
T-IV	Topoclima de área urbana	1060 a 1160	Urbano com edificações comerciais e residenciais de até 24 pavimentos	Quadrante sul	20.5°C a 20.9°C	66.4% a 69.5%
T-V	Topoclima de topo voltado para norte e densamente urbanizado	1150 a 1200	Urbano com edificações residenciais de 20 a 27 pavimentos	Norte	20.9°C a 22.1°C	65.4% a 64.6%
T-VI	Topoclima de topo voltado para sul	1150 a 1310	Urbano com edificações residenciais de 16 a 27 pavimentos	Sul	20.6°C a 20.9°C	65.4% a 66.4%
T-VII	Topoclima de topo voltado para norte com ocupação urbana esparsa	1150 a 1200	Urbano com edificações residenciais esparsas	Quadrante norte	20.6°C a 20.9°C	66.4% a 67.8%

À noite a camada do dossel funciona como uma barreira à dissipação da radiação de ondas longas para a atmosfera, reemitindo-a para a superfície e desacelerando o arrefecimento térmico. No entanto, este fator, que poderia favorecer a manutenção térmica ao longo da madrugada, tem seu efeito superado pelos resultados da dinâmica advectiva noturna. A unidade T-I está localizada em terrenos topograficamente rebaixados, no entorno de calhas fluviais. Os desníveis topográficos favorecem a drenagem de ar frio e úmido pelos ventos catabáticos para essas áreas ao longo da noite, tornando-a mais fria do que as demais unidades topoclimáticas. Nos meses de outono-inverno, após noites frias e sem nebulosidade, a atmosfera resfriada nos fundos de vales favorece a inversão térmica no princípio da manhã. A umidade presente no ar é então condensada, formando uma névoa espessa que é dissipada ao longo da manhã por mecanismos de circulação de vale-montanha e o aquecimento gradual da superfície.

A evapotranspiração vegetal, assim como a proximidade a cursos d'água, condicionam atmosfera úmida no interior da camada de troncos que, na madrugada, atingiu médias entre 79,2% e 85% na unidade T-I. Ademais, quanto menor a temperatura do ar, menor é sua capacidade de retenção de vapor d'água (umidade absoluta) e maior será o percentual de umidade relativa. No entanto, em dias muito secos, mesmo tais caraterísticas não são suficientes para elevar os índices de umidade no início da tarde para níveis ideais à saúde humana, embora ainda assim sejam estes os locais mais úmidos.

A unidade T-II compreende uma área de encosta voltada para norte com boa iluminação solar. A cobertura vegetal de gramíneas e arbustos favorece o aquecimento da superfície durante o dia e o rápido resfriamento durante a noite. A temperatura ficou em torno dos 21°C e a umidade relativa variou de 67,8% a 69,5%.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Durante o dia, a cobertura vegetal rasteira e a exposição da vertente, favorecem a absorção da radiação de ondas curtas e a emissão de ondas longas para a atmosfera, potencializando o aquecimento na área. A evapotranspiração vegetal aporta umidade ao ar, embora, ao longo do dia, o aquecimento do ar reduz a capacidade atmosférica de retenção da umidade.

Durante a noite, como não há interpostos entre a superfície e a abóbada celeste capazes de reter com eficiência a radiação terrestre, a radiação de ondas longas é rapidamente dissipada, tornando o local um dos mais frios do período. O resfriamento do ar condiciona sua umidificação. O ar frio e úmido é, então, transportado por ventos catabáticos para as áreas mais rebaixadas, como os terrenos que abrangem a unidade T-I. A vegetação rasteira não oferece obstáculo ao escoamento atmosférico na camada laminar, configurando uma área de boa ventilação natural.

Alguns edificíos com cerca de 30 pavimentos estão em construção na unidade T-II. No entanto, dada sua pontualidade e distância entre eles, a influência sobre a dinâmica topoclimática é reduzida.

A unidade T-III compreende um terreno elevado que varia de 1150 a 1250 metros de altitude, ocupado por edificações empresariais e multifamiliares de 3 a 24 pavimentos. As vertentes na área são voltadas para o quadrante norte, com boa iluminação solar direta. A temperatura média ficou entre 20,6°C e 20,9°C. A umidade relativa média variou de 65,4% a 66,4%.

A boa iluminação solar da vertente ao longo do dia, principalmente à tarde, e as superfícies de asfalto e concreto, potencializam a absorção de radiação de ondas curtas e a emissão de ondas longas no ambiente urbano para a atmosfera, aquecendo o ar e reduzindo os ganhos hígricos. Durante a tarde, a média da umidade relativa do ar foi de 50%. Em função da altitude e da presença de uma área aberta gramada pertencente à Faculdade Milton Campos, a ventilação é boa. No entanto, os edifícios instalados a leste, sudeste e noroeste nesta unidade desviam os ventos.

Durante a noite a radiação de ondas longas emitida pela superfície e pelos edifícios é gradualmente absorvida e reemitida entre eles, retardando o arrefecimento térmico. À medida que o ar se resfria, configuram-se ventos catabáticos que fluem em direção às áreas de fundo de vale.

A unidade T-IV compreende a maior parte do bairro Vila da Serra e um trecho ao norte do bairro Vale do Sereno. Sua extensão é caracterizada pela presença de edifícios empresariais, comerciais e residenciais de até 24 pavimentos. A arborização das vias públicas é irrisória. Não há praças ou áreas de convívio social. A média da temperatura do ar variou de 20,5°C a 20,9°C e a da umidade relativa ficou entre 66,4% e 69,5%.

Embora seja o perímetro mais urbanizado e ocupado da área de estudo, esta unidade apresenta comportamento térmico e hígrico intermediário entre as áreas mais frias e úmidas e as mais quentes e secas. Em alguns períodos do dia, a disposição dos edifícios na malha urbana provoca o sombreamento da superfície reduzindo a absorção de radiação de ondas curtas e os ganhos térmicos nos locais sombreados. No entanto, o albedo diminuto das superfícies asfálticas e de concreto permite a absorção elevada da radiação de ondas curtas, e a emissão de ondas longas, favorecendo as trocas de calor sensível na baixa atmosfera.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Já durante a noite, a obstrução da abóbada celeste provocada pela proximidade das edificações torna o arrefecimento térmico lento, dada a troca de radiação de ondas longas que se configura entre as coberturas de asfalto e as superfícies de concreto. Ainda assim, esta não é a unidade topoclimática mais aquecida neste período. Os fatores morfologia e orientação das vertentes superam a influência urbana quanto à configuração de áreas de atmosfera mais aquecida durante a noite na área de estudo.

O arranjo das edificações na malha urbana influencia o escoamento dos ventos na baixa atmosfera. Em locais cuja a orientação das ruas e dos edifícios em seus arredores obedece ao eixo SW-NE, foi observada aceleração e canalização dos ventos, além de movimentos turbulentos. Em outros locais, foi observado o desvio dos ventos que desciam a vertente ao longo da noite em função da presença dos edifícios.

A unidade T-V está localizada em uma área de topo no bairro Vila da Serra, a qual compreende altimetrias que variam de 1150 a 1200 metros. Toda a área está ocupada por edificações de 20 a 27 pavimentos. A média térmica compreendeu o intervalo de 20,9°C a 22,1°C, enquanto a umidade relativa do ar variou de 65,4% a 64,6%.

Este local recebe radiação solar direta ao longo de quase todo o dia, o que, adicionado às superfícies de asfalto e concreto predominantes, potencializa os ganhos térmicos. Ao longo do dia a área consiste em um núcleo aquecido que se destaca dos demais, com média térmica que variou de 26,6°C a 30,3°C. Em função do aquecimento atmosférico e da escassez de fontes hígricas, o ar torna-se mais seco atingindo níveis médios de 43% durante a tarde. A baixa arborização das ruas aumenta o desconforto térmico para os transeuntes.

Durante a noite a proximidade dos edifícios favorece a troca de radiação de ondas longas entre eles retardando a dissipação do calor na baixa atmosfera. A ventilação no local é reduzida, sendo uma das áreas que registra a maior frequência de calmarias, o que diminui ainda mais a perda térmica, tornando esta unidade uma das mais aquecidas e mais secas ao longo da noite e madrugada. A média térmica noturna variou de 21,4°C a 21,7°C. A umidade ficou entre 45,5% e 50,1% no mesmo período. Na madrugada, a temperatura média caiu para uma faixa entre 17,5°C e 18,2°C, enquanto a umidade relativa média variou de 75% a 76,7%.

A unidade T-VI abrange uma área de topo com altimetrias que variam de 1150 a 1310 metros referente aos cumes da Serra do Curral. A média térmica compreende valores entre 20,6°C e 20,9°C, com umidade relativa entre 65,4% e 66,4%, comportamento médio semelhante ao da unidade T-III. No entanto, a dinâmica de variação dos elementos climáticos ao longo do dia e da noite discretiza esta unidade.

A vertente é iluminada pelos raios solares logo no início da manhã, sendo um dos primeiros locais a receber radiação solar direta, que permanece até por volta das 15 horas. Durante o período da manhã o processo de absorção da radiação de ondas curtas e sua emissão sob a forma de ondas longas pela superfície é adiantada com relação aos demais locais, tornando esta unidade a mais quente do período matutino (média térmica entre 19,8°C a 20,2°C). Como resultado, a unidade T-VI foi a mais seca no período

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

(umidade relativa entre 67,5% e 68,2%). Embora a unidade esteja em uma região vegetada, em vertentes de alto declive da Serra do Curral não ocupadas por construções urbanas, os solos ali são rasos e a maior parte da vegetação rasteira, diminuindo a infiltração e o armazenamento de água no solo e reduzindo as fontes hígricas.

Já durante a tarde, com o fim da incidência da radiação direta no local e a boa ventilação natural, as temperaturas baixam significativamente, reduzindo a média térmica para uma faixa entre 23,9°C e 25,4°C. Neste período, esta é a unidade mais fria dentre as demais, superando, inclusive, a unidade T-I.

À noite, as condições de aquecimento se invertem. No início do período, o ar que se resfria é logo transportado por ventos catabáticos para as áreas rebaixadas mantendo a atmosfera local mais aquecida e seca que os fundos de vale. Ademais, a proximidade das edificações construídas na região pode retardar o arrefecimento térmico local, bem como causar efeitos de turbulência e desvio dos ventos. Durante a noite e madrugada, as médias térmicas e hígricas desta unidade são semelhantes à unidade T-V. Enquanto nesta última o adensamento urbano é o principal responsável pela manutenção térmica local ao longo da noite, na unidade T-VI a topografia e morfologia do terreno são os principais fatores de manutenção das temperaturas na medida em que possibilitam o desenvolvimento dos ventos de encosta rumo aos fundos de vale.

A unidade T-VII está localizada em uma área de topo voltada para o quadrante norte em uma altitude que varia entre 1150 e 1120 metros, assim como a unidade T-V. A principal diferença entre elas consiste na ocupação urbana que, na unidade T-VII é incipiente e esparsa não tendo efeito intensificador sobre o comportamento térmico atmosférico no local, como foi observado em relação à T-V.

Ao longo do dia a unidade T-VII apresenta comportamento próximo à T-VI em relação às médias térmicas e hígricas. No entanto, recebe maior quantidade de radiação no período da tarde e ao longo do dia tornando-se mais aquecida neste período. Durante a noite e madrugada, a altitude e o posicionamento da unidade T-VII influencia a formação de ventos catabáticos que tornam o local mais aquecido que os fundos de vale, como é observado nos demais topos na área de estudo.

Entre as unidades topoclimáticas definidas é perceptível um topoclima de transição, o qual adquire características distintas de acordo com sua variação espacial. As áreas de transição entre as unidades topoclimáticas se configuram em função do caráter contínuo do clima, que torna gradual a propagação dos efeitos superficiais sobre os elementos meteorológicos nas camadas inferiores da atmosfera.

As transições entre a unidade T-I/T-II e T-I/T-IV abrange um espaço curto. Isto porque a extensão da influência do topoclima T-I é reduzida, uma vez que as condições de sombreamento oferecidas pela vegetação se restringem às áreas de povoamento vegetal arbóreo, reduzindo a influência sobre o arrefecimento térmico atmosférico a seu entorno próximo. Por outro lado, as unidades T-II e T-IV apresentam características climáticas intrínsecas à topografia e ao uso e ocupação da terra. Como não há uma transição

espacialmente longa entre as características superficiais desses topoclimas e a unidade T-I, a transição entre eles ocorre em um espaço reduzido.

Entre as unidades T-IV e T-V a ocupação urbana apresenta características semelhantes quanto à altura e espaçamento entre os edifícios. A transição entre esses topoclimas se relaciona com o relevo local, no qual se destaca uma área de topo onde se assenta a unidade T-V.

A transição entre as unidades T-I/T-V/T-VI acontece em um espaço maior por apresentar, este local, características mistas das três unidades. Destacam-se: áreas de topo que não são tão aquecidas quanto a unidade T-V devido à baixa ou inexistente ocupação urbana; áreas arborizadas, porém reduzidas e isoladas; vegetação rasteira; e variações altimétricas significativas (1000 a 1170 metros, aproximadamente).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interação entre os fatores de superfície e os elementos climáticos apontou para a configuração de sete unidades topoclimáticas. Entre elas, identificou-se um topoclima de transição no qual se alternam combinações de elementos característicos das unidades topoclimáticas próximas, nos moldes do que define Sorre (2006, p. 91) como manchas limítrofes climáticas.

A principal distinção entre essas unidades foi a dinâmica de variação dos elementos climáticos ao longo do dia. Ficou claro que o relevo ocupa função primária nas características dessas unidades, uma vez que a orientação das vertentes interfere na distribuição da radiação solar na superfície, determinando a resposta térmica diurna, enquanto a altitude, junto aos atributos de geomorfologia que configuram no período noturno a circulação catabática, influenciam na distribuição de calor no período noturno. Em experimentos realizados na Serra do Souza por Machado (2013), na Serra do Cipó por Machado et al. (2014), ambas em Minas Gerais, e no vale do rio Barcarena por Lopes (1995), em Portugal, foi observada a mesma relação entre relevos de topo e a manutenção de calor na atmosfera no período noturno, em comparação com os fundos de vale.

A cobertura vegetal e as características de ocupação urbana distinguem as intensidades de aquecimento ou resfriamento atmosférico. As áreas de fundo de vale, de altitude reduzida, são sombreadas durante parte do dia, o que as torna mais amenas do que os locais de altitude elevada. A predominância de vegetação de porte arbóreo nesses espaços potencializa o efeito topográfico, tornando-as as áreas mais frescas na região. Da mesma forma, a ocupação urbana densa e verticalizada em áreas de topo intensifica o aquecimento atmosférico, já favorecido pela condição topográfica desses locais. Nas áreas mais adensadas e verticalizadas, onde se configuram os topoclimas IV e V da área de estudo, foram observadas as maiores temperaturas mínimas, efeito produzido pelas características urbanas no entorno.

No que diz respeito à influência das áreas arborizadas sobre a temperatura do ar abaixo da camada do dossel, esperava-se observar um efeito térmico atenuador durante o dia e a retenção de calor sob o dossel ao longo da noite, conforme observaram Oke (1978), para Baumüller et al.

(1997) e Machado et al. (2014). Durante o dia foi observada a atenuação térmica sob a camada de dossel. Porém, a superfície arborizada está concentrada no entorno de talvegues nos fundos de vale e áreas mais rebaixadas do relevo, destino para o qual flui o ar resfriado e denso que desce as encostas durante a noite. Logo, o ar frio transportado pelos ventos catabáticos se acumula nesses locais, tornando-os mais frios que os demais no período noturno.

Com relação à metodologia desenvolvida para elaboração do mapa de unidades topoclimáticas, o uso da análise multicritérios permitiu investigar matematicamente possíveis unidades climáticas, integrando um método estatístico à análise qualitativa do clima. Esta técnica foi útil na medida em que permitiu enxergar padrões superficiais que determinaram respostas climáticas de uma maneira integradora, proporcionando maior fundamentação à visão do pesquisador na delimitação das unidades.

Por outro lado, os resultados da análise multicritério gera ruídos típicos da estrutura de entrada matricial dos dados, havendo a necessidade da intervenção do pesquisador na delimitação dos limites das unidades. Outro limite a esta técnica consiste na definição das variáveis envolvidas na diferenciação das unidades climáticas e os pesos atribuídos a cada uma delas. Nesse aspecto é necessário o conhecimento prévio do pesquisador a respeito da área por meio de um diagnóstico que norteie a definição destes valores. Assim, esta técnica apresenta um potencial de replicação para outras áreas, desde que haja o cuidado do pesquisador em elaborar um diagnóstico que permita definir as principais características da superfície envolvidas nos climas estudados e sua hierarquia na definição de tais climas. Cabe ressaltar que as unidades topoclimáticas delimitadas servem como artifício analítico das características climáticas observadas na área de estudo, sendo os limites apresentados variáveis ao longo do dia e conforme a alternância dos sistemas atmosféricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, W. L. O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial. 2010, 299 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

BAUMÜLLER, J; HOFFMAN, U; RUTER, U. Cartilha urbanística do clima - Sequência 2. Tradução de Francisco Assis Gonçalves da Silva. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1997. 194p.

BAUMÜLLER, J; HOFFMAN, U; REUTER, U. Climate booklet for urban development: indications for urban land-use planning. Ministry of Economy Baden-Wuerttemberg (Wirtschafts ministerium), Environmental Protection Department (Amt für Umweltschutz), 275p, 2012.

CRAVEIRO, C. A produção do espaço do espaço das Seis Pistas como nova centralidade periférica no espaço metropolitano Belo-Horizontino. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 15, n. 24, p. 68-77, 2005.

FUNDAÇÃO ISRAEL PINHEIRO – FIP. Estudos preliminaries para regulamentação de área de diretrizes especiais: loteamentos Vila da Serra,

Vale do Sereno, Jardim das Mangabeiras, Jardim da Torre, Jardinaves e entorno. Nova Lima, 23 de julho de 2014, 76f.

LOPES, A. Drenagem e acumulação de ar frio em noites de arrefecimento radiativo. Um exemplo no vale de Barcarena (Oeiras). Finisterra, v. 30, n. 59-60, p. 149-164, 1995.

MACHADO, L. A. Implicações da verticalização dos bairros Vila da Serra e Vale do Sereno (Nova Lima, MG) na circulação atmosférica local. 2013, 144f. Monografia (Bacharelado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

MACHADO, L. A.; GONCALVES, I.; MAGALHAES, M. A. N.; ASSIS, W. L. Análise do comportamento térmico e hígrico em área do Parque Nacional da Serra do Cipó. In: Anais... XI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Curitiba: UFPR, 2014. v. 1. p. 449-460.

MACHADO, L. A. Impactos da verticalização e adensamento das edificações em topoclimas e mesoclimas na porção norte do município de Nova Lima (MG). 2016, 166p.Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

MENEGALE, M. B. C. S. A Transformação territorial de um município de tradição mineradora: estudo de caso sobre a recente ocupação do norte de Nova Lima, circundante à Mata do Jambreiro. 2002. 164 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

MONTEIRO, C. A. F. Análise rítmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho. São Paulo, Série Climatologia Dinâmica I, USP-IG, 1971, 21p.

MONTEIRO, C. A. F. Teoria e clima urbano. São Paulo: IG06-USP, 1976. (Série Teses e Monografias n. 25). 181p.

MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. GEOSUL, Florianópolis, v. 5, nº 9, p. 61-79, 1990.

MONTEIRO, C. A. Teoria e clima urbano: Um projeto e seus caminhos. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (orgs). Clima Urbano. São Paulo: Contexto, p.9-67, 2003.

OKE, T. R. Boundary layer climates. London: Methuem & Co. LTD, 1978. 372p.

REN, C.; YAN-YUNG, E; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. International Journal of Climatology, n. 31, p. 2213-2233, 2010.

SORRE, M. Objeto e método da climatologia. Revista do Departamento de Geografia USP, São Paulo, nº 18, p. 89-94, 2006.

SOUZA, V. S. Mapa climático da cidade de João Pessoa - PB. 145f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal da Paraíba, 2010.

TARIFA, J. R.; ARMANI, G. Unidades climáticas da cidade de São Paulo: 1ª aproximação. Atlas Ambiental do Município de São Paulo, Fase I: Diagnósticos e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes no município de São Paulo. Universidade Federal de São Paulo - USP, 86f. 2000.