



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Influência da arborização e da edificação na dispersão de material particulado respirável em cidade costeira altamente urbanizada (Fortaleza, CE-Brasil)

Elissandra V. Marques¹, Camille A. Rocha², Rafael P. dos Santos¹, Fernanda C. L. Ramos³, Joyce Leylane Rocha Lima⁴, Carlos M. Cattony¹, Marcus V.C. Silva⁵, Maria E. Zanella⁶, Rivelino M. Cavalcante⁷.

¹Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 60165-081, Fortaleza. (85) 33667020. vmelissandra@gmail.com; santosrafael900@gmail.com; carloscattony@hotmail.com ²Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, 60455-760, Fortaleza. (85) 33669781. camilleufc@gmail.com ³Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, UniFanor | Wyden, 60191-195, Fortaleza (85) 30034430. feehramos1555@gmail.com ⁴Graduação em Gestão de Políticas Públicas, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, 60356-001, Fortaleza. (85) 33669663. joycelrleilane@gmail.com ⁵Prof. Dr. do curso de Ciências Ambientais e coordenador do Laboratório de Observação da Terra (LOT), Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 60165-081, Fortaleza. (85) 33667020. mvc81@hotmail.com ⁶Prof. Dr. do curso de pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, 60455-760, Fortaleza. (85) 33669781. elisazv@terra.com.br ⁷Prof. Dr. do curso de Ciências Ambientais e coordenador do Laboratório de Avaliação de Contaminantes Orgânicos (LACOr), Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 60165-081, Fortaleza. (85) 33667035. rivelino@ufc.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 09/02/2019 e aceito em 22/05/2019

RESUMO

O presente artigo tem como intuito abordar a influência existente entre o índice de arborização e edificação com níveis do material particulado respirável (MP 2,5 μ m) e condições atmosféricas em áreas utilizadas para práticas de esportes e lazer no centro urbano de Fortaleza, CE, tendo em vista a melhora ou piora das condições atmosféricas em locais, predominantemente, ocupados por vegetação ou edifícios. Assim, foram coletados dados primários das concentrações de MP_{2,5} com a amostragem ativa e dados meteorológicos com uma estação meteorológica portátil em 7 pontos de amostragem distribuídos no Município. Os índices de Arborização e Edificação foram feitos por meio do Software ArcGis, consistindo no mapeamento e delimitação da área de cobertura por copas de árvores e edifícios nos pontos de amostragem selecionados. Assim, foi realizada a correlação estatística dos dados, onde verificou-se, como resultado, os tipos de correlações existentes, classificando-as como positivas ou negativas e fortes ou fracas. Assim, esse trabalho permitiu observar a influência entre as concentrações de MP_{2,5} na atmosfera e as variáveis meteorológicas, e a relação dos índices construídos com o MP_{2,5} e com a velocidade do vento.

Palavras-chave: poluição atmosférica, vegetação urbana, verticalização, partículas, fatores meteorológicos

Influence of afforestation and building on the dispersion of respirable particulate material in a highly urbanized coastal city (Fortaleza, CE-Brazil)

ABSTRACT

The present article aims to address the influence between the index of vegetation and edification with respirable particulate matter levels (PM 2.5 μ m) and atmospheric conditions in areas used for sports and leisure practices in the urban center of Fortaleza, CE, with a view to improving or worse weather conditions at locations predominantly occupied by vegetation or buildings. Thus, primary data of the concentrations of PM_{2,5} with active sampling and meteorological data were collected with a portable meteorological station in 7 sampling points distributed in the Municipality. The vegetation and edification indexes were made through ArcGIS Software, consisting of the mapping and delimitation of the coverage area by crowns of trees and buildings at the selected sampling points. Thus, the statistical correlation of the data was performed, where as a result the types of correlations were found, classifying them as positive or negative and strong or weak. Thus,

this work allowed to observe the influence between the concentrations of PM_{2.5} in the atmosphere and the meteorological variables, and the relation of the indices constructed with PM_{2.5} and with the wind speed.

Keywords: atmospheric pollution, urban vegetation, verticalization, particles, meteorological factors

Introdução

A população urbana tem crescido intensamente nas últimas décadas. Esse crescimento está relacionado ao desenvolvimento econômico, que sustenta o processo e urbanização. Atualmente, mais da metade da

população global (54%) vive em áreas urbanas, espaços atrativos por apresentarem mais oportunidades de trabalho e educação (United Nations, 2015). No entanto, a não inclusão da variável ambiental no planejamento desses espaços faz com que seu crescimento concorra diretamente com a qualidade ambiental (MMA, 2019). Dessa forma, a qualidade de vida da população torna-se ameaçada.

O crescimento populacional urbano intensifica o uso do território, aumentando a demanda por recursos naturais e a geração de resíduos para o ambiente. Nesses espaços há uma grande disputa de áreas entre pessoas, construções e vegetação. Como consequência, tem-se diversos impactos ambientais, como perda de cobertura vegetal, extinção de espécies, impermeabilização e degradação de solos, intensa produção de lixo, adversidades climáticas e poluição das águas e do ar (Pasqualotto e Sena, 2017).

Acompanhado do aumento dos residentes em áreas urbanas, houve o incremento do tráfego de veículos. Em decorrência disso, as concentrações de poluentes atmosféricos vêm aumentando, trazendo prejuízos à saúde humana. Segundo Genikhovich (2005), os poluentes de origem veicular se constituem num grande impacto adverso à saúde, pois são emitidos próximo ao nível do solo e podem ser inalados pelas pessoas, não sendo tão diluídos quanto àqueles emitidos à uma altura superior.

Um dos principais poluentes do ar urbano é o material particulado (MP), complexa mistura de partículas sólidas e líquidas em suspensão no ar, de origem natural ou antrópica (Kaur,

Nieuwenhuijsen e Colvile, 2007). Também conhecido como “aerossól atmosférico”, sua distribuição por tamanho é muito ampla, mas o aerossol é dominado por partículas menores, $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (Seinfeld e Pandis, 1998; US-EPA, 2016a).

Entre as principais fontes naturais de MP atmosférico pode-se destacar as emissões de partículas do solo, aerossol marinho, vulcões, processos pirolíticos naturais e partículas de origem vegetal, todavia em concentrações bem menores que as demais fontes (Seinfeld e Pandis, 1998). Já entre as fontes antropogênicas, especialmente em áreas urbanas destacam-se: as emissões veiculares, atividades industriais, o uso de carvão e madeira como fontes de energia (Silva et al., 2016). A constituição química do MPA inclui íons inorgânicos, bem como uma vasta variedade de substâncias orgânicas e metais (Seinfeld e Pandis, 1998; Cavalcante et al., 2017). Em adição, componentes biológicos (fungos e bactérias) também fazem parte da composição do MPA (Rocha et al., 2017). O MPA pode ser primário, quando sua composição for de materiais emitidos diretamente na atmosfera (p.ex.: poeiras de diversas fontes, sais marinhos, partículas geradas mecanicamente e por combustão), ou secundário, quando são formadas por vapores condensados pela reação química envolvendo precursores da fase gasosa ou de outros processos. Estas partículas, conhecidas como partículas secundárias, compõem a maior parte da poluição por partículas finas (US-EPA, 2016a).

O material particulado total (MPT) ou partículas totais em suspensão (PTS), é composto por partículas grossas ($2,5 \mu\text{m} > \text{MP} \leq 10 \mu\text{m}$), bem como por partículas finas ($0,1 \mu\text{m} > \text{MP} \leq 2,5 \mu\text{m}$) e ultrafinas ($\text{MP} \leq 0,1 \mu\text{m}$), denominadas, respectivamente, por MP₁₀, MP_{2.5}, e MP_{0.1} (US-EPA, 2016a). A Figura 1 compara os tamanhos de MP_{2.5} e MP₁₀ com os tamanhos médios de um fio de cabelo humano (70 μm) e grão de areia (90 μm).

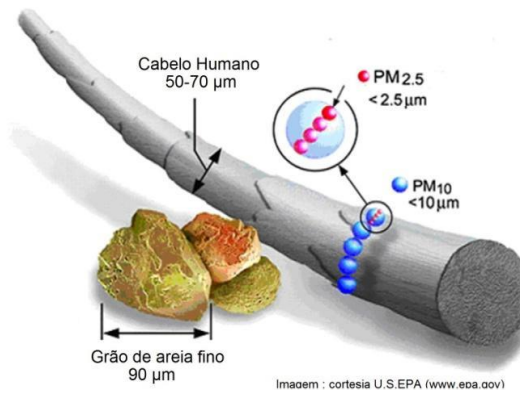


Figura 1. Comparação do tamanho de MP_{2,5} e MP₁₀ com fio de cabelo e grão de areia

As partículas grossas são chamadas de inaláveis e as finas e ultrafinas são chamadas de respiráveis. As inaláveis (MP₁₀) são encontradas próximas à rodovias e indústrias, e são consideradas partículas menos perigosas à saúde

humana pois são depositadas mais rapidamente. As partículas inaláveis quando inspiradas são retidas na parte superior do trato respiratório, ou seja, na

parte extratorácica, acima da laringe (Figura 2). As partículas respiráveis (MP_{2,5} e MP_{0,1}) apresentam um maior perigo à saúde humana pois permanecem em suspensão no ar por mais tempo. Quando inspiradas podem atingir as porções mais inferiores do trato respiratório onde estão situados os alvéolos pulmonares. Desta forma, os constituintes do MP podem alcançar a corrente sanguínea, se espalhando pelo corpo e chegando até as células dos organismos vivos, causando efeitos deletérios diversos (US-EPA, 2016a; US-EPA, 2016b) (Figura 2).

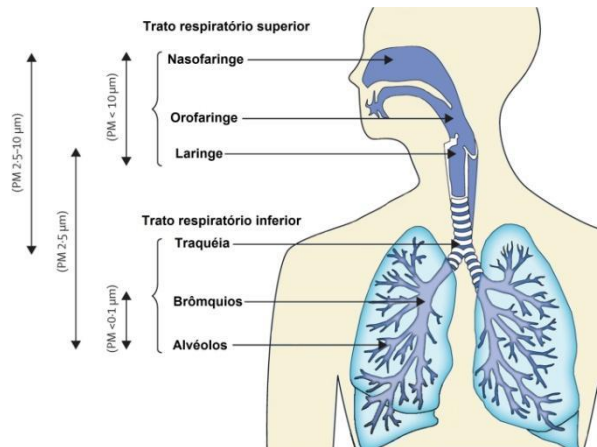


Figura 2. Exposição por inalação e distribuição do MP entre o trato respiratório superior e inferior nos seres humanos (adaptado de Guarnieri e Balmes, 2014)

Com o crescimento acelerado das cidades e a adoção de políticas de conservação ambiental, os espaços livres necessários à expansão urbana se tornam cada vez mais escassos, o que levou ao crescimento vertical das cidades (Lin et al., 2014; Aguiar et al., 2017). Para Lin *et al.* (2014), embora a verticalização represente uma resposta inevitável ao desenvolvimento urbano, constituindo-se um marcador de vitalidade econômica, ela também pode ter efeitos negativos. A rugosidade dos edifícios e das estruturas urbanas afeta o vento dentro da cidade, agindo como barreiras que diminuem o fluxo de ar, diminuindo a capacidade de dispersão dos poluentes atmosféricos

(Santamouris et al., 2011). Além disso, a distribuição dos edifícios pode influenciar significativamente o efeito da ilha de calor e amplificar o ruído do tráfego rodoviário (Ko, Chang e Lee, 2011).

Com a atenuação das ações antrópicas nas cidades, a presença da vegetação nos centros urbanos está cada vez menor. Os principais benefícios da arborização urbana são: conforto térmico – relacionado ao controle da temperatura –, paisagem urbana, captação da água da chuva e filtragem dos poluentes atmosféricos. As desvantagens ocasionadas pelas florestas urbanas, geralmente, são o manejo inadequado e a escolha de espécies não nativas. Apesar de algumas

desvantagens, as árvores são capazes de atenuar a temperatura e absorver componentes gasosos através dos estômatos, interceptando o material particulado, sendo imprescindíveis para a melhoria da qualidade do ar (Albuquerque e

Lopes, 2016; Amato-Lourenço et al., 2016; Duarte et al., 2018).

A cidade de Fortaleza, está localizada em um país em desenvolvimento que passa por intenso processo de urbanização, é a quinta capital mais populosa do Brasil (IBGE, 2016) e é um exemplo de cidade que sofre com as consequências da expansão urbana. Nos últimos dez anos passou por um “boom” imobiliário, na qual aumentou sua densidade populacional e obteve um crescimento de aproximadamente 95% na frota de veículos (DENATRAN, 2018). As consequências disso foram à perda de áreas verdes, aglomeração de residências em áreas específicas da cidade e longos congestionamentos, bem como a redução de áreas públicas usadas para a prática de atividades físicas, esportes e lazer. Assim, os cidadãos passaram a utilizar praças e calçadas, inseridas em áreas altamente edificadas com intenso fluxo de automóveis.

Deste modo, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência das características urbanas sobre a dispersão do material particulado atmosférico de 2,5 µm em locais utilizados para prática de atividades físicas e lazer na cidade costeira de Fortaleza, através dos índices de arborização e de edificação construídos, bem como das variáveis meteorológicas.

Material e Métodos

Área de Estudo

A cidade de Fortaleza está localizada na costa atlântica, na região Nordeste do Brasil, com uma área de 314,93 km² e uma população estimada em 2.627.482 pessoas (IBGE, 2016). A região tem duas estações bem definidas, chuvosa (janeiro a julho) e seca (agosto a dezembro), com temperaturas médias variando de 25 a 28 °C, velocidade média anual de 3,5 m.s⁻¹ e precipitação média de 1600 mm; no entanto, as chuvas se concentram entre fevereiro e maio (Sousa et al., 2015). A amostragem foi realizada nas estações seca e chuvosa em 2016, durante os meses de abril, maio e junho (estação chuvosa) e outubro e novembro (estação seca), para verificar o efeito da sazonalidade nos dados. Nota-se que 2016 foi marcado por baixas chuvas (45% abaixo da média), e, portanto, a estação seca predominou durante o ano (FUNCEME, 2016).

Este estudo foi conduzido durante a manhã e à tarde, entre as 6:30 e 8:00 e 17:30 e 19:00, dois períodos considerados "horários de pico" do tráfego na cidade e também os horários que a maioria das pessoas praticam atividade física nos locais estudados. A coleta de dados foi realizada em triplicata, três dias numa mesma semana, em locais diferentes para diminuir a tendência das medições, e os equipamentos utilizados no estudo foram localizados na calçada, onde as pessoas caminhavam.

Foram selecionados sete locais para o estudo, distribuídos pela cidade, cujos critérios de escolha foram baseados na intensidade das atividades urbanas próximas, como: fluxo de veículos e de pessoas, arborização, densidade populacional e de construções, tendo em comum seu uso para atividade física e recreação. É possível observar a distribuição dos pontos de amostragem na área de estudo na Figura 3:

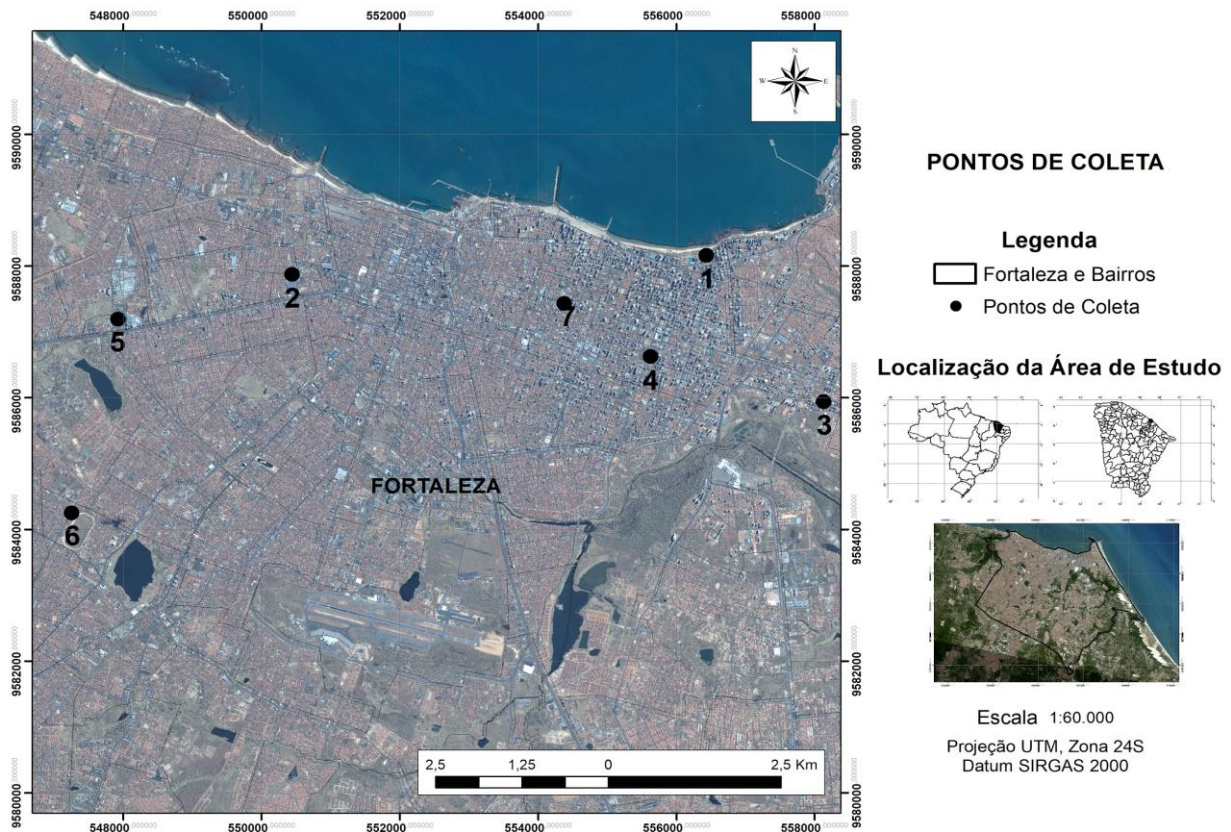


Figura 3. Localização dos pontos de coleta na área de estudo

Conforme a Figura 3, as áreas de estudo são as seguintes:

- Ponto 1 (CBM) – Calçadão da Avenida Beira Mar
- Ponto 2 (CCr) – Calçadão Crasa
- Ponto 3 (PMD) – Praça Martins Dourado

- Ponto 4 (PPF) – Praça Dr. Carlos Alberto Studart Gomes
- Ponto 5 (PNS) – Praça Jonas Gomes de Freitas
- Ponto 6 (CHM) – Calçadão do Hospital da Mulher
- Ponto 7 (PLT) – Praça Luiza Távora

Segundo a Política Ambiental de Fortaleza, “as praças públicas são áreas verdes urbanas de pequeno porte, distribuídas nos bairros e regionais, funcionando como áreas de convivência social e lazer”. Das áreas verdes urbanas existentes, as praças públicas podem ter um índice de permeabilidade reduzido, desde que não seja inferior a 40% da área total. O objetivo principal da criação de praças públicas numa cidade é a oferta de espaços de lazer urbanos arborizados e acessíveis. Devem ser implantadas em áreas onde não se encontrem corpos hídricos e áreas

protegidas. Assim, as praças públicas têm por finalidade o uso público para atividades culturais e educacionais, recreação e lazer, condicionado à observância das disposições estabelecidas na Lei do Sistema Municipal de Áreas Verdes e na legislação urbanística e municipal vigente.

A cidade de Fortaleza não possui um sistema público de praças e áreas verdes bem estruturado e hierarquizado. Estas se espalham pela cidade sem critério, implantadas de acordo com interesses de políticos e de autoridades (em muitos casos com fins eleitoreiros), que não conseguem formar uma estrutura organizada que possa ter função preponderante no espaço urbano (Agda e Lima, 2012).

Outro fator a ressaltar é que a grande maioria das praças da cidade tem cerca de 50% ou mais de sua superfície impermeabilizada, o que contradiz a política ambiental de Fortaleza. Grande parte das praças e as mais bem estruturadas encontram-se nos bairros nobres da cidade, situados nas regionais II e uma parte da VI.

Coleta de Dados

Material Particulado 2,5µm:

O MP foi coletado por um monitor de poeira em tempo real (Microdust Pro CEL-712, Casella). O seguinte equipamento informa com precisão a

quantidade de partículas por m³ de ar que estão na atmosfera do local amostrado. Utiliza o princípio de dispersão da luz frontal com luz de laser de semiconductor vermelho visível (comprimento de onda 635 nm < 5 mW) comprovado para realizar medições de concentração de poeira precisas. Possui uma resolução de medição de 1 µg/m³ em 2500 µg/m³, cuja faixa e medição utilizada foi 0 a 2500 µg/m³. O equipamento foi colocado a 1,5 m de distância do solo.

Dados Meteorológicos:

Em cada local amostrado também esteve presente uma estação meteorológica portátil (marca Davis, modelo Vantage Vue), cujos dados coletados foram temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. O equipamento coletou os dados a cada minuto e foi montado a uma altura de, aproximadamente, 2 m do solo. Os dados coletados pela estação foram armazenados em seu “*datalogger*” e, posteriormente, exportados e tratados no programa Excel – Microsoft®.

Além da coleta de MP e de alguns parâmetros meteorológicos, também foi realizada uma estimativa da média do fluxo de veículos de cada local estudado através de filmagens em diferentes pontos da área, no mesmo horário da coleta dos outros dados. Posteriormente, foi feita a contagem dos veículos e calculado o fluxo por minuto.

Construção dos Índices de Arborização e Edificação

O procedimento metodológico para a criação do Índice de Área Edificada e Arborizada sucedeu algumas etapas, entre elas a coleta e tratamento de dados, criação de banco de dados, vetorização de elementos, verificações e correções, atualização de dados cartográficos e cálculo da porcentagem da área arborizada e edificada.

Inicialmente foram coletadas imagens de satélite (Quickbird) de 2009, fornecida pela Prefeitura Municipal de Fortaleza em 2014, que foram tratadas no *ArcGis 10.2.1*.

Posteriormente, foi criado um banco de dados no ArcCatalogTM com arquivos *shapes* de Quadras, Telhados e Árvores nas áreas de estudo. A importância do banco de dados nesse trabalho consistiu na organização e uniformização de todos os dados adquiridos e criados. Os dados foram projetados em WGS1984, no sistema de projeção UTM.

Em seguida, os arquivos criados foram vetorizados (quadras, telhados e árvores). Foi

considerado textura e coloração para a delimitação dos objetos de acordo com suas características naturais. Inicialmente, delimitaram-se as quadras considerando suas geometrias na espacialidade. Para vetorizar os telhados foram considerados elementos como geometria, disposição e localização espacial, a sombra gerada pelo ângulo de elevação solar na imagem foi desconsiderada. A vetorização das árvores considerou a geometria das copas de árvores e a pigmentação esverdeada. Nessa etapa foi, também, delimitada a área de estudo, considerando-se um raio de 3 quadras nas praças, com o intuito de uniformizar as áreas de estudos em cada praça estudada.

Após a vetorização, verificou-se e atualizou-se os dados vetorizados por meio de imagens atualizadas temporalmente no *Google Earth*, possibilitando relacionar a existência de novas áreas edificadas e remoção de árvores da área de estudo considerando a alta dinamicidade dos centros urbanos.

Concluindo-se a criação do Índice de Área Edificada e Arborizada nas praças foi necessário o cálculo da porcentagem da área edificada e arborizada, calculando-se a área percentual de cada objeto na área de estudo. Assim, considerou-se a área total da área de estudo em relação à área de ocupação de cada objeto para o cálculo do percentual.

Análise Estatística dos Dados

A técnica estatística utilizada neste estudo foi feita no programa SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*). Os dados foram analisados por meio do teste estatístico de Correlação de Pearson. Para esta técnica foram adotados tanto o nível de significância a 5% ($\alpha = 0,05$) quanto a 1% ($\alpha = 0,01$).

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta as médias dos resultados de cada parâmetro avaliado de acordo com a sazonalidade climática. É possível perceber que algumas variáveis estudadas, MP_{2,5} e velocidade do vento, obtiveram uma diferença significativa entre os períodos chuvoso e seco. As variáveis temperatura e fluxo de veículos apresentaram uma pequena variação entre esses períodos. Quanto à umidade, somente alguns pontos estudados, CHM, PPF e PNS, apontaram uma diminuição relevante do período seco para o chuvoso.

	Parâmetros avaliados
--	----------------------

Locais	MP _{2,5} (µg/m ³)		Temperatura (°C)		Umidade (%)		Velocidade do vento (m/s)		Fluxo de veículos (p/min)	
	PC	PS	PC	PS	PC	PS	PC	PS	PC	PS
CBM	23,86	9,94	28,87	27,76	77,71	70,63	0,68	0,74	13	12
CCr	34,43	7,72	28,35	28,04	75,68	72,48	0,82	1,47	30	30
PMD	24,07	16,14	27,94	27,33	78,97	76,67	0,35	1,06	10	15
PPF	23,65	13,83	27,41	27,65	84,01	74,04	0,37	0,80	35	45
PNS	25,41	4,52	27,92	28,34	79,85	71,06	0,53	1,18	38	40
CHM	30,97	11,35	28,23	27,43	78,28	76,44	0,87	0,99	22	28
PLT	29,74	9,29	28,28	27,77	77,98	76,7	0,22	0,53	29	34

*PC – Período chuvoso/ PS – Período Seco

Tabela 1 – Valores médios dos parâmetros avaliados

O ponto CCr apresentou o maior nível de MP_{2,5} verificado no estudo, obtido no PC. Já o menor nível foi verificado no ponto PNS, no PS. A maior temperatura do ar obtida foi no ponto CBM, no PC, e a menor foi no ponto PMD, no PS, mas com uma diferença de apenas 1,5 °C, pois Fortaleza possui uma baixa amplitude térmica durante todo o ano por estar situada próxima à linha do Equador. Quanto à umidade, foi observada uma diminuição de aproximadamente 14% do maior valor obtido, no ponto PPF (PC) para o menor valor, no ponto CBM (PS), devido a época chuvosa na cidade possuir uma maior umidade relativa do ar. A

maior velocidade do vento foi verificada no ponto CCr, no PS, e a menor no ponto PLT, no PC, porém, em todos os pontos analisados houve um aumento significativo dos valores devido a intensificação dos ventos no PS em Fortaleza, principalmente entre os meses de agosto à outubro. Já o fluxo de veículos, último parâmetro avaliado, teve o maior resultado no ponto PPF e o menor no ponto PMD.

Com base, no levantamento dos dados foi possível a elaboração dos mapas dos Índices de Arborização e Cobertura Vegetal, conforme as Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, em cada ponto de amostragem:

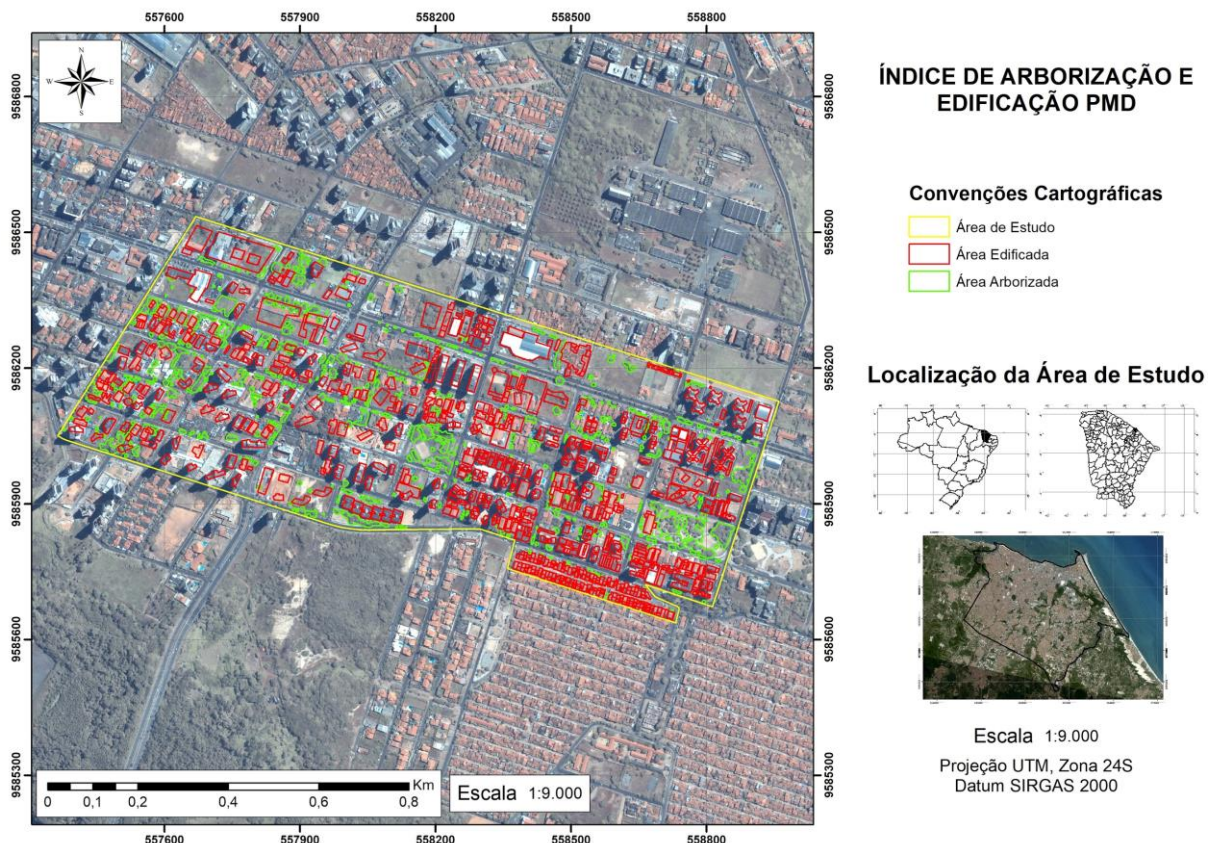


Figura 4. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - PMD

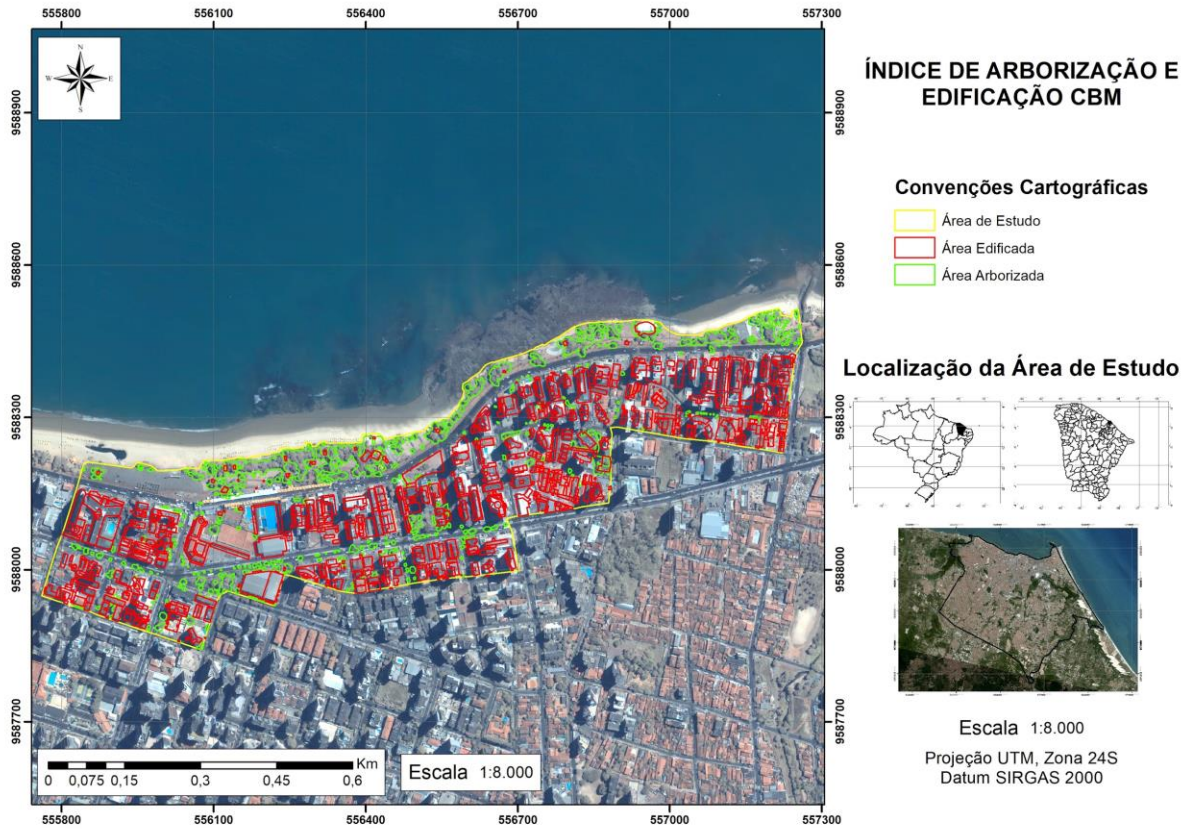


Figura 5. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - CBM

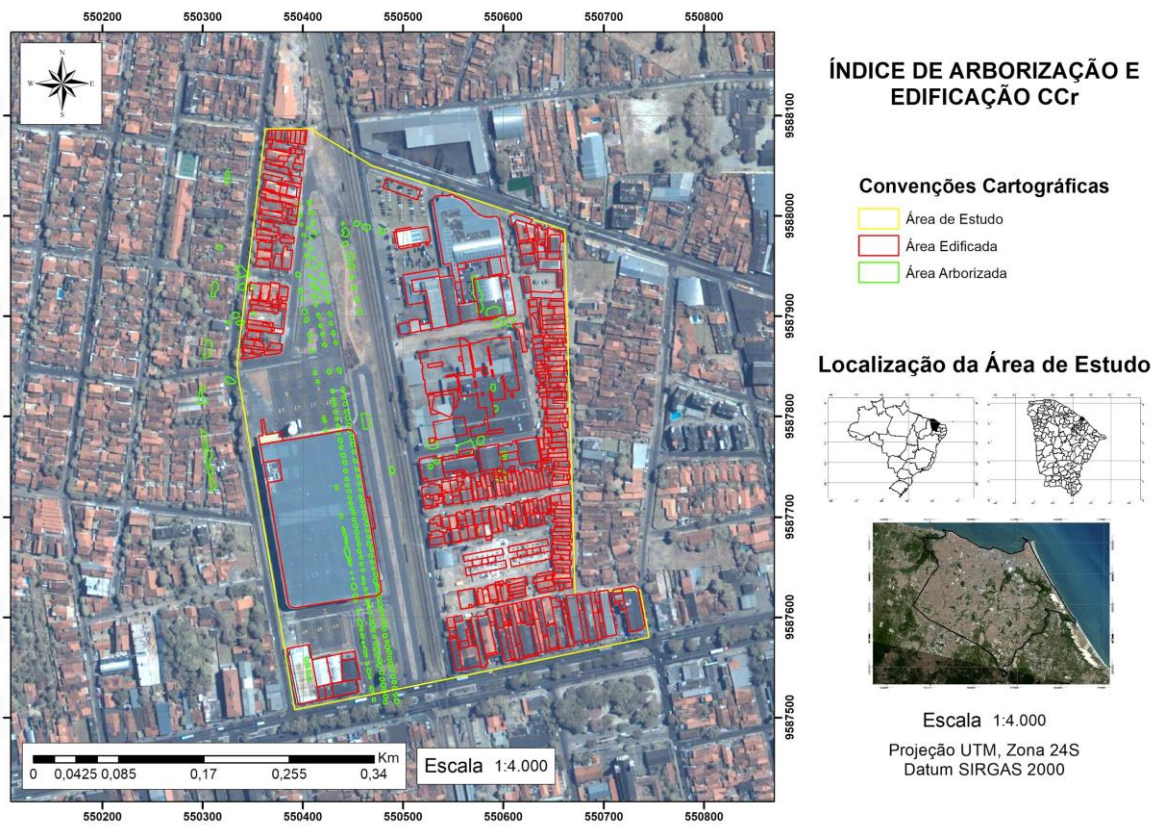


Figura 6. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - CCR

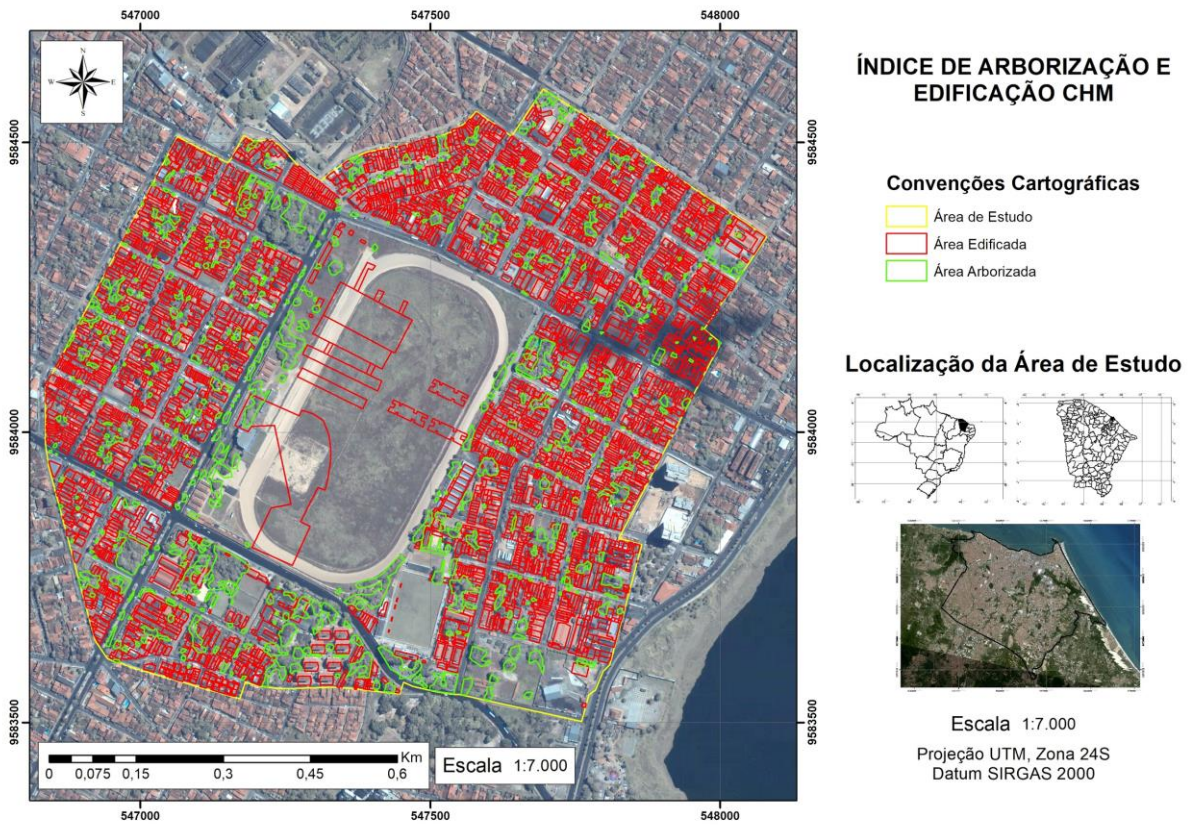


Figura 7. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - CHM

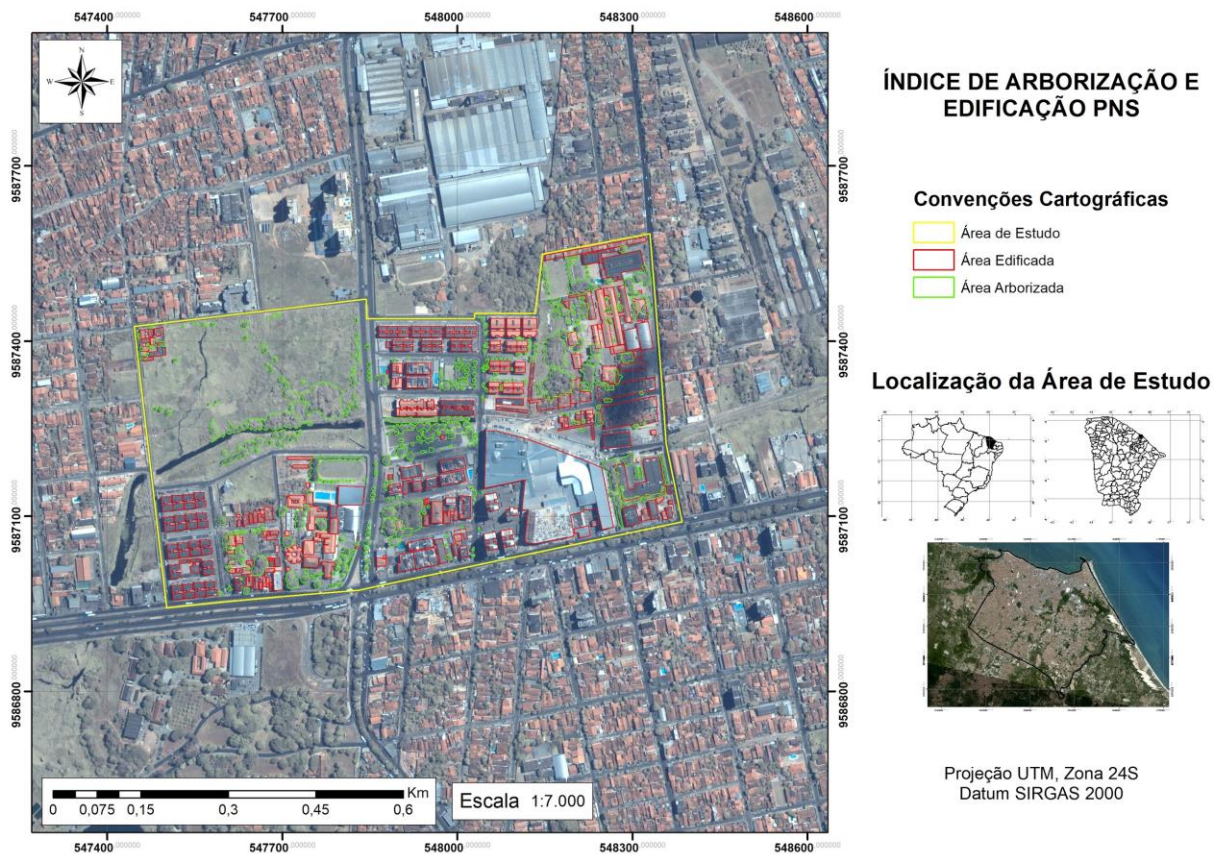


Figura 8. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - PNS

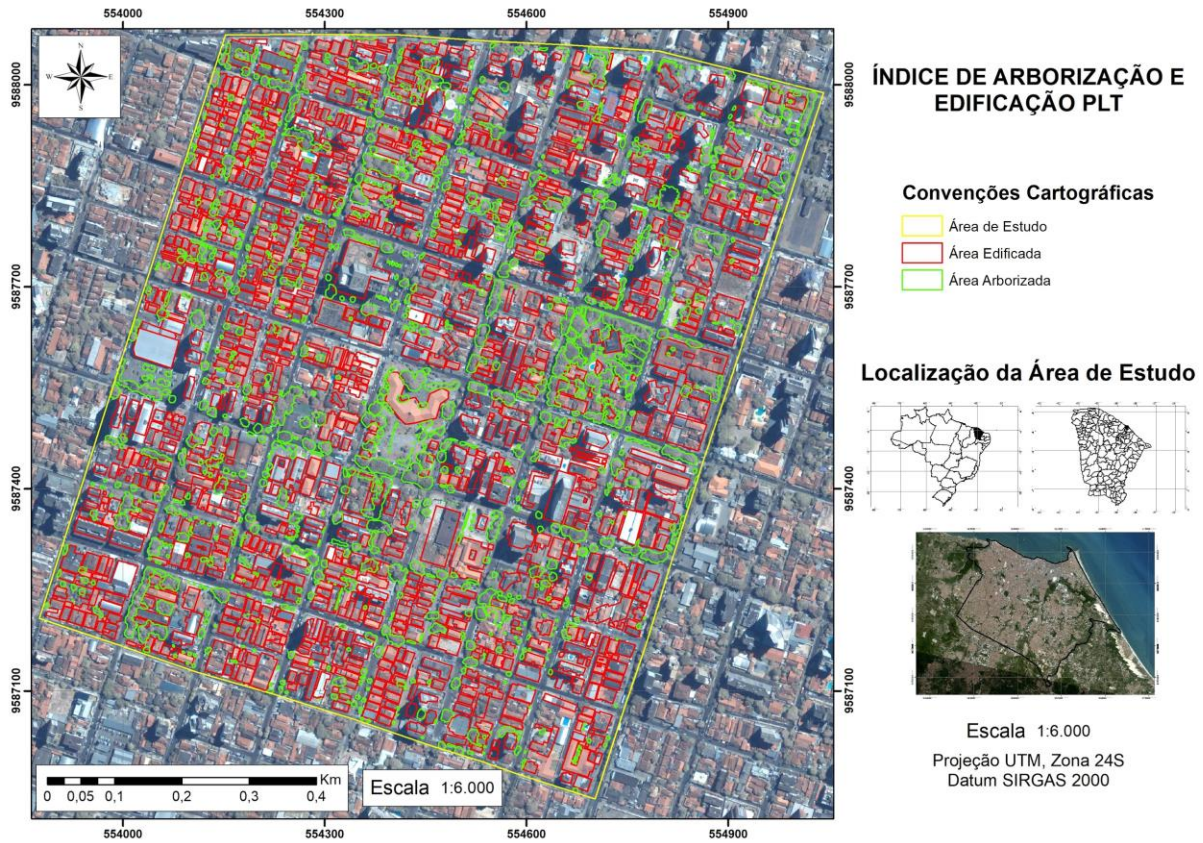


Figura 9. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - PLT

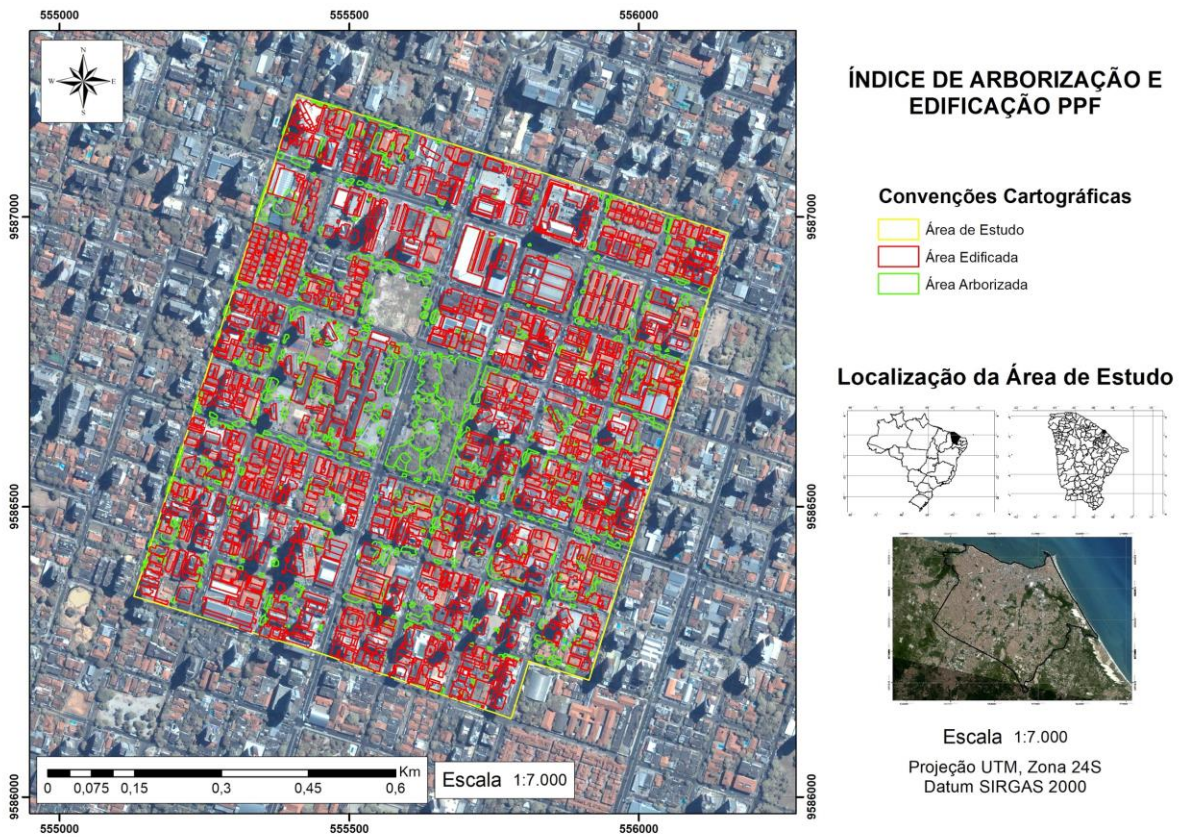


Figura 10. Mapas dos Índices de Arborização e Edificação nos pontos de amostragem - PPF

De acordo com a elaboração dos índices foi possível determinar a área com cobertura vegetal e de área construída (edificada) em cada ponto

estudado (Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10), como pode-se observar na Tabela 2. Considerou-se, para a construção dos índices uma área com raio de 3 quarteirões a partir dos pontos de amostragem, onde as áreas edificadas corresponderam à área

total construída com, no mínimo, 1 pavimento (altura de aproximadamente 3 metros) nesse perímetro e a área arborizada a todas as copas de árvores existentes. A vetorização permitiu observar que os prédios construídos em áreas residenciais ocupam um menor espaço no terreno quando comparados às construções consideradas “baixas”, como as casas.

Locais	Índice de arborização (%)	Índice de edificação (%)
CBM	8,84	29,91
CCr	2,45	42,39
PMD	12,73	23,41
PPF	9,15	38,20
PNS	9,83	23,71
CHM	7,58	35,21
PLT	9,85	30,50

Tabela 2 – Valores obtidos dos índices de arborização e edificação

Os resultados permitiram observar que os maiores índices de edificação estão ligados diretamente aos menores índices de arborização e vice-versa, considerando-se a retirada da vegetação para a construção de áreas edificadas. O ponto CCr apresentou o menor índice de

arborização e o maior índice de edificação devido, principalmente, à grande modificação do espaço construído por muitos empreendimentos comerciais (shoppings, mercantis, escolas e lojas) e áreas residenciais que ocupam um maior espaço horizontal no terreno. Este ponto localiza-se em uma das principais avenidas da cidade, com intenso e constante fluxo de veículos (Tabela 1) e alta concentração de atividades humanas, o que levou a uma supressão das áreas verdes na região. Outro fato que pode explicar o baixo índice de arborização no ponto CCr é má distribuição da vegetação no local, com a concentração de árvores em determinados lugares, em contraste com o elevado número de edifícios construídos nos últimos anos.

Em oposição ao ponto CCr, observou-se no ponto PMD o maior índice de arborização e o menor índice de edificação. Na área em questão foi possível notar que os prédios prevalecem, de forma significativa, sobre as casas como opção de residência, ocupando, assim, um menor espaço horizontal no terreno. Apesar da região ser alvo de uma alta especulação imobiliária, possuindo um crescente aumento no número de construções verticais, ainda há uma forte presença de vegetação distribuída pela área estudada, devido a algumas

praças arborizadas e vários terrenos que ainda não foram ocupados, variáveis estas que explicam o maior índice de arborização encontrado no estudo.

De acordo com a Tabela 2, também foi possível verificar que nos pontos PPF, PNS e PLT houve uma similaridade no índice de arborização, apresentando os valores 9,15, 9,83 e 9,85, respectivamente, o que permite notar um padrão na área arborizada nos três pontos, cujo resultado pode ser relacionado às árvores de canteiro central e calçadas, terrenos abandonados ou ainda não ocupados, arborização da praça e colégios com área interna arborizada. No índice de edificação observou-se essa mesma similaridade nos pontos PMD e PPF, com valores de 23,41 e 23,71, respectivamente. Esses níveis demonstram uma alta concentração de prédios bem próximos aos dois pontos de coleta, em oposição ao número de casas.

Os testes estatísticos permitiram observar as principais correlações, e as mais significativas, entre os parâmetros estudados. Os resultados das correlações mostraram que as variáveis meteorológicas, temperatura do ar (TA), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (VV), apresentaram correlações significativas com as concentrações de $MP_{2,5}$ ($r = 0,25$ e $\alpha < 0,05$; $r = 0,42$ e $\alpha < 0,01$; $r = - 0,38$ e $\alpha < 0,01$, respectivamente). TA e UR obtiveram correlações positivas com o $MP_{2,5}$, enquanto a VV foi negativa. As variáveis UR e VV foram os principais parâmetros que exerceram influência nos níveis de $MP_{2,5}$ na atmosfera, atuando diretamente sobre a dispersão dessas partículas. A variável TA também exerce influência sobre o $MP_{2,5}$, porém é menos expressiva que as outras duas variáveis

meteorológicas citadas anteriormente, devido à baixa variação espaço-temporal da mesma, uma vez que os pontos estão sobre influência de um mesmo clima, com amplitude térmica diária e anual baixas, característica observada na cidade de Fortaleza.

A relação entre as variáveis meteorológicas e as concentrações de $MP_{2.5}$ é melhor observada quando se analisa a variação sazonal climática destes parâmetros (Tabela 1). As concentrações médias de $MP_{2.5}$ no PC chegam a ser de 1,5 a 5,6 vezes maiores que no PS nos pontos estudados. A diferença sazonal da VV explica, em parte, as maiores concentrações de $MP_{2.5}$ no PC, cuja a condição de baixos ventos é a principal responsável pela redução da diluição horizontal destas partículas na atmosfera (Fang et al., 2018). Índices de umidade um pouco mais altos no PC podem colaborar com a acumulação das partículas finas, estando geralmente relacionados à aproximação da camada limite planetária (CLP) com a superfície, auxiliando o aumento das concentrações do $MP_{2.5}$ próximo ao solo (Sandeep et al., 2014; Li et al., 2017). Além disso, conforme Hu et al. (2008), a partição de espécies semi-voláteis na fase aerossol é favorecida em situações de alta UR. Bem como, a estagnação atmosférica com ventos fracos e alta umidade (sem precipitação) induz o crescimento higroscópico de MP (Fang et al., 2018). No segundo semestre do ano em Fortaleza, durante o PS, a maior altura da CLP associada ao aumento da VV e à redução da UR (que também se correlacionou com a VV, $r = -0,44$ e $\alpha < 0,01$) colaborou para a dispersão das partículas finas, resultando em uma grande diminuição da concentração do $MP_{2.5}$.

Correlações estatisticamente significativas não foram obtidas entre os índices (de arborização e edificação) e as concentrações de $MP_{2.5}$, mostrando que não há relação direta entre essas variáveis. No entanto, foram observadas correlações significativas entre as variáveis VV e Índice de Arborização e VV e Índice de Edificação, podendo representar uma influência indireta sobre as concentrações de $MP_{2.5}$. O Índice de Arborização apresentou correlação positiva com a VV ($r = 0,24$ e $\alpha < 0,05$), e o oposto foi verificado para o Índice de Edificação ($r = -0,39$ e $\alpha < 0,01$), isto implica que quanto maior a área edificada (nos locais estudados) menor a velocidade do vento, enquanto para áreas mais arborizadas a velocidade é maior.

Tanto a arborização quanto a edificação constituem elementos de rugosidade (pedras, vegetação, árvores e edifícios) com potencial para alterar o fluxo de vento, pois atuam como obstáculos que geram turbulência na atmosfera

(Rotach e Calanca, 2015). No entanto, os obstáculos criados pelas construções urbanas exercem maior influência, em comparação a vegetação. Sob condições de ventos brandos, a presença de edifícios altos aumenta a rugosidade da superfície urbana, o que reduz a velocidade média do vento em toda a cidade, permitindo o aumento das concentrações de poluentes na baixa atmosfera (Liu et al., 2005). Vale ressaltar que foi levado em consideração apenas a área horizontal ocupada pelas edificações, não sendo considerada a altura das mesmas – parâmetro que poderia exercer grande impacto sobre os fluxos de vento e o transporte e dispersão de poluentes atmosféricos.

A variável UR apresentou uma correlação negativa com os parâmetros TA ($r = -0,41$ e $\alpha < 0,01$) e VV ($r = -0,44$ e $\alpha < 0,01$). A cidade de Fortaleza, por ser uma região litorânea possui alta umidade durante todo o ano, com pequenas variações entre os períodos sazonais e quando se compara determinados pontos da cidade. A influência das brisas marítimas e terrestre e a evapotranspiração são os principais fatores que contribuem com a UR nos centros urbanos (Jardim, 2011). As correlações encontradas neste estudo entre UR, TA e VV estão diretamente ligadas à sazonalidade climática da região, pois no PC em Fortaleza configura-se uma maior umidade do ar e menores velocidades dos ventos. Já no PS estas condições se invertem, com uma menor umidade e aumento da intensidade dos ventos. Quanto à temperatura do ar, não há diferenças consideráveis entre os períodos sazonais (menos que $1^{\circ}C$ – Tabela 1), como já foi exposto anteriormente. A cidade possui uma baixíssima amplitude térmica durante todo o ano.

Os centros urbanos, quando comparados às áreas circunvizinhas, são regiões de baixa pressão e alta temperatura, devido ao grande número de construções e áreas impermeáveis, remetendo áreas mais quentes (Jardim, 2011). Porém, este cenário não se configura uma regra, pois no interior de uma cidade ocorrem diferenças significativas de temperatura entre os diferentes bairros, associadas às diferentes características de relevo, vegetação e na dinâmica, densidade e arranjo espacial do equipamento urbano. O que, por sua vez, interfere na disponibilidade de calor sensível disponível para aquecer o ar. Há, também, as diferenças diárias, diferenças associadas às mudanças dos tipos de tempo e variações estacionais (Bayer e Bayer, 2015). Portanto, a temperatura influencia diretamente nos movimentos das massas de ar, o que ocasiona deformação no campo de vento, podendo intervir na dispersão dos poluentes próximos à superfície.

Outra relação encontrada neste estudo foi entre os índices, de arborização e edificação, que apresentou a melhor correlação observada ($r = -0,83$ e $\alpha < 0,01$). A arborização de um centro urbano está intimamente ligada ao fator edificação, por conta do espaço necessário para se construir. Conforme Pinheiro e Souza (2017), a urbanização e a edificação das cidades ocasiona a retirada da vegetação, substituindo-as por áreas construídas como residências, comércios, estacionamentos e indústrias. Os valores obtidos entre as correlações dos índices de todos os pontos estudados apontaram que quanto maior o índice de arborização, menor o de edificação, e vice-versa, pois com o aumento da urbanização e modernização das cidades, a tendência é a substituição dos espaços verdes por espaços construídos, pela necessidade de novas moradias, tendo como destaque os prédios residenciais, deixando as cidades cada vez mais verticalizadas, menos arborizadas e, conseqüentemente, termicamente desconfortáveis.

As concentrações de poluentes atmosféricos nas cidades aumentaram com o passar das décadas. A urbanização desordenada e o crescimento da frota veicular contribuem com as emissões de MP nos grandes centros urbanos, permanecendo por muitos anos como a principal fonte de MP (Andrade et al., 2017). Devido ao aumento dessas emissões foram implantadas tecnologias na área dos combustíveis, como a substituição de gasolina e diesel por etanol, biodiesel ou gás natural veicular (GNV), e nos sistemas estruturais dos automóveis, promovendo uma redução dos níveis de alguns poluentes atmosféricos, quando observadas séries históricas de monitoramento. Portanto, a forte relação entre emissão veicular e níveis de MP na atmosfera nem sempre será encontrada, como ocorreu neste estudo ($r = 0,06$ e $\alpha = 0,32$). É necessário considerar todas as outras fontes de emissão, como a evaporação pelos processos de abastecimento nos postos de gasolina, construção civil e o uso de madeira e carvão para cozinhar em casas e restaurantes (Jiang et al., 2001; Liu et al., 2004).

Conclusão

A criação dos índices de arborização e edificação mostrou a evolução urbana na cidade de acordo com o aumento de construções verticalizadas e a redução da cobertura arbórea em diferentes pontos da cidade de Fortaleza. Assim, foi possível verificar a influência do avanço urbano e da opressão da vegetação sobre o comportamento do material particulado na atmosfera. A sazonalidade climática foi um fator preponderante

sobre os níveis de $MP_{2,5}$ na atmosfera da região, cujas maiores concentrações foram encontradas no período chuvoso, o que revelou uma forte influência dos ventos e da precipitação na manutenção da qualidade do ar na cidade. A correlação estatística feita entre todos os parâmetros avaliados mostrou a influência direta e significativa entre as concentrações de $MP_{2,5}$ na atmosfera e as variáveis meteorológicas (velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar). Os índices construídos não apresentaram correlação significativa com o $MP_{2,5}$, porém relacionaram-se com a velocidade do vento, o que contribui diretamente com a dispersão do poluente próximo à superfície. Assim, os maiores índices de arborização podem contribuir para a melhoria da qualidade do ar em áreas urbana influenciando na dinâmica de poluentes atmosféricos, tendo consequência na qualidade de práticas esportivas e de lazer da população em determinadas áreas.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelos recursos e bolsas do projeto "Como aferir a qualidade do ambiente para garantia de espaços adequados na prática esportiva e de lazer: um projeto de políticas públicas para valorização do meio ambiente em Fortaleza-Ce" (processo: 487853/2013-0) custeado pelo CNPq.

Referências

- Albuquerque, M. M.; Lopes, W. G. R., 2016. Influência da vegetação em variáveis climáticas: estudo em bairros da cidade de Teresina, Piauí. *Ra'e Ga* [online] 36, 38-68. Disponível: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/39719/27989>. Acesso: 09 mar. 2019.
- Agda, A., Lima, M. A., 2012. O desenvolvimento das áreas verdes no ecossistema urbano – um cenário ambiental e sustentável para Fortaleza. III ENECS – Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. Santa Maria, RS. 21 a 28 de julho.
- Aguiar, L. F. M. C., Silva, M. V. C., Gandu, A. W., Rocha, C. A., Cavalcante, R. M., 2017. Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física* 10, 1046-1058.
- Amato-Lourenço, L. F., Moreira, T. C. L., Arantes, B. L., Mauad, T., 2016. Metrôpoles, cobertura

- vegetal, áreas verdes e saúde. *Estudos Avançados* [online] 30, 113-130. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142016.00100008>. Acesso: 09 mar. 2019.
- Andrade, M. F. et al, 2017. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric Environment* [online] 159, 66-82. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.051>. Acesso: 10 abr. 2018.
- Bayer, D. M., Bayer, F. M., 2015. Previsão da umidade relativa do ar de Brasília por meio do modelo beta autorregressivo de médias móveis. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 30, 319-326. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130645>. Acesso: 28 fev. 2019
- Cavalcante, R. M., Rocha, C. A., De Santiago, I. S., Da Silva, T. S. A., Cattony, C. M., Silva, M. V. C., Silva, I. B., Thiers, E P. R. L., 2017. Influence of Urbanization on Air Quality Based on the Occurrence of Particle-Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Tropical Semiarid Area (Fortaleza-CE, Brazil). *Air Qual Atmos Health* 10, 437-445. DOI 10.1007/s11869-016-0434-z.
- DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito, 2018. Frota por município e tipo de veículo. Disponível: <https://www.denatran.gov.br/estatistica/635-frota-2018>. Acesso: 20 nov. 2018.
- Duarte, T. E. P. N., Angeoletto, F., Santos, J. W. M. C., Silva, F. F., Bohrer, J. F. C., Massad, L., 2018. Reflexões sobre arborização urbana: desafios a serem superados para o incremento da arborização urbana no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* [online]. Disponível: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n1p327-341>. Acesso: 09 mar. 2019.
- Fang, X., Fan, Q., Li, H., Liao, Z., Xie, J., Fan, S., 2018. Multi-scale correlations between air quality and meteorology in the Guangdong–Hong Kong–Macau Greater Bay Area of China during 2015-2017. *Atmospheric Environment* [online] 191, 463-477. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.018>. Acesso: 03 set. 2018.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2016. Disponível: <http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/724-quadra-chuvosa-de-2016-teve-precipitacao-abaixo-da-media>. Acesso: 15 mai. 2018.
- Genikhovich, E. L., 2005. Joint analysis of air pollution in street canyons in St. Petersburg and Copenhagen. *Atmospheric Environment* [online] 39, 2747-2757. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.057>. Acesso: 19 fev. 2018.
- Guarnieri, M., Balmes, J. R., 2014. Outdoor Air Pollution and Asthma. *The Lancet* 383, 1581-1592. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)60617-6.
- Hu, X-M., Zhang, Y., Jacobson, M. Z., Chan, C. K., 2008. Coupling and evaluating gas/particle mass transfer treatments for aerosol simulation and forecast. *Journal of Geophysical Research* [online] 113. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2007JD009588>. Acesso: 03 set 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2016. Informações completas sobre Fortaleza. Disponível: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=230440&search=ceara|fortaleza|infograficos:-informacoes-completas>. Acesso: 29 mar. 2017.
- Jardim, C. H., 2011. Relações entre temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica em área urbana: comparação horária entre dois bairros no município de São Paulo-SP. *Geografias* 7, 128-142.
- Jiang, D. B., Wang, S. G., Lang, X. M., Shang, K. Z., Yang, D. B., 2001. The characteristics of stratification of lower-layer atmospheric temperature and their relations with air pollution in Lanzhou proper. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 133–139.
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M. J., Colville, R. N., 2007. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment* [online] 41, 4781-4810. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.002>. Acesso: 20 jun. 2018
- Ko, J. H., Chang, S. I., Lee, B. C., 2011. Noise impact assessment by utilizing noise map and GIS, a case study in the city of Chungju, Republic of Korea. *Applied Acoustics* [online] 72, 544-550. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.09.002>. Acesso: 07 set. 2018.
- Li, X., Ma, Y., Wang, Y., Liu, N., Hong, Y., 2017. Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM10 and PM2.5) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast China. *Atmospheric*

- Research [online] 198, 185-193. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.023>. Acesso: 03 set. 2018.
- Lin, J., Huang, B., Chen, M., Huang, Z., 2014. Modeling urban growth using cellular automata: Guangzhou as a case study. *Applied Geography* [online] 53, 172-186. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.007>. Acesso: 01 mai. 2018.
- Liu, C. H., Leung, D. Y. C., Barth, M. C., 2005. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. *Atmospheric Environment* [online] 39, 1567–1574. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.036>. Acesso: 10 mar. 2019.
- Liu, X. D., Tian, L., Zhang, X. Y., 2004. Influence of spring dust activities over the Taklimakan Desert area on concentrations of atmospheric PM10 in east of Northwest China. *China Environmental Science* 24, 528–532.
- MMA. Ministério Do Meio Ambiente, 2019. Planejamento Ambiental Urbano. Disponível: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/planejamento-ambiental-urbano>. Acesso: 24 fev. 2019.
- Pinheiro, C. R., Souza, D. D., 2017. A importância da arborização nas cidades e sua influência no microclima. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* [online] 6, 67-82. Disponível: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v6e1201767-82>. Acesso: 10 mar. 2019.
- Pasqualotto, N., Sena, M. M., 2017. Impactos ambientais urbanos no Brasil e os caminhos para cidades sustentáveis. *Revista Educação Ambiental em Ação*, 61.
- Rocha, C. A., Sousa, F. W., Zanella, M. E., Oliveira, A. G., Nascimento, R. F., Souza, O.V., Cajazeiras, I. M. P., Lima, J. L. R., Cavalcante, R. M., 2017. Environmental Quality Assessment in Areas Used for Physical Activity and Recreation in a City Affected by Intense Urban Expansion (Fortaleza-CE, Brazil): Implications for Public Health Policy. *Expo Health* 9. DOI 10.1007/s12403-016-0230-x.
- Rotach, M. W., Calanca, P., 2015. Boundary layer (atmospheric) and air pollution | Microclimate. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 258–264. DOI 10.1016/b978-0-12-382225-3.00225-5. Acesso: 19 set. 2018.
- Sandeep, A., Rao, T. N., Ramkiran, C. N., Rao, S. V. B., 2014. Differences in atmospheric boundary-layer characteristics between wet and dry episodes of the Indian summer monsoon. *Boundary-Layer Meteorology* [online] 153, 217-236. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9945-z>. Acesso: 03 set. 2018.
- Santamouris, M., et al, 2011. *Energy and climate in the urban built environment*. Nova York: Routledge. ISBN: 9781873936900.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics from air pollution to climate change*. New York. John Wiley and Sons, Incorporated. ISBN-13:978-0471720188.
- Silva, I. B., Silva, T. L., Rocha, C. A., Cavalcante, R. M., Silva, M. V. C., 2016. Uso da Geoestatística na Avaliação da Distribuição de Material Particulado Respirável na Cidade de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, p. 334-344.
- Sousa, F. W., Cavalcante, R. M., Rocha, C. A., Nascimento, R. F., Ferreira, A. G., 2015. Carbonyl compounds from urban activities and their associated cancer risks: the influence of seasonality on air quality (Fortaleza-Ce, Brazil). *Urban Climate* [online] 13, 110–121. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.03.004>. Acesso: 13 jun. 2018.
- United Nations, 2015. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. (ST/ESA/SER.A/366), 517 p. Disponível: <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf>. Acesso: 14 abr. 2018.
- US-EPA. United States Environmental Protection Agency, 2016a. Particulate matter (PM) pollution. Disponível: <https://www.epa.gov/pm-pollution>. Acesso: 8 mar. 2018.
- US-EPA. United States Environmental Protection Agency, 2016b. *Climate Change Indicators in the United States*. 4ª Edição. EPA 430-R-16-004. Disponível: www.epa.gov/climate-indicators. Acesso: 8 mar. 2018.