



SINGEORB 2017

I Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS



ANAIS SINGEORB 2017

ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE SOLAR E CENÁRIOS EVOLUTIVOS EM ÁREAS URBANAS SUJEITAS À VERTICALIZAÇÃO E AO ADENSAMENTO

PACIFICI¹, M.; MARINS², K. R. C.

¹ Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil.
E-mail: martinapacifici@usp.br

² Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil.
E-mail: karin.marins@usp.br

RESUMO

O sombreamento devido à presença dos objetos construídos é responsável por criar micro-diferenças climáticas entre tecidos urbanos caracterizados por diferentes formas, em termos de adensamento construído e verticalização. Essas diferenças afetam o desempenho térmico dos espaços fechados das habitações, assim como o bem-estar do pedestre em espaços abertos. Regiões urbanas que são objeto de atividades imobiliárias intensas, como as áreas ao longo dos Eixos de Transporte em São Paulo, sofrem com a inserção de novos empreendimentos imobiliários, que promovem novas condições de sombreamento, afetando a disponibilidade solar no lugar. Nesse contexto descrito, o objetivo principal do trabalho visa analisar as condições de acesso solar em vias urbanas, no bairro do Belenzinho, localizado na cidade de São Paulo, com base em simulações da disponibilidade de radiação solar em função do sombreamento causado pela variação do tecido morfológico urbano. O método de trabalho é organizado em coletas climáticas de campo, análise de dados de estação fixa e técnicas de simulação. Os resultados produzidos são apresentados em forma de correlação entre as variáveis de temperatura do ar, temperatura superficial, número de horas solares e fator de visão do céu (SVF). Também cenários morfológicos futuros são elaborados a partir do contexto urbano existente; cada cenário representa um padrão de adensamento específico que traz mudanças na disponibilidade solar do lugar. Os cenários são avaliados de acordo com o número de horas solares interceptadas. O trabalho pretende contribuir para a análise climática da estrutura morfológica das cidades brasileiras e oferecer insumos que suportem o desenvolvimento do desenho urbano e sua correta implementação.

Palavras-chave: sombreamento, adensamento e verticalização, clima urbano, morfologia urbana.

ABSTRACT

The shading due to the presence of constructed objects is responsible for creating thermal micro-differences between urban fabrics characterized by different forms, and degrees of built densification and verticalization. These differences affect the environmental performance of enclosed spaces, and internal spaces inside the dwellings, as well as the pedestrian well-being on the street. Urban areas that are subject to intense real estate

activities, such as the areas along the Transport Oriented Development (TOD) in São Paulo, suffer for the insertion of new real estate developments, which involve new shading conditions, affecting the solar availability on the place. In this context, the main objective of this work is to analyze the conditions of urban road solar access, in a neighborhood located in the city of São Paulo, based on simulations of the solar radiation availability affected by the variation of urban morphological fabric. The work method is organized in field climate collections, fixed station data collection and simulation techniques. The results produced were presented as a correlation between variables of air temperature, surface temperature, number of solar hours and sky view factor (SVF). Also future morphological scenarios were elaborated from the existing urban context; each scenario represents a different density pattern that brings out changes in the site's solar availability. The scenarios were evaluated according to the number of solar hours intercepted. This work intends to contribute to the climate analysis of the morphological structure of Brazilian cities and to provide inputs that support the improvement of urban design and its right implementation.

Keywords: shading, densification and verticalization, urban climate, urban morphology.

1 INTRODUÇÃO

O ambiente climático urbano é um sistema em permanente adaptação devido às contínuas transformações morfológicas que seus habitantes demandam. De acordo com Assis (2002), "a qualidade físico-ambiental da cidade está intrinsecamente ligada à acessibilidade dos recintos urbanos aos recursos ambientais, dentro os quais a insolação, iluminação e ventilação naturais têm grande importância no balanço energético urbano".

O sombreamento devido à presença dos objetos construídos é responsável por criar micro-diferenças climáticas entre tecidos urbanos caracterizados por diferentes formas, e graus de adensamento e verticalização. Essas diferenças afetam o desempenho térmico dos espaços fechados, dentro das habitações, assim como o bem-estar do pedestre em espaços abertos. Regiões urbanas que são objeto de atividades imobiliárias intensas, como as áreas ao longo dos Eixos de Transporte em São Paulo, sofrem com a inserção de novos empreendimentos imobiliários, que promovem novas condições de sombreamento, afetando a disponibilidade solar no lugar.

A metrópole de São Paulo (latitude $-23^{\circ}21'$, longitude $-46^{\circ}44'$), por estar localizada próxima ao trópico de Capricórnio, constitui uma região climática de transição entre o clima tropical úmido de altitude e o clima subtropical. A região é caracterizada por duas estações bem definidas: uma quente e chuvosa (Primavera - Verão) e outra fria e mais seca (Outono - Inverno). O Município de São Paulo encontra-se a 45 km do Oceano Atlântico; sua topografia apresenta várzeas, colinas, morros e serras, entre uma altitude de 720 e 850 metros. Segundo Tarifa e Armani (2000), o município é formado por quatro macro-unidades climáticas urbanas, predominantemente homogêneas. A macro-unidade em que o Bairro de Belenzinho se encontra, é um vale plano, rebaixado, marcado pela presença de fábricas antigas e depósitos, com telhados e superfícies de alta absorção solar, em que um forte aquecimento foi comprovado por imagens de satélite.

Nessa região urbana, desde a década de 2000, um processo de adensamento e verticalização tem sido produzido pelo setor imobiliário, contribuindo para alteração morfológica e climática do tecido residencial/industrial preexistente de baixa altura. Essa intensificação na atividade construtiva tem provocado o aumento da circulação de pedestres, da frota de veículos e o incremento das atividades comerciais. A proliferação de edifícios altos e próximos entre si levou à formação de cânions urbanos, onde

profundas áreas sombreadas são projetadas e temperaturas mais frescas vêm sendo observadas, junto à modificação dos fluxos de ar; no entorno desses empreendimentos o ambiente luminoso e térmico da região modifica-se e microclimas peculiares se formam.

De acordo com Costa (2003) e Ribeiro et al. (2010), a aceleração do processo de verticalização induz o aumento de área construída exposta à radiação solar, dificulta a dispersão de energia térmica armazenada para atmosfera e, se o sombreamento mútuo entre edifícios for excessivo, leva à exigência de iluminação artificial. Também, para Monteiro et al. (2013), o processo de verticalização, incentivando a edificação de empreendimentos de grande porte, altera a rugosidade, a forma do relevo e a impermeabilização do solo, levam à degradação das condições de ventilação e ao aumento do ganho de calor, impactando diretamente na temperatura e afetando saúde e o conforto térmico dos moradores.

Segundo Knowles (1980), a construção de novos empreendimentos imobiliários impacta no microclima da cidade projetando sombras profundas que abrangem as áreas recreativas e os jardins, diminuindo a disponibilidade solar nas casas, mudando drasticamente a ecologia doméstica e restringindo o direito ao acesso solar. Esses impactos são complexos e não deveriam ser analisados de forma isolada; eles podem prejudicar a habitabilidade do bairro, assim como comprometer o potencial de conversão energética. Rossi et al. (2011), em estudar a sensação térmica em espaços abertos na cidade de Curitiba, recomendam o uso de elementos arquitetônicos como pérgolas e galerias, assim como o uso de árvores decíduas, para permitir a insolação no período de inverno, minimizando o estresse térmico devido ao frio, e garantindo sombreamento no verão.

Segundo Douglas (1983) apud Nucci (1999), com a verticalização surge o problema do sombreamento que causa contrastes térmicos entre a parte sombreada e a ensolarada. Para Erell et al. (2011), “o sombreamento - ou sua falta relativa - é uma característica proeminente de qualquer paisagem urbana”. Ele é função da geometria do cânion e pode ser computado quantitativamente a partir do período do ano, da localização geográfica e das proporções geométricas da rua (H e W). Os pedestres podem ser afetados pelo sol direto em diferentes graus, de acordo com as circunstâncias em que os elementos construídos se colocam. Uma compactidade excessiva nos cânions com orientação leste-oeste pode resultar em uma perda excessiva de calor (overshading) para os pedestres, enquanto esse efeito é amenizado nos cânions norte-sul quando o sol alcança a posição vertical.

Para Nunes (2011, p.59) o monitoramento do processo de verticalização em áreas urbanas é essencial para preservação da qualidade de vida urbana; isto é, a projeção de sombras em volta de edifícios residenciais de grande porte aumenta a umidade nas partes internas das habitações sombreadas, causando a proliferação de mofo, fungos e cupins, considerados agentes favoráveis ao aparecimento de doenças bronco-pulmonares.

Emmanuel et al. (2007) considera o potencial de sombreamento da massa urbana como um meio crucial para o aprimoramento do conforto, certamente superior às características da superfície das áreas urbanas. O sombreamento interfere nos fluxos de energia solar transmitida por radiação (input) e irradiada de volta pelas formas construídas (output). Segundo Oke (1978, p.6), a diferença entre essa energia de input e output resulta em uma energia acumulada, responsável pelo aumento da temperatura, e que ao longo do tempo será restituída para atmosfera, de acordo com a primeira Lei da Termodinâmica. Dessa forma, o ambiente construído afeta a absorção e a reflexão de radiação solar recebida, bem como a absorção e a emissão de radiação de onda longa da superfície. A

temperatura, por sua vez, é influenciada pelo albedo do tecido urbano, ou seja, pela razão entre radiação emitida e radiação incidente.

2 OBJETIVO

O objetivo principal desse trabalho é analisar as condições de acesso solar em vias urbanas existentes, no bairro do Belenzinho, localizado na subprefeitura da Mooca, na Cidade de São Paulo, assim como simular cenários futuros de adensamento cujo impacto no sombreamento causado será analisado. Para o alcance desse objetivo, um método em seis etapas foi investigado e aplicado nesse artigo. O processo metodológico proposto é parte de pesquisas em desenvolvimento para apoio à construção e avaliação de políticas urbanas que visam incentivar o adensamento construído nas áreas urbanas existentes.

3 MÉTODO

O método proposto visa explorar a relação entre a morfologia do ambiente construído e o clima urbano, assumindo que, ao variar a posição mútua entre volumes arquitetônicos, diferenças climáticas locais são encontradas na escala do bairro. O sombreamento causado pela geometria urbana e a temperatura é o objeto principal desse estudo; especialmente o sombreamento (ou inversamente, o número de horas de acesso direto ao sol) é suposto ser uma das principais causas responsáveis pela retenção do aumento de temperatura superficial e do ar. O método foi aplicado em estudo de caso; o domínio selecionado, localizado no bairro de Belenzinho, é composto por cinco quadras ocupadas por torres mistas implantadas em um tecido urbano de baixa altura. A área já sofreu um processo de adensamento e verticalização na década de 2000; hoje, pelo fato de encontra-se ao longo de dois Eixos de Transporte, poderia receber a construção de novos empreendimentos. O método se constituiu de seis etapas:

- i. Acesso Solar: Primariamente, um estudo preliminar de acesso solar, realizado pelo Grasshopper em Rhinoceros, foi conduzido em quatro datas simbólicas; equinócios de primavera e outono e solstícios de verão e inverno, para sondar a extensão das sombras.
- ii. Coleta Climática: Sucessivamente, uma coleta de campo em transepto foi efetuada, em 36 pontos do domínio, para medir a temperatura (do ar e superficial) e o fator de visão do céu em configurações morfológicas diversas. A lista dos equipamentos usados inclui: Datalogger: Hobo, U23-001; Solar shield: Hobo, RS-1 (temperatura do ar); Câmera termográfica: Fluke, Ti105 (temperatura superficial), Câmera fotográfica: Nikon, Coolpix 4500; Fisheye lens: Nikon, FC-E8 0.21x (visão do céu).
- iii. Estações climáticas: Os dados de temperatura local foram comparados com dados de estações climáticas de São Paulo, tomando-se em conta as estações mais perto do domínio em estudo, assim como uma estação situada fora da mancha urbana da cidade.
- iv. Simulação solar: Dentro da janela temporal da coleta de campo, um estudo de simulação solar foi executado para a data 26 de Maio, ao longo de 24 horas e, sucessivamente, em faixas temporais distintas em que as horas solares foram agrupadas. As simulações foram realizadas por meio do GrassHopper (Ladybug) acessível pelo software Rhinoceros.
- v. Correlação: Os output obtidos na simulação foram correlacionados com os dados de temperatura medidos no lugar, a fim de se verificar o papel de sombreamento em gerar diferenças de temperatura intra-pontos.
- vi. Cenários: Finalmente, dois cenários alternativos de adensamento construído foram criados para explorar o alcance do sombreamento relacionado com essas configurações futuras.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Acesso Solar

Para selecionar o período do ano mais adequado para presente análise, as condições de sombreamento no domínio em estudo foram analisadas nas quatro estações climáticas do ano, tendo como referência as datas dos equinócios de primavera e outono (23 setembro, 21 março) e dos solstícios de verão e inverno (21 dezembro, 21 junho) (Figura 1a e 1b). Analisando os resultados, períodos de sombra consideravelmente mais longos foram encontrados nos períodos de inverno e outono, devido à menor altura do sol e à maior inclinação dos raios solares. Além disso, enquanto no verão e primavera o sombreamento é, na maior parte do tempo, desejável, dadas as temperaturas elevadas, na estação mais fria um excesso de sombreamento pode comprometer a vivência dos espaços abertos em alguns horários do dia, enquanto a exposição à radiação direta pode ser benéfica para o seu aproveitamento. Desde esta primeira etapa, a estação do ano mais fria foi selecionada para proceder a análise proposta.

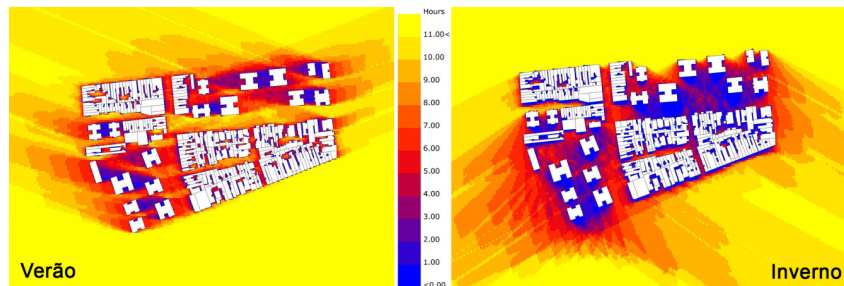


Figura 1 - Sombreamento no verão (a) Sombreamento no inverno (b)
Fonte: AUTORES (2017)

4.2 Coleta Climática

Na segunda etapa do método, uma coleta climática em transepto foi realizada no domínio urbano em estudo (Figura 2). A coleta foi organizada em dois ciclos de medição (outono e inverno) de três dias cada um, em 36 pontos, no período da manhã (6h-9h) e da tarde (13h-16h). O ponto de parada em cada ponto foi 15 minutos. As medições foram realizadas em campo aberto, em condições atmosféricas estáveis. Para esse trabalho, entre as variáveis coletadas, somente a temperatura do ar e a superficial foram utilizadas junto com o fator de visão do céu. Os resultados das medições demonstram que apesar da distância muito próxima entre pontos de medição, diferenças de temperatura superficial e temperatura do ar, inter-pontos, existem. A partir dessa evidência, o trabalho buscou identificar se e de que forma o sombreamento dos edifícios pode ser considerado responsável por essa variação térmica tão próxima. Os 36 pontos iniciais foram reduzidos para 27, descartando os pontos afetados pelo sombreamento das árvores, cuja análise não é parte do escopo deste trabalho.



Figura 2 – Domínio em estudo com pontos de coleta (a); subprefeitura da Mooca (b); bairro do Belém (c). Fonte: AUTORES (2017)

4.3 Estações climáticas

As variações de temperatura superficial e do ar levantadas em campo foram analisadas comparativamente com os dados de estação climática fixa. Entre as estações climáticas presentes no território do Município de São Paulo, foram selecionadas: a estação CGE da Mooca, a mais próxima ao domínio urbano em estudo, a estação CGE da Sé, cercada por um tecido urbano muito denso, a estação de CGE de Butantã, rodeada por vegetação, e a estação CGE Capela do Socorro, situada nas bordas periféricas do Município de São Paulo, fora da mancha urbana. Esta escolha tornou possível verificar a correspondência entre as medidas tomadas em campo e as medições de estações meteorológicas, assim como permitiu analisar a variabilidade térmica dentro do município de São Paulo, comparando áreas urbanas caracterizadas por tecidos morfológicos bem diferentes e geograficamente distantes (centrais ou periféricos a respeito da mancha urbana). A comparação com as estações meteorológicas foi efetuada nos mesmos dias da medição realizada em transepto. Os resultados demonstram uma correspondência entre os valores de temperatura do ar em todas as estações fixas (Figura 3). Isso, quantitativamente, confirma a existência de uma tendência térmica comum gerada pela regionalidade específica da cidade de São Paulo, até a Capela do Socorro (fora da mancha urbana) pouco se afasta desses valores. Em outras palavras, a extensão da área urbana de São Paulo e suas peculiaridades demonstram um padrão térmico comum que abrange a todo seu território. Nesse sentido, a cidade deve ser vista como uma totalidade urbana e climática; a diversidade térmica ao nível local deve ser, portanto, contextualizada dentro desse cenário térmico comum.

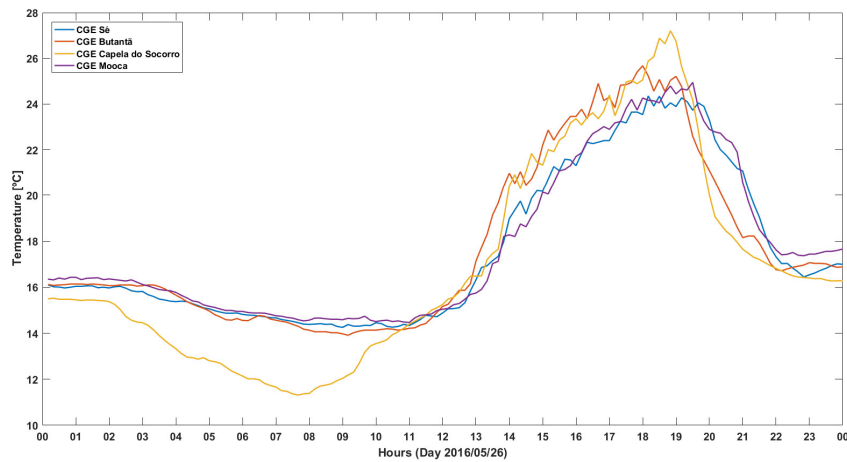


Figura 3 – Temperatura do ar no dia 26 Maio 2016 em quatro estações de medição climática

Fonte: AUTORES (2017)

4.4 Simulação Solar

Para analisar a influência do sombreamento nos contrastes térmicos medidos entre os pontos do domínio, uma simulação solar foi rodada no dia 26 de maio (data selecionada por encontrar-se no final do outono, no meio da estação fria). Um dia de simulação foi suficiente, como a variação da inclinação solar entre dias próximos é desprezível. O software Rhinoceros, em conjunto com DIVA, permitiu construir parametricamente a trajetória do Sol (SunPath) acima do próprio domínio, para o intervalo temporal definido (dia, mês, e horário), retornando como dados de saída o sombreamento gerado pela geometria urbana nas condições anuais desejadas (Figura 4).

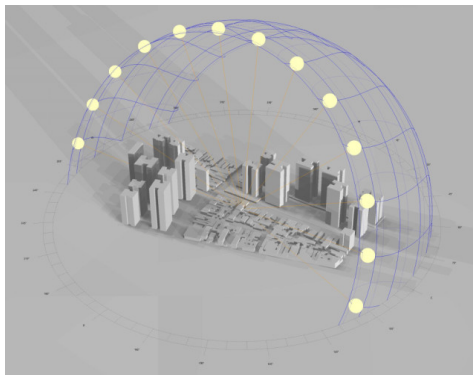


Figura 4 – Sun Path

Fonte: AUTORES (2017), utilizando a ferramenta Sun Path no software DIVA for Rhino

Sucessivamente, sempre por meio do software Rhinoceros e dos scripts GrassHopper, um estudo mais específico foi feito utilizando-se da ferramenta Sunlight Analysis (plugin Ladybug), que permite retornar graficamente a distribuição da luz no domínio em estudo, assim como calcular as horas solares de iluminação direta (Figura 5). Um período de simulação de 24 horas foi selecionado no dia 26 de maio. Os resultados mostram que um valor entre 0 e 11 horas solares foi atribuído para cada pixel; dessa forma foi possível obter as horas solares encontradas em cada ponto de medição e comparar esses valores com a temperatura superficial e do ar.

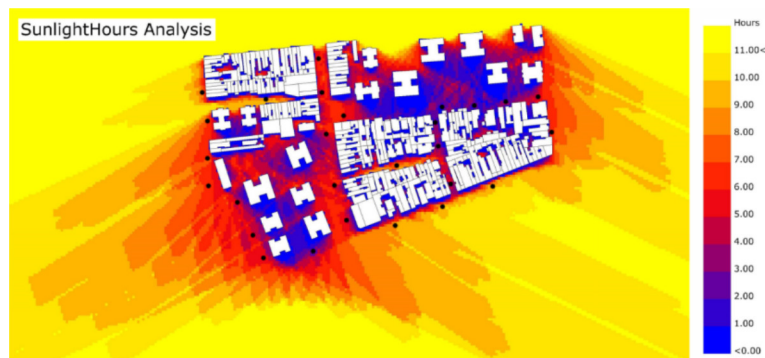


Figura 5 – Análise das Horas de Sol
 Fonte: AUTORES (2017), utilizando a ferramenta Sunlight Analysis

4.5 Correlação

Após a simulação, a correlação entre as variáveis de temperatura do ar, temperatura superficial e número de horas de sol foi analisada, retornando resultados suficientemente satisfatórios. A correspondência entre a evolução da temperatura e do número de horas de sol encontradas em cada ponto foi observada (Tabela 1) mediante a análise do coeficiente de correlação de Spearman (r_s), indicado para o estudo de relações não lineares. Vista a velocidade de aquecimento que caracteriza o asfalto, a temperatura superficial da via retornou uma correlação melhor ($r_s = 0.700949$) a respeito da temperatura do ar ($r_s = 0.55413$). O coeficiente de Spearman foi calculado pelo software PLA 3.0 Bioassay Software; os resultados foram comprovados pelo website VassarStats: Website for Statistical Computation e pelo Microsoft Excel.

Tabela 1 – Horas de Sol e Sombras nos ponto de medição

Pontos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
H Sol	5	2	2	2	6	4	5	5	8	9	9	7	2	3	4	8	4	5	2	5	5	6	5	7	7	7	4
H Sombra	7	10	10	10	6	8	7	7	4	3	3	5	10	9	8	4	8	7	10	7	7	6	7	5	5	5	8

Sucessivamente, como as áreas solares não podem ser consideradas igualmente significativas ao longo do todo dia, o estudo foi refinado aplicando uma média ponderada das horas solares encontradas nos pontos. Efetivamente, para Erell et al. (2011), o sombreamento tende se tornar mais importante ao longo das horas diurnas. Para aplicar a média ponderada foi preciso identificar as faixas horárias em que distintos aportes de energia solar são constatados. Assim, a trajetória solar foi observada no dia em análise; em data 26 de maio 2016, no domínio de estudo, o sol surgiu às 06:19 horas, pôs-se às

19:47 horas, enquanto o zênite ocorreu às 13:07 horas. Consequentemente, o intervalo das 19:00 às 7:00 horas foi cortado da análise, como nesses horários as horas de luz são ausentes ou com conteúdo energético desprezível. Após, dentro do intervalo restante (07:00h-19:00h), uma segregação em três faixas foi feita: 1) 07h-11h; 2) 11h-15h; e 3) 15h-19h. Para efetuar a segregação, foi tomada como referência a parábola solar; a faixa central (11h-15h), caracterizada por uma radiação energeticamente maior, foi construída em volta do zênite (13h), enquanto as duas faixas laterais completam o intervalo em estudo. As horas de sol foram calculadas novamente nas três faixas; 19% das horas solares enquadravam-se na faixa 1, 60%, na faixa 2, e 21% na faixa 3. Após, por cada uma delas, um fator de ponderação foi atribuído. Para determinar esse fator multiplicativo, o montante de energia de radiação solar foi estimado para cada faixa. A partir das médias horárias da estação CETESB Marg.Tietê - Ponte dos Remédios, a RADG (Radiação Solar Global) foi estimada em 967 W/m² na primeira faixa, 2860 W/m² na segunda faixa, e 954 W/m² na terceira faixa (Tabela 2).

Tabela 2 – Radiação solar global agrupada em faixas

Tipo de Rede: Automática				
Tipo de Dado: Primário				
Código estação: 270				
Nome estação: Marg.Tietê-Pte Remédios				
Data	Hora	RADG(horaria) - W/m2	Faixa	RADG(faixa) - W/m2
26/05/2016	07:00	2		
26/05/2016	08:00	39		
26/05/2016	09:00	99	F1	967
26/05/2016	10:00	256		
26/05/2016	11:00	571		
26/05/2016	12:00	613		
26/05/2016	13:00	678	F2	2860
26/05/2016	14:00	492		
26/05/2016	15:00	506		
26/05/2016	16:00	314		
26/05/2016	17:00	125	F3	954
26/05/2016	18:00	9		
26/05/2016	19:00	0		

Fonte: AUTORES (2017), com base nos dados da estação CETESB Marg.Tietê - Ponte dos Remédios.

Deve-se notar, portanto, que a faixa central possui uma energia tripla a respeito das faixas laterais. Logo, à primeira (1) e à terceira faixas (3) foi atribuído um fator multiplicativo de 0,20, visto que nesses intervalos a contribuição à radiação global é mínima; no entanto, à faixa central (2) foi atribuído um fator multiplicativo de 0,60, como nesse intervalo a participação à radiação global é tripla. A análise “temperatura-horas solares” foi repetida com os valores ponderados e uma correlação melhor foi efetivamente encontrada ($r_s = 0.741302$) (Figura 6).

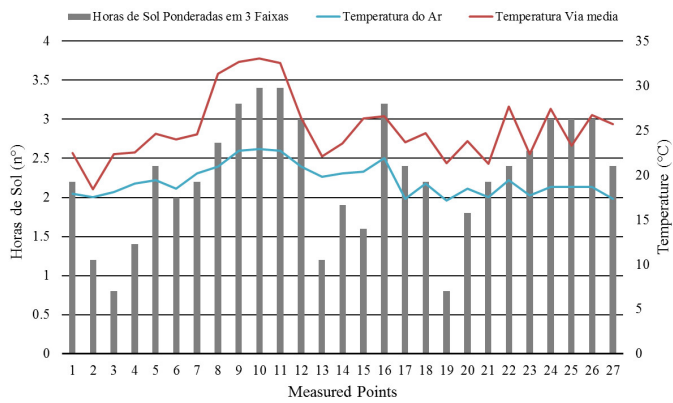


Figura 6 - Correlação entre Temperatura Superficial, Temperatura do Ar e Horas de Sol, ponderada em três faixas diurnas. Fonte: AUTORES (2017)

O emprego da média ponderada permitiu diferenciar o dado puro de hora solar em valores mais finos, de acordo com o potencial de energia solar que ao longo do dia alcança os pontos do domínio causando seu aquecimento diferenciado. Ao mesmo tempo, para levar em conta a proximidade dos objetos obscurantes a respeito dos pontos em análise, também o fator de visão do céu (SVF) foi considerado. De acordo com Erell et al. (2011), o SVF é uma variável crítica para quantificar a radiação difusa relacionada com o cânion. O SVF foi calculado pelo software Rayman desde fotos com lente olho de peixe. Valores altos de SVF no ponto dão mais importância ao número de horas solares. A lógica desse raciocínio é confirmada pelo fato que dados dois pontos sombreados, independentemente do comprimento da trajetória solar interceptada, o ponto com maior visão do céu apresenta objetos obscurantes mais afastados e se beneficia da radiação difusa espalhada pelo céu e da radiação refletida que vem das superfícies e paredes adjacentes (Figura 8b); em vez, o ponto com menor visão de céu apresenta objetos obscurantes mais próximos (Figura 8a). Assim, multiplicando as horas solares pelo novo fator SVF, um novo ajuste da correlação foi obtido ($r_s = 0.716227$) (Figura 8c); no entanto, a média ponderada nas três faixas (Figura 6) demonstrou-se ser mais eficiente.

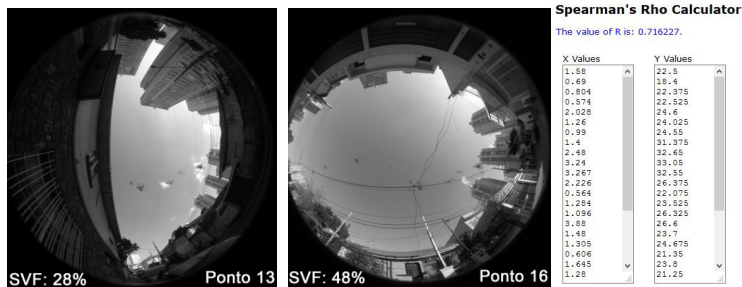


Figura 8 – Distancia do objeto obscurante nos pontos 13 (a) e 16 (b); cálculo do coeficiente de Spearman (c). Fonte: AUTORES (2017)

4.6 Cenários

Finalmente, para compor os cenários de desenvolvimento urbano, uma alteração na geometria do ambiente construído foi aplicada ao domínio existente e simulada, com o escopo de avaliar quantas horas solares por dia os mesmos pontos iriam receber, e, portanto, qual seria o alcance do sombreamento. Dois cenários morfológicos futuros (A e B) foram elaborados; cada cenário representa um padrão de adensamento diferente, suscetível de trazer mudanças térmicas específicas. No cenário A, os lotes atuais ocupados por edifícios de baixa altura foram substituídos por torres, usando a mesma arquitetura dos lotes vizinhos; no cenário B, em vez, 21 lotes foram adensados de forma pontual, elevando a altura do prédio atual em 10 andares, combinando o tecido urbano existente de baixa altura com edifícios mais altos (Figura 9a). Em ambos os cenários um aumento similar de volume construído foi implementado, resultando em um adensamento comparável. Ao simular a trajetória solar nos dois cenários, no dia 26 de maio, duas novas configurações de sombreamento foram obtidas. A Figura 9b mostra a redução de horas solares, causada pelos dois cenários. A cor laranja destaca a ocorrência dessa redução a respeito da configuração morfológica existente; o tom mais escuro mostra um decréscimo maior de horas solares, enquanto o tom mais claro destaca um decréscimo mais ténue. Nota-se que o cenário A é fortemente impactante nos pontos centrais do domínio em estudo (pontos 7 – 19) chegando a obstruir 35 horas solares a respeito da condição existente; o cenário B demonstra ser menos impactante em termos de horas solares garantidas. No cenário A os objetos construídos introduzidos são puramente verticais e projetam sombras profundas que abrangem amplas porções de solo urbano, assim como as superfícies dos prédios ao redor. O cenário B, em vez, realizando o adensamento por meio de edifícios modestos, apresenta um impacto atenuado sobre as horas solares disponíveis, resultando ser, entre as duas soluções propostas, a configuração adensada mais apropriada para otimização do acesso solar.

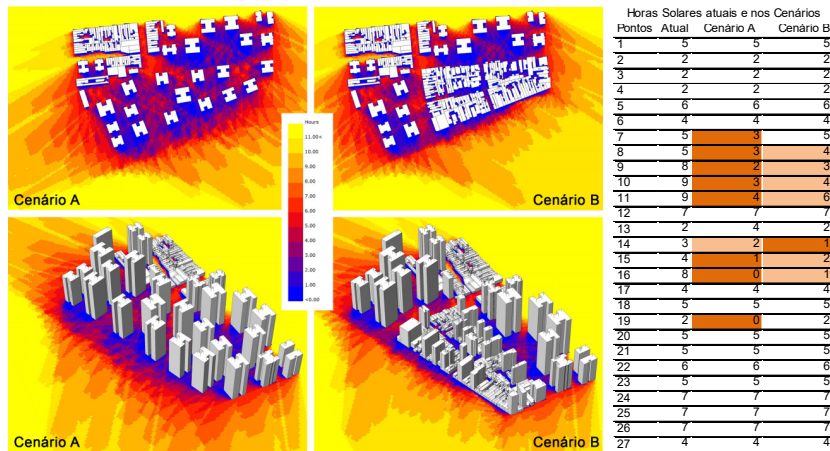


Figura 9 – Cenário A e B (a) e as relativas horas solares (b)
 Fonte: AUTORES (2017), utilizando a ferramenta Sunlight Analysis

5 CONCLUSÃO

Este trabalho contribui para o entendimento das relações ambientais e morfológicas que vinculam as variáveis climáticas à estrutura construída da cidade. Especialmente o acesso solar, favorecido ou impedido pelos objetos construídos, foi relacionado com a

presença de diferenças térmicas infra-urbanas, assim como com o fator de visão do céu, visando avaliar as condições de sombreamento presentes e futuras, em um bairro da cidade de São Paulo que, assim como outras áreas selecionadas do município, passa por um processo de adensamento e verticalização incentivado pelo Plano Diretor. O objetivo pretendido foi alcançado por uma sequência de seis etapas metodológicas, combinando técnicas de medição climática, análise de dados e simulação solar. Os resultados mostram que a temperatura média da cidade de São Paulo apresenta valores similares nas várias estações climáticas analisadas, apesar das diferenças geográficas e de altitude em que elas são instaladas. Todavia, diferenças de temperatura foram encontradas também na escala local, geradas por os múltiplos fatores ligados à estrutura morfológica do lugar. Entre esses fatores, o potencial de sombreamento dos objetos construídos foi explorado, selecionando um dia típico de outono, em que uma coleta climática tinha sido feita. O estudo conjunto da temperatura coletada e do número de horas solares simuladas revelou uma boa correlação entre as duas variáveis; a temperatura superficial desempenhou uma melhor correlação ($r_s = 0.700949$) a respeito da temperatura do ar. Além disso, para levar em conta o crescimento da energia solar radiante ao longo do dia, a correlação foi refinada executando a média ponderada das horas solares, agrupadas em três faixas, e aprimorando o coeficiente de Spearman ao valor $r_s = 0.741302$. Os resultados das correlações entre temperatura e número de horas solares (r_s) corroboram que o acesso ao sol é uma variável adequada para explicar o fenômeno do aquecimento diferenciado infra-urbano, embora não a única, dado o grande número de variáveis envolvidas no balanço energético urbano. Finalmente, dois cenários de adensamento urbano foram simulados para a área em estudo, denunciando um excesso de sombreamento no Cenário A (35 horas solares obstruídas) e propondo insumos que suportem a prática do desenho urbano. Para continuação do presente estudo, trabalhos futuros deveriam ser endereçados para o cálculo e a análise dos índices de conforto do pedestre na configuração urbana real e nos cenários simulados. Também, a concepção desses cenários futuros poderia ser melhorada com propostas urbanísticas alternativas. Além disso, simulações da temperatura do ar deveriam ser associadas com essas configurações.

6 REFERÊNCIAS

ASSIS, E. D. S. Critérios de acessibilidade ao sol e à luz natural para conservação de energia em escala de planejamento urbano. In: IX ENTAC Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Anais... Foz do Iguaçu, PR, 2002, p. 991–1000.

CETESB Estação meteorológica Marg.Tietê - Ponte dos Remédios, 2017. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/qualar/>>. Dados solicitados em: 11/04/17.

CGE Estações meteorológicas, 2017. Disponível em: <<https://www.cgesp.org/v3/estacoes-meteorologicas.jsp>>. Dados solicitados em: 10/04/2017.

COSTA, A. D. L. Análise bioclimática e investigação do conforto térmico em ambientes externos: Uma experiência no bairro de Petrópolis em Natal/RN. 2003. 180 f. Tese (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/12411>>. Acesso em: 6 ago. 2017.

DOUGLAS, I. The urban environment. London: Edward Arnold (Publishers) Ltda, 1983, 229p.

- EMMANUEL, R. et al. Urban Shading—a Design Option for the Tropics? A Study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology*. v. 27, n. 14, 2007, p. 1995–2004.
- ERELL, E. et al. Urban Microclimate. Designing the Spaces Between Buildings. 1. ed. London: Earthscan, 2011.
- NICOL, F. Adaptive Thermal Comfort. Principles and Practice. Oxon: Routledge, 2012
- NUCCI, J. C. Análise sistêmica do ambiente urbano, adensamento e qualidade ambiental. *Ciências Biológicas e do Ambiente*, São Paulo, v. 1, n. 1, 1999, p. 73–88.
- KNOWLES, R. L. Solar Envelope. *2 Solar L. Rep.*, v. 2, n. 2, 1980, p. 263-297.
- MONTEIRO, K. C. R. et al. Reflexões sobre as consequências da verticalização para o clima urbano na cidade de Vitória da Conquista – BA- Brasil. In: Encontro de Geógrafos da América Latina, 14, Peru, 2013. *Anais...*, Peru, 2013.
- NUNES, N. GESTÃO AMBIENTAL URBANA: PLANEJAR ANTES DE VERTICALIZAR. Instituto de Engenharia Arquitetura e Design – INSEAD – CEUNSP, SALTO - SP, Ano. 2, n. 3, 2011, p. 58-62.
- OKE, T. R. Boundary Layer Climate. 1. ed. London: Methuen & Co. Ltd, 1978.
- PLA 3.0 Bioassay Software. Disponível em:
<<http://www.socscistatistics.com/Default.aspx>> Acesso em: 13 ago. 2017.
- RIBEIRO, C. A. D. M. et al. Metodologia para análise do sombreamento em centros urbanos. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2010. *Anais...* Recife, PE, 2010, p. 1–9.
- ROSSI, F. A. et al. A Influência da Configuração Urbana no Microclima e na Sensação Térmica em Ruas de Pedestre de Curitiba, Paraná. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Búzios, 2011. *Anais...* Búzios, RJ, 2011, v. 11.
- TARIFA, J. R. et al. Atlas ambiental do município de São Paulo. Laboratório de Climatologia Departamento de Geografia / Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas-FFCLH Universidade de São Paulo – USP, 2000.
<http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/As%20Unidades%20Clim%E1ticas%20Urbanas.pdf> Acesso 12.01.17.
- VASSARSTATS: Website for Statistical Computation. Disponível em:
<<http://vassarstats.net/>> Acesso em: 13 ago. 2017.

Agradecimentos

Ao Programa BE MUNDUS Brazil-Europe, pela bolsa de doutorado concedida para o desenvolvimento da pesquisa de junho/2014 a junho/2017 e a CAPES, pela bolsa de doutorado concedida a partir de junho/ 2017. Ao estudante Vinicius Catto, pelo trabalho das medições realizado em conjunto, como parte de sua pesquisa de iniciação científica com a bolsa FAPESP (processo 2015/10759-0). Ao doutorando Fabrizio Rama, pelo apoio na análise comparativa dos dados das estações meteorológicas.