CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONFIGURAÇÃO DE MALHA NO PROGRAMA ENVI-MET

Rafael Silva Brandão (1); Simone Queiroz da Silveira Hirashima (2); Eleonora Sad de Assis (3)
(1) PhD, Pós-Doutorando do PPACPS, rbrandao@ufsj.edu.br
(2) PhD, Pós-Doutoranda do PPACPS, simoneqs@gmail.com
(3) PhD, Professora do Departamento de Tecnologia
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Tecnologia, Laboratório de Conforto Ambiental, Rua Paraíba, 697, Belo Horizonte - MG, 30130-141, Tel.: (31) 34098825

RESUMO
As simulações computacionais representam uma importante ferramenta para nortear o planejamento das cidades, uma vez que, além de investigar condições atuais, possibilitam o estudo de cenários futuros. Seu planejamento cuidadoso tem papel relevante para a fidedignidade dos resultados obtidos e, buscando subsidiar essa etapa, este artigo apresenta considerações sobre a configuração da malha (abrangência e resolução) no programa ENVI-met, analisando seu impacto no tempo de simulação e na consistência de resultados produzidos. Foram realizadas simulações para 4 tamanhos de áreas e 5 tamanhos de célula, para 29/06/2022, no Conjunto Paulo VI, em Belo Horizonte. Os resultados de temperatura (potencial do ar e média radiante), umidade relativa e vento (direção e velocidade) foram avaliados numericamente, para um receptor pontual, e espacialmente, por meio de mapeamentos. Os resultados demonstram a necessidade de atenção ao planejamento das malhas, já que o processo de transposição de bases georreferenciadas vetoriais para a malha estruturada de simulação pode gerar distorções como redução da área construída e deslocamento de receptores. Embora variáveis como temperatura do ar e umidade tenham se mostrado pouco dependentes da malha, a temperatura média radiante e o vento foram significativamente alterados pela configuração escolhida. Ao fim, são propostas diretrizes para elaboração de malhas de simulação no ENVI-met que, ainda que geradas para o estudo de caso específico, podem ser testadas em outros contextos.

Palavras-chave: clima urbano, ENVI-met, configuração de malha, simulação computacional.

ABSTRACT
Computer simulations are important tools in city planning since they make it possible to evaluate current conditions and test future scenarios. Simulation planning is fundamental to ensure results reliability. This paper discusses the configuration of the grid (extent and resolution) in software ENVI-met by analyzing impact on computation time and results consistency. Simulations were carried out for 4 area extents and 5 cell sizes for June 6th, 2022, at Conjunto Paulo VI, in Belo Horizonte. The results of air potential and mean radiant temperatures, relative humidity, and wind (direction and speed) were evaluated numerically, for a point receiver, and spatially, through mapping. The results indicate important issues for grid planning since the process of transposing georeferenced vector bases to a structured simulation mesh can generate distortions such as reduction in built area and displacement of receivers. Although variables such as air temperature and humidity have shown relative independence from grid size, mean radiant temperature and wind were significantly altered by grid configuration. Guidelines for elaborating simulation meshes in ENVI-met were proposed. Even though they were generated for a specific case study, they can be tested in other contexts.

Keywords: urban climate, ENVI-met software, grid configuration, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

O clima urbano é caracterizado pelas alterações das condições atmosféricas, em escala local, resultantes de modificações no balanço de energia nas cidades pela ocupação e uso do solo urbano. Para estudá-lo, pesquisadores utilizam diferentes métodos, incluindo simulações computacionais. Elas representam uma importante ferramenta para nortear o planejamento das cidades, uma vez que possibilitam, além de investigar situações atuais, simular cenários futuros. Porém, ainda há lacunas na literatura sobre as consequências das decisões que o pesquisador toma ao longo da preparação dos arquivos de entrada e dos arquivos de configuração utilizados para as simulações. Neste contexto, este trabalho busca apresentar subsídios para direcionar os pesquisadores na fase de planejamento de simulações no programa ENVI-met.

1.1. Tipos de modelagem e o ENVI-met

Devido à complexidade da atmosfera, da cidade e das interações entre ambos, a apreensão da realidade climática urbana demanda o uso de modelos. A escolha adequada dos tipos de modelo, das variáveis e da forma de tratamento e análise de resultados é fundamental na resposta às questões colocadas. No caso dos modelos térmicos urbanos, é possível classificá-los em três categorias quanto à abordagem:

- **Modelos empíricos** que utilizam bases confiáveis de dados empíricos, buscando correlacionar variáveis climáticas ou de planejamento urbano com as condições térmicas da cidade e que, fundamentados em condições reais, têm validade restrita à qualidade da base de dados de origem;
- **Modelos de balanço de energia** que modelam o clima urbano a partir dos fluxos de calor que ocorrem na cidade, com formulação matemática derivada da física de transferência de calor;
- **Modelos fluidodinâmicos** que, a rigor, utilizam também balanço de energia e massa na atmosfera, podendo ser considerados uma subdivisão dos modelos de balanço, mas em que o comportamento do fluido atmosférico não é tratado homogeneamente e sim como um domínio fluido discretizado, ou seja, dividido em volumes de controle menores, para os quais são realizados cálculos do balanço de massa, energia e momento separadamente (CÓSTOLA, 2006).

Dentre os modelos de análise térmica urbana, o ENVI-met é reconhecido como um dos mais confiáveis e completos, sendo amplamente utilizado pela comunidade acadêmica, com estudos de validação em diversos climas (SHINZATO et al, 2019, SILVA, 2021). Trata-se de um modelo fluidodinâmico que leva em conta dados meteorológicos locais, morfologia urbana (incluindo a topografia), materiais e vegetação, contando com um algoritmo para avaliar o comportamento atmosférico dentro de um volume urbano pré-definido. Detalhes sobre sua modelagem podem ser encontrados em HUTTNER (2012) e SIMON (2016).

O programa é estruturado em 6 módulos: Monde, Spaces, ENVI-guide, ENVI-core, BIO-met e Leonardo. Os módulos Spaces, ENVI-guide, ENVI-core são responsáveis pela modelagem, configuração e execução da simulação respectivamente. O BIO-met é utilizado para cálculo de índices de conforto térmico e o Leonardo, para visualização de resultados (geração de mapas). O módulo Monde é uma adição de versões mais recentes e permite a importação de bases de dados vetoriais georreferenciadas em formato *shapefile* (SHP) e/ou de informações obtidas em bases georreferenciadas públicas. O Monde exporta arquivos no formato INX (informações da geometria e materiais no ENVI-met) com extensão e nível de detalhamento definidos pelo usuário a partir de uma única base, o que implica maior eficiência na modelagem em relação a versões anteriores.

1.2. Discretização espacial para análises fluidodinâmicas

A discretização de domínios fluidos para análise fluidodinâmica demanda a subdivisão do volume principal em um conjunto de células interconectadas, em um processo de geração de malha (*mesh* ou *grid*). Nesse processo, busca-se um equilíbrio na decisão do número de células a serem criadas de forma a descrever adequadamente a geometria de contorno do volume, viabilizar a análise de eventuais variações nas condições internas e a permitir a abrangência necessária para a simulação dentro da capacidade computacional disponível. O número de células tem impacto direto nas demandas de *hardware* e no tempo de simulação, podendo aumentá-los exponencialmente.

As subdivisões do domínio podem ser realizadas de forma estruturada ou não-estruturada. No primeiro caso, os vértices interiores são topologicamente iguais, sendo o subgráfico resultante uma transformação de um *grid* com linhas e colunas pré-definidas (SACK; URRUTIA, 2000). A ordenação e a conectividade das células são definidas implicitamente pela estrutura do *grid*. As células podem ser organizadas em famílias de

linhas que não se cruzam e que podem ser numeradas consecutivamente, o que facilita a programação do modelo e a resolução das equações fluidodinâmicas, mas muitas vezes dificulta a criação da malha a partir de geometrias existentes (GONÇALVES, 2007). No caso das malhas não-estruturadas, os vértices têm disposição arbitrária e suas conexões devem ser determinadas e armazenadas individualmente. Com isso, se ganha flexibilidade para a representação de geometrias irregulares, orgânicas ou complexas, sendo que o código computacional suporta elementos de diferentes formas e refinamentos parciais da malha (GONÇALVES, 2007), mas torna-se necessário que o programa armazene mais informações sobre os nós da malha, tais como forma e vizinhanças.

Usualmente malhas estruturadas utilizam quadriláteros (em análises bidimensionais) ou hexaedros (em análises tridimensionais), enquanto malhas não-estruturadas utilizam triângulos (2D) ou tetraedros (3D). Malhas estruturadas podem ainda se organizar de forma ortogonal ou não-ortogonal, sendo que as primeiras apresentam limitações na representação de geometrias curvas ou fora da orientação da malha (SACK; URRUTIA, 2000). Malhas não-ortogonais podem ser matematicamente transformadas em malhas retangulares regulares, viabilizando a solução das equações fluidodinâmicas para esses modelos (ANDERSON JR, 1995).

1.3. A elaboração da malha no ENVI-met

As simulações no ENVI-met são realizadas utilizando uma malha ortogonal estruturada tridimensional pré-definida, sobre a qual são sobrepostos os elementos urbanos a serem considerados. É possível determinar o número de células em cada extensão (comprimento x largura x altura) e o tamanho das células em qualquer uma das direções. Na licença gratuita (ENVI-met Lite), há um limite de 50x50x40 células para realização das simulações. As células verticais podem contar com configuração telescópica, aumentando em até 30% sua dimensão a partir de uma altura definida pelo usuário. Também é possível dividir a primeira linha de células em 5 (cinco) subcélulas, aumentando a resolução na região próxima à superfície. Observa-se, porém, que essa primeira linha é sempre considerada a partir da superfície horizontal de referência e não do terreno ou das superfícies urbanas. A extensão da área simulada, bem como a precisão na sua representação, depende da combinação desses fatores (número e dimensão das células). O programa permite ainda a criação de células de aninhamento (*nesting grids*), adicionadas às bordas do modelo para minimizar efeitos de bordas, como instabilidades causadas por elementos muito próximos a elas. Sua vantagem é que também apresentam uma proporção telescópica, sendo que cada célula tem o dobro do tamanho da anterior, representando uma economia computacional. O número de *nesting grids* depende do recorte da área e do tamanho da malha original, permitindo atender às recomendações do programa.

O processo de transposição dos dados vetoriais georreferenciados para o modelo de simulação é realizado de forma semiautomática pelo módulo Monde, conforme mencionado. O usuário determina uma subárea de interesse dentro da região mapeada, escolhe camadas de informação para exportação e determina o número de células e sua dimensão. A área é necessariamente retangular, mas pode ser rotacionada para se adequar ao tecido urbano. O *grid* é construído paralelamente às bordas do retângulo e não necessariamente orientado para o norte, que pode ser definido separadamente, preservando a orientação dos elementos. As características dos materiais de superfícies e prédios, bem como os tipos de vegetação, podem ser definidas de forma homogênea para todos os elementos ou individualmente a partir da base de dados georreferenciada. Os objetos ocupam a malha a partir de decisões tomadas pelo próprio programa, já que cada célula permite apenas uma única informação de ocupação. Não fica claro como o algoritmo trata importações heterogêneas, ou seja, quando uma célula se sobrepõe a mais de um elemento ou quando o elemento está apenas parcialmente na célula. Receptores pontuais podem ser especificados e serão sempre centralizados em alguma célula do *grid*, o que significa que podem ser deslocados para se encaixar nessa condição, dificultando a comparação entre receptores localizados na mesma posição, mas em malhas diferentes, especialmente para dimensões de célula maiores.

Como a malha é ortogonal, superfícies inclinadas ou curvas adquirem forma serrilhada, alterando não só a forma de fachadas e ruas, mas, eventualmente, sua orientação. Assim, recomenda-se escolher um alinhamento semelhante ao das ruas e fachadas, já que isso não altera a exposição dos elementos urbanos. No caso de células telescópicas ocupadas ou pelo relevo ou por edifícios, a altura dos elementos também pode ser distorcida, ganhando toda a extensão da célula. Isso é particularmente problemático em edifícios muito altos ou relevos muito irregulares, considerando que o nível do edifício é somado à sua altura na determinação da sua posição no *grid*.

Outra questão a ser considerada é que a topografia é incluída na malha e modelada apenas até a borda do modelo e que as alturas são sempre consideradas em relação ao nível horizontal de referência. Com isso, o terreno ocupa espaço da malha e gera "paredes" na borda do modelo, o que aumenta a demanda computacional e pode gerar distorções significativas nos resultados.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo analisar e discutir o impacto da configuração de malha em um programa de simulação do balanço energético urbano, ENVI-met, a partir do estudo de caso de um assentamento urbano periférico adensado na cidade de Belo Horizonte, denominado Paulo VI. Busca-se, assim, relacionar essa configuração (abrangência e resolução) ao tempo de computação e à consistência de resultados.

3. MÉTODO

3.1. Organização da base de arquivos de entrada

Selecionou-se, para o estudo de caso, o Conjunto Paulo VI, Regional Nordeste de Belo Horizonte, Minas Gerais (Latitude: -19°50'13"; Longitude -43°53'27"), uma vez que, em 2030, este conjunto passará a integrar o grupo dos dez bairros mais vulneráveis da cidade, apresentando-se altamente suscetível a deslizamentos e a ondas de calor (BELO HORIZONTE, 2016).

Na organização da base de arquivos de entrada, os dados sobre edifícios e quadras foram obtidos da BHGEO (2022), e exportados para o módulo Monde em formato vetorial (*shapefiles*). Informações sobre a vegetação foram registradas com o uso da planta cadastral da PRODABEL (BELO HORIZONTE, 2015), atualizada a partir da ortofoto retificada produzida por Magalhães (2021). Os materiais foram atribuídos da seguinte maneira: as ruas são de pavimento asfáltico [0100ST: *Asphalt Road*], o solo das quadras é de terreno argiloso [0000LS: *UnsealedSoil (LoamySoil)*], as paredes são de tijolo furado [0100B1: *Brick Wall (aerated)*] e os telhados de telha cerâmica [0100R1: *Roofing Tile*]. As árvores foram todas consideradas do tipo *Robinia Pseudoacacia* [00003], que apresenta 12m de altura e 7m de diâmetro da copa, com calendário alterado para que não ocorra perda de folhas. As informações topográficas são importadas pelo próprio programa por meio do site Open Topography (2023).

No ENVI-guide, utilizou-se o modelo de entrada de dados chamado *Simple Forcing*, no qual são informados os dados horários de temperatura e umidade para um único dia, que será repetido caso a simulação tenha mais de 24 horas de duração. Os dados horários de temperatura e umidade do ar para o dia 29/06/2022 foram obtidos no site do INMET (2023) para estação automática da Pampulha. O modelo *Simple Forcing* permite a entrada apenas de um valor para velocidade e direção de vento, tendo sido utilizado o valor médio anual obtido a partir das Normais Climatológicas (INMET, 2022). O dado de umidade específica a 2500m foi obtido pelo site da Universidade de Wyoming (2023), para o Aeroporto de Confins (83566), 12Z para o dia em questão. Para o comprimento da rugosidade da superfície utilizou-se o valor de 1,0. O *cloud cover* (nuvens baixas, médias e altas), que também é constante ao longo do dia, foi considerado zero.

3.2. Definição das áreas de estudo e das malhas para simulação

Considerando os objetivos deste trabalho, foram definidos quatro diferentes tamanhos para as áreas a serem simuladas: 100x100m, 200x200m, 400x400m e 920x480m, sendo essa última área correspondente a todo o Conjunto Paulo VI. Foram definidos também cinco diferentes tamanhos de célula, que representam diferentes resoluções, para simulação de cada uma destas áreas: 2m, 3m, 5m, 10m e 20m. Além disso, o programa demanda que os prédios estejam ou encostados na borda do modelo ou distantes pelo menos a altura do edifício mais próximo. O módulo Spaces faz essa análise utilizando a ferramenta *Model inspector*, informando se o espaço deixado é suficiente ou se é necessário acrescentar células à área de estudo para satisfazer essa condição. Embora a documentação do programa recomende a expansão da área com a adição de novas células no modelo base, optou-se no presente trabalho por se ajustar a distância a partir da adição de *nesting grids*, que são posicionados a partir da borda externa do modelo, visando à economia computacional gerada pela sua característica telescópica. No sentido vertical foram consideradas 40 células em todos os modelos com a altura inicial de 3m e utilizando o *telescoping factor* de 30% a partir de 105m, nível da cobertura mais alta considerando a cota total (terreno com edifício). A organização das simulações pode ser visualizada na Tabela 1:

Tabela 1 - Informações sobre as simulações propostas, em amarelo as simulações que demandam licenças pagas e em vermelho as que demando licenças com processamento em núcleos múltiplos.

Tamanho da célula (m)	Número de células em cada uma das simulações				Número de *nesting grids*	Comprimento da área de *nesting grids* (m)
	100x100m	200x200m	400x400m	920x480m		
2	50 x 50	100 x 100	200 x 200	460 x 240	6	54
3	34 x 34	67 x 67	134 x 134	307 x 160	5	60
5	20 x 20	40 x 40	80 x 80	184 x 96	4	70
10	10 x 10	20 x 20	40 x 40	92 x 48	2	50
20	5 x 5	10 x 10	20 x 20	46 x 24	2	100

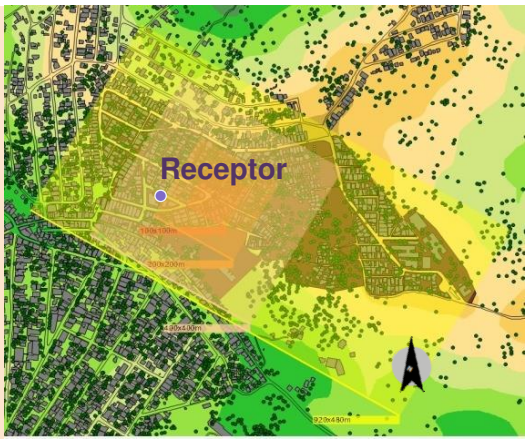


Figura 1 - Representação da área de estudo no módulo Monde, com a marcação das áreas de simulação

Na Figura 1 é possível ver a representação vetorial da área no módulo Monde. A escala de cores ao fundo é uma representação hipsométrica do terreno. Os pontos verdes são árvores, os polígonos cinza, edifícios, e os marrons, quadras. Os quatro polígonos transparentes amarelados são as áreas de simulação com suas diferentes abrangências, observa-se que as três áreas menores são quadradas e estão centralizadas no mesmo ponto (na R. Soraia Monteiro Mateuz, entre R. Dois e R. Raio de Sol). A área maior abrange todo o bairro e é a única retangular. As áreas foram rotacionadas em 30° para terem orientação mais próxima à maior parte das ruas do bairro, evitando serrilhamentos.

3.3. Simulações no ENVI-met e sistematização de resultados

As simulações foram realizadas com o ENVI-met 5.1 Student Licence, que permite a utilização de apenas um núcleo de processamento, em um computador Thermaltake, com processador AMD Ryzen 9 3950X 16-Core de 3.49 GHz e 128GB de memória RAM, no período entre 21/12/2022 e 29/03/2023. Foram simuladas 42 horas a partir das 6h00 da manhã do dia 28/06/2022 (encerramento às 23h59 do dia 29/06/2022). Os dados foram coletados para as 14h00 do segundo dia de simulação.

Foram registrados o número total de células e o tempo de simulação para cada modelo. Cabe considerar que as duas simulações maiores (área de 920x480m com malhas de 2m e 3m) não foram integralmente realizadas, sendo a primeira finalizada sem resultados e a segunda com resultados até as 14h00 do dia 29, o que possibilitou sua inclusão no trabalho. A simulação gerou, dentre outros resultados, a Temperatura Potencial do Ar (TPA em °C), a Temperatura Radiante Média (TRM em °C), a Umidade Relativa (UR em %), a Velocidade do Ar (m/s) e a Direção do Vento (°) para cada ponto da malha, o que permitiu a geração de mapas no módulo Leonardo. Os mapas foram confeccionados utilizando a primeira célula acima do terreno (com altura equivalente a 1,5m). Foram analisados os valores máximos, mínimos e médios, bem como o desvio padrão dos resultados para cada variável obtida no receptor. Também foram comparados os mapas com a distribuição da TPA e da TRM ao nível do pedestre. Para a análise da transposição das informações vetoriais para a malha estruturada foi considerado o fator de área construída (FAC - volume edificado total dividido pela área do terreno), calculado pelo QGIS e para cada modelo com malha estruturada produzido no ENVI-met.

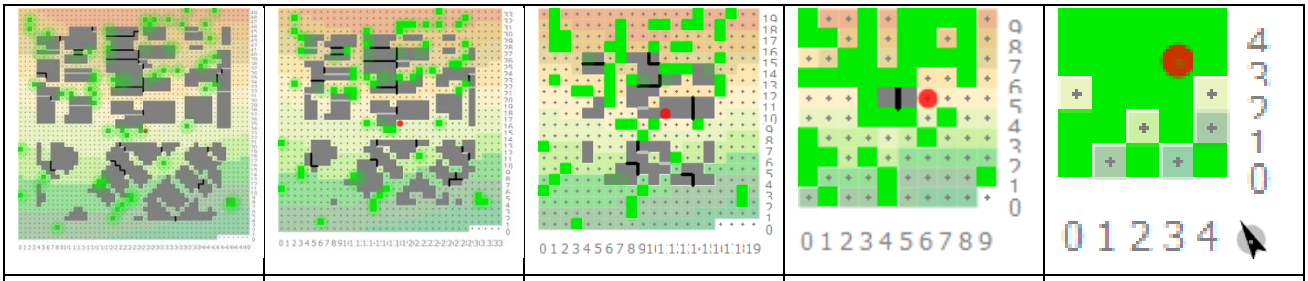
4. RESULTADOS

4.1. Análise da transposição das informações vetoriais para a malha estruturada

O processo de transposição da base de dados georreferenciada para a malha estruturada de forma semiautomatizada acelera o trabalho de modelagem em relação às versões anteriores. O módulo Monde permite alterar os parâmetros das células e a forma e o tamanho das áreas de estudo para gerar novos arquivos para simulação, permitindo a realização de testes sem que seja necessário reiniciar o processo.

No entanto, observou-se que o processo deve ser monitorado pelo pesquisador, já que a criação de células com ocupações homogêneas pode gerar várias distorções. Esses problemas são mais evidentes na medida em que se aumenta a dimensão de cada célula. Se as células forem muito maiores que as vias e

fachadas, a transposição pode eliminar elementos importantes para o balanço energético urbano, como ruas e edifícios inteiros. Também se coloca a questão de que áreas com ocupação muito heterogênea em termos de alturas, como é o caso de grande parte das cidades brasileiras, podem ser mal representadas. O algoritmo para transposição não é explícito em suas decisões, não sendo possível determinar *a priori* como ele considerará a ocupação de uma célula. Na Figura 2 podemos ver a transposição do modelo vetorial para malhas estruturadas de diferentes resoluções, observando a área de 100x100 metros com resolução progressivamente mais grosseira.



Célula de 2m	Célula de 3m	Célula de 5m	Célula de 10m	Célula de 20m

Figura 2 - Área de 100 x 100 m com diferentes resoluções de malha.

Observou-se uma redução progressiva da área ocupada, com redução no número de edifícios e aumento da área vegetada. Como a topografia também se encaixa na malha, ela também é simplificada com as alterações. A distorção na ocupação tem impactos diretos na obstrução do espaço urbano tanto para a radiação como para o vento, bem como na alteração da exposição de pontos específicos. Observou-se também um deslocamento em direção ao noroeste do receptor (representado na figura pelo ponto vermelho) o que influencia os resultados obtidos.

Também deve se considerar que as condições térmicas de um ambiente são fortemente afetadas pelo seu entorno, sendo importante considerar o efeito do aumento da área de estudo. Na Figura 3 é apresentado o efeito de expansão da área, utilizando-se a mesma malha (3m).



Área de 100 x 100m	Área de 200 x 200m	Área de 400 x 400m	Área de 920 x 480m

Figura 3 - Diferentes recortes de área com malhas de 3m de resolução.

Observa-se que na área menor, a maior parte das ruas e edifícios acompanha a orientação da malha, com a rotação de 30°. Na medida em que a área se expande, outras orientações surgem, criando serrilhamentos nas porções sul e oeste do bairro.

Em relação à correspondência entre o modelo vetorial e o modelo de simulação na malha estruturada, observou-se que o FAC foi influenciado pela estrutura da malha, com uma tendência de redução em relação ao valor pelo QGIS a partir dos arquivos *shapefile*.

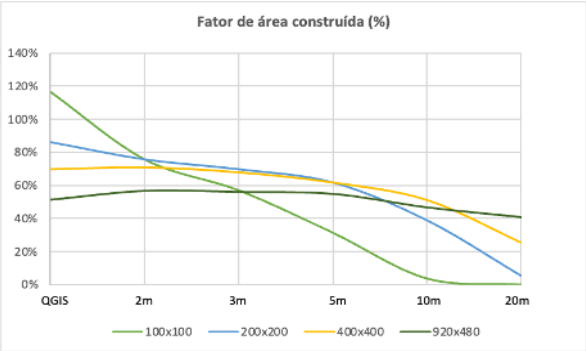


Figura 4 – FAC para cada tamanho e resolução do modelo. A referência são os valores calculados no QGIS.

Observa-se na Figura 4 que esse impacto foi maior para áreas de estudo com dimensões menores e para células com dimensões maiores. Em geral, a transposição era mais estável (independente do tamanho da célula) para áreas simuladas maiores. A malha 400x400m apresenta uma boa representação do parque edificado com células com dimensão entre 2m e 5m, sendo a reprodução da densidade construtiva da malha de 920x480m praticamente independente da resolução da malha.

4.2. Tempo de computação, limitações e viabilidade

Observou-se uma correlação estreita (R^2 = 0,998) e quadrática entre o número de células e o tempo de simulação, lembrando que a pesquisa foi desenvolvida com a licença estudantil, que permite processamento em apenas um núcleo. A simulação mais longa completada (400 x 400 m; 2m de célula) demorou cerca de 20 dias para terminar. A expectativa fornecida pelo próprio programa para conclusão da maior simulação (920 x 480 m; 2m de célula) foi de cerca de 3 (três) meses.

Considerando-se que o número de células na vertical foi constante, observou-se que acima de 40.000 células em 2D (1.600.000 em 3D), o uso de licenças que permitem a simulação em um único núcleo de processamento torna-se inviável.

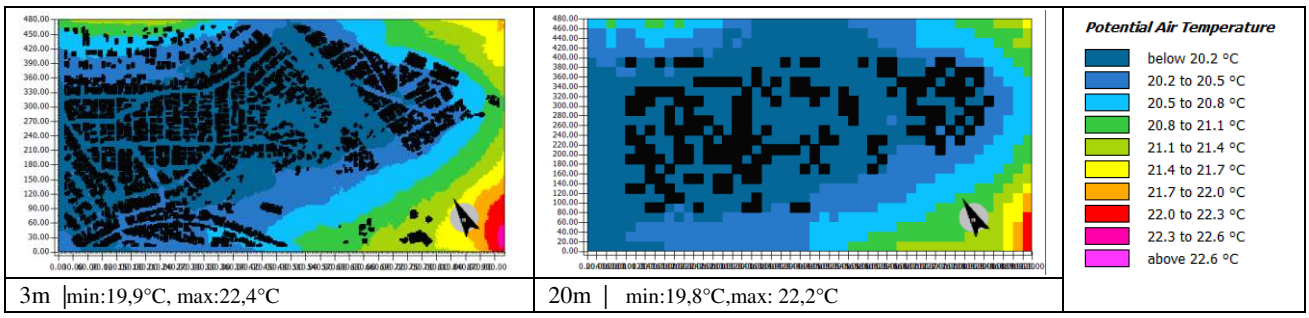
4.3. Análise comparativa dos resultados obtidos

A comparação entre os resultados do receptor nos vários modelos indica uma variação pequena na TPA e na UR, mas altas variações nos resultados vento e TRM (Tabela 2). Essas últimas variáveis são mais sensíveis à geometria local e podem sofrer grandes alterações mesmo com mudanças relativamente pequenas. No caso da TRM, chama a atenção que os valores se concentraram em duas grandes faixas, o que indica que em alguns modelos o receptor ficou exposto ao sol e em outros não, seja devido a mudanças na geometria, seja em função do seu deslocamento para adequação à malha. No entanto, o modelo de temperaturas superficiais pareceu menos sensível à malha, já que quando o receptor era sombreado, a variação da TRM era menor.

Tabela 2 - Resultados estatísticos dos receptores para as 14h, indicando valores máximos, mínimos e médios, com desvio padrão.

	TPA (ºC)	**TMR (ºC)**	**UR (%)**	**Vel. Ar (m/s)**	**Dir. Vento (º)**
Máximo	21.7	47.6	39.5	1.22	129
Mínimo	20.0	20.3	38.2	0.01	33
Média	20.8	30.3	38.9	0.54	104
Desvio Padrão	0.6	8.9	0.4	0.36	25
Desv. Pad. (%)	3%	29%	1%	66%	24%

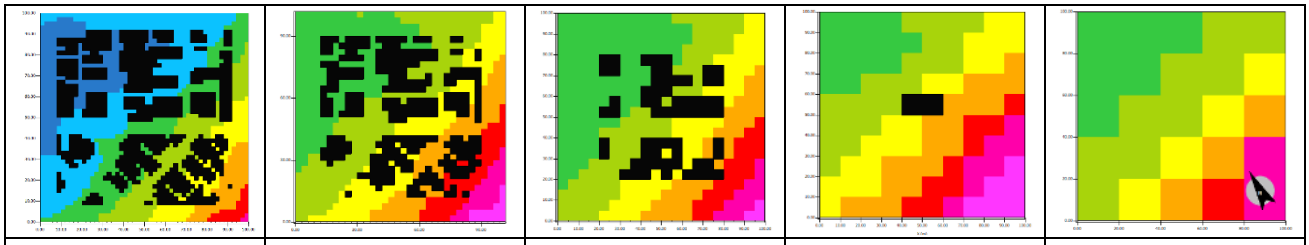
A distribuição espacial das variáveis é dada pelos mapas produzidos no módulo Leonardo. A Figura 5 indica o resultado de TPA para a simulação de maior extensão às 14h, com resolução de 3m e 20m. Em relação à distribuição geral, observou-se que a TPA manteve o padrão de distribuição geral independentemente da malha, mas que a precisão na avaliação de condições localizadas pode sofrer grandes alterações com a resolução. Observou-se que a malha urbana apresentou de forma geral uma TPA mais baixa do que seu entorno rural, o que contradiz a intuição de que a impermeabilização e aumento da absorção radiativa aumentariam a temperatura da área. Na verdade, o que a simulação indica é que a capacidade térmica urbana contribuiria para o resfriamento da área durante o período da tarde, considerando que a temperatura de entrada de vento era de 24,4ºC para o horário e a TPA na área mais adensada estava em torno de 20ºC.



3m | min:19,9°C, max:22,4°C	20m | min:19,8°C,max: 22,2°C

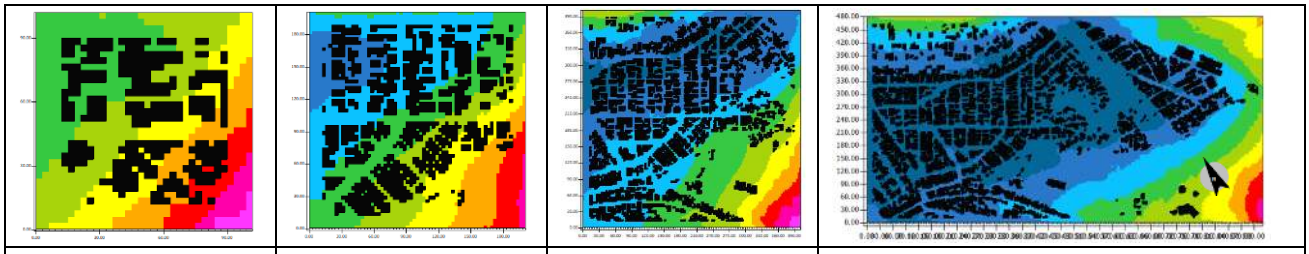
Figura 5 - Resultados de TPA para 920x480m com diferentes resoluções. A escala de cores é comum aos mapas com essa variável.

O fenômeno de resfriamento é comum entre as simulações realizadas, sendo sua intensidade dependente não da distância, mas do número de células existentes a barlavento do ponto de interesse (Figura 6 e Figura 7). Assim, seria necessária a calibração de outros parâmetros do modelo para corrigir essa condição, não sendo suficiente a reconfiguração da malha.



2m | min:20,8°C,max:23°C	3m | min:20,8°C,max:22,9°C	5m | min: 20,8°C, max: 22,7°C	10m | min: 21°C, max: 23,3°C	20m | min: 20,9°C, max: 22,5°C

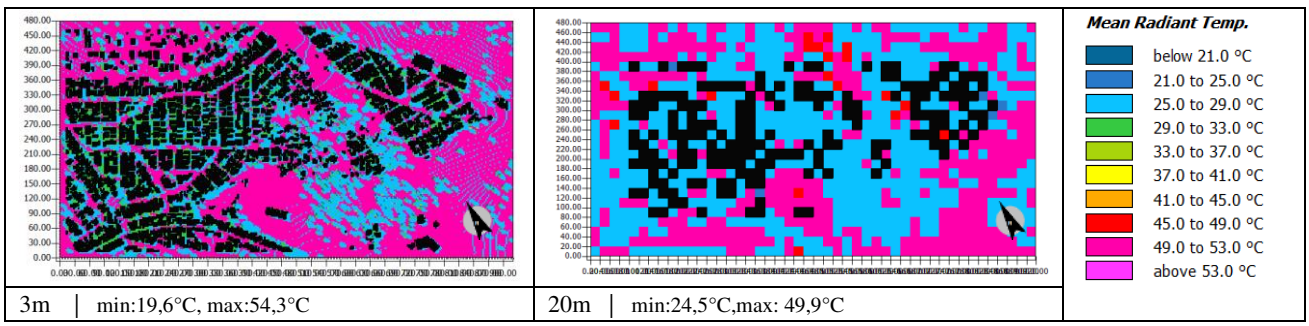
Figura 6 - Resultados de TPA para 100x100m com diferentes resoluções. A escala de cores é comum aos mapas com essa variável.



100x100m | min:20,8°C,max:22,9°C	200x200m | min:20,4°C,max:22,4°C	400x400m | min:20,1°C,max:23,0°C	920x480m | min:19,9°C, max:22,4°C

Figura 7 - Resultados de TPA para as áreas com resolução de 3m. A escala de cores é comum aos mapas com essa variável.

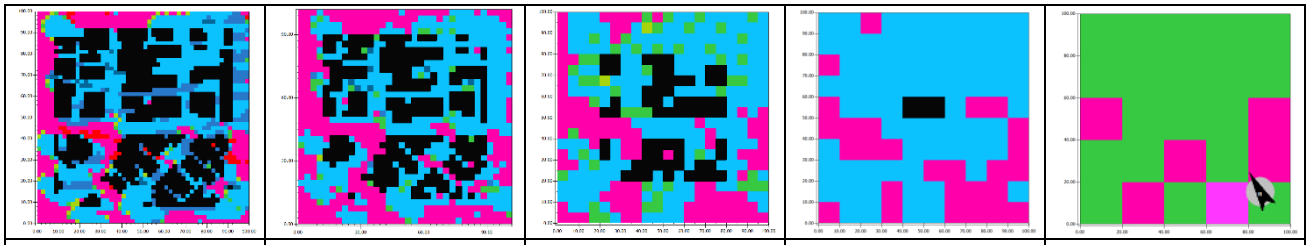
No caso da TRM, a distribuição foi irregular, seguindo sombreamento dos pontos. Os resultados se distribuíram em dois grandes grupos, um sombreado, com TRM entre 21ºC e 25ºC, e outro exposto ao sol, com TRM entre 49ºC e 55ºC. O aumento da dimensão das células reduziu a ocupação, mas aumentou a área vegetada, criando mais superfícies sombreadas e reduzindo a TRM no nível do pedestre. Na Figura 8 observa-se que o efeito do sombreamento dos prédios na TRM é mais visível na simulação de maior resolução, bem como a própria frequência de ocorrência.



3m | min:19,6°C, max:54,3°C	20m | min:24,5°C,max: 49,9°C

Figura 8 - Resultados de TRM para 920x480m com diferentes resoluções. A escala de cores é comum aos mapas com essa variável.

Este efeito pode ser observado mais claramente na comparação entre os diversos tamanhos de célula da área de 100 x 100 m, mostradas na Figura 9. São percebidas alterações mesmo entre as malhas de 2 e 3 metros. Na menor resolução, as diferenças espaciais praticamente desaparecem.



2m |	3m |	5m |	10m |	20m |
min:20,3°C,max:51,9°C	min:20,4°C,max:52,6,9°C	min: 25,5°C, max: 52,9°C	min: 25,5°C, max: 50,4°C	min: 29,8°C, max: 53°C

Figura 9 - Resultados de TRM para 100x100m com diferentes resoluções. A escala de cores é comum aos mapas com essa variável.

5. CONCLUSÕES

O trabalho buscou analisar e discutir o impacto da configuração de malha no ENVI-met nos resultados de simulação, a partir do estudo de caso no Conjunto Paulo VI. Ressalta-se que foi avaliada apenas a consistência interna do programa.

Embora a dimensão da malha tenha afetado todos os resultados obtidos, observou-se que as principais alterações ocorreram nos parâmetros mais sensíveis à geometria (vento e radiação). No caso da radiação, o fator determinante foi a exposição do ponto de análise ao sol. Quando se avalia o conjunto dos dados, e não o receptor, as variações são menores, principalmente para modelos com células entre 2m e 5m. Na temperatura potencial do ar e na umidade relativa, os impactos da escolha da malha são menores. Como índices de conforto urbano como o PET (*Physiological Equivalent Temperature*) são dependentes da TRM e do movimento do ar, sua variação também deve ser significativa.

O conjunto de análises permite realizar indicações para a elaboração de malhas de simulação em estudos futuros. Observa-se que as conclusões do trabalho se aplicam apenas para licenças que permitam apenas a utilização de um núcleo de processamento e para áreas com o mesmo tipo de ocupação do estudo de caso, embora as diretrizes possam e devam ser testadas em diferentes contextos. Desse modo, recomenda-se: 1. utilização do módulo Monde como ponto de partida para a modelagem, mas a verificação da área de estudo produzida no módulo Space, observando especialmente a reprodução da densidade construtiva original; 2. orientação da malha nas direções predominantes das ruas e fachadas, rotacionando a área de estudo caso necessário; 3. simulação de áreas com maior extensão, atentando para o limite de aproximadamente 1.500.000 células no total (para simulações com duração inferior a uma semana, o limite deve ser de cerca de 750.000 células); 4. para áreas de maior extensão, células entre 2m e 5m de lado ofereceram resultados suficientemente semelhantes. Em áreas menores, a célula deve diminuir proporcionalmente. Espera-se que essas diretrizes e metodologia de análise possam contribuir para que futuras simulações representem melhor a realidade e obtenham, assim, resultados mais precisos e consistentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON JR., J. **Computational Fluid Dynamics.** Nova York: McGraw-Hill, 1995.

BELO HORIZONTE. **Análise de vulnerabilidades às mudanças climáticas do município de Belo Horizonte**: Relatório Final. Belo Horizonte: WayCarbon. 2016. Disponível em: http://bhgeo.pbh.gov.br/

_____ . **BHMap**. Belo Horizonte: PBH. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/. Acesso em: 2022-10-15.

_____ . PRODABEL. **Cadastro Técnico Municipal (CTM).** Belo Horizonte: PBH, Fls.5760,5761,5860,5861, 2015. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo/acervo-cartografico. Acesso em: 2022-10-15.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício:** procedimentos para quantificação. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.16.2006.tde-26102010-144530. Acesso em: 2023-04-12.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Matemática) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007.

HUTTNER. S., **Further Development and Application of the 3D Microclimate Simulation Envi-met**. Tese (Doutorado em Ciências) - FachbereichChemie, PharmazieundGeowissenschaften ‚Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, 2012.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil 1991-2020**. 2022. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais. Acesso em: 2022-11-20.

_____. **Tabela com dados das estações**: Belo Horizonte (Pampulha) A521 2022. Disponível em: https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/. Acesso em: 2022-11-20

MAGALHÃES, D. M. **Uso de drones como suporte ao planejamento territorial**: da coleta de dados à geovisualização. 2021. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/36455. Acessoem: 2023-04-12.

OPEN TOPOGRAPHY. **High-Resolution Topography Data and Tools**. 2023. Available at https://opentopography.org/. Accessed in 2022-11-13.

SACK, J.R.; URRUTIA, J. **Handbook of Computational Geometry**. Amsterdam: Elsevier, 2000.

SHINZATO, P.; SIMON, H.; DUARTE, D.; BRUSE, M. Calibration process and parametrization of tropical plants using ENVI-met V4 - Sao Paulo case study. **Architectural Science Review**, v. 62, n. 2, p. 112-125, 2019.

SILVA, M. **Vegetação e o microclima urbano em área de ocupação consolidada:** aplicação do modelo ENVI-met ao Conjunto Confisco em Belo Horizonte, MG, 2021. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SIMON, H. **Modeling urban microclimate** : development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. Tese (Doutorado em Ciências) - FachbereichChemie, PharmazieundGeowissenschaften ,Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, 2016.

UNIVERSITY OF WYOMING, Dep.of Atmos. Science. **http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html,** 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES e ao CNPq pela contribuição para a realização desta pesquisa. Somos gratos também ao Institute for Climateand Energy Strategies (INKEK), na pessoa de seu Chairman Lutz Katzschner e de seu CEO Sebastian Kupski, pelo apoio nas simulações.