

Calibração do ENVI-met para simulações termodinâmicas de espaços urbanos abertos em dias quentes

ENVI-met calibration for thermodynamic simulations of open urban spaces during hot days

Gabriel Bonansea de Alencar Novaes 
Leonardo Marques Monteiro 

Resumo

Este trabalho apresenta o procedimento para realizar a calibração de um modelo climático do ENVI-met, com suas etapas metodológicas, para a avaliação de espaços urbanos abertos de porções da cidade de São Paulo na condição de um dia quente e seco, marcado por altas temperaturas e incidência solar, baixa umidade e baixa nebulosidade. O processo de calibração foi realizado por meio de sucessivas simulações baseadas em dados microclimáticos de medições realizadas no local representado nas simulações, além de dados das estações meteorológicas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP) e do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas, e seus resultados foram avaliados comparando-se as principais variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento e radiação) entre simulação e medições. O modelo calibrado apresentou aderência às medições realizadas, dentro dos limites de tolerância esperados, e no processo de calibração foi possível evidenciar as vantagens do uso do ENVI-met, sua adequação e adaptabilidade para modelos representativos de São Paulo, e as principais dificuldades do processo de simulação, sobretudo em função das grandes necessidades de capacidade e tempo de computação para o processamento das simulações.

Palavras-chave: Simulação térmica. Condições térmicas em espaços urbanos abertos. Microclima urbano.

Abstract

This article presents the procedure to perform the calibration of an ENVI-met climate model, with its methodological steps, for the evaluation of open urban spaces in portions of the city of São Paulo in the condition of a hot and dry day, marked by high temperatures, and solar incidence, low humidity and low cloudiness. The calibration process was carried out through successive simulations based on microclimatic data from measurements performed at the location represented in the simulations, in addition to data from the Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP) meteorological stations and from the Congonhas Airport climate file, and its results were evaluated by comparing the main microclimatic variables (air temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, and radiation) between simulation and measurements. The calibrated model presented adherence to the measurements, within the expected tolerance limits and, in the calibration process, it was possible to highlight the advantages of using the ENVI-met, its suitability and adaptability for representative models of São Paulo, and also the main difficulties of the simulation process, mainly due to the significant needs of computation capacity and time for the processing of the simulations.

¹Gabriel Bonansea de Alencar Novaes

¹Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

²Leonardo Marques Monteiro

²Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 14/12/21
Aceito em 28/03/22

Keywords: Thermal simulation. Thermal conditions in open urban spaces. Urban microclimate.

Introdução

O uso de simulações termodinâmicas para avaliar as condições térmicas de edifícios e áreas urbanas vem ganhando espaço na pesquisa científica e na avaliação de projetos (BARBOSA, 2018). Nesse contexto, o ENVI-met realiza simulações das condições microclimáticas de espaços urbanos abertos usando mecânica dos fluidos e termodinâmica (BRUSE; FLEER, 1998) através da aplicação, em cada *grid* para cada intervalo de tempo, de cálculos de balanço térmico que consideram parâmetros físicos da atmosfera, das superfícies, dos solos, das vegetações e das edificações, levando em conta os fluxos de calor latente e sensível entre todos esses elementos (ROSHEIDAT; HOFFMAN; BRYAN, 2008).

O software usa um modelo tridimensional para simular as interações entre edifícios, solo, vegetação e atmosfera, e seus cálculos incluem parâmetros ambientais como radiações direta, difusa e de onda longa e os sombreamentos ocasionados pelas edificações e vegetações. Seu modelo inclui fluxos e turbulências dos ventos entre edifícios e trocas de calor e vapor entre os elementos do meio urbano (SHINZATO, 2014; BRANCO, 2009; BARBOSA, 2018).

Assim, o ENVI-met possibilita analisar a interação entre uma porção da cidade e microclima, verificando as condições térmicas resultantes na área estudada que são ocasionadas pelas trocas de calor entre ar, edifícios, vegetação e solo. Por essa razão, a ferramenta já foi utilizada em diversas pesquisas com foco em análises de condições térmicas em espaços urbanos abertos, pois, através da simulação de distintas composições físicas dos ambientes urbanos, possibilita estudar, para uma mesma climatologia, diferentes soluções de geometria da cidade.

Para tal, a modelagem da geometria urbana e as características dos elementos do espaço urbano são introduzidas pelo usuário, assim como características físicas e geométricas de edificações, solo, corpos d'água, superfícies e vegetação. Da mesma maneira, o usuário fornece os dados climáticos da área de estudo, e, para tanto, entre as alternativas disponíveis para a inserção dos dados climáticos, existe a ferramenta do *full forcing*, com a qual o usuário pode introduzir dados de arquivos climáticos, estações meteorológicas e/ou medições a serem adotados pelo programa nas bordas limítrofes do modelo.

Com a possibilidade de introduzir dados climáticos de qualquer localidade, o ENVI-met se torna flexível e adaptável para praticamente qualquer região. Cabe à própria ferramenta a aplicação do modelo de cálculo, e cabe ao usuário a seleção e o controle de qualidade dos dados climáticos que são introduzidos ao programa.

Com isso, a correta inserção de dados climáticos ao programa, o rigor técnico na coleta desses dados e a avaliação da aderência dos resultados da simulação aos dados introduzidos são essenciais para o uso adequado da ferramenta, uma vez que a introdução de dados de baixa confiabilidade ou a falha na configuração do modelo podem gerar resultados de simulações que não sejam fidedignos à realidade. Por isso, há a necessidade de ajustar o modelo climático para a área de estudo, com uma simulação de ajuste que deve preceder à simulação principal, e uma verificação de seus resultados para que o modelo não seja utilizado sem o devido controle, o que reduziria sua confiabilidade (LEAL, 2018; SCHMITZ, 2014).

Esse processo de introdução de dados climáticos e de avaliação da aderência dos resultados calculados pelo modelo de simulação aos dados reais que foram introduzidos é chamado de calibração, e seu resultado é um arquivo climático que pode ser utilizado em diferentes variações do ambiente urbano submetidos às mesmas condições microclimáticas.

De acordo com Leal (2018), a calibração do modelo climático é crucial para determinar sua capacidade de reprodução do contexto simulado de modo condizente com a realidade. Uma simulação realizada com modelo climático que não tenha passado por calibração pode gerar resultados que não sejam fidedignos com a realidade do microclima da área de estudo.

O processo de calibração pode ser desenvolvido mediante procedimento de simulações em que os dados de entrada são aqueles coletados em medições e a simulação representa o local de coleta das medições. Os resultados das simulações são contrapostos com os valores reais medidos, verificando sua aderência por meio de análises estatísticas e identificando as necessidades de eventuais adequações dos parâmetros de entrada do modelo para que os resultados da simulação sejam fidedignos à realidade (LEAL, 2018).

Assim, este trabalho apresenta o processo de calibração de um modelo climático do ENVI-met para a avaliação de espaços urbanos abertos de São Paulo durante dias quentes, elaborado a partir de medições de variáveis microclimáticas em um ambiente da cidade.

O objetivo deste trabalho foi apresentar o procedimento para realizar a calibração de um modelo climático do ENVI-met, com suas etapas metodológicas, para a avaliação de espaços urbanos abertos de porções da cidade de São Paulo na condição de um dia quente e seco.

Referencial teórico

O ENVI-met é uma ferramenta eficiente para simular o desempenho térmico em áreas urbanas (BARBOSA, 2018), e seu cálculo abrange as trocas de calor por condução, radiação, convecção e evaporação, assim como os efeitos dos ventos e da geometria urbana e sua influência mútua com as demais condições microclimáticas (SHINZATO, 2014). Por essa razão, o programa é usualmente utilizado para representar uma situação real ou projetada de um espaço urbano a partir de características que incluem parâmetros físicos, dimensionais, geográficos, meteorológicos e climáticos.

Sua simulação se constitui em cálculos parametrizados das condições térmicas em cada *grid* do modelo (unidade geométrica mínima associada a distâncias horizontais e verticais) em todas as direções e a cada intervalo temporal definido, calculado com base no fornecimento de um arquivo climático e de informações do local (ROSHEIDAT; HOFFMAN; BRYAN, 2008).

Para tal, o software utiliza valores de entrada que são inseridos pelo usuário para dados a respeito da configuração tanto geométrica quanto física dos edifícios, das características da vegetação, dos tipos de solos e superfícies, bem como da localização e das condições climáticas, fazendo com que cada modelo seja associado a informações próprias de situação geográfica, coordenadas e altitude (ROSHEIDAT; HOFFMAN; BRYAN, 2008).

Além disso, os *outputs* da simulação do ENVI-met contêm os resultados de variáveis microclimáticas para cada *grid* do modelo em cada intervalo de tempo com informações distribuídas ou em pontos específicos (BARBOSA, 2018), variando conforme altura e plano de análise em relação ao solo (ROSHEIDAT; HOFFMAN; BRYAN, 2008).

Por conta disso, o processo de modelagem do ENVI-met se mostra adequado à avaliação climática na escala de pequenas áreas do ambiente urbano, pois permite a inclusão de dados climáticos locais para qualquer região analisada e a definição das características técnicas de todos os elementos inseridos no modelo e de suas superfícies.

No entanto, justamente a flexibilidade da modelagem climática traz uma preocupação: os dados de entrada devem ter respaldo em fontes confiáveis ou devem ser gerados pelo próprio usuário com rigor técnico em sua obtenção. Por exemplo, dados de albedo, transmitância, absortância e rugosidade de componentes construtivos e do solo podem ser obtidos em bibliografia consolidada e em levantamento das características da área de estudo.

Para dados climatológicos, de acordo com Sharmin, Steemers e Matzarakis (2017), torna-se necessário usar informações meteorológicas acrescidas das características das áreas de estudo para produzir resultados confiáveis, e o arquivo climático, configurado e calibrado no próprio ENVI-met, pode ter seus dados obtidos em estações meteorológicas, que podem ser complementados e calibrados por dados de medições microclimáticas realizadas na mesma localização do modelo estudado.

Uma das alternativas para a calibração de um modelo climático no ENVI-met a partir da inserção de dados de medições microclimáticas é o uso da ferramenta *full forcing*, através da qual o usuário pode introduzir dados microclimáticos a serem utilizados pelo modelo de cálculo nas bordas externas do modelo de simulação a cada intervalo de tempo da análise. Gusson (2014) comenta que a ferramenta *full forcing* permite a inserção de dados como temperatura do ar, umidade relativa, radiação, velocidade e direção do vento e/ou nebulosidade, o que permite uma aderência muito melhor entre os dados medidos e os simulados.

Esse processo de calibração traz uma significativa maior adesão do modelo simulado aos dados reais medidos no local, e com essa função o ENVI-met permite que o modelo climático seja calibrado para replicar as condições climáticas de determinado local na avaliação de diferentes modelos geométricos do espaço urbano aberto.

O processo de calibração do modelo climático, portanto, é uma etapa crucial para um estudo que utiliza o ENVI-met, para introduzir ao software os dados microclimáticos de um fragmento de cidade sob determinada condição microclimática local que não é necessariamente idêntica às condições gerais informadas nos arquivos climáticos disponibilizados publicamente para a cidade (ex.: arquivos climáticos do Inmet) ou às condições de medição de uma estação meteorológica devido à distância ou à diferença de aspecto morfológico entre o local da área de estudo e o local da estação.

Com essa função, o usuário pode calibrar um modelo climático específico para um local e para uma condição microclimática. A calibração permite ainda que o usuário garanta que o modelo climático, configurado com as medições introduzidas como dados de entrada, seja efetivamente confiável para gerar resultados condizentes com a realidade local.

O ENVI-met já foi aplicado em pesquisas em diversos países e, no Brasil, em diversas cidades, como São Paulo, Teresina, Cuiabá, Curitiba, Brasília e Bauru (BARBOSA, 2018). Alguns exemplos brasileiros de trabalhos que utilizaram o software são o estudo dos impactos da vegetação no microclima urbano (SHINZATO, 2014), o estudo do efeito da densidade urbana em suas condições microclimáticas (GUSSON, 2014), o estudo de estratégias de melhoria do ambiente térmico diurno em situação de verão em São Paulo (MINELLA; HONJO; KRÜGER, 2012), o estudo dos impactos da geometria urbana no microclima (MINELLA; KRÜGER, 2015) e o estudo dos impactos da morfologia urbana nas condições microclimáticas de áreas urbanas consolidadas em São Paulo (NOVAES, 2020), todos com processo de calibração do modelo climático previamente às simulações de avaliação.

Gusson (2014) realizou medições das condições climáticas na Brasilândia e na Bela Vista, em São Paulo, e com os dados medidos em campo foram feitas simulações de calibração do modelo do ENVI-met para posteriores simulações de diferentes cenários paramétricos de geometria urbana submetidos ao modelo climático calibrado. A calibração foi feita por meio da comparação dos dados reais das medições com os resultados das simulações utilizando os dados das medições como *input* do *simple forcing*. O modelo apresentou resultados próximos aos medidos, com exceção de algumas discrepâncias na curva de radiação solar (GUSSON, 2014).

Maciel (2014), por sua vez, traz um estudo visando à mitigação de ilhas de calor urbanas em Cuiabá, MT, em que foi necessária a calibração do modelo do ENVI-met. A metodologia de calibração foi a mesma, pela comparação dos dados de temperatura do ar e umidade relativa entre medições e simulação. Os dados reais foram medidos por estação fixa da universidade, enquanto os dados gerados pelo software foram registrados por meio de receptores dispostos em situação geométrica representativa da situação real edificada (MACIEL, 2014).

Já Leal (2018), em um trabalho para Vitória, ES, traz um estudo estatístico para identificar as curvas de calibração e quantificar as diferenças entre os valores reais medidos em campo e os valores simulados no modelo do ENVI-met. As simulações de calibração utilizaram dados de entrada obtidos em estações meteorológicas e aplicaram-se métodos estatísticos de avaliação da acurácia dos modelos de simulação, como o índice de destreza Dpielke e o Índice de Concordância (IC), o desvio padrão de valores simulados e o desvio padrão dos valores observados em campo, o erro absoluto médio (MAE), o erro quadrático médio (MSE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e os coeficientes de correlação de Pearson (r) e de determinação (R^2).

Em mais um exemplo, Shinzato (2014), em um estudo dos impactos da vegetação no microclima urbano da região do Parque Trianon em São Paulo, SP, também teve de realizar a calibração do modelo do ENVI-met. O processo de simulação nessa fase de calibração incluiu a modelagem de dados microclimáticos conforme medições realizadas em campo. De acordo com a autora, a maior dificuldade na fase de calibração foi encontrar dados representativos do solo e do asfalto adequados ao local de estudo. Outras adequações realizadas na calibração foram os ajustes nas curvas de radiação solar e da cobertura de nuvens.

Assim, diferentes estudos indicam que é necessária a calibração do modelo do ENVI-met e que as medições de campo são fundamentais, principalmente na aplicação em estudos voltados para áreas com clima quente e úmido, em que se observou a dificuldade do modelo em reproduzir amplitudes térmicas diárias (LEAL, 2018). Autores apontam dificuldades a serem solucionadas ainda na simulação de calibração, como divergências entre os dados das medições e os resultados das simulações (GUSSON, 2014), e é importante o cuidado com mudanças nos dados de entrada do modelo, pois elas podem gerar resultados equivocados, e com os níveis de detalhamento necessários, em função dos tempos necessários para processar as simulações (SHINZATO, 2014).

Método

A calibração do ENVI-met foi feita por meio de sucessivas simulações termodinâmicas com modelo climático baseado em dados obtidos em medições microclimáticas realizadas no mesmo local representado nas simulações, complementadas por dados do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas e de medições das estações meteorológicas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP). Foram avaliadas 21 simulações de calibração de um período de 36 h (escolhidas no período das medições), com pequenos ajustes de configuração, no modelo geométrico e no modelo climático. Essas análises foram feitas através da comparação das principais variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento e radiação) entre as medições e os resultados das simulações obtidos no receptor alocado no mesmo ponto onde foram realizadas as medições. Para este estudo foi utilizado o software ENVI-met versão 4.4.3 Summer 19 com a licença Science and Education.

Medições in loco de dados microclimáticos e caracterização da área de estudo

As medições de dados microclimáticos foram realizadas na cobertura de um sobrado no bairro Mirandópolis, na Zona Sul de São Paulo (conforme a Figura 1), ao longo de um período de 40 dias, entre os dias 6/12/2018 e 14/1/2019. São Paulo é caracterizada por um clima tropical de altitude, com verões medianamente quentes e úmidos, com frequentes “chuvas de verão”, mas nos últimos anos, com a mudança climática global, tem experimentado verões cada vez mais quentes e secos, com longos períodos de estiagem, baixa nebulosidade e forte incidência solar.

Ainda que na cidade de São Paulo o verão seja caracterizado por frequentes precipitações, o período de medições de 40 dias, acompanhado de um registro diário das condições meteorológicas, permitiu escolher um período de avaliação com altas temperaturas, baixa umidade, condições ensolaradas e baixa nebulosidade, condições que foram mantidas depois de um período de 4 dias consecutivos.

Os fatores que levaram à escolha do local de medições foram a possibilidade de permanência do equipamento por longo período em local aberto e descoberto com visão desobstruída de céu, a minimização de interferências de sombreamento por objetos do entorno sobre o equipamento de elementos próximos que pudessem impactar nas medições, o acesso controlado, a segurança contra intrusões e a proteção contra riscos naturais.

Como fica evidente nas Figuras 2 e 3, a área de estudo é ocupada principalmente por casas e sobrados geminados com quintal nos fundos. A zona climática local que melhor descreve a área de estudo é a LCZ 3E, correspondente à ocupação compacta de baixa elevação (alta taxa de ocupação com casas e sobrados de baixa altura, próximos ou geminados entre si) e condição de solo pavimentado com pouca ou nenhuma presença de vegetação arbórea.

Os edifícios mais próximos se localizavam predominantemente no arco sul-sudoeste do ponto de medições, com 8 a 10 pavimentos, e a uma distância razoavelmente grande, superior a 60 m no caso do edifício mais próximo, e superior a 150 m nos demais. Sendo assim, não há sombreamento no ponto de medição por nenhum dos edifícios do entorno. Além disso, todas as árvores próximas ao ponto de medição têm altura inferior ou semelhante à do ponto de colocação dos equipamentos, e a única árvore alta próxima está localizada em posição de baixo impacto com relação aos pontos de medição.

Para a coleta de dados de velocidade do ar (*Var*), direção do vento, radiação solar global (*Ig*), temperatura de globo (*Tg*), temperatura do ar (*Tar*), umidade relativa (*UR*), em intervalos de 10 min, as medições comportaram 2 Hobos e 1 Estação Científica *Campbell*, equipados com 3 termo-higrômetros, 3 termômetros de globo, 1 anemômetro ultrassônico e 1 piranômetro em dois subpontos de medição externos totalmente descobertos.

Figura 1 - Foto de satélite de São Paulo destacando o ponto de medições/simulação e as estações meteorológicas Cidade Universitária e Água Funda



Fonte: adaptada de Google Earth (2021).

Figura 2 - Foto de satélite do entorno do ponto de medições e simulação



Fonte: adaptada de Google Earth (2021).

Figura 3 - Vista aérea do entorno do ponto de medições



A Figura 4 ilustra o ponto inferior de medições, na cobertura de uma edícula de 1 pavimento, enclausurado por paredes laterais, protegido do vento e com visão de céu parcialmente obstruída. Os seguintes sensores foram instalados nesse ponto: 2 termo-higrômetros e 2 termômetros de globo, a aproximadamente 4,5 m do solo. Os dados desse ponto não foram utilizados na calibração do modelo climático, mas somente utilizados a título de análise comparativa com os dados coletados na laje de cobertura.

A Figura 5 ilustra o ponto principal de medições, localizado na laje de cobertura do sobrado de 2 pavimentos, acima da altura das demais casas do entorno, em local totalmente desobstruído, tanto vertical quanto lateralmente, praticamente sem nenhuma obstrução de céu, exposto assim à insolação e ao vento. No ponto da cobertura foram instalados os seguintes sensores: 1 termo-higrômetro, 1 termômetro de globo, 1 piranômetro (em local desobstruído adiante ao norte verdadeiro em relação aos demais equipamentos) e 1 anemômetro digital ultrassônico (em local desobstruído acima de todos os outros equipamentos), a aproximadamente 7,5 m do solo. Esse ponto foi utilizado para a coleta de dados utilizados para a calibração

do modelo de simulação. Os equipamentos foram posicionados a 1,5 m do piso e sem nenhum muro, parede ou obstrução vertical próximo, evitando interferências de superfícies sobre as medições.

A colocação dos equipamentos foi realizada seguindo as principais normativas e boas práticas para medições, posicionando termômetro de globo e termo-higrômetro a 1,50 m de altura com relação ao piso (laje), e o anemômetro um pouco acima, desobstruído vertical e lateralmente. O piranômetro (cujos dados não foram utilizados na calibração) foi colocado junto ao piso. Como sua medição é hemisférica, coletando dados somente da parte superior, foi posicionado exatamente a norte dos demais equipamentos, para não haver nenhum tipo de sombreamento. Além disso, como o modelo geométrico da simulação de calibração foi constituído de forma a representar a situação real do ponto onde se realizaram as medições, foi modelada a cobertura da edificação em laje de concreto impermeabilizada. Com isso, não há influência da laje a ser considerada nas medições e tampouco nas simulações.

Por meio da Figura 6, é possível perceber que, no ponto da laje superior, o fator de visão de céu é elevado e há poucas obstruções. O ponto permanece na maior parte do ano com visibilidade completa do céu e insolação direta. Somente uma árvore a oeste do ponto traz sombreamento a partir das 16h45 nos meses de março, abril, setembro e outubro, e uma edificação no segmento leste-sudeste traz sombreamento até às 6h15 nos meses de fevereiro, março, outubro e novembro. No período de medições, entre dezembro e janeiro, há sombreamento do ponto somente antes das 5h45, nos dias 22/11 e 21/01, e antes das 6h00, no dia 22/12, e somente após as 18h00, durante todo o ano. Em todo o período de avaliação, minimamente nos horários entre 6h00 e 18h00, o ponto permaneceu exposto ao céu e à insolação direta.

Figura 4 - Ponto inferior (a) com o corpo da Estação Científica Campbell (b e c), incluindo painel solar fotovoltaico (b) e Hobo (d)



Figura 5 - Ponto da laje de cobertura com equipamentos da Estação Científica Campbell (b), incluindo anemômetro (c), piranômetro (a) e Hobo (d)

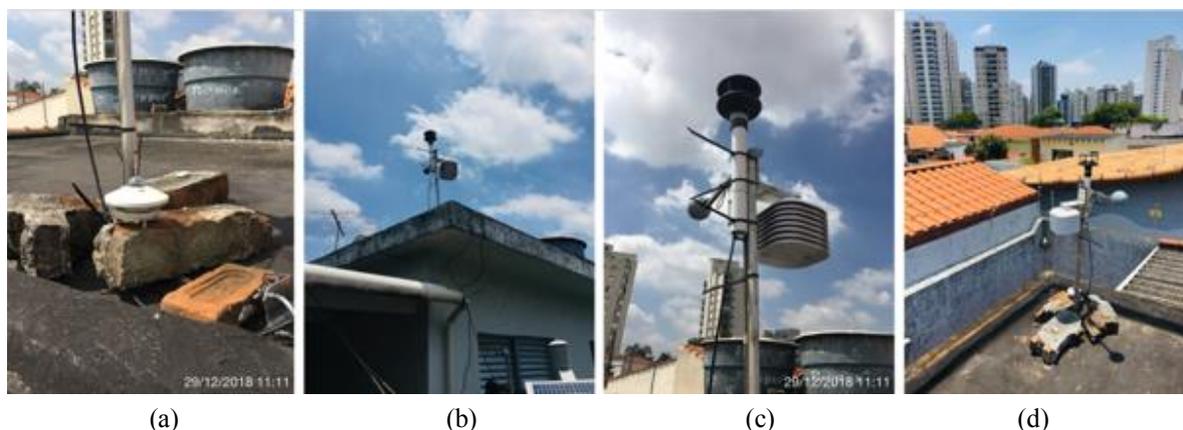
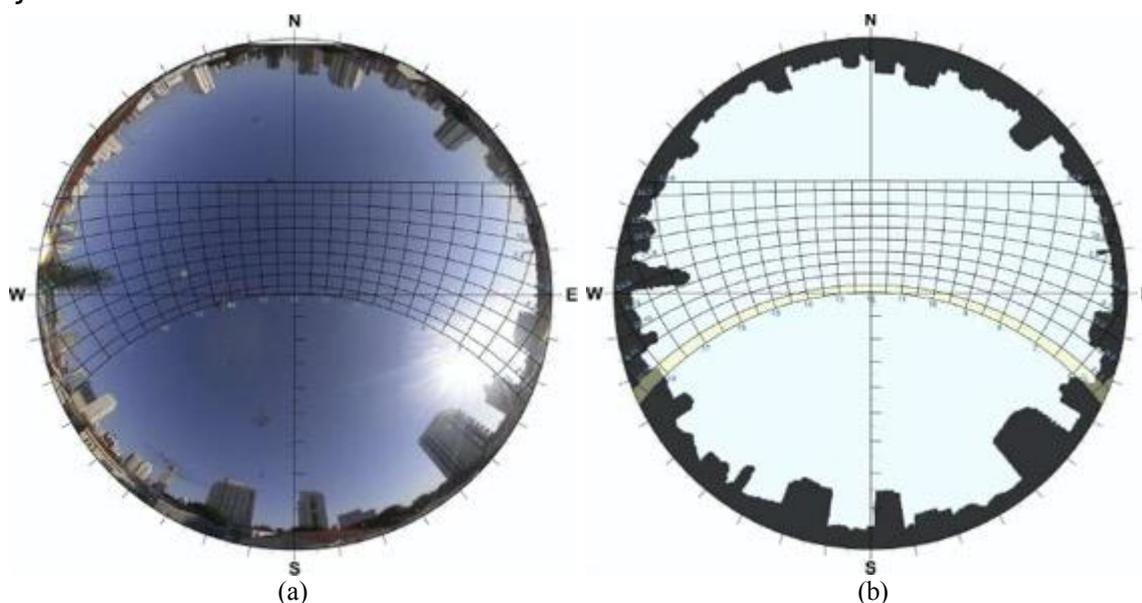


Figura 6 - Foto tipo “olho de peixe” (a) e estudo de mascaramento de céu e insolação (b) do ponto da laje de cobertura



Escolha do período para calibração do modelo climático

Ao longo do período foram feitos registros diários das condições meteorológicas para identificar o período ideal para a calibração. Os critérios para a escolha do dia para reprodução no modelo climático de simulação foram dia ensolarado, de baixa nebulosidade, altas temperaturas, baixa umidade e sem precipitações no dia da análise e nos 4 dias anteriores.

Com esses critérios, foi escolhido o dia 12/12, pois apresentou condição meteorológica predominantemente ensolarada, com pouca incidência de nuvens e sem precipitação, sendo o quarto dia consecutivo nessa condição. Com *Tar* de 22 °C a 34 °C e *UR* de 30% a 66%, caracterizou-se um dia seco com altas temperaturas. O vento predominante vinha da direção sudeste (138,7°), e a velocidade ponderada dos ventos foi de 1,5 m/s.

O período de análise de resultados é um ciclo de 24 h, entre as 6h00 do dia 12/12 e as 6h00 do dia 13/12. Para a adequada estabilização dos modelos e para não haver influências da inicialização do modelo (efeito *burnup*), adotou-se período de simulação de 36 h com, início às 18h00 do dia 11/12, ou seja, um período de 12 h de antecedência para a inicialização da simulação antes do início do período estudado. As Figuras 7 e 8 ilustram os dados de *Tar* e *UR* no período de análise.

Elaboração do modelo geométrico de calibração

O modelo geométrico tridimensional representa a volumetria, a geometria e a disposição das edificações e das vias do local onde foram realizadas as medições microclimáticas. Através do Mapa Digital da Cidade de São Paulo (PREFEITURA..., 2019), usando o software QGis, foram extraídos os dados georreferenciados dos traçados de ruas e suas respectivas áreas de leito carroçável asfaltado e calçadas, bem como o traçado e a geometria das edificações, incluindo áreas de projeção e alturas. Com esses dados, um recorte do bairro em torno do ponto de medições foi realizado, com uma área de 400x400 m de edifícios mais 30 *grids* vazios nas bordas com vias e quadras, compondo o modelo geométrico tridimensional, usando os softwares ENVI-met Monde e ENVI-met Spaces (Figura 9).

Após, foram definidas as resoluções horizontal e vertical, que impactam nos resultados da simulação, no tempo de processamento e na correta composição do modelo geométrico da simulação, pois os *grids* trazem as dimensões das edificações, as larguras das vias e as divisões das superfícies das vias entre leito carroçável de asfalto e passeios de pedestres. Foram adotados *grids* de 3 m de dimensão na horizontal, pois permitem larguras de vias, larguras de calçadas e tamanhos de lotes em múltiplos de 3 m, representativos de ruas, lotes e edifícios corriqueiros em bairros residenciais de São Paulo. Na vertical, utilizou-se a função *telescoping*, que reduz a resolução vertical dos modelos à medida que se eleva a altura, mantendo a resolução mais alta no nível da rua, para a qual foi feita a análise dos resultados das simulações.

O georreferenciamento do modelo foi feito através do Google Earth com uso do ENVI-met Monde. Nesse caso, o modelo foi adotado como plano, sem topografia, uma vez que foi escolhida uma região aproximadamente plana para a simulação. Foi também definido o uso do asfalto preto comum como superfície do leito carroçável das vias e o pavimento de concreto “sujo” para as áreas de calçadas e interior de quadras (GUSSON, 2014). Essas superfícies foram colocadas sobre terreno de solo argiloso-arenoso, representativo da cidade de São Paulo (SHINZATO, 2014).

Figura 7 - Medições de temperatura do ar (T_{ar}) no período de análise

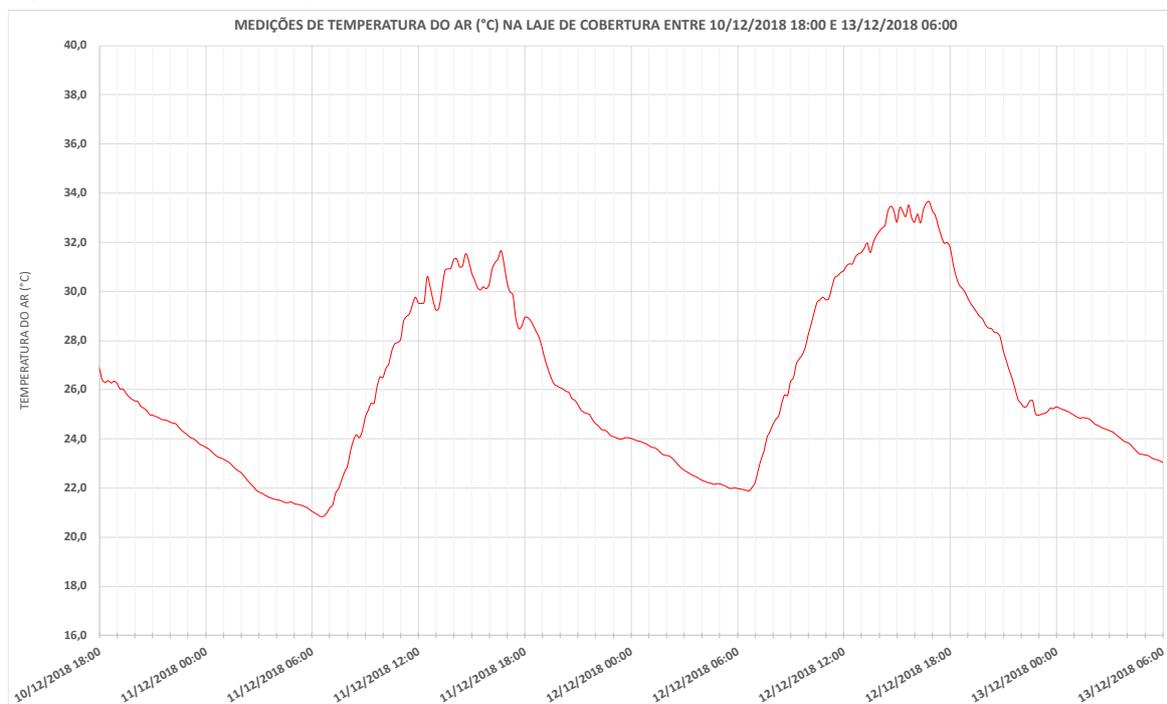


Figura 8 - Medições de umidade relativa (UR) no período de análise

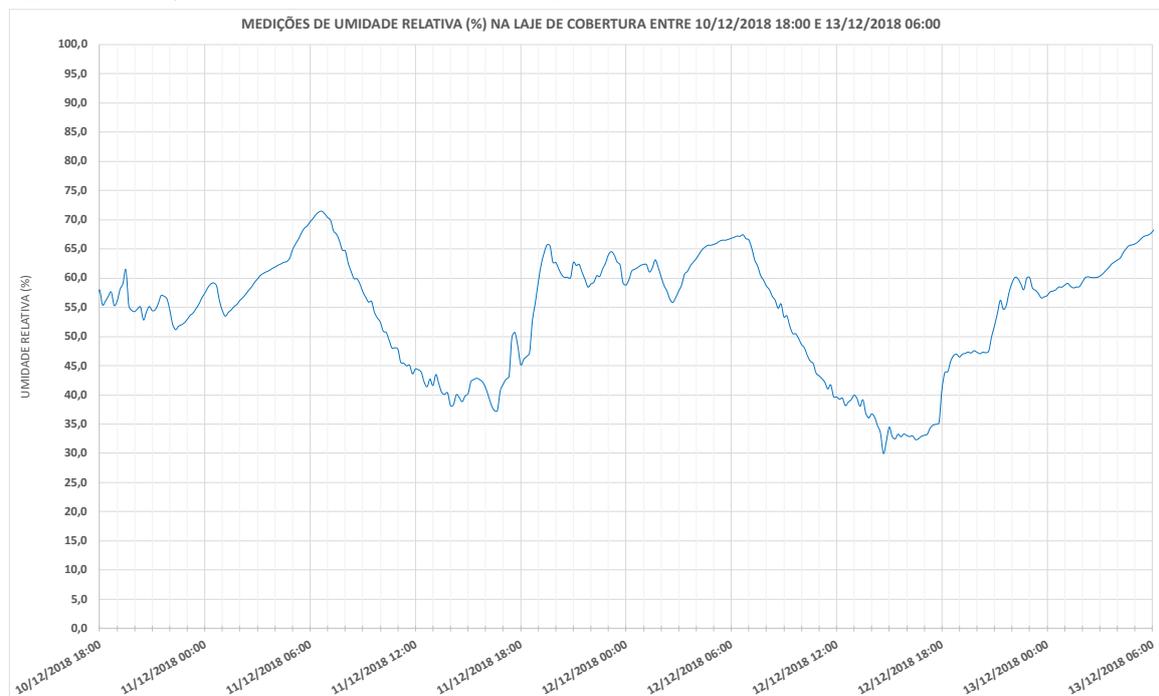
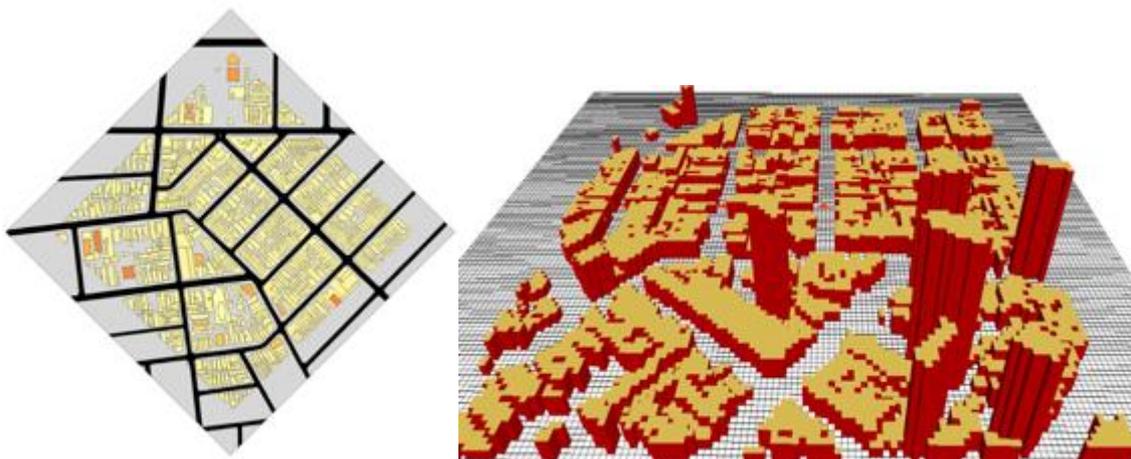


Figura 9 - Planta do QGIS com distribuição de alturas das edificações da área de estudo (a) e vista tridimensional (b) do modelo no ENVI-met



Foram utilizados para todas as edificações nos modelos os padrões de vedações verticais das construções em alvenaria de blocos cerâmicos maciços com revestimentos interno e externo em argamassa e coberturas em telhas cerâmicas, com camada de ar e laje de concreto maciça. Essas soluções de paredes e coberturas são representativas do bairro, onde a maior parte das construções é formada por casas e sobrados com paredes e coberturas desse tipo. Para as propriedades físicas e térmicas das paredes de fachadas e coberturas foram utilizados os valores de referência de transmitância térmica, condutividade térmica, absorvância de superfície, emissividade e massa específica, conforme diretrizes da NBR 15220-2 (ABNT, 2013) e do PBE Edifica (INSTITUTO..., 2017). As propriedades térmicas e físicas dos componentes e superfícies podem ser identificadas na Tabela 1.

Não foi considerado nenhum tipo de vegetação no modelo, dado que a área selecionada é de ocupação densa e compacta por tipologia predominante de casas e sobrados geminados entre si, com pouca ou nenhuma vegetação no terreno e nas calçadas.

Processo de calibração do modelo climático

As medições aferidas pelos equipamentos na laje de cobertura foram utilizadas para a calibração do modelo climático do ENVI-met, complementadas por dados do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas e de medições das estações meteorológicas do IAG/USP (na Cidade Universitária e na Água Funda). Já as medições da laje inferior foram utilizadas para uma avaliação crítica comparativa dos resultados.

O arquivo climático do Aeroporto de Congonhas é um arquivo padrão em formato *.epw* com os dados do levantamento histórico de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção dos ventos. Foi utilizado somente como base para o arquivo climático do período anual da cidade de São Paulo, e no dia avaliado e nos dias próximos à avaliação os dados foram sobrescritos pelos dados das medições, conforme a Figura 10.

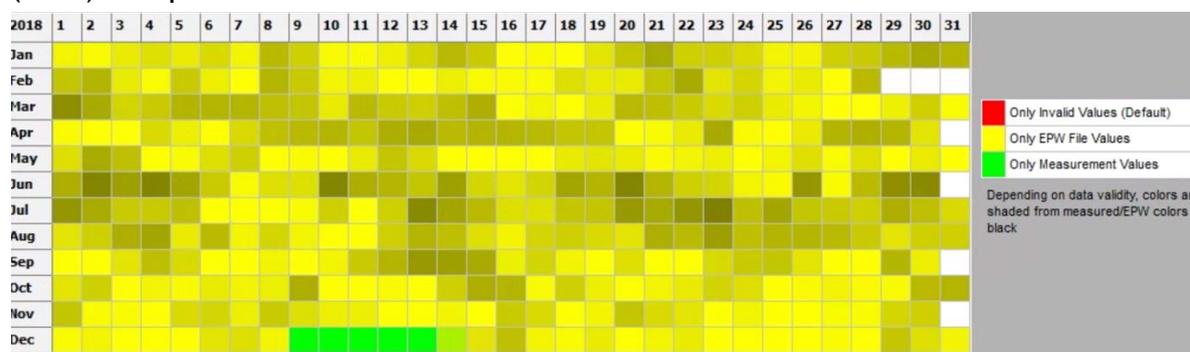
Já as estações meteorológicas do IAG/USP fornecem dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção dos ventos, que não foram utilizados nos modelos de calibração, mas somente para verificação dos dados aferidos nas medições realizadas no local de estudo. A estação Cidade Universitária fornece dados de radiação estratificados em radiação direta, difusa e de onda longa, enquanto a estação Água Funda fornece os dados de nebulosidade estratificados em nuvens altas, médias e baixas. Ambas as estações meteorológicas se localizam em regiões urbanas distintas da área de estudo, sendo a Cidade Universitária condizente com a LCZ 5B, de ocupação aberta e esparsa de baixa elevação com vegetação arbórea abundante e esparsa, enquanto a Água Funda, localizada dentro do Parque Cientec da USP, condiz com as LCZ 9A e 9B, de construções muito esparsas em meio à vegetação arbórea ora densa ora esparsa, mas sempre abundante. A estação Água Funda tem uma proximidade geográfica maior com o ponto de medições, conforme se observa na Figura 1.

As estações meteorológicas foram utilizadas somente para acompanhamento das condições meteorológicas e para análise crítica dos resultados, e, com relação aos dados de entrada do *full forcing* da simulação, somente para os dados de radiação (não utilizados no modelo final calibrado) e de nebulosidade (utilizados no modelo final calibrado).

Tabela 1 - Propriedades térmicas e físicas dos componentes e superfícies

DESCRIÇÃO	PRINCIPAIS PROPRIEDADES	
Asfalto preto comum no leito carroçável	Material pré-configurado do ENVI-met composto de solo argiloso-arenoso (<i>sandy clay loan</i>) e camadas de asfalto (<i>“asphalt with basalt e asphalt with gravel”</i>).	Albedo de 0,2 e emissividade de 0,9
Pavimento de concreto “sujo” para as áreas de calçadas e interior de quadras	Material pré-configurado do ENVI-met composto de solo argiloso-arenoso (<i>“sandy clay loan”</i>) e camada de concreto (<i>“cement concrete”</i>).	Albedo de 0,3 e emissividade de 0,9
Parede de fachada	Alvenaria de blocos cerâmicos maciços com 25 cm revestidos com camadas internas e externas de 3 cm de argamassa	Espessura total de 31 cm, absorvância de 0,6 e emissividade de 0,9
Cobertura de telhado cerâmico sobre laje	Telhas cerâmicas sobre camada de ar sobre laje de concreto maciça de 10 cm	Espessura total de 36 cm, absorvância de 0,8 e emissividade de 0,95

Figura 10 - Alternância entre dados do Aeroporto de Congonhas (amarelo) e das medições e estação (verde) no arquivo climático calibrado



Assim, o processo de calibração do modelo climático consiste no *input* dos dados das medições microclimáticas e/ou de outros arquivos climáticos, e na realização dos devidos ajustes nesses dados de entrada e nas configurações do software para obter, no mesmo ponto onde foram realizadas as medições, resultados suficientemente aderentes às medições. Os dados climáticos, que são inseridos como *inputs* do *full forcing* do ENVI-met, são utilizados como referência pelo programa para aproximação nos limites externos dos modelos de simulação, a partir dos quais serão calculados todos os demais resultados para todas as demais áreas e espaços do modelo.

A validação dos resultados foi feita com a garantia de que todas as diferenças de valores entre simulação e medições estivessem dentro do limite de tolerância ao longo de todo o período de avaliação. Assim, todas as diferenças entre registros de simulação e medição a cada 10 min ao longo do período de 36 h foram inferiores ao critério de 15% estipulado para aprovação do modelo. A partir dessas diferenças, foram também calculados o erro absoluto médio (MAE) e o erro relativo médio (%). A metodologia ainda considerou as avaliações do MSE e da RMSE.

No processo de realização das sucessivas simulações de calibração, primeiramente foi especificada a localização georreferenciada do modelo, o que permite ao ENVI-met trazer dados do macroclima local, condição atmosférica, altitude em relação ao nível do mar, características de temperatura e umidade a 2.000 m de altitude com relação ao nível do mar e suas interações com o clima local.

Após, foram realizados diversos ajustes e combinações que envolveram a adoção do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base dos dados; o uso da ferramenta *full forcing* para dados de *Tar*, *UR*, *Var* e direção do vento das medições; o *input* de radiação (direta, difusa e de onda longa) com base em dados da Estação Cidade Universitária ou *input* da nebulosidade com base em dados da Estação Água Funda; a altura em relação ao solo do receptor condizente com o ponto de medições; o ajuste da *Var* de entrada até se obter a *Var* correta no ponto de medições; e as alterações e ajustes das dimensões horizontais e resolução dos modelos.

Ao todo, foram avaliadas 21 simulações de calibração, buscando-se obter um modelo climático com a maior acurácia. Para cada modelo de calibração foram realizadas comparações entre as medições e os resultados encontrados no receptor locado no ponto de medições a 7,50 m de altura, com vistas a proporcionar a comparação dos valores de *Tar*, *UR*, *Var* e direção do vento. A Tabela 2 expõe o histórico de ajustes e conclusões das simulações das calibrações realizadas.

Tabela 2 - Histórico dos ajustes nos modelos de calibração do ENVI-met (Continua...)

	Principais ajustes realizados nos modelos geométrico e/ou climático e/ou configuração da simulação
1	Primeira versão do modelo com 500x500 m com 1 <i>grid</i> = 2 m na horizontal e 1 <i>grid</i> = 3 m na vertical. <i>Input</i> de dados de medições para <i>Tar</i> e <i>UR</i> (conforme medições) e <i>Var</i> (1,38 m/s, média da velocidade do vento na direção sudeste), e <i>input</i> de dados de radiação da Estação Meteorológica da Cidade Universitária do IAG/USP. O início do período de simulação é às 22h do dia 11/12, sendo o período de estudo da análise das 6h do dia 12/12 às 6h do dia 13/12. A simulação não foi concluída em função de erros identificados no <i>data-base</i> de componentes construtivos e materiais do modelo geométrico.
2	Revisão do <i>data-base</i> de componentes construtivos e materiais do modelo geométrico. Mesmo arquivo climático e mesmo modelo geométrico da simulação 1. Necessidade de ajuste do modelo geométrico com acréscimo de <i>grids</i> vazios no entorno do modelo.
3	Revisão do modelo geométrico com acréscimo de 30 <i>grids</i> vazios no entorno entre os edifícios e bordas do modelo, na horizontal e na vertical, mantendo a mesma resolução de 1 <i>grid</i> = 2 m na horizontal e 1 <i>grid</i> = 3 m na vertical. Mesmo arquivo climático do da simulação 1. Simulação cancelada devido ao tempo estimado de 16 dias para o processamento. Necessidade de ajustes para redução do tempo de processamento.
4	Revisão do modelo geométrico com redução das dimensões horizontais do modelo para 400x400 m com mais 30 <i>grids</i> vazios em cada borda para redução do tempo de processamento, mantendo a mesma resolução de 1 <i>grid</i> = 2 m na horizontal e 1 <i>grid</i> = 3 m na vertical. Mesmo arquivo climático do da simulação 1. Simulação cancelada devido ao tempo estimado de 10 dias para o processamento. Necessidade de ajustes para redução do tempo de processamento.
5	Revisão do modelo geométrico com redução das dimensões horizontais do modelo para 300x300 m com mais 30 <i>grids</i> vazios em cada borda para redução do tempo de processamento, mantendo a mesma resolução de 1 <i>grid</i> = 2 m na horizontal e 1 <i>grid</i> = 3 m na vertical. Mesmo arquivo climático do da simulação 1. Simulação cancelada devido ao tempo estimado de 8 dias para o processamento. Necessidade de ajustes para redução do tempo de processamento.
6 (A/B)	Revisão do modelo geométrico com aumento das dimensões horizontais do modelo para 400x400 m com mais 30 <i>grids</i> vazios em cada borda, mas redução da resolução horizontal para 1 <i>grid</i> = 3 m, mantendo a mesma resolução de 1 <i>grid</i> = 3 m na vertical. Mesmo arquivo climático do da simulação 1. A simulação foi realizada em dois diferentes computadores simultaneamente com as mesmas configurações e foi concluída com boa aderência do modelo simulado às medições no período noturno, mas com tendência a maiores valores de <i>Tar</i> e menores valores de <i>UR</i> no período diurno, acima da tolerância admitida. Excesso de radiação solar direta à tarde.
7	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 6, alterando o <i>input</i> da <i>Var</i> para 1,47 m/s (média ponderada das medições da velocidade do vento de acordo com as direções). A simulação foi concluída com boa aderência do modelo simulado às medições no período noturno, mas com tendência a maiores valores de <i>Tar</i> e menores valores de <i>UR</i> no período diurno, acima da tolerância admitida. Verificou-se excesso de radiação direta no período da tarde. A <i>Var</i> ficou inferior às medições.
8	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 6, alterando o <i>input</i> da <i>Var</i> para 1,50 m/s (média ponderada das medições) e realizando ajuste no modelo geométrico com a simplificação das alturas das edificações inferiores a 6 m em faixas de altura múltiplas das dimensões dos <i>grids</i> verticais do modelo. A simulação foi concluída com boa aderência do modelo simulado às medições no período noturno, mas o modelo ainda reproduz excesso de insolação direta no período da tarde, gerando maiores valores de <i>Tar</i> (cerca de 3 °C de diferença máxima) e menores valores de <i>UR</i> (cerca de 10% de diferença máxima) no período da tarde. Excesso de radiação direta à tarde, crescente até as 18h.
9	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 8, com correção da altura do ponto de análise (receptor) e <i>input</i> das medições para a 7,50 m de altura, que é a altura real onde se realizaram as medições. A simulação foi concluída com boa aderência do modelo simulado às medições, pois houve aproximação da <i>Tar</i> , da <i>UR</i> e da <i>Var</i> em direção às medições. No entanto, o modelo ainda reproduz no período da tarde um tempo mais quente e mais seco, com altas radiações diretas, crescentes até as 18h. A <i>Var</i> ficou inferior às medições.
10	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 9, alterando o <i>input</i> de <i>Var</i> para 2,00 m/s na entrada da borda do modelo. A simulação foi concluída com grande aproximação dos valores de <i>Var</i> , <i>Tar</i> e <i>UR</i> no ponto de análise em direção às medições. No entanto, o modelo ainda reproduz no período da tarde um tempo mais quente e mais seco, com altas radiações diretas, crescentes até as 18h. A <i>Var</i> ficou inferior às medições.
11	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 9, alterando o <i>input</i> de <i>Var</i> para 2,20 m/s e adotando o procedimento de <i>simple forcing</i> , isto é, optou-se por não utilizar <i>input</i> de dados de radiação, nem de nebulosidade, mas somente de <i>Tar</i> , <i>UR</i> e <i>Var</i> . A simulação foi concluída com grande aproximação dos valores de <i>Tar</i> e <i>UR</i> no ponto de análise em direção às medições, mas diferenças de <i>Var</i> foram levemente mais altas do que o aceitável e houve grandes diferenças entre os gráficos de radiação da simulação e da Estação Cidade Universitária do IAG/USP. Conclui-se que a adoção de <i>simple forcing</i> reduz a aderência dos resultados da simulação às medições e aos dados de radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP.

Tabela 2 - Histórico dos ajustes nos modelos de calibração do ENVI-met (continuação)

Principais ajustes realizados nos modelos geométrico e/ou climático e/ou configuração da simulação	
12	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 11, mas retornou-se à adoção do <i>full forcing</i> , porém utilizando o <i>input</i> dos dados de nebulosidade da Estação Água Funda do IAG/USP em vez dos dados de radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP, além dos dados de <i>Tar</i> , <i>UR</i> e <i>Var</i> . A simulação foi concluída com melhores resultados em comparação com as simulações anteriores, cabendo o ajuste de <i>Var</i> , <i>Tar</i> e <i>UR</i> . Houve menor aderência dos valores da simulação e da Estação Cidade Universitária do IAG/USP do que com <i>full forcing</i> com radiação (simulações 1 a 10), mas ainda boa aderência dos gráficos, das tendências de variação e dos valores de radiação da simulação e da Estação Cidade Universitária do IAG/USP, e melhor resultado do que a simulação 11, inclusive para <i>Tar</i> , <i>UR</i> e <i>Var</i> . Conclui-se que a adoção de <i>full forcing</i> com nebulosidade em vez de radiação melhorou a aderência dos resultados da simulação às medições e aos dados de radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP.
13	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 11, mas utilizando como <i>input</i> o arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base para o período do ano inteiro e, no período de 11/12 a 13/12, sobrescrevendo os dados de entrada do <i>full forcing</i> com os seguintes: nebulosidade nula, <i>Tar</i> e <i>UR</i> das medições e <i>Var</i> na borda do modelo a 2,20 m/s. A simulação foi concluída com aproximação dos gráficos de <i>Tar</i> , <i>UR</i> e <i>Var</i> e direções dos ventos com as medições. No entanto, aumentaram as diferenças entre os gráficos de radiação da simulação e da estação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP. Conclui-se que a adoção de nebulosidade nula reduz a aderência dos resultados da simulação às medições e aos dados de radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP.
14	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 11, mas utilizando como <i>input</i> o arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base para o período do ano inteiro e, no período de 11/12 a 13/12, sobrescrevendo os dados de entrada do <i>full forcing</i> com os seguintes: radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP, <i>Tar</i> e <i>UR</i> das medições e <i>Var</i> na borda do modelo a 2,20 m/s. A simulação foi concluída com resultados similares aos da Simulação 11, mas com leve tendência a obter temperaturas mais altas e umidades mais baixas durante o dia, em especial no período da tarde. Conclui-se que a adoção de <i>full forcing</i> com radiação em vez de nebulosidade reduz a aderência dos resultados da simulação às medições e aos dados de radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP, uma vez que a Estação Água Funda do IAG/USP, de onde foram coletados os dados de nebulosidade, tem maior proximidade geográfica com o ponto da área de estudo.
15	Nova simulação com mesmo modelo geométrico da simulação 11, mas com um arquivo inteiramente novo com <i>input</i> do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas para todos os dados climáticos de entrada, inclusive no período de análise e sem utilizar nenhum dado das medições ou das estações. A simulação foi concluída, porém foi descartada, porque, apesar da excelente aderência de velocidades e direções dos ventos aos dados das medições, houve baixa aderência de <i>Tar</i> e <i>UR</i> com as medições, além de leve tendência a obter temperaturas mais altas e umidades mais baixas durante o dia, em especial no período da tarde.
16	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 14, mas utilizando como <i>input</i> o arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base para o período do ano inteiro e, no período de 9/12 a 14/12, sobrescrevendo os dados de entrada do <i>full forcing</i> com os seguintes: radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP, <i>Tar</i> e <i>UR</i> das medições e <i>Var</i> na borda do modelo a 2,20 m/s. A simulação foi concluída com resultados similares aos da simulação 14. Reforça-se a conclusão de que são melhores os resultados nas simulações com a adoção de <i>full forcing</i> com nebulosidade em vez de radiação. Houve novamente leve tendência a obter temperaturas mais altas e umidades mais baixas durante o dia, em especial no período da tarde, e aumento desproporcional da radiação direta à tarde.
17	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 16, mas com alteração do início da simulação para às 20h do dia 11/12 (antes era 22h), sendo o período de estudo da análise das 6h do dia 12/12 às 6h do dia 13/12. A simulação foi concluída com melhores resultados de aderência de <i>Tar</i> e <i>UR</i> do que na simulação 16, porém se reforça a conclusão de que são melhores os resultados nas simulações com a adoção de <i>full forcing</i> com nebulosidade em vez de radiação, pois houve novamente aumento desproporcional da radiação direta à tarde.
18	Nova simulação com mesmos modelos geométrico e climático da simulação 16, mas com alteração do início da simulação para às 18h do dia 11/12 (antes era 20h), sendo o período de estudo da análise das 6h do dia 12/12 às 6h do dia 13/12. A simulação foi concluída com melhores resultados de aderência de <i>Tar</i> , <i>UR</i> e <i>Var</i> do que nas simulações 16 e 17, com diferenças nas <i>Var</i> inferiores a 3% em todo o período e diferença máxima da direção do vento de 0,12% (0,16°). Houve melhor aderência dos valores de radiação difusa e radiação de onda longa, mas também houve aumento desproporcional da radiação direta à tarde. Assim, reforça-se a conclusão de que são melhores os resultados nas simulações com a adoção de <i>full forcing</i> com nebulosidade em vez de radiação.
19 (A/B)	Nova simulação utilizando o mesmo modelo geométrico das simulações 6 a 18 e consolidando as experiências e conclusões a respeito do modelo climático e da configuração da simulação obtidas nas simulações 12 a 18. A simulação adota como <i>input</i> o arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base para o período do ano inteiro e, no período de 9/12 a 14/12, sobrescrevendo os dados de entrada do <i>full forcing</i> com os seguintes: nebulosidade da Estação Água Funda do IAG/USP em vez da radiação da Estação Cidade Universitária do IAG/USP, <i>Tar</i> e <i>UR</i> das medições e <i>Var</i> na borda do modelo a 2,20 m/s. A simulação foi realizada em dois diferentes computadores simultaneamente com as mesmas configurações e foi concluída com excelente aderência de resultados, com todas as variáveis dentro do limite de tolerância. Considera-se o modelo final calibrado.

Resultados e discussões

Resultados do procedimento de calibração

As informações na aba Meteorological Settings da configuração das condições climáticas finais consideradas calibradas para o modelo simulado podem ser visualizadas nas Figuras 10 a 13 e na Tabela 3. Essas foram armazenadas em um arquivo *.cvs* para um período de simulação de 36 h, das 18h00 do dia 11/12 às 6h00 do dia 13/12.

A introdução desses dados no ENVI-met Guide foi feita com o uso da ferramenta *full forcing*, clicando-se em “New” para criar um novo arquivo *forcing*, posteriormente fazendo a leitura do arquivo climático em formato *.epw* do Aeroporto de Congonhas, da cidade de São Paulo (Figura 13, dados em amarelo). Na sequência foi feita a leitura do arquivo *.cvs* que contém os dados meteorológicos das medições realizadas na área de estudo (com informações de *Tar*, *UR*, *Var* e direção dos ventos), complementados com os dados de nebulosidade da Estação Água Funda, do IAG/USP. A importação desses dados sobrescreveu os dados do arquivo climático no período entre 9/12, às 0h00, e 14/12, às 6h00 (Figura 13, dados em verde). Abaixo se apresenta uma síntese dos dados meteorológicos considerados na aba Meteorological Settings do ENVI-met Guide.

É importante informar que se deve inserir no software a informação da altura do ponto de realização das medições *in loco* em relação solo, que corresponde a 7,50 m.

Figura 11 - *Inputs* de *Tar* e *UR* do arquivo climático calibrado para o dia 12/12

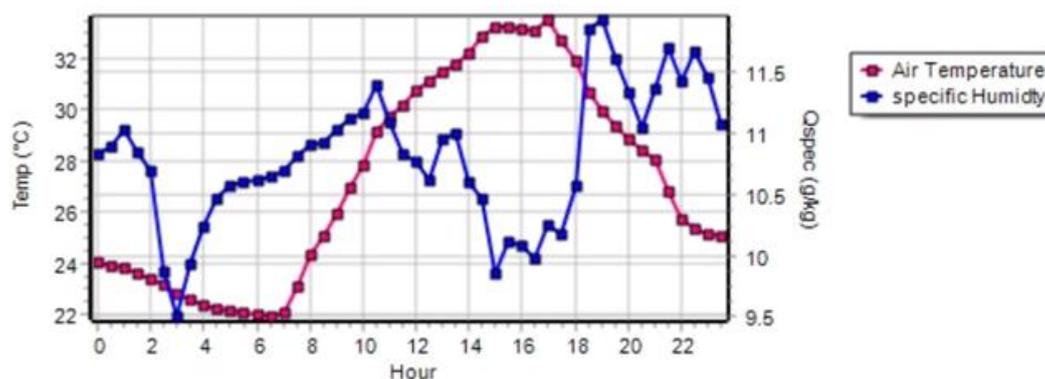


Figura 12 - *Input* de nebulosidade do arquivo climático calibrado para o dia 12/12

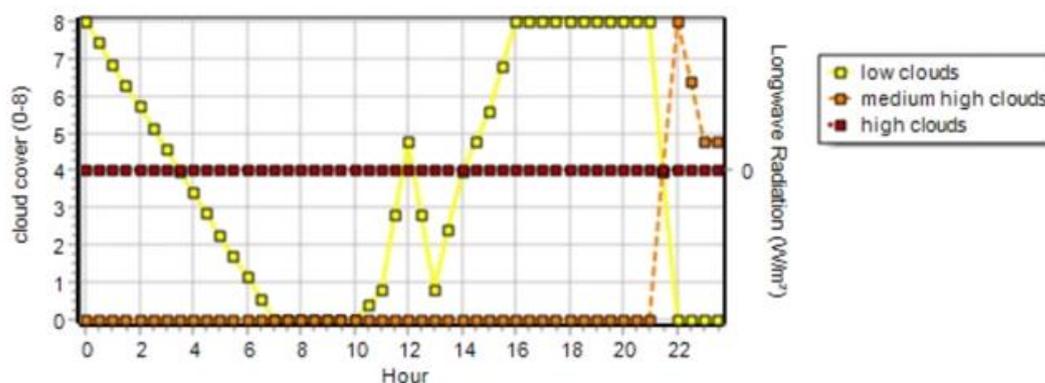


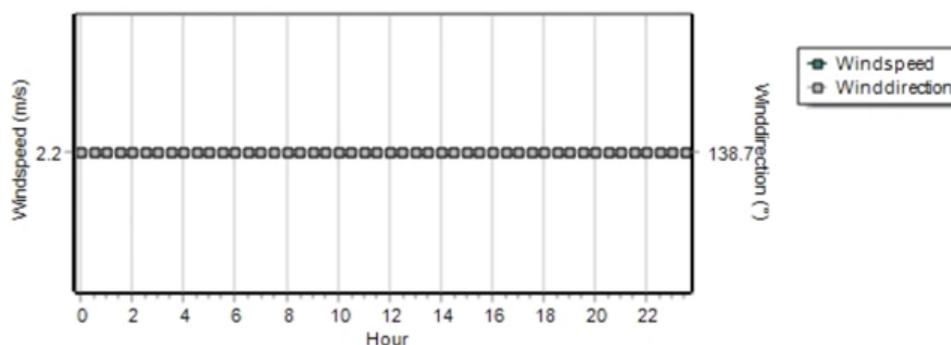
Figura 13 - *Input de Var* do arquivo climático calibrado para o dia 12/12

Tabela 3 - Síntese dos dados meteorológicos considerados no modelo climático calibrado

Dados		Descrição
Base do arquivo climático de São Paulo		Arquivo climático em formato <i>.epw</i> do Aeroporto de Congonhas, da cidade de São Paulo
Período entre 9/12 às 00h00 e 14/12 às 6h00	Direção do vento	Direção do vento constante de 138,7° (sudeste)
	Velocidade do ar (<i>Var</i>)	Velocidade do ar (<i>Var</i>) constante de 2,2 m/s na borda do modelo para obter no ponto de medições o valor de 1,5 m/s, conforme medições
	Nebulosidade	Nebulosidade inserida em intervalos de 30 min conforme registros da Estação Meteorológica da Água Funda (Parque do Estado), do IAG/USP
	Temperatura do ar (<i>Tar</i>)	Temperatura do ar (<i>Tar</i>) e umidade relativa (<i>UR</i>) inseridas em intervalos de 30 min, conforme medições realizadas no local representado na simulação
	Umidade relativa (<i>UR</i>)	

As Tabelas 4 a 7 mostram que as diferenças máximas entre o modelo final calibrado e as medições foram todas dentro do critério de tolerância especificado. O modelo calibrado apresentou acurácia na reprodução dos dados das medições, com diferenças máximas de 1,5 °C (4,9%) para a *Tar* (Figura 14), de 5,4% (12,4%) para a *UR* (Figura 15), de 0,1 m/s (7,7%) para a *Var* e de 0,4° (0,3%) para a direção do vento. As diferenças máximas foram avaliadas através do MAE e do erro absoluto máximo, e também pelo MSE e pela RMSE, conforme as Tabelas 6 e 7.

Assim, o modelo climático calibrado foi considerado adequado em função da apresentação de curvas de mesmo aspecto e pequenas diferenças de valores máximos e mínimos registrados, dentro dos limites de tolerância apresentados.

Como pode ser visto nas Figuras 16 a 18 e nas Tabelas 8 e 9, também foi realizada uma comparação entre os registros de radiação entre o modelo de simulação e os dados registrados pela Estação Cidade Universitária, do IAG/USP.

Essa comparação não deve ser utilizada para validação do modelo, uma vez que, no modelo calibrado, foram utilizados os dados de nebulosidade da Estação Água Funda em vez dos dados de radiação da Estação Cidade Universitária, e, além disso, o ponto de medições/simulações é geograficamente distante da Estação Cidade Universitária e em situação urbana distinta (o primeiro em área densamente ocupada, edificada e impermeabilizada e o segundo em área aberta predominantemente vegetalizada com edificações esparsas), podendo haver diferenças entre o modelo simulado e os registros da Estação Cidade Universitária do IAG/USP.

Ainda assim, como visto nas Figuras 16 e 17, o modelo calibrado apresentou razoável aderência aos dados de radiação da Estação Cidade Universitária, com proximidade aos valores máximos e mínimos de radiação direta e difusa, praticamente não sofrendo variação e não divergindo dos registros da Estação, mas somente apresentando atraso entre os horários do início e do pôr do sol dos máximos do dia. Neste caso, tanto a radiação direta quanto a difusa podem ser consideradas variáveis que independem da formação morfológica e urbana, mas dependem da localização, da condição de céu e do horário, justificando a similaridade entre os dados da simulação e dos registros da estação, e também o atraso mencionado. A radiação direta máxima é

da ordem de 1.000 W/m , tanto na simulação quanto nos registros da estação, o que é esperado para São Paulo no verão.

Entretanto, como esperado, conforme visto na Figura 18, a radiação de onda longa apresenta dados divergentes entre e a simulação e os registros da estação, pois, apesar de apresentar majoritariamente o mesmo formato de curva e a mesma ordem de grandeza de valores, demonstra maior variação e diferença entre os máximos e mínimos, e maior atraso horário. Isso já era esperado, visto que a radiação de onda longa é uma variável que depende da formação morfológica do ambiente urbano e dos materiais das superfícies edificadas; e, por essa razão, entre duas regiões tão distintas em termos urbanísticos (conforme descrito anteriormente), os dados resultantes de radiação de onda longa naturalmente são também diferentes.

Figura 14 - Comparação da Tar no modelo calibrado e nas medições

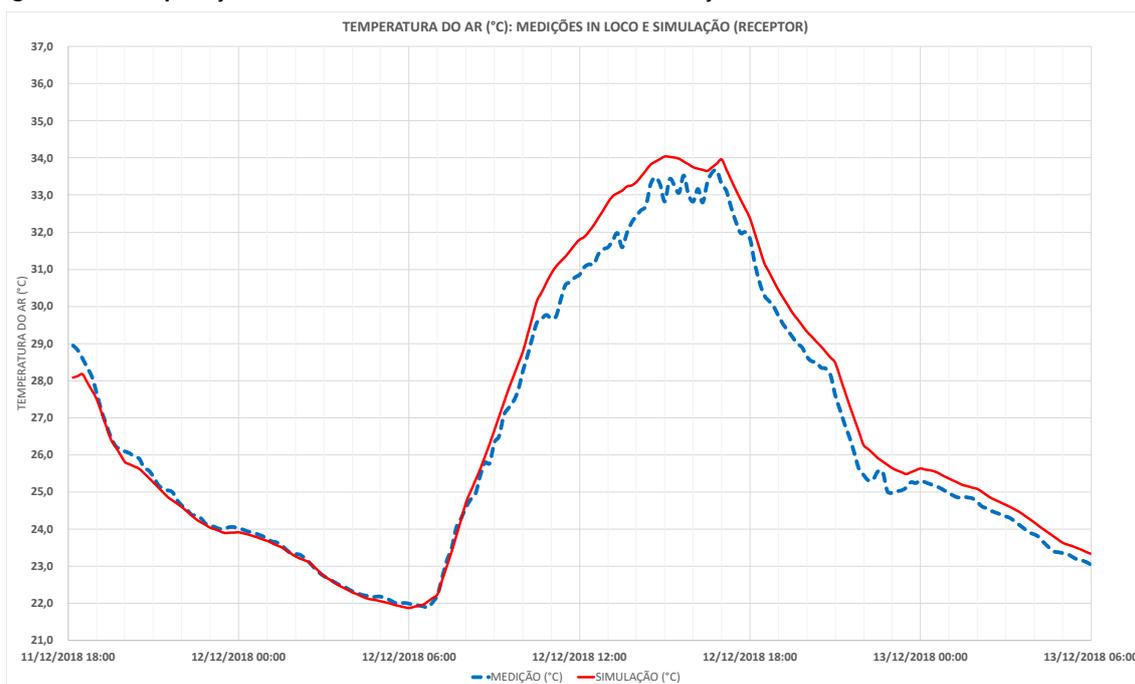


Figura 15 - Comparação da UR no modelo calibrado e nas medições

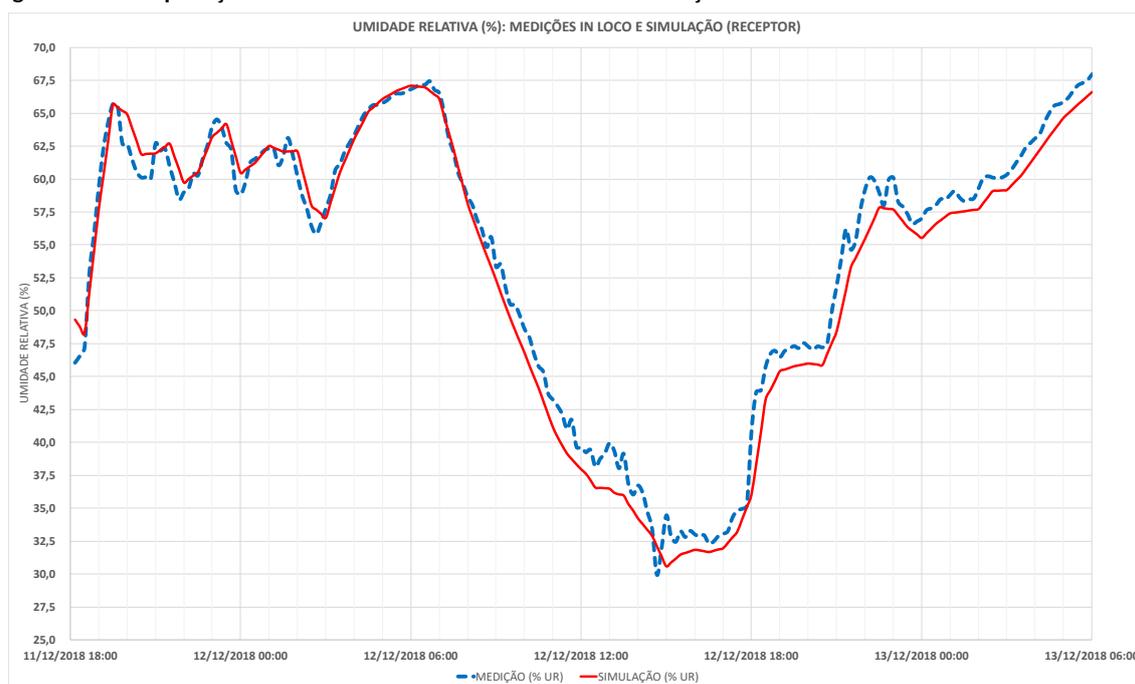


Tabela 4 - Comparação da *Tar* e *UR* nas medições e no modelo calibrado

	Temperatura do ar (°C)		Umidade relativa (% UR)	
	Medição (°C)	Simulação (°C)	Medição (%)	Simulação (%)
Média	26,5	26,8	54,2	53,3
Máximo	33,7	34,0	67,9	67,1
Mínimo	21,9	21,9	29,9	30,6
Desvio padrão	3,5	3,8	10,7	11,3

Tabela 5 - Comparação da *Var* e direção dos ventos nas medições e no modelo calibrado

	Velocidade do ar (m/s)		Direção do vento (°)	
	Dado de entrada (m/s)	Simulação (m/s)	Dado de entrada (°)	Simulação (°)
Média	1,5	1,5	138,7	138,7
Máximo		1,6		139,0
Mínimo		1,4		138,3
Desvio padrão	0,00	0,1	0,00	0,2

Tabela 6 - Comparação da *Tar* e *UR* nas medições e no modelo calibrado

	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa (% UR)
Erro Absoluto Médio (MAE)	0,4	1,4
Erro absoluto máximo	1,5	5,4
Erro relativo médio (%)	1,5%	2,8%
Erro relativo máximo (%)	4,9%	12,4%
Erro Quadrático Médio (MSE)	0,3	2,8
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	0,5	1,7

Tabela 7 - Comparação da *Var* e direção dos ventos nas medições e no modelo calibrado

	Velocidade do ar (m/s)	Direção do vento (°)
Erro absoluto médio (MAE)	0,1	0,2
Erro absoluto máximo	0,2	0,4
Erro relativo médio (%)	3,4%	0,1%
Erro relativo máximo (%)	10,4%	0,3%
Erro Quadrático Médio (MSE)	0,0	0,1
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	0,1	0,2

Figura 16 - Comparação da radiação direta no modelo calibrado e na Estação Meteorológica da Cidade Universitária, do IAG/USP

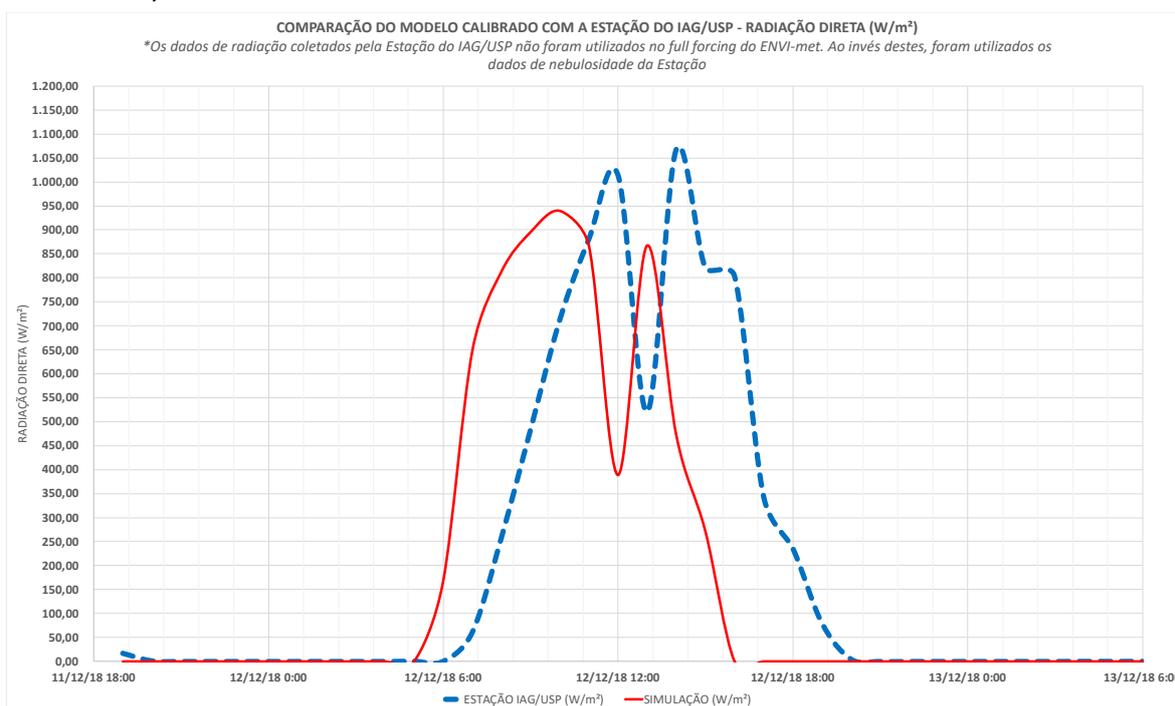


Figura 17 - Comparação da radiação difusa no modelo calibrado e na Estação Meteorológica da Cidade Universitária, do IAG/USP

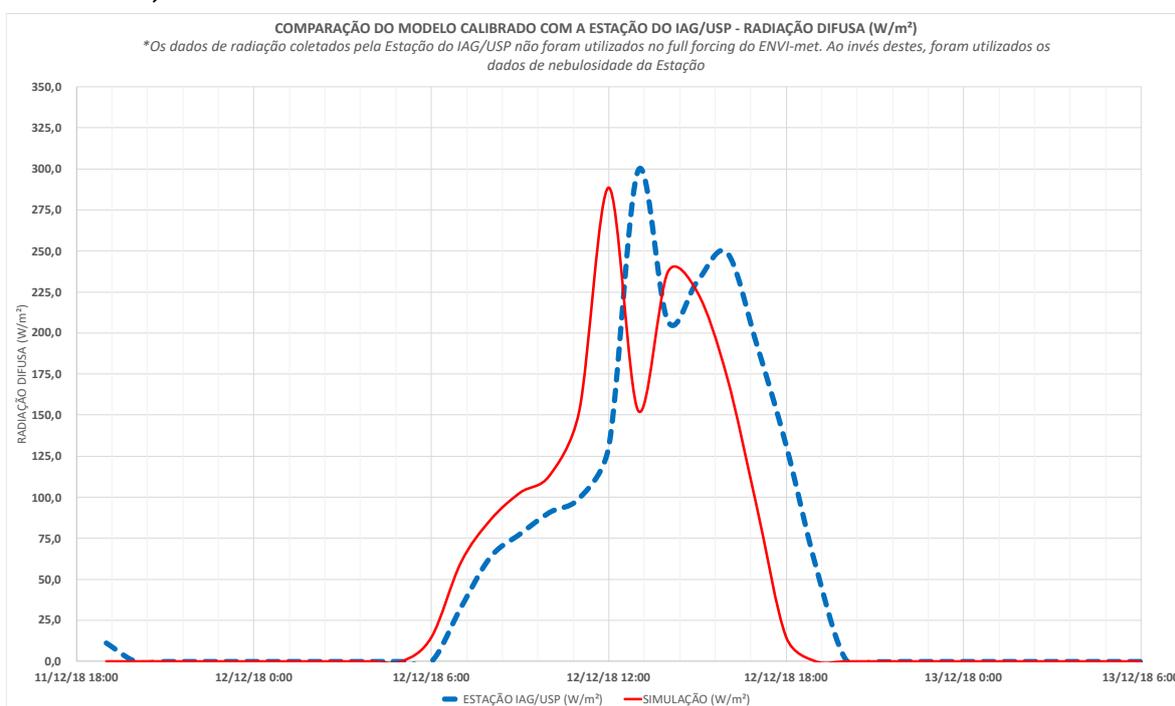


Figura 18 - Comparação da radiação de onda longa no modelo calibrado e na Estação Meteorológica da Cidade Universitária, do IAG/USP

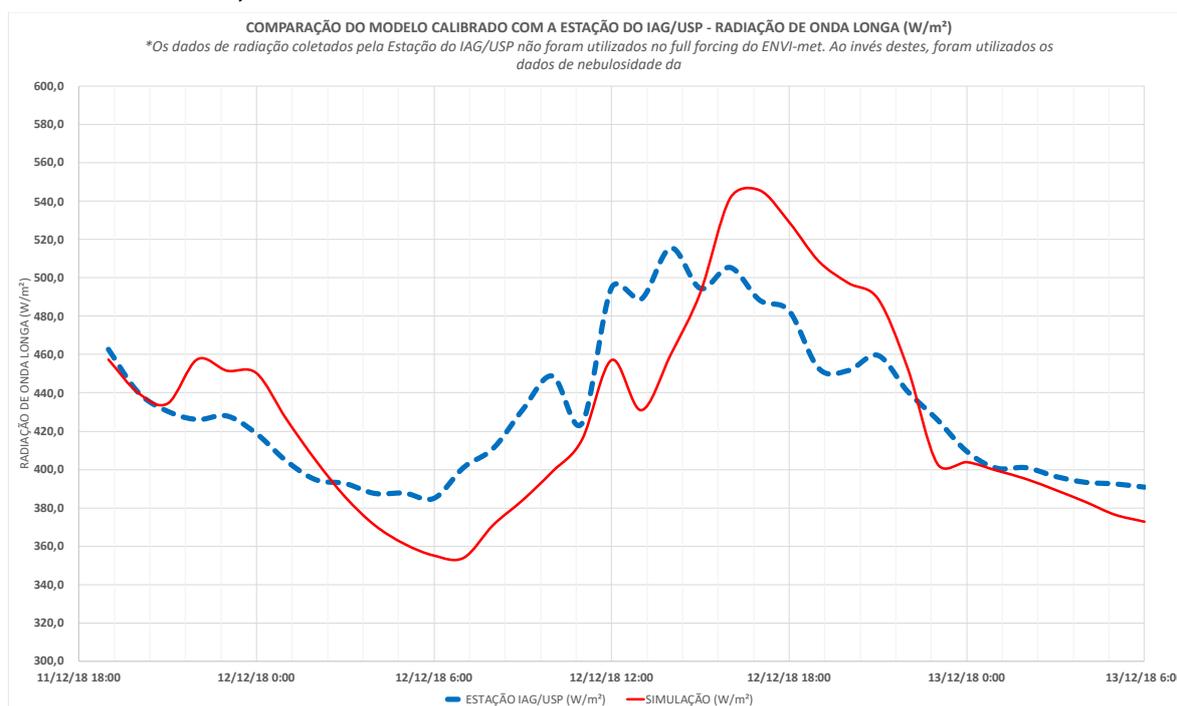


Tabela 8 - Comparação da radiação entre o modelo calibrado e a Estação Meteorológica da Cidade Universitária, do IAG/USP

	Radiação direta		Radiação difusa		Radiação de onda longa	
	Estação IAG (W/m ²)	Simulação (W/m ²)	Estação IAG (W/m ²)	Simulação (W/m ²)	Estação IAG (W/m ²)	Simulação (W/m ²)
Máximo	1.068,2	939,3	299,1	288,5	515,6	545,6
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	385,1	354,0

Tabela 9 - Comparação da radiação entre o modelo calibrado e a Estação Meteorológica da Cidade Universitária, do IAG/USP

	Radiação direta (W/m ²)	Radiação difusa (W/m ²)	Radiação de onda longa (W/m ²)
Erro Absoluto Médio (MAE)	154,6	24,1	25,7
Erro absoluto máximo	803,7	157,8	57,9

Em resumo, o modelo climático calibrado apresentou aderência às medições, dentro dos limites de tolerância esperados, e pode ser utilizado para estudos que envolvam a simulação do desempenho térmico de espaços urbanos abertos da cidade de São Paulo. Assim, o modelo climático tem potencial para ser utilizado em estudos que analisam o comportamento do microclima urbano de São Paulo ao longo de dias quentes, permitindo, por exemplo, estudar as respostas de diferentes composições urbanas e diferentes soluções geométricas da cidade.

Análise dos resultados ante outros procedimentos de calibração

Em um breve levantamento, podemos identificar outros trabalhos brasileiros que realizaram procedimentos de calibração do ENVI-met de natureza ou de objetivo similar para a cidade de São Paulo. Por exemplo, Gusson e Duarte (2016) apresentam o processo de calibração de um modelo do ENVI-met para duas áreas da cidade de São Paulo com base em medições *in loco* de variáveis microclimáticas e com o objetivo de criar um modelo climático para comparações de resultados das condições térmicas da cidade em função de diferentes soluções morfológicas.

O procedimento de calibração apresentado em Gusson e Duarte (2016) é similar ao deste trabalho, com *grid* do modelo também com proporções horizontais de 3 m, porém para um período de 24 h e com modelos que apresentam situações urbanas e características de edificações, materiais e superfícies que divergem do modelo utilizado neste trabalho. Trata-se de um modelo do bairro da Bela Vista, com ocupação urbana densa e verticalizada, e de outro modelo, do bairro da Brasilândia, com ocupação urbana em situação irregular de alta densidade e baixa verticalização.

Entretanto, o trabalho foi feito no ENVI-met v4, com uso da v3.1 para algumas funções, e utilizou a ferramenta *simple forcing* em vez do *full forcing*, trazendo o *input* de dados de medições *in loco* para temperatura do ar e umidade relativa e os dados das estações meteorológicas do Mirante de Santana e do IAG/USP – Água Funda para velocidade e direção do vento; e, para a radiação solar, utilizando a v3.1, foram feitos ajustes no fator de radiação global para obter valores similares aos da medição da estação meteorológica do Mirante de Santana, com base na nebulosidade medida pela estação do IAG/USP – Água Funda.

O trabalho de Gusson e Duarte (2016), comparando as temperaturas do ar obtidas a 1,5 m de altura entre medições e simulações, trouxe excelentes resultados de aderência da curva de temperaturas do ar. Os dois modelos calibrados apresentaram MAE de 1,4 °C e de 1,8 °C e RMSE de 1,6 °C e de 1,9 °C. Para este trabalho, o procedimento de calibração utilizado conseguiu alcançar o MAE de 0,4 °C, sendo a diferença máxima entre medição e simulação de 1,5 °C, e a RMSE de 0,5 °C.

A maior correspondência entre os valores de medição e de simulação obtidos neste trabalho é atribuída principalmente ao uso da ferramenta de *full forcing*, que permite significativa maior aderência dos cálculos do software às medições utilizadas como referência, além da coleta e *input* de dados medidos *in loco* de velocidade e direção do vento e do uso de versão mais recente do software, também fazendo o *input* dos dados de nebulosidade da estação meteorológica como um dos dados de entrada do *full forcing*. Para este trabalho, as correspondências de outras variáveis também foram controladas, como umidade relativa, velocidade do ar e direção do vento.

Shinzato *et al.* (2018) também estabeleceram procedimento de calibração para modelo climático para uma área de São Paulo utilizando o ENVI-met v4, a partir de medições *in loco* de variáveis microclimáticas medidas em dois pontos da cidade, um dentro do Parque Trianon, em área totalmente vegetalizada, e outro nas proximidades da Avenida Paulista, em situação de ocupação urbana densa e verticalizada. Para esse trabalho, o foco de estudo foi o impacto da vegetação no microclima urbano, a qual teve, portanto, papel essencial também na calibração dos modelos, diferindo do modelo do presente trabalho, que focou uma área com baixíssima presença vegetal, portanto não incorporando a vegetação do modelo. O procedimento de calibração foi também similar ao deste trabalho, ao adotar células do *grid* com resolução horizontal de 3,5 m e utilizar o *full forcing* com *input* dos dados das medições *in loco* para temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, e dados de radiação da estação meteorológica do IAG/USP – Cidade Universitária. Shinzato *et al.* (2018) adotaram um período maior de simulação, de 58 h, e, sendo o foco do estudo a vegetação, foram realizadas diversas simulações com diferentes cenários de *full forcing* para vários modelos com diferentes características de vegetação.

O trabalho alcançou resultados apurados entre o modelo calibrado e as medições e concluiu que o processo de calibração é mais simples e mais apurado no caso do modelo da área com pouca vegetação do que no caso dos modelos com vegetação. Comparando a temperatura do ar das medições e das simulações para os modelos com vegetação, de um total de 12 diferentes modelos de simulação, os modelos calibrados, com os melhores resultados, portanto, alcançaram RMSE de 0,7 °C e MAE de 0,6 °C, comprovando a excelente aderência entre os dados de medição e simulação, e próximos aos valores encontrados neste trabalho (RMSE de 0,5 °C e MAE de 0,4 °C).

Outros aspectos dos resultados da calibração

Durante o processo de calibração, em alguns dos modelos intermediários, registrou-se excesso de radiação direta incidente no período da tarde, chegando a 1.500 W/m² e, com isso, gerando valores de temperatura radiante média (*TRM*) incompatíveis com as medições (Figura 19, em verde). Esse problema ocorreu quando utilizado o *full forcing* com dados inseridos de radiação solar, mas não com dados de nebulosidade, que geraram resultados adequados às medições (Figura 19, em vermelho), o que é justificado a seguir.

Figura 19 - Comparação dos resultados de *TRM* para a simulação do modelo final calibrado com *input* de dados de nebulosidade com modelo com *input* de dados de radiação



O piranômetro utilizado nas medições registrava somente a irradiação global, e não os valores estratificados de radiação (direta, difusa e onda longa), exigidos pelo ENVI-met para o *full forcing*. Por essa razão, os dados coletados pelo piranômetro não puderam ser utilizados como dados de entrada do modelo climático. Essas informações tiveram de ser supridas com dados das estações meteorológicas e, para tal, deve-se notar que somente é possível inserir os dados de radiação ou os dados de nebulosidade no *full forcing*, nunca os dois.

Assim, havia três opções:

- não inserir dados de entrada de radiação nem de nebulosidade (simulações 11 e 15);
- inserir dados de entrada de radiação coletados pela Estação Cidade Universitária (todas as simulações, exceto 11, 12, 15 e 19); ou
- inserir dados de entrada de nebulosidade coletados pela Estação Água Funda (simulações 12 e 19, incluindo o modelo final calibrado).

(d) Foram realizados testes com as três opções, e a melhor foi o uso de dados de nebulosidade coletados pela Estação Água Funda, pois garantiu redução das diferenças de valores entre medições e simulação. Isso pode estar relacionado principalmente à maior distância entre o ponto de medições e a Estação Meteorológica da Cidade Universitária do IAG/USP (conforme Figura 1), impactando no cálculo do modelo. Dada a maior proximidade geográfica entre o ponto de medições e a Estação Meteorológica Água Funda do IAG/USP, na região do Parque do Estado, Zona Sul de São Paulo (Figura 1), os dados de nebulosidade desta última convergiram melhor com os demais dados de entrada, gerando resultados mais próximos dos medidos.

Por fim, nos modelos, verificou-se leve tendência de supervalorizar o efeito de aquecimento diurno, com aumento da *Tar* e da *TRM* e queda de *UR* maiores do que nas medições durante o dia, em especial no período da tarde, porém dentro dos limites de tolerância adotados para este trabalho. Isso corrobora os achados de pesquisas anteriores, que evidenciaram a supervalorização de algumas variáveis microclimáticas nas simulações, por exemplo, estudos em que os valores de *TRM* foram superestimados (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017).

Conclusão

Através do *input* de medições de variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento), dos dados de nebulosidade da Estação Meteorológica Água Funda do IAG/USP e do

arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base, foi possível compor um modelo climático calibrado para a simulação de condições térmicas na cidade de São Paulo para um dia marcado por altas temperaturas do ar, baixa nebulosidade, alta incidência solar e baixa umidade relativa. A metodologia apresentada garantiu que o modelo climático calibrado tenha grande aderência com os dados microclimáticos medidos *in loco*. Sendo assim, o modelo é capaz de reproduzir de maneira confiável e eficaz a situação climática de um segmento da cidade de São Paulo durante um dia quente e seco.

Também foi possível evidenciar as vantagens do uso do ENVI-met, como sua adequação e adaptabilidade para modelos representativos de São Paulo e para espaços urbanos abertos em microescala, e as dificuldades do processo de simulação em computadores domésticos, em função da grande demanda de tempo para o processamento das simulações. Essa limitação pode se tornar um fator limitante para o estudo, sendo, às vezes, necessário reduzir a escala ou a resolução do modelo.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações: parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2013.

BARBOSA, A. **Urbanismo bioclimático**: efeitos do desenho urbano na sensação térmica. São Carlos, 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

BRANCO, L. M. B. C. **Microclimas urbanos no plano piloto de Brasília**: o caso da Superquadra 108 Sul. Brasília, 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environment Modelling & Software**, Bochum, v. 13, n. 3, p. 373-384, 1998.

GOOGLE EARTH. [Mapas]. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acesso em: 15 jul. 2021.

GUSSON, C. D. S. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano**: construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP. São Paulo, 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GUSSON, C. D. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of built density and urban morphology on urban microclimate: calibration of the model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COUNTERMEASURES TO URBAN HEAT ISLAND, 4., Singapura, 2016. **Proceedings [...]** Singapura: Procedia Engineering, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Anexo Geral V**: Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros - Anexo da Portaria Inmetro n. 50/2013 – Atualizado em 27/11/2017. Brasília, 2017.

LEAL, L. R. **Análise do adensamento urbano no comportamento microclimático de Vitória (ES)**: aplicações no Modelo ENVI-met. Vitória, 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

MACIEL, C. R. **Condições microclimáticas de espaços abertos**: simulação de estratégias por meio do software ENVI-met. Cuiabá, 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

MINELLA, F. C. O.; HONJO, S.; KRÜGER, E. L. Estratégias de melhoria do ambiente térmico diurno em situação de verão de uma fração urbana da cidade de São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 139-158, out./dez. 2012.

MINELLA, F. O.; KRÜGER, E. L. **Impactos da geometria urbana no microclima**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265750178_IMPACTOS_DA_GEOMETRIA_URBANA_NO_MICROCLIMA. Acesso em: 24 ago. 2019.

NOVAES, G. B. A. **Impactos da morfologia da cidade nas condições microclimáticas de áreas urbanas consolidadas de São Paulo em dias quentes**. São Paulo, 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Mapa digital da cidade de São Paulo**. GeoSampa Mapa, 2019. Disponível em: http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx. Acesso em: 19 ago. 2019.

ROSHEIDAT, A.; HOFFMAN, D.; BRYAN, H. Visualizing pedestrian comfort using ENVI-met. In: SIMBUILD 2008; NATIONAL CONFERENCE OF IBPSA, 3., Berkeley, 2008. **Proceedings [...]** Berkeley: IBPSA, 2008.

SCHMITZ, L. K. **Reestruturação urbana e conforto térmico em Curitiba/PR**: diagnóstico, modelagem e cenários. Curitiba, 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SHARMIN, T.; STEEMERS, K.; MATZARAKIS, A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 293-308, 2017.

SHINZATO, P. **Impacto da vegetação nos microclimas urbanos em função das interações solo-vegetação-atmosfera**. São Paulo, 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SHINZATO, P. *et al.* 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, 2018.

Agradecimentos

Agradeço à Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do IAG/USP e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, pelo fornecimento de dados das medições meteorológicas das estações Água Funda, no Parque do Estado, e IAG USP, na Cidade Universitária. Também agradeço ao LABAUT FAU USP, pelo empréstimo e manuseio dos equipamentos de medição utilizados.

Gabriel Bonansea de Alencar Novaes

Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Rua do Lago, 876, Cidade Universitária, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 04280-000 | Tel.: (11) 3091 4795 | E-mail: gabriel.novaes@usp.br e gabrielalencarnovaes@hotmail.com

Leonardo Marques Monteiro

Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | E-mail: leo4mm@usp.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
www.scielo.br/ac
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.