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

O FATOR DE VISÃO DO CÉU E O CLIMA URBANO NA CIDADE DO RECIFE-PE/ BRASIL

MOREIRA, Ayobami Badiru – ayo.badiru@hotmail.com
Universidade Federal de Pernambuco / UFPE

NÓBREGA, Ranyére Silva - ranyere.nobrega@yahoo.com.br
Universidade Federal de Pernambuco / UFPE

MENDES, Tamires Gabryele de Lima - tamilimam25@gmail.com
Universidade Federal de Pernambuco / UFPE

SANTOS, Pedro Felipe Cavalcanti dos - pedrofcds@gmail.com
Universidade Federal de Pernambuco / UFPE

ZAMPARONI, Cleusa Aparecida Gonçalves Pereira - cazamp@gmail.com
Universidade Federal de Pernambuco / UFPE

Submetido em: 05/02/2020
Aceito para publicação em: 11/12/2020
Publicado em: 06/04/2021
DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.71518

RESUMO: O presente estudo propõe discutir os valores de Fator de Visão do Céu (FVC) e suas relações com o clima no espaço construído da cidade do Recife - PE a partir da utilização de dois métodos de estimativa: a obtenção de fotografias hemisféricas e o processamento digital de Modelo Digital de Superfície. Para isto, foram utilizados dados de temperatura do ar e fotografias hemisféricas registrados em pontos específicos da cidade do Recife com diferentes tipos de cobertura de superfície. Também foram utilizados 11 Modelos Digitais de Superfície (MDS) com resoluções espaciais distintas para melhor compreender a espacialização dos valores de FVC na área de estudo e o comportamento destes valores em relação à resolução do MDS. O processamento dos dados foi realizado no software RayMan (para as fotografias hemisféricas) e no GRASS GIS (para os MDS). Os dois métodos de estimativa de FVC se apresentaram complementares, porém é necessário interpretar o valor resultante de ambos processamentos de acordo com a forma de obtenção e de processamento dos dados. a resolução espacial do MDS utilizado pode influenciar na amplitude dos valores espacializados e na suavização de áreas verticalizadas enquanto a altura e a posição da câmera durante a obtenção da fotografia hemisférica influenciam no valor resultante. A cidade do Recife apresentou duas áreas de concentração de baixos valores de FVC e potenciais para o desenvolvimento de Ilha de Calor Urbana (ICU) com intensidade classificada como muito forte. O posicionamento destas áreas ao longo do espaço urbano, a cobertura da superfície e a permeabilidade do canyon em relação ao fluxo do vento contribuiu na formação de fenômenos distintos.

PALAVRAS-CHAVE: Fator de Visão do Céu, Clima Urbano, Ilha de Calor Urbana.

SKY VIEW FACTOR AND THE URBAN CLIMATE OF THE CITY OF RECIFE – PE/BRAZIL

ABSTRACT: The present study proposes to discuss the Sky View Factor (SVF) values and its relationship with the climate in the built space of the city of Recife – PE (Brazil) by the use two methods: hemispheric photographs and digital Digital Surface Model (DSM) processing. For this, air temperature data and hemispheric photographs were registered from three locations of the city and different patterns of surface cover. Eleven DSM with different spatial resolutions were also used to better understand both the distribution of SVF values in the study area and the behavior of these values in relation to the MDS

resolution. Data processing was performed by RayMan model (for hemispheric photographs) and GRASS GIS (for DSM). The use of both methods proved to be complementary, however it is necessary to understand their value according to the proceedings to obtain and process data. The spatial resolution of the DSM can influence the values amplitude, smoothing verticalized areas while. The height and the position of the camera in relation to the urban canyon center influence the resulting value. The city of Recife presented two areas of concentration of low SVF values and potential for the development of strong intensity of Urban Heat Islands. The position of these areas along the urban space, the surface cover and the urban canyon permeability in relation to the wind flow contributed to the formation of distinct phenomena.

KEYWORDS: Sky View Factor, Urban Climate, Urban Heat Island.

1. INTRODUÇÃO

A natureza do Clima Urbano envolve a interação entre fatores urbanos com o clima regional e o meio físico pré-existente, resultando nas modificações que as superfícies, materiais e as atividades das áreas urbanas provocam no balanço de energia, massa e movimento (ANDRADE, 2005). Dentre os fatores urbanos estão os componentes físicos da paisagem, subdivididos por Stewart e Oke (2012) como estrutura e cobertura da superfície. O primeiro afetando o clima local através das modificações no fluxo de vento, no transporte de calor e no balanço de radiação; e o segundo modificando o albedo, a disponibilidade de umidade e o potencial de resfriamento/aquecimento do solo.

O estudo das propriedades destes componentes é um indicativo da qualidade ambiental sobre a população em diversos aspectos, como no conforto ambiental, na saúde pública, no consumo de energia e, de forma mais abrangente, sobre os processos radiativos referentes ao fenômeno da Ilha de Calor Urbana (ICU).

Seis fatores principais são listados como consequência deste fenômeno: vegetação reduzida, superfícies impermeáveis, aumento da superfície vertical, materiais escuros, calor antropogênico e poluição (ADLER, 2015), sendo o Fator de Visão do Céu (FVC) relativo à intensidade da superfície vertical. Oke (1981) destacou a importância do FVC como variável da geometria urbana e o correlacionou a com a máxima intensidade da ICU.

Esses fatores permeiam a modificação do meio urbano e de suas entradas e saídas térmicas e influenciam a intensidade da ICU, como ocorre nos canyons urbanos, um dos principais elementos da topografia superficial (HARMAN & BELCHER, 2006). Os quais resultam em espaços abertos com condições ambientais altamente influenciadas pelo volume da forma urbana e das fachadas dos prédios.

O FVC, como uma propriedade da componente estrutural, ou seja, uma propriedade geométrica, é definido como a razão da abóbada celeste visível a partir do solo, sem obstruções de construções, relevo ou vegetação. É um dos principais agentes da ICU (UNGER, 2009) e apresenta uma relação inversamente proporcional entre o seu valor e a distribuição intraurbana do fluxo de radiação (BERNANRD et al, 2018).

Com referência ao modelo de *canyon* urbano, o FVC é compreendido por um valor entre 0 e 1, e é intimamente relacionado à razão de aspecto (H/W) do canyon, onde H é a altura das construções/obstáculos e W a largura da rua/espaço entre construções (OKE, 1988; OKE et al, 2017). Ou seja, quanto

mais verticalizada e densamente construída for a malha urbana, menor é o valor de FVC associado.

Os métodos de estimativa deste valor são diversos, podendo abranger levantamento topográfico, análise de fotografias hemisféricas, de sinais de GPS e processamento de dados tridimensionais em Sistema de Informação Geográfica (SIG) (UNGER 2009, UNGER, 2004).

Os primeiros estudos usaram métodos analíticos baseados em propriedades da malha urbana, como medidas de ângulo e relações entre altura e largura (OKE, 1981; JOHNSON E WATSON, 1984). Com a disponibilidade de modelos de cidades tridimensionais, foram introduzidos métodos de estimativa de FVC baseados por dados vetoriais em SIG (COMPAGNON, 2004; GÁL et al., 2009; CHEN & NG, 2011; GÁL et al., 2009).

Para áreas onde há disponibilidade de Modelos Digitais de Superfície (MDS), o FVC também pode ser derivado usando uma abordagem baseada em imagem raster, avaliando os valores por pixel (RATTI et al., 2005; LINDBERG et al., 2008; LINDBERG & GRIMMOND, 2010; KOKALJ et al., 2011). O processamento de modelos digitais de superfície promove agilidade na aquisição dos valores de FVC e a possibilidade de cálculos para áreas extensas.

A utilização de fotografias hemisféricas, conhecida como "olho de peixe" (*fisheye)*, tem sido frequentemente empregada para calcular o FVC para locais discretos, os métodos fotográficos produzem bons resultados e requerem uma lente apropriada, a aquisição manual e o processamento das imagens. (GRIMMOND et al., 2001; CHAPMAN E THORNES, 2004; ALI-TOUDERT & MAYER, 2007). Além da aquisição *in loco* das fotografias hemisféricas, a visualização de ruas disponibilizada pelo *Google Street View* permite a obtenção das características urbanas a partir de um campo de visão de 90 graus, que são recuperadas e convertidas em vistas hemisféricas através de projeção equiângular (MIDDEL et. al.,2018).

Apesar de pouco explorada na literatura, a diferença entre valores de FVC a partir do método de cálculo ocorre por diversos fatores, que podem abranger desde às limitações técnicas e instrumentais até às condições do ambiente durante a coleta dos dados. Oke (1981 b) afirmou que a técnica fotográfica deveria ser considerada como o mais próximo da realidade para a estimativa de FVC. Hämmerle (2011) encontrou desvios sistemáticos nas estimativas de FVC entre os valores provenientes de cálculos pontuais e aqueles resultantes de processamento de MDE. Diante da diferença entre os valores encontrados, Hämmerle (2011) ressaltou que sempre pode haver erros tanto em modelos quanto em dados virtuais e, nestes casos, as fotografias hemisféricas servem como um registro da realidade.

No Brasil há diversos estudos que apresentam o FVC como parâmetro de análise do Clima Urbano, entre eles, Monteiro (1990) na obra clássica "Adentrar a cidade para tomar a temperatura"; Minella et al. (2011) que analisaram o efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba; Ferreira e Fialho (2016) investigaram as dinâmicas térmicas decorrentes do processo de urbanização, na paisagem da cidade de Viçosa - MG, por meio do estudo do Clima Urbano.

Ribeiro et al (2010) usaram uma metodologia para o cálculo, observação e análise do comportamento do sombreamento provocado pelas edificações no

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

espaço urbano, cuja aplicação pode se dar em estudos de climatologia urbana e no planejamento de arborização urbana que integra o uso de SIG e do software de *SketchUp* para armazenar e gerenciar dados relativos à morfologia urbana e às edificações ao cálculo do FVC e do período de exposição de determinados pontos ao Sol.

Em Recife/PE, destaca-se os estudos realizados por Araújo et al. (2000) sobre a influência de superfícies urbanizadas no saldo de radiação em Recife, mostrando a importância do FVC na determinação da entrada de energia (radiação de onda curta) na Camada do Dossel Urbano.

A importância do estudo sobre os valores de FVC ao longo da malha urbana do Recife se dá pela melhor compreensão das características dos seus diferentes padrões de adensamento e suas consequências sobre o clima urbano, uma vez que o processo de verticalização nesta cidade é irreversível e crescente. O presente estudo propõe discutir os valores de FVC e suas relações com o clima no espaço construído da cidade do Recife - PE a partir da utilização de dois métodos de estimativa: a obtenção de fotografias hemisféricas e o processamento digital de MDS.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 ÁREA DE ESTUDO E COLETA DOS DADOS ATMOSFÉRICOS

O estudo compreende ao espaço construído da cidade do Recife (Figura 1), capital do estado de Pernambuco, localizada na costa oriental da Região Nordeste do Brasil e estabelecida predominantemente em uma planície flúvio-marinha, circundada por encostas e morros. Possui uma população de aproximadamente 1.646.000 habitantes, sua Região Metropolitana apresenta uma população estimada de 4.054.000 hab. para o ano de 2019 (IBGE, 2019).

A direção predominante do vento é de Sudeste e o tipo climático do Recife é o Tropical do Nordeste, caracterizado por chuvas de outono/inverno e baixas amplitudes de temperatura e umidade do ar, tendo um regime de precipitação anual intenso e com elevada variabilidade (WANDERLEY,2018).

Foram utilizados dados de temperatura do ar obtidos por três termohigrômetros (TH) localizados em pontos específicos do Recife (Figura 1), e com diferentes tipos de cobertura de superfície. Os dados de temperatura do ar foram registrados por termohigrômetros da marca HOBO U23-001, fixados à 1,50 m de altura com intervalo temporal de trinta minutos. Os equipamentos utilizados para a coleta dos dados foram disponibilizados pelo Grupo de Estudos em Climatologia Tropical e Eventos Extremos (Tropoclima) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Os três locais de coleta dos dados dos termohigrômetros foram nomeados como TH01, TH02 e TH03, localizados respectivamente nos bairros de Boa Viagem, Graças e Várzea (Figura 1) e instalados em áreas planas e selecionados levando em consideração as suas distintas características de cobertura e estrutura da superfície urbana circundante, de modo a verificar possíveis contrastes nos dados coletados. Devido à disponibilidade dos dados de temperatura do ar, o estudo será mais detalhado para estes três bairros.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

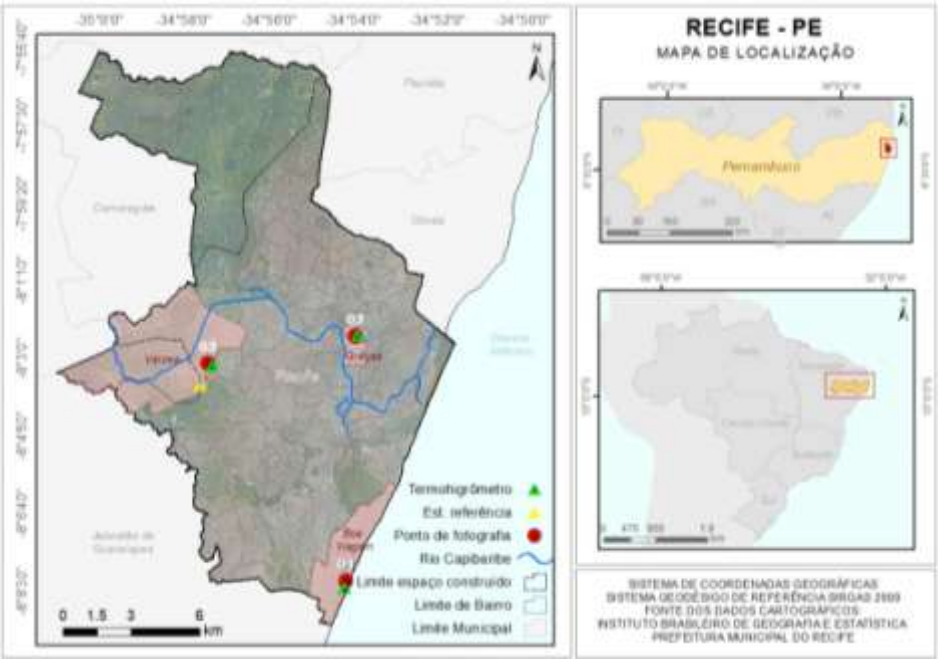


Figura 1 – Mapa de localização do Recife/PE em relação ao estado de Pernambuco e ao território nacional, assim como a localização dos três pontos de coleta dos dados e gráfico com direção predominante do vento. (Org. pelos autores)

O TH01 situa-se no bairro de Boa Viagem, zona sul do Recife, próximo da linha de costa. O bairro de Boa Viagem apresenta a maior densidade de ocupação e a maior taxa de verticalização da cidade. A partir da década de 50 este bairro passou por um intenso processo de verticalização (MELO, 1978) e atualmente apresenta uma centralidade de ofertas de comércio e serviços (GOMES E ALBUQUERQUE, 2013).

O TH02 foi localizado no Bairro das Graças, zona norte do Recife, próximo à margem norte do Rio Capibaribe, principal rio que atravessa a cidade. O Bairro das Graças faz parte do conjunto de bairros da zona norte do Recife acobertados pela Lei 16.719/01 (Lei dos Doze Bairros), a qual visa controlar o gabarito das construções (Recife (PE), 2001). Deste modo, a verticalização deste bairro não é tão intensa como em Boa Viagem, apresentando uma maior diversidade de gabarito de edificações em sua paisagem.

O TH03 situa-se no Bairro da Várzea, zona oeste do Recife, próximo ao Campus 1 da Universidade Federal de Pernambuco. O entorno apresenta edificações horizontais e espaçadas, espaços cobertos por vegetação herbácea, ruas largas, pavimentadas e arborizadas. Ao redor do campus universitário encontram-se áreas com edificações justapostas com até três pavimentos, localizadas em ruas estreitas e pouco ordenadas, típicas dos subúrbios das grandes cidades brasileiras.

2.2 DEFINIÇÃO E CÁLCULO DO FVC

O FVC é um parâmetro adimensional que representa a fração visível do céu em um hemisfério centralizado sobre um local de análise (OKE, 1981). Também é definido como "uma razão geométrica que expressa a fração da saída

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

de radiação de uma superfície interceptada por outra superfície" (OKE, 1987). Quando relacionados a estudos de Clima Urbano, a sua definição está associada com a razão de aspecto (H/W) do *canyon urbano*, ou seja, com a relação entre a largura do *canyon* (W) e a altura das edificações/obstáculos (H). Em uma perspectiva bidimensional, estas variáveis (H e W) podem ser aplicadas para estimar o FVC (DIRKSEN et al., 2019), como mostra a Figura 2. Sendo FVC_{2D}, o valor bidimensional do FVC.

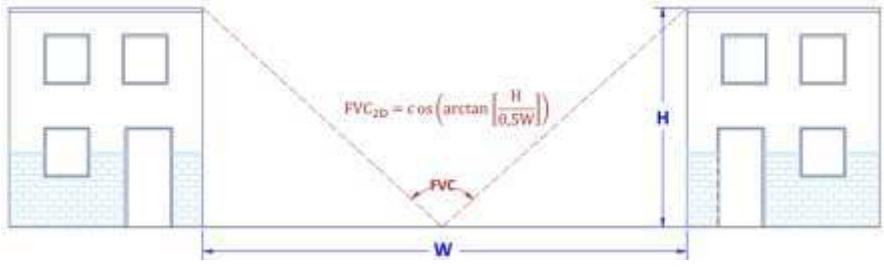


Figura 2 – Visão frontal representando as duas variáveis da razão de aspecto do canyon urbano: altura (H) e a largura (W), assim como a projeção do FVC para um ponto centralizado no canyon. Fonte: Org. pelos autores.

Do ponto de vista esférico, o cálculo do FVC é realizado considerando a altura do obstáculo (β_i) e o ângulo de azimute (a_i) na seguinte equação:

$$\mathrm{FVC} = \sum_{i=1}^{n} sen^2.\beta_i.\left(\frac{a_i}{360°}\right)$$

O seu valor resultante pode variar entre 0 e 1, assim como também é comum representá-lo no formato de porcentagem, entre 0% e 100%. Sendo a completa obstrução do céu representado pelo valor 0 (0%) e a total visibilidade do céu pelo valor 1 (100%).

O FVC também pode variar ao longo do canyon urbano. Por exemplo, a Figura 3 mostra que no topo dos edifícios o FVC tende a ser 1 quando não há edifícios maiores no entorno ou outros obstáculos como copa de árvores, o valor do FVC tende a diminuir à medida que o ponto se distancia do centro do canyon e a aumenta à medida que se eleva do nível da superfície.

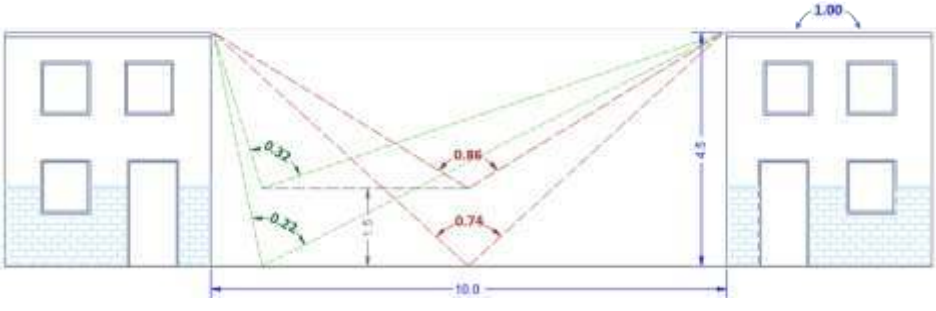


Figura 3 – Exemplo de diferentes valores de FVC ao longo do canyon urbano. Fonte: Organizado pelos autores.

O processamento de fotografias hemisféricas, também chamadas "olho de peixe" (*fisheye*) é o primeiro método de cálculo de FVC abordado neste artigo, seguido pelo método do processamento de MDS. As fotografias

hemisféricas, quando registradas no *canyon* urbano projetam uma percepção pontual da abóbada celeste e suas obstruções (Figura 4). A análise destas fotografias é realizada pela demarcação de esferas e raios concêntricos, dos quais são calculados os arcos que não apresentam obstruções (STEYN, 1980). Este procedimento pode ser realizado manualmente com o auxílio de um gráfico de coordenadas polares, porém o presente estudo realizou o processamento digitalmente, de modo a reduzir o tempo consumido e a quantidade de erros associados.

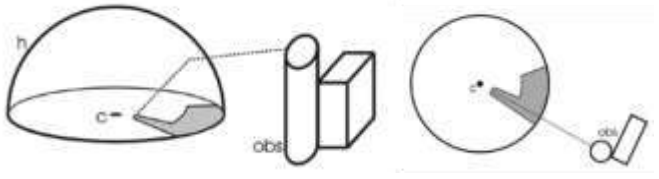


Figura 4 - Representação esférica e bidimensional da abóbada celeste (h), o seu ponto central (C) e os obstáculos visuais ("obs"). Fonte: Adaptado de Hämmerle et al., (2014).

O processamento das fotografias e o cálculo do FVC foi realizado pelo modelo RayMan, elaborado por Matzarakis et al (2007; 2010). Este modelo calcula a quantidade de pixels sem obstáculos e os relaciona ao total de pixels, para isso, a fotografia precisa ser tratada para apresentar o mesmo número de linhas e de colunas, exportada para o formato .bmp e, posteriormente ter os obstáculos digitalizados. Como a fotografia deve representar uma meia-esfera, o modelo calcula um fator de peso (ω_{proj}) para cada pixel de modo a corrigir a projeção e o impacto do pixel no ângulo zenital (φ) a partir da seguinte equação:

$$\omega_{proj} = sen(\varphi).\left(\frac{\varphi}{90}\right)^{-1}$$

A câmera utilizada para a obtenção das fotografias hemisféricas foi da marca Nikon D7200, lente SIGMA EX DG FISHEYE fixada à 1,50m de altura do solo sobre tripé. A Figura 5 apresenta os três locais de registro das fotografias e a ilustração de seus respectivos canyons: Ponto 01: (A) Rua Setúbal, Boa Viagem; Ponto 02: (B) Rua do Futuro, Graças; Ponto 03: (C) Rua Palmira Valença, Várzea. Estes locais foram próximos dos TH01, TH02 e TH03 respectivamente (Figura 1). As datas de aquisição das fotografias foram entre os dias três e cinco de fevereiro de 2018.

O processamento de FVC a partir de MDS permite a obtenção de valores contínuos em áreas extensas. O presente estudo cobriu a superfície construída do território do Recife (Figura 1) e foi realizado na plataforma *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS). O modelo utilizado foi concebido pelo método de visualização de relevo apresentado por Zakšek et al. (2011) e se baseia na seguinte equação, sendo: *n* o número de direções ao redor do centro da abóbada celeste; γ_i a elevação vertical do ângulo zenital.

$$FVC = 1 - \frac{\sum_{i-1}^{n} sen\gamma_i}{n}$$

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

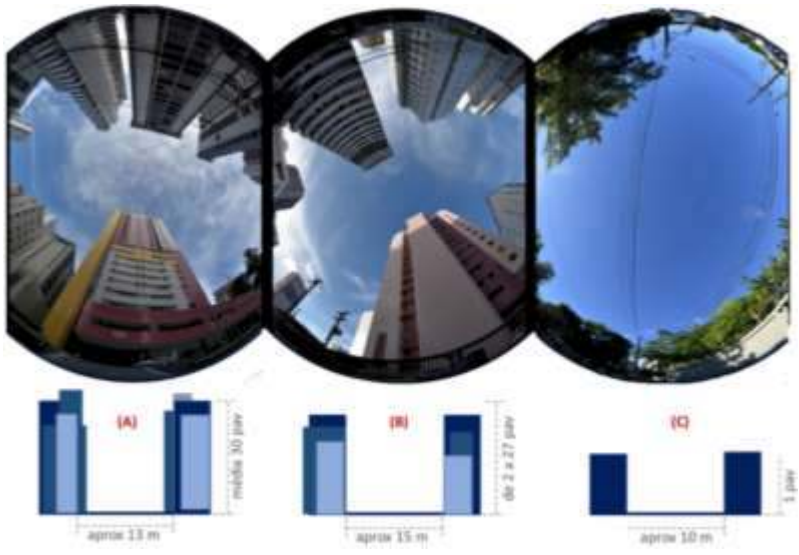


Figura 5 – Fotografias hemisféricas registradas em (A) Rua Setúbal, Boa viagem; (B) Rua do Futuro, Graças e (C) Rua Palmira Valença, Várzea com as ilustrações dos respectivos *canyons*. (Org. pelos autores)

Foram utilizados 11 MDS com resoluções espaciais distintas (2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 metros) gerados a partir dos dados de superfície provenientes do perfilamento a laser do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) e processados em 16 direções.

2.3 O FVC E OS DADOS ATMOSFÉRICOS DO ESTUDO

Como componente da geometria urbana, o FVC está diretamente relacionado ao balanço de radiação no canyon urbano e é uma variável indicadora da intensidade de ICU. Oke (1981) descreveu a relação entre a Intensidade Máxima de ICU ($\Delta T_{u-r(máx)}$) e o FVC (ψ_s) através da seguinte regressão linear:

$$\Delta T_{u-r(máx)} = 15.27 - 13.88\psi_s$$

Esta equação é resultante de uma simulação sobre modelo físico e é aplicada a um conjunto limitado de condições, das quais se destacam: período noturno; condições meteorológicas calmas e sem nuvem; calor antropogênico desconsiderado.

Para o cálculo de ICU, foram utilizados os dados de temperatura do ar provenientes dos TH01, TH02 e TH03 durante todo o ano de 2018, com resolução temporal de 1 hora. A estação 82900 do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) foi considerada com a estação de referência rural. Dados de velocidade e direção do vento provenientes da estação 82900/INMET também foram utilizados para simular o fluxo e a pressão de vento a sobre o MDS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de FVC provenientes das fotografias hemisféricas serão designados FVC_{foto} e os provenientes dos MDS serão designados FVC_{MDS} ou FVC_x,

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

sendo "x" o valor da resolução espacial do respectivo MDS. A Figura 6 apresenta as fotografias hemisféricas e seus respectivos valores de FVC para os três pontos estudados. A quantidade de pavimentos das construções próximas e os valores de FVC_{2m} estão dispostos na Figura 7. Estes valores estão apresentados em gradiente de cor a partir do vermelho para valores próximos de zero, verde para os valores próximos de 0,5 até o azul para os valores próximos de um.

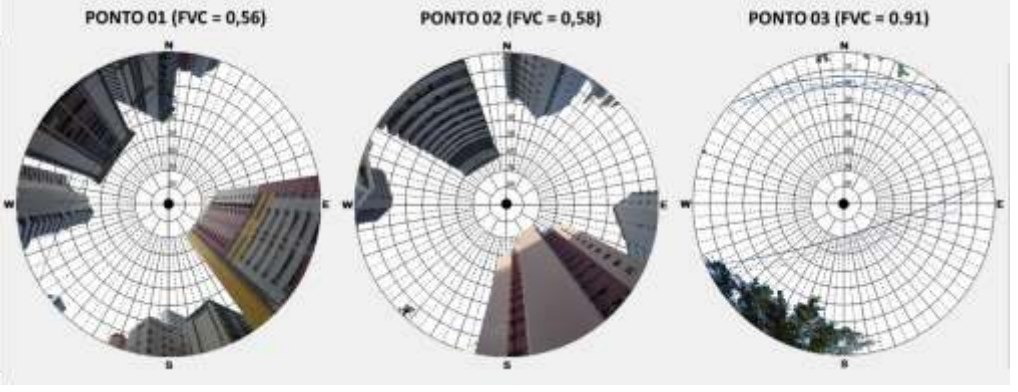


Figura 6 - Fotografias hemisféricas e respectivos de FVC_{foto} para os pontos estudados. Fonte: Organizado pelos autores.

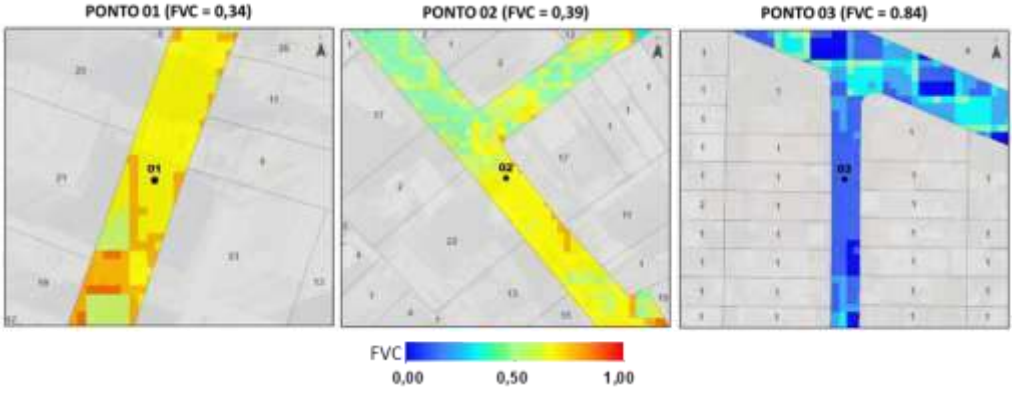


Figura 7 – Pontos de estudo, quantidade de pavimento dos lotes do entorno e valores de FVC_{2m}. Organizado pelos autores.

A localização dos pontos, a orientação de seus canyons, os valores pontuais de FVC_{foto}, FVC_{2m} e suas diferenças estão apresentados na Tabela 1. Para todos os três pontos estudados a estimativa de FVC_{foto} apresentou valores mais elevados em relação ao FVC_{2m}. As fotografias foram registradas em tripé a 1,5 m de altura enquanto o MDS considerou a altura da superfície, o que resulta em valores de FVC_{foto} superiores aos valores de FVC_{MDS}. Porém não houve um padrão sistemático: para o Ponto 01 a diferença foi de 0,22; para o Ponto 02 a diferença foi de 0,19 e o Ponto 03 apresentou diferença de 0,07.

Esta ausência de padrão ainda é pouco explorada na literatura e pode ser devido ao reduzido número de amostras, assim como também pode estar relacionado a outros fatores como a resolução do raster, a representação dos obstáculos no raster e os parâmetros do modelo. Hämmerle et al. (2011) não encontrou desvios sistemáticos entre os valores de FVC resultantes das

fotografias e aqueles provenientes de processamento de MDS para uma amostra de 23 pontos. Essa aparente falta de padrão ressalta a necessidade do uso das fotografias hemisféricas como a representação mais próxima da realidade (OKE, 1981; HÄMMERLE et al, 2011).

Tabela 1 - Localização dos pontos de estudo, a orientação de seus canyons, os valores de FVC pontuais resultantes do processamento da fotografia hemisférica (FVC_{foto}), do MDS (FVC_{2m}) e suas diferenças (FVC_{foto}-FVC_{2m}).

Ponto	Lon	Lat	Localização	Orientação	FVC_{foto}	FVC_{2m}	$FVC_{foto} - FVC_{2m}$
01	-34.90	-8.14	Rua Setúbal, Boa Viagem	SW - NE	0,56	0,34	0,22
02	-34.90	-8.04	Rua do Futuro, Graças	NW - SE	0,58	0,39	0,19
03	-34.96	-8.05	Rua Palmira Valença, Várzea	S - N	0,91	0,84	0,07

Fonte: Organizado pelos autores

Diante da incerteza do desvio dos valores de FVC_{MDS} provenientes de MDS em relação ao FVC_{foto}, pode-se questionar qual seria a utilidade destes dados para o estudo de Clima Urbano. Sabe-se que a qualidade do resultado é diretamente proporcional à qualidade do MDS e é preciso verificar se a sua resolução consegue representar a superfície na escala das edificações. Além disto, a partir do MDS é possível compreender a espacialização dos valores de FVC ao longo da área de estudo, enquanto os dados pontuais provenientes de fotografias hemisféricas complementam a compreensão e a validação destes dados.

Dentre os 11 MDS utilizados neste estudo, os valores de FVC_{2m} foram apresentados inicialmente por serem provenientes do MDS com maior resolução espacial, ou seja, com a representação mais detalhada da superfície. Seus valores se apresentaram menores em comparação ao FVC_{foto} (Figura 6; Tabela 1). Os valores provenientes dos demais MDS gerados estão dispostos na Figura 8. Os valores mostram que o FVC_{MDS} tende a aumentar à medida que a resolução espacial é reduzida assim como a amplitude dos valores entre os pontos. A Figura 9 ilustra espacialmente esta tendência para os valores de FVC_{2m}, FVC_{15m} e FVC_{30m}.



Figura 8 – Gráfico dos valores de FVC para os três pontos de estudo (Ponto 01 em verde, Ponto 02 em preto e Ponto 03 em vermelho), resultantes de 11 MDS com

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

resoluções espaciais de 2 m até 50 m; Valor de FVC proveniente da fotografia ao lado da indicação dos pontos. Fonte: Organizado pelos autores.

Esta tendência se apresentou mais pronunciada no Ponto 01 e no Ponto 02, ambos localizados em ambientes mais verticalizados em comparação ao Ponto 03. Ou seja, para superfícies mais complexas, que apresentam maior quantidade de obstáculos, a variabilidade de FVC_{MDS} é maior em relação à resolução espacial. Porém, percebe-se que o Ponto 2 apresentou a maior variabilidade de FVC_{MDS} (0,34), chegando a apresentar valores menores do que o Ponto 01 no intervalo entre as resoluções de 10 e 25 metros.

A tendência de aumento do FVC_{MDS} para baixas resoluções espaciais é devido ao fato de que quanto maior for a resolução espacial, maior é a quantidade de pixels representados no canyon urbano. Isto faz com que o FVC das margens das ruas, que tendem a ser menor do que no centro (Figura 3), também seja calculado, aumentando o contraste entre os valores. À medida que a resolução espacial é reduzida, a quantidade de pixels representados no canyon é reduzido e este contraste é suavizado na imagem.

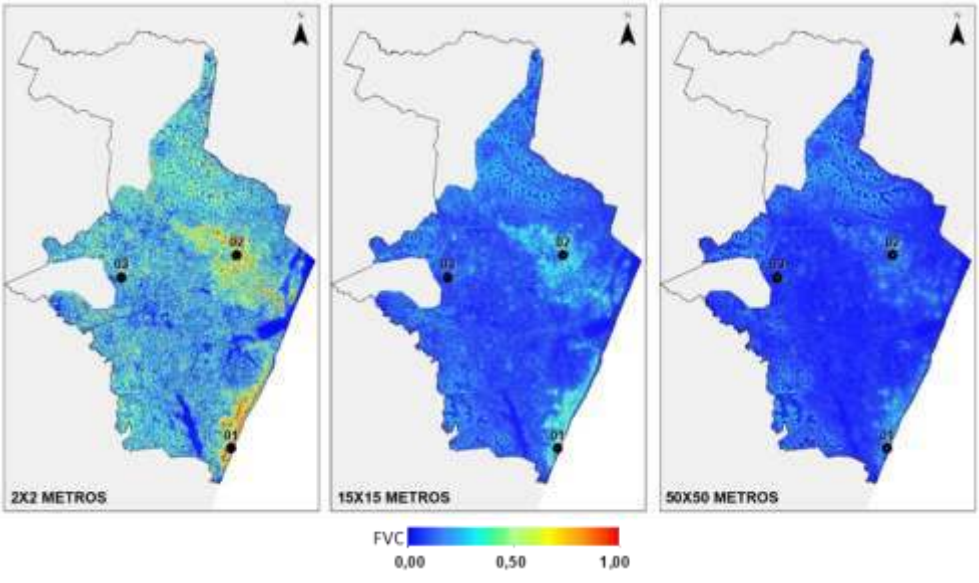


Figura 9 – Espacialização dos valores de FVC provenientes de 3 MDS com resoluções espaciais distintas: 2 m, 15 m e 50 m respectivamente. Fonte: Org. pelos autores.

A Figura 10 apresenta os valores de FVC_{2m} espacializados para a área construída da cidade do Recife em paralelo ao mapa da cidade com a divisão dos bairros e locais de referência citados neste artigo, de modo a auxiliar a interpretação dos resultados.

Os corpos hídricos e o aeroporto se destacam pelos altos valores de FVC, devido ao relevo plano e a ausência de edificação nestes locais. As áreas de morros, que circundam a parte plana da cidade, concentram valores de FVC abaixo de 0,5. A maior concentração dos baixos valores de FVC foram identificados na costa litorânea, nos bairros de Boa Viagem, seguidos pelos bairros da margem norte do Rio Capibaribe. Estes locais que apresentaram espacialmente os menores valores de FVC constituem os dois espaços tradicionais da verticalização no Recife (NUNES, 2008).

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

A concentração de valores de FVC_{2m} abaixo de 0,5 nos morros que circundam a planície é resultante da influência conjunta do relevo, de edificações informais justapostas e de vias estreitas que aumentam a obstrução da abóbada celeste. Essas áreas são compostas por ocupações majoritariamente informais que carecem de dados cadastrais e que, por pertencerem à Zona de Interesse Social (ZEIS), não são alvos de processo formal de verticalização.

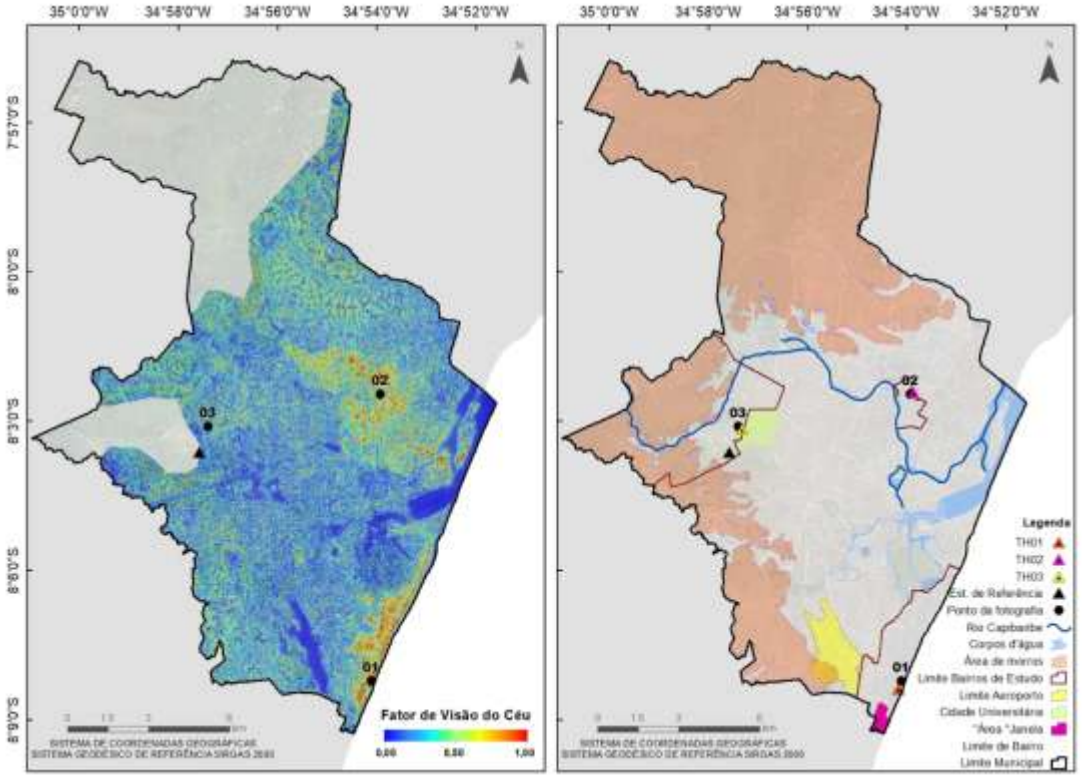


Figura 10 - Valores de FVC para o espaço construído da cidade do Recife a partir do MDS com resolução espacial de 2 m. Fonte: Organizado pelos autores.

A densidade da verticalização e a orientação perpendicular do canyon urbano em relação à direção predominante do vento (SE) não apenas aprisionam a radiação de onda curta no dossel urbano como também reduzem a permeabilidade dos ventos alísios na área litorânea, compreendida pelos bairros de Boa Viagem e do Pina. A Figura 11 apresenta o fluxo e a pressão do vento simulados nesta área sobre o MDS.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

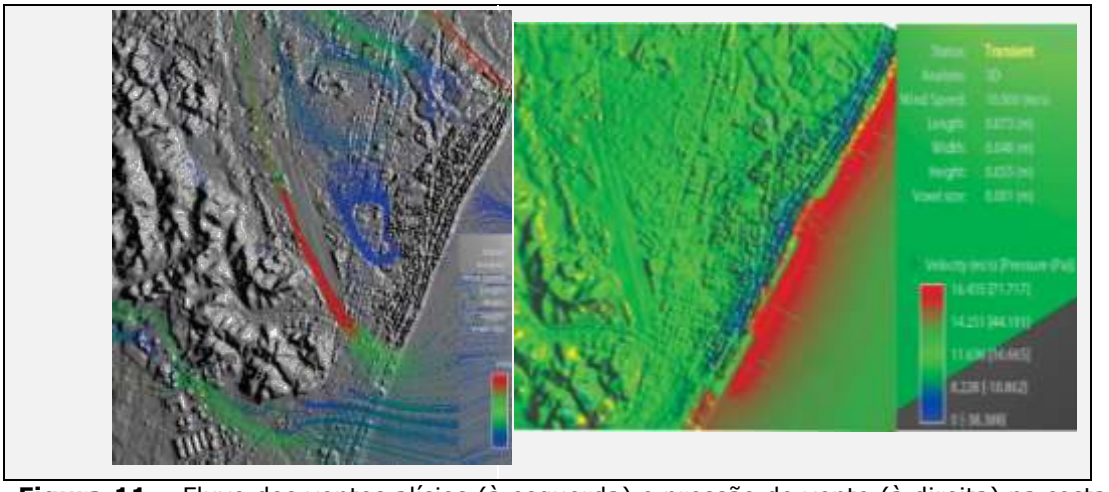


Figura 11 – Fluxo dos ventos alísios (à esquerda) e pressão do vento (à direita) na costa litorânea do Recife. Fonte: Organizado pelos autores.

Enquanto a área litorânea concentra valores baixos de FVC, a presença do aeroporto restringe o gabarito das edificações em seu entorno. Percebe-se esta influência na área destacada localizada no extremo sul da orla de Boa Viagem (Figura). Apesar desta área ser pequena no mapa do Recife, ela se estende na direção sul, para a orla do município de Jaboatão dos Guararapes (fora da área de estudo), e aumenta a permeabilidade do vento (predominantemente de sudeste) na cidade e pode atuar como uma área de canalização e distribuição do vento em direção aos bairros da zona oeste da cidade, Incluindo o bairro da Várzea onde está localizado o Ponto 1.

Esta relação de impermeabilidade versus canalização do vento também pode interferir no comportamento das chuvas no Recife. Anjos et al. (2020) mapeou a distribuição espacial da precipitação no Recife e encontrou uma variabilidade espacial anual de 400 mm entre oito postos pluviométricos distribuídos na cidade. A área com menor quantidade precipitada concentrou-se próximo ao litoral, entre Boa Viagem e Pina. Enquanto a Várzea esteve dentre os bairros com maior registro de precipitação acumulada. Como os processos formadores das chuvas são complexos e envolvem diversos fatores atmosféricos (SCHROEDER E BUCK, 1970), mesmo se esta variabilidade não for diretamente causada pela estrutura urbana, do qual o FVC é uma componente, ela interfere em fatores como o volume hídrico superficial, distribuição da umidade do ar, variabilidade da temperatura do ar e da superfície e consequentemente, na ICU.

O FVC é uma variável indicadora da intensidade de ICU. A Figura 12 representa a aplicação da equação de intensidade máxima de ICU (OKE, 1981) nos valores de FVC_{2m} representados de acordo com as seguintes classes de magnitude (FERNANDEZ GARCÍA, 1996): *fraca* para ICU de até 2°C; *média* para variação de 2°C a 4°C; *forte* para variação entre 4°C e 6°C e *muito forte* para valores acima de 6°C. Sabe-se que esta equação visa descrever a intensidade máxima de ICU sob condições pré-definidas descritas anteriormente e seus valores resultantes são inversamente proporcionais ao FVC.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

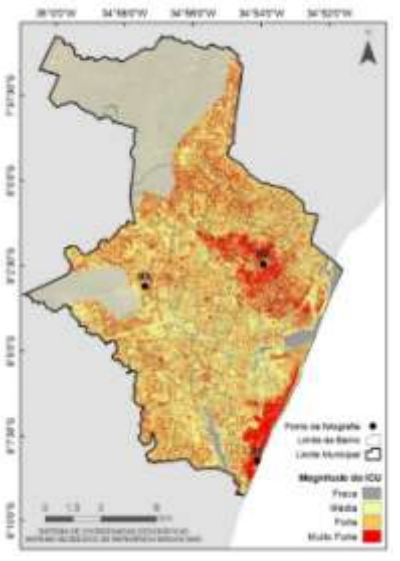


Figura 12 – Mapa de ICU máxima calculada a partir dos valores de FVC para o espaço construído da cidade do Recife. (Org. pelos autores)

As maiores intensidade de $ICU_{máx}$, através do FVC, se concentraram na orla marítima e nos bairros da margem norte do Rio Capibaribe, onde se localizam os pontos 01 e 02 respectivamente. As trocas radiativas no canyon urbano são altamente influenciadas pelo FVC (OKE, 1981), dessa forma, a variabilidade horária da temperatura do ar, em relação estação de referência, permite que se entenda quais são as características particulares da ICU no Recife.

A Figura **6**13 apresenta a média horária da temperatura do ar da estação de referência rural e dos TH para o ano de 2018. Os menores valores de temperatura do ar são observados no fim da madrugada, antes do nascer do sol, por volta das 5 horas. Neste período também é registrado a maior diferença de temperatura do ar entre os TH. Durante o período da manhã há uma ascensão no valor desta variável e às 8 horas são registrados os valores mais próximos entre os TH.

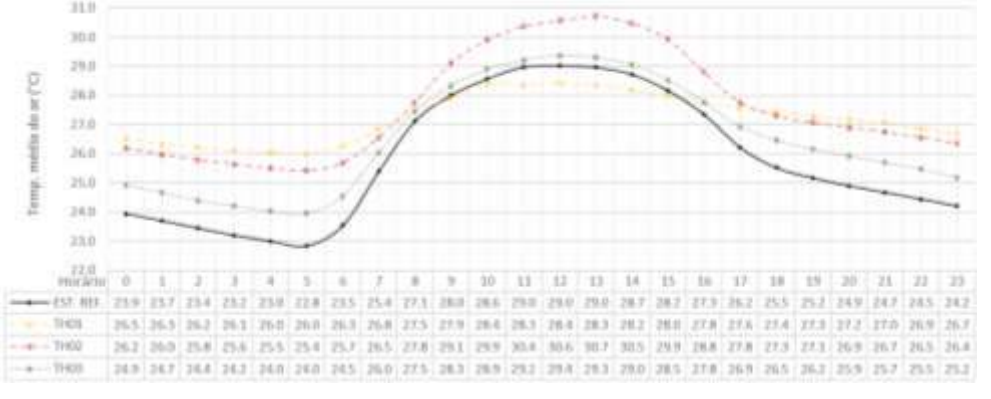


Figura 63 - Média horária da temperatura do ar na estação de referência para o ano de 2018. Fonte: Organizado pelos autores.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

O TH01 apresentou menor acréscimo de temperatura no período matutino, alcançando o maior valor às 10 horas. Entre as 9 e 15 horas o TH01 também registrou a temperatura do ar inferior à estação de referência. Para os demais TH, os maiores valores de temperatura do ar foram registrados entre as 12 e 13 horas. Entre as 13 e 17 horas a temperatura do ar decresce mais rapidamente do que no período noturno. O gradiente térmico entre o TH01, TH02 e TH03 em relação à estação de referência estão apresentados pela Figura **7**14, Figura **8**15 e Figura **9**16 respectivamente.



Figura 74 – Gráfico da variabilidade horária da temperatura do ar registrada pelo TH01 durante o ano de 2018. Fonte: Organizado pelos autores.



Figura 85 – Gráfico da variabilidade horária da temperatura do ar registrada pelo TH02 durante o ano de 2018. Fonte: Organizado pelos autores.



ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Figura 9 – Gráfico da variabilidade horária da temperatura do ar registrada pelo TH03 durante o ano de 2018. Fonte: Organizado pelos autores.

A variabilidade noturna da temperatura do ar para o TH01, localizado no bairro de Boa Viagem, se apresenta acima de 1°C durante todo o período noturno; sendo mais pronunciada entre as 0 e 6 horas, com o pico de maior intensidade às 5 horas da manhã (3,2 °C). No período diurno os valores mostram a configuração de uma Ilha de Frescor Urbana em Boa Viagem, possivelmente devido à sua maior proximidade com o Oceano Atlântico.

Apesar de se localizar numa área de $ICU_{máx}$ classificada como *muito forte*, (Figura 12), os dados do TH01 sofrem influência direta da ação do oceano, através das brisas e do calor específico da água que resulta na temperatura da superfície do mar mais elevadas no período noturno. Em paralelo à morfologia urbana, isso pode influenciar nas temperaturas mais baixas do que a estação de referência no período diurno e maiores no período noturno no TH01.

O TH02, localizado em uma área de $ICU_{máx}$ também classificada como *muito forte*, não recebe diretamente os ventos litorâneos, que são barrados pela morfologia urbana. Dessa forma, o TH02 apresenta temperaturas que podem chegar a 2°C a mais que a estação de referência no período diurno. A variabilidade das temperaturas do ar entre o TH01 e o TH02 corroborou com os resultados apresentados por Nóbrega et al (2016). No qual as temperaturas registradas no bairro de Boa Viagem se apresentaram mais elevadas no período noturno em relação aos bairros da margem norte do Rio Capibaribe.

O bairro da Várzea, onde está localizado o TH03, está localizado próximo à estação de referência, porém, em uma área urbanizada e próximo de um campus universitário, uma área com $ICU_{máx}$ classificada entre *média* e *forte* (Figura 12) porém os dados do TH03 apresenta uma variação próxima a 1°C, configurando uma ICU *fraca*. O TH03 também apresenta o menor desvio padrão entre as TH.

4. CONCLUSÃO

Os dois métodos de estimativa de FVC explorados neste artigo se apresentaram complementares: enquanto o MDS oferece uma compreensão especializada do FVC ao longo da área de estudos, as fotografias hemisféricas disponibilizam valores pontuais e mais acurados de locais de interesse.

Porém, é necessário interpretar o valor resultante de ambos processamentos de acordo com a forma de obtenção e de processamento dos dados: a resolução espacial do MDS utilizado pode influenciar na amplitude dos valores espacializados e na suavização de áreas verticalizadas enquanto a altura e a posição da câmera durante a obtenção da fotografia hemisférica influencia no valor resultante: quanto maior for a elevação da câmera em relação ao solo, maior será o valor do FVC e quanto mais afastada a câmera estiver do centro do canyon, menor será o valor resultante. Além disto, o erro sistemático entre a fotografia e o MDS precisa ser mais explorado na literatura.

A espacialização dos valores de FVC auxilia na indicação de áreas com potencial para o desenvolvimento de ICU, porém é necessário observar os dados atmosféricos, a relação da geometria urbana e estes dados e as características

dos materiais presentes na cobertura da superfície para a melhor compreensão do comportamento deste fenômeno e do Clima Urbano resultante.

A cidade do Recife apresentou duas áreas de concentração de baixos valores de FVC e potenciais para o desenvolvimento de ICU com intensidade classificada como *muito forte* porém, o posicionamento destas áreas ao longo do espaço urbano, a cobertura da superfície e a permeabilidade do canyon em relação ao fluxo do vento resultou contribuiu na formação de fenômenos distintos.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (Facepe), ao Grupo de Estudos em Climatologia Tropical e Eventos Extremos (Tropoclima) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

ADLER, F. R.; TANNER, C. J.; MEDINA, M. B. Ecossistemas Urbanos: Princípios Ecológicos Para o Ambiente Construído. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades, and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. Solar energy, n.81, p. 742–754, 2007.

ANDRADE, H. O Clima Urbano – Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. Revista Portuguesa de Geografia, n. 80, p. 67-91, 2005.

ANJOS, R. S. A.; WANDERLEY, L. S. A.; NOBREGA, R. S. Análise espacial da precipitação e possíveis fatores que contribuem para sua espacialização em Recife-PE. Revista Brasileira de Geografia Física, v.13, n.01, p. 18-34, (2020).

ARAÚJO, T. L. Estudo numérico da interação entre uma região urbanizada e a convecção rasa. 2010. 129f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande.

BERNARD, J.; RODLER, A.; MORILLE, B.; ZHANG, X. How to Design a Park and Its Surrounding Urban Morphology to Optimize the Spreading of Cool Air? Climate, n.6, v.10, p. 1-15, 2018.

CHAPMAN, L.; THORNES, J. E. Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 21, p. 730-741, 2004.

CHEN, L.; NG, E. Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v.13, p. 586–594, 2011.

COMPAGNON, R. Solar and daylight availability in the urban fabric. Energy and Buildings, v.36, n.4, p. 321-328,2004.

DIRKSENA, M.; RONDAB, R. J.; THEEUWESC, N. E.; PAGANI, G. A. Sky View Factor calculations and its application in Urban Heat Island studies. Urban Climate, v.30, p. 1-16, 2019.

FERREIRA, G. R.; FIALHO, E. S. Campo térmico x Fator de Visão do Céu: estudo da área central do município de Viçosa - MG em episódios de outono e inverno/2014. Boletim Gaúcho de Geografia, v.43, n. 1, 247-271, 2016.

GÁL T., LINDBERG F.; UNGER J. Computing continuous Sky View Factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. Theoretical and Applied Climatology, v. 95, p. 111–123, 2009.

GOMES, E. T. A.; ALBUQUERQUE, M. Z. A. A Via Mangue no processo de produção do espaço da cidade do Recife. In: X Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia, Campinas. Anais do X ENANPEGE. Campinas: ENANPEGE, p. 1-10, 2013.

GRIMMOND, C. S. B.; POTTER, S. K.; ZUTTER, H. N.; SOUCH, C. Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. International Journal of Climatology, v. 21, n. 7, p. 903–913, 2001.

HARMAN, I. N. BELCHER, S. E. The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons. Quarterly Journal of the Royal Meteorological society,132, p. 2749–2768, 2006.

HÄMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J., MATZARAKIS, A. Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. Theoretical Applied Climatology, v.105, p.521–527, 2011.

HÄMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J., MATZARAKIS, A. Introducing a script for calculating the sky view factor used for urban climate investigations. Acta Climatologica et Chorologica, v. 44, p. 83-92, 2011.

HÄMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J.; MATZARAKIS, A. Different aspects in the quantification of the sky view factor in complex environments. Acta Climatologica et Chorologica, v. 47, p. 53062, 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas. Acesso em 01 de abril de 2020.

JOHNSON, G. T.; WATSON, I. D. The determination of view-factors in urban canyons. Journal of Applied Climate and Meteorology, v. 23, p. 329-335, 1984.

KOKALJ, Z; ZAKŠEK, K.; OSTIR, K. Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived relief models. Antiquity, V. 85, P. 263 – 273, 2011.

LANDSBERG, H. E. The urban climate. Academic Press, New York. 1981.

LINDBERG, F.; GRIMMOND, C.; Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models. Climate Research, v. 42, n.3, p. 177–183, 2010.

LINDBERG, F.; HOLMER, B.; THORSSON, S. SOLWEIG 1.0–modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. International Journal of Biometeorology, v. 52, n. 7, p. 697–713, 2008.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; AND MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. International Journal of Biometeorology, v. 51, p. 323–334, 2007.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; AND MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. International Journal of Biometeorology, v. 54, n. 2, p. 131–139, 2010.

MELO, M. L. Metropolização e Subdesenvolvimento: o caso do Recife. UFPE – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, 1978.

MIDDEL, A.; LUKASCZYK, L.; MACIEJEWSKI, R.; DEMUZERED, M.; ROTHE, R. Sky View Factor footprints for urban climate modeling. Urban Climate, v. 25, p. 120–134, 2018.

MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar a temperatura. GEOSUL, v.9, n.9, p. 61 – 79, 1990.

NÓBREGA, R. S.; SANTOS, P. F. C.; MOREIRA, E. B. M. Morfologia Urbana e Ilhas de Calor na cidade do Recife-PE: distribuição espacial e intensidade. Revista de Geografia (UFPE), v. 33, n. 4, p. 319–333, 2016.

NUNES, A. F. S. O impacto da "Lei dos doze bairros" sobre a construção civil na cidade do Recife. 2008, 162.f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Católica de Pernambuco.

OKE, T. R. Boundary Layer Climates. London: Methuem & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1978. 372p.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. Journal of climatology, vol. 1, p. 237-254,1981b.

OKE, T. R. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. IOM Report 81, WMO/TD. No. 1250.World Meteorological Organization, Geneva. 1988

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. Urban climates. Cambridge University Press, 2017.

RATTI, C.; BACKER, N.; STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. Energy and Buildings, v. 37, n.7, p. 762-776, 2005.

RIBEIRO, C. A. M.; CARVALHO, H. J. M.; SANTOS, M. A. Metodologia para análise do sombreamento em centros urbanos. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, p. 001 de 009, 2010.

SCHROEDER, M. J.; BUCK, C. C. Fire Weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. Salt Lake City: University of Utah. Clouds and precipitation Department of Agriculture Forest Service 1, p. 144- 165, 1970.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bulletin of the American Meteorological Society, v.1, p.1879 – 1900, 2012.

STEYN, D. G. Effects of a small scrub fire on the surface radiation budget. Royal Meteorological Society, v. 3, n. 7, p. 253 – 264, 1980.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

UNGER, J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. Climate Research, v. 27, p. 253–264, 2004.

UNGER, J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. Environment and Pollution, v. 36, p. 59 – 80, 2009.

WANDERLEY, L. S. A.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, A. B.; ANJOS, R. S. A.; ALMEIDA, C. A. P. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. Revista Brasileira de Climatologia, v. 22, p. 149 – 164, 2018.

ZAKŠEK, Z.; OŠTIR, K.; KOKALJ, Z. Sky-view factor as a relief visualization technique. Remote Sensing, v. 3, n. 2, p. 398-415, 2011