

O PAPEL DA ÁRVORES NAS CIDADES – SEQUESTRO DE CARBONO E OUTROS SERVIÇOS ECOSISTÉMICOS

M. Moreira da Silva, P. Matias, J. Teigão e A. Duarte

RESUMO

Atingir a neutralidade carbónica exige redução das emissões atuais de carbono e aumento do seu sequestro. As cidades são responsáveis por 75 % das emissões globais, e são muito vulneráveis às alterações climáticas por concentrarem 55 % da população mundial, edifícios e infraestruturas. A integração de árvores nas cidades apresenta diversos benefícios para a resiliência climática. Estudou-se sequestro e armazenamento de carbono, produção de O₂, remoção de poluentes atmosféricos, transpiração e escoamento superficial evitado, assegurados por nove espécies arbóreas, presentes em duas cidades no Algarve (Portugal). Verificou-se que: *C. equisetifolia*, *E. globulus*, *J. mimosifolia*, *P. nigra* e *Q. suber* sequestraram mais CO₂ e produziram mais O₂; *Q. suber* e *E. globulus* armazenaram mais carbono; *J. mimosifolia*, *P. ×hispanica*, *P. nigra* e *Q. suber* removeram mais poluentes atmosféricos, apresentaram maior transpiração e evitaram maior volume de escoamento superficial. A seleção adequada das árvores permite a complementaridade dos diversos benefícios para as comunidades urbanas.

1 INTRODUÇÃO

Desde novembro de 2022, a população mundial ultrapassou os 8 mil milhões e prevê-se que atingirá os 9,7 mil milhões em 2050. Este crescimento populacional está relacionado com o decréscimo dos níveis de mortalidade, que se reflete na crescente esperança média de vida (Mimi *et al.* 2024). A pressão sobre os recursos naturais do planeta e sobre os ecossistemas que sustentam a vida na Terra é cada vez maior, mantendo a ameaça de excedermos a biocapacidade do planeta (UN-DESA 2023). Os padrões de consumo atuais, fundamentados numa economia global e linear, não resultam apenas numa exploração insustentável dos recursos naturais, mas geram também grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos e contribuem significativamente para as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases poluentes (Brauer *et al.* 2021; Guzmán *et al.* 2022a). O CO₂, juntamente com outros gases com efeito de estufa (GEE), como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) têm a capacidade de absorver e reemitir radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra. A concentração de GEE tem vindo a aumentar ao longo dos anos, e em particular a do CO₂, considerado o principal causador do aquecimento global e das alterações climáticas. Estas têm-se refletido no aumento da temperatura atmosférica média, na alteração dos padrões da precipitação, na subida do nível médio das águas do mar, no aumento da temperatura média dos oceanos, no degelo nas principais cordilheiras terrestres, no degelo oceânico do Ártico, e na redução do gelo permanente do subsolo. As emissões de GEE continuam a aumentar devido às atividades antrópicas, incluindo uso de combustíveis fósseis (extração e queima de carvão, petróleo e gás), alteração do uso dos solos (desflorestação, urbanização, agricultura e indústria) (Ahlgren *et al.* 2023). A queima de combustíveis fósseis, para o

transporte de pessoas e mercadorias e para a produção de energia não renovável, é responsável por emissões que se mantêm na atmosfera durante centenas de anos (Ahlgren *et al.* 2023) considerada a principal causa das alterações climáticas de origem antrópica e da poluição atmosférica nas zonas urbanas. Os poluentes libertados para a atmosfera, como as partículas finas (PM₁₀ e PM_{2,5}), o dióxido de azoto (NO₂), o dióxido de enxofre (SO₂) e outros, estão entre as principais causas de doenças respiratórias e cardiovasculares, e de mortalidade precoce. Alguns estudos em zonas urbanas têm relacionado diretamente a poluição atmosférica com as alterações climáticas (Guzmán *et al.* 2022b).

Os impactos das alterações climáticas, como as ilhas de calor, a escassez de água e a subida do nível médio das águas do mar, juntamente com a poluição atmosférica, não são compatíveis com a harmonia e o bem-estar que uma cidade sustentável deve proporcionar à economia, à natureza e às pessoas das gerações atuais e futuras (Graça *et al.* 2018; de Jong *et al.* 2015). Atualmente, em média, apenas cerca de um quarto das emissões de CO₂ de origem antrópica são sequestradas e armazenadas, principalmente nos solos florestais e na biomassa vegetal aérea (Luhtaniemi 2023). Nesse contexto, a neutralidade carbónica, isto é, o equilíbrio entre as emissões de CO₂ e a sua remoção da atmosfera, é fundamental para se melhorar a resiliência urbana. Em junho de 2021, foi aprovada no Parlamento Europeu a Lei do Clima, que tem o objetivo reduzir em 55 % as emissões de carbono até 2030 e atingir a neutralidade carbónica em 2050 (EP 2023). A neutralidade carbónica passa por implementar ações tecnológicas e sociais que permitam reduzir as emissões de CO₂, sem perder qualidade de vida e numa lógica de inclusão e justiça social. Apesar destas medidas serem fundamentais, só por si não permitirão atingir a neutralidade carbónica, uma vez que há emissões que não se conseguem evitar e que, portanto, têm de ser compensadas pelo sequestro desse CO₂ (Sun *et al.* 2023). Para isso é essencial explorar Soluções Baseadas na Natureza (SBN), com foco especial na capacidade das plantas para sequestrar CO₂ atmosférico através da fotossíntese ($6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$). Para além de sequestrar carbono, as SBN assegura outros serviços ecossistémicos fundamentais para a resiliência climática e para a qualidade de vida das pessoas, sobretudo em ambiente urbano. Nestes serviços ecossistémicos estão incluídos a produção de O₂, a retenção de poluentes do ar, a redução do escoamento superficial durante fenómenos de precipitação, o sombreamento, a retenção da humidade atmosférica, a manutenção da biodiversidade, a polinização, entre outros (Graça *et al.* 2018; Oral *et al.* 2020; Tao *et al.* 2023).

Desde 2007, mais de metade da população mundial vive em cidades, e até 2050, prevê-se que 68 % das pessoas viverão em zonas urbanas. No entanto, os contextos urbanos são um fenómeno relativamente novo na história da humanidade, e esta transição transformou a forma como vivemos, trabalhamos, viajamos e construímos redes (Ritchie and Roser 2018). As cidades, apesar de constituírem apenas 2 % do planeta, são locais particularmente vulneráveis, por concentrarem as pessoas, edifícios e infraestruturas. Representam 80 % do consumo total de energia e 75% das emissões totais de carbono. Se repensados numa lógica de ecologia funcional, os espaços verdes urbanos podem ser cruciais para a resiliência climática, nomeadamente, podem promover o sequestro de CO₂ e a remoção de poluentes atmosféricos em locais estratégicos das cidades, e atenuar a formação das ilhas de calor (Strohbach *et al.* 2012; Xu *et al.* 2023). As cidades Mediterrânicas têm sido particularmente afetadas pelas alterações climáticas, tendo já atingido um aumento da temperatura média atmosférica de 1,5 °C. Devido a este aumento da temperatura, a região do Mediterrâneo encontra-se num cenário de escassez de água cada vez mais acentuada. Em simultâneo os episódios de precipitação extrema, durante curtos espaços de tempo têm sido cada vez mais frequentes, com graves prejuízos humanos e materiais. Neste contexto, é necessário

desenvolver medidas que permitam gerir a água de forma sustentável nas zonas urbanas, em períodos alternados de escassez e de abundância extrema.

A utilização de SBN nas cidades, e em particular nas Mediterrânicas, pode melhorar as suas condições térmicas e hidrológicas, e a qualidade do ar atmosférico que as pessoas respiram. As SBN permitem o sequestro e armazenamento de carbono em zonas com emissões mais elevadas e, através da fotossíntese, a produção de biomassa vegetal para sombreamento, produção de oxigénio e remoção de poluentes atmosféricos. Apesar de se utilizar água para rega de espaços verdes num contexto de escassez hídrica, essa água não carece de ser potável e é devolvida à atmosfera através da transpiração das plantas. Esta promove o aumento da humidade do ar e contribui para a redução da temperatura, através do consumo de energia na forma de calor latente na evaporação que ocorre nas folhas, o que reduz os picos térmicos. As copas das árvores servem ainda para interceptar a água da chuva, atenuando o escoamento superficial e evitando ou reduzindo os impactos dos eventos de precipitação extrema. Globalmente, as SBN podem ser da maior relevância na promoção de um ambiente urbano mais compatível com a saúde física e psíquica das gerações atuais e futuras.

O objetivo deste estudo foi quantificar os serviços ecossistémicos assegurados por nove espécies de árvores presentes em duas cidades do Algarve, no Sul de Portugal, Faro e Loulé.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Casos de Estudo

Foram considerados cinco espaços verdes urbanos, o Jardim das Comunidades de Almancil, em Loulé, e o Parque Ribeirinho, a Mata do Liceu, o Jardim da Alameda e o Campus da Penha, em Faro. Os municípios de Loulé e Faro, localizam-se no Algarve, e apresentam clima tipicamente mediterrânico (classificação Csa na escala de Köppen–Geiger), caracterizado por apresentar verões quentes e secos, alternados com invernos suaves e húmidos. As características sócioeconómicas e ambientais destes dois municípios, consideradas mais relevantes para o presente estudo, resumem-se na tabela 1.

Tabela 1 Caracterização dos Casos de Estudo (PORDATA 2021).

	Loulé	Faro
Área total	763,67 Km ²	202,57 Km ²
População residente	72 400	68 026
Densidade populacional	94,8 hab./km ²	335,8 hab./km ²
Principais atividades económicas	Setor primário: Agricultura; pesca. Setor secundário: Limitado (algum artesanato). Setor terciário: Turismo; retalho; transporte (comboio e outros).	Setor primário: Agricultura; pesca. Setor secundário: Limitado (algum artesanato). Setor terciário: Turismo; retalho; transporte (comboio, aeroporto e outros); universidade.
Emissões de CO₂e/hab	1,5 t/ano (estimado pelo município)	4,0 t/ano * (*média nacional)
Área verde per capita	9 675 m ²	2 744 m ²
Principais condicionalismos ambientais	Escassez de água; Eventos curtos de precipitação extrema com inundações; Ondas de calor cada vez mais prolongadas; Incêndios florestais; Subida do nível médio da água do mar; Erosão costeira.	

2.2. Amostragem das Espécies Arbóreas

Foi feita uma seleção de espécies arbóreas com base na frequência da sua utilização nos espaços verdes considerados nos dois municípios. Em Loulé estudaram-se a alfarrobeira (*Ceratonia siliqua*), a oliveira (*Olea europaea*) e o pinheiro-manso (*Pinus pinea*), e em Faro o pinheiro-australiano (*Casuarina equisetifolia*), o eucalipto (*Eucalyptus globulus*), o jacarandá (*Jacaranda mimosifolia*), o plátano (*Platanus × hispanica*), o choupo-negro (*Populus nigra*) e o sobreiro (*Quercus suber*). De notar que o pinheiro-australiano, o jacarandá e o eucalipto são espécies exóticas que se encontram amplamente implementadas em diversas cidades portuguesas há várias décadas.

Durante o mês de junho de 2023 selecionamos, para cada espécie, cinco árvores consideradas representativas em termos de tamanho, e procedemos à medição *in situ* da altura total, altura da base da copa, largura da copa, diâmetro do tronco à altura do peito (DAP), % de copa em falta e % de copa em mau estado sanitário.

2.3. Quantificação dos Serviços Ecosistémicos

Para quantificar os serviços ecosistémicos prestados pelas espécies medidas, utilizámos o software i-Tree Eco v6, desenvolvido pela USDA *Forest Service Northern Research Station*, (<https://www.itreetools.org/>). Utilizaram-se dados meteorológicos da estação mais próxima do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e dados da qualidade do ar atmosférico da estação mais próxima da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Utilizando-se este modelo, procedeu-se à quantificação de sequestro de carbono, armazenamento de carbono, produção de oxigénio, remoção de poluentes, incluindo monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de azoto (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), partículas com um diâmetro igual ou inferior a 10 µm (PM10) e partículas com um diâmetro igual ou inferior a 2,5 µm (PM2,5). Foi ainda estimada a transpiração, a água interceptada e o escoamento superficial evitado pelas árvores consideradas. Os resultados obtidos foram analisados utilizando-se o IBM® SPSS® Statistics 26. Efetuaram-se comparações de médias através da análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Duncan.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Caracterização das Árvores Estudadas

Os resultados das medições *in situ* das árvores e as respetivas áreas foliares apresentam-se na Tabela 2, sendo evidente a grande variabilidade de tamanho nas árvores estudadas dentro de cada espécie e entre as diversas espécies estudadas, nos espaços verdes dos dois municípios. Numa análise global dos resultados obtidos nos dois casos de estudo, a espécie com árvores mais baixas e com menor largura de copa foi o sobreiro (respetivamente $5,29 \pm 1,28$ m e $5,00 \pm 1,75$ m) e a espécie com árvores mais altas e maior largura de copa foi o eucalipto ($15,7 \pm 1,8$ m e $10,1 \pm 2,0$ m), que apesar de ser uma espécie exótica, grande consumidora de água, uma vez introduzida na cidade, desempenha um papel relevante no seu sombreamento (área foliar média de 213 ± 54 m²). O plátano, que é uma caducifólia autóctone, foi a segunda espécie mais alta e com maior área foliar (386 ± 117 m²), portanto também com um grande potencial de sombreamento na cidade no período mais crítico em termos de ondas de calor, nos meses de Primavera e Verão.

Tabela 2 Características das árvores urbanas consideradas nos dois casos de estudo (média ± erro padrão).

Cidade	Espécie	DAP* (cm)	Altura total (m)	Altura da copa (m)	Largura da copa (m)	Área foliar (m ²)
Faro	<i>C. equisetifolia</i>	36,0 ± 8,9	11,2 ± 2,1	9,03 ± 1,99	6,54 ± 1,20	105 ± 37
	<i>E. globulus</i>	57,8 ± 8,4	15,7 ± 1,8	9,05 ± 1,43	10,1 ± 2,0	213 ± 54
	<i>J. mimosifolia</i>	31,4 ± 4,1	7,97 ± 1,04	4,73 ± 0,65	6,86 ± 1,26	138 ± 54
	<i>P. ×hispanica</i>	47,0 ± 11,8	13,8 ± 2,6	9,22 ± 1,84	9,54 ± 2,30	386 ± 117
	<i>P. nigra</i>	47,3 ± 13,7	10,4 ± 1,7	8,20 ± 1,56	6,43 ± 1,33	222 ± 84
	<i>Q. suber</i>	29,0 ± 12,8	5,29 ± 1,28	3,80 ± 1,14	5,00 ± 1,75	93,4 ± 59,1
Loulé	<i>C. siliqua</i>	90,0 ± 12,3	8,50 ± 0,83	6,86 ± 0,78	11,2 ± 1,6	424 ± 62
	<i>O. europaea</i>	65,2 ± 14,6	6,86 ± 0,84	5,04 ± 0,76	8,14 ± 1,20	293 ± 87
	<i>P. pinea</i>	46,2 ± 6,2	9,36 ± 0,19	6,25 ± 0,37	9,17 ± 0,91	358 ± 55

3.2. Quantificação dos Serviços Ecosistêmicos Assegurados pelas Árvores Urbanas

Sequestro e Armazenamento de Carbono e Produção de Oxigénio

Estudos anteriores (Graça *et al.* 2018; Snehlata *et al.* 2021; Wang *et al.* 2021) têm demonstrado que espécies arbóreas distintas asseguram diversos serviços ecosistêmicos com diferentes eficiências e que dentro da mesma espécie, o tamanho e o estado sanitário de cada árvore são fatores relevantes para o sequestro e armazenamento de carbono. Os resultados obtidos confirmam que as espécies estudadas apresentam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na eficiência de sequestro de carbono por área foliar e na produção de oxigénio por área foliar (Tabela 3). Estas diferenças estatisticamente significativas são iguais para o sequestro de carbono e para a produção de oxigénio, porque ambos ocorrem durante o processo fotossintético.

Tabela 3 Sequestro armazenamento de carbono e produção de oxigénio pelas espécies consideradas nos dois casos de estudo.

Espécie	Sequestro de CO ₂ (kg.ano ⁻¹)		Sequestro de CO ₂ (kg.ano ⁻¹ .m ⁻²)	Armazenamento de carbono (kg)		Produção de O ₂ (kg.ano ⁻¹ .m ⁻²)	
	mín	máx	méd ± erro padrão	mín	máx	méd ± erro padrão	
Faro	<i>C. equisetifolia</i>	92,0	654	3,98 ± 1,04 ^b	58,9	1901	2,90 ± 0,76 ^b
	<i>E. globulus</i>	83,5	765	2,75 ± 0,82 ^b	372	3285	2,00 ± 0,60 ^b
	<i>J. mimosifolia</i>	70,7	150	2,00 ± 0,82 ^{ab}	61,1	460	1,45 ± 0,60 ^{ab}
	<i>P. ×hispanica</i>	6,2	196	0,37 ± 0,09 ^a	3,7	1412	0,27 ± 0,06 ^a
	<i>P. nigra</i>	10,3	505	1,92 ± 0,82 ^{ab}	4,5	1927	1,40 ± 0,60 ^{ab}
	<i>Q. suber</i>	19,1	87,6	3,12 ± 1,15 ^b	11,3	2267	2,26 ± 0,84 ^b
Loulé	<i>C. siliqua</i>	2,6	5,9	0,01 ± 0,00 ^a	754,4	4588	0,01 ± 0,01 ^a
	<i>O. europaea</i>	4,4	72,5	0,33 ± 0,29 ^a	177,3	4066	0,24 ± 0,21 ^a
	<i>P. pinea</i>	38,8	97,1	0,18 ± 0,03 ^a	154,1	756	0,13 ± 0,02 ^a

Para cada caso de estudo, os valores com letras comuns não diferem significativamente entre si no teste de Duncan ($p < 0,05$).

As espécies de árvores autóctones (*P. ×hispanica*, *P. nigra*, *Q. suber*, *C. siliqua*, *O. europaea*, e *P. pinea*), sendo mais tolerantes à seca, são particularmente interessantes no atual cenário de alterações climáticas por estarem naturalmente adaptadas a temperaturas mais elevadas e ao stress hídrico (Correia *et al.* 2017). No entanto, à semelhança do que acontece noutras cidades, nas zonas urbanas do Algarve, a par das espécies autóctones, existem algumas exóticas que parecem contribuir para a resiliência climática. Em Faro, as diferentes espécies

arbóreas apresentaram três grupos de eficácia no sequestro de carbono e na produção de oxigénio por área foliar, por ordem decrescente: [*C. equisetifolia* \cong *Q. suber* \cong *E. globulus*] > [*J. mimosifolia* \cong *P. nigra*] > *P. ×hispanica*. O valor máximo por árvore de sequestro de CO₂ observou-se para *E. globulus* (765 kg CO₂.ano⁻¹), correspondendo a uma árvore com 3285 kg de carbono armazenado.

Em Loulé o sequestro de CO₂ por por área foliar foi, por ordem decrescente das espécies arbóreas: *P. pinea* > *O. europaea* > *C. siliqua*. O valor máximo para sequestro de CO₂ observado para *P. pinea* correspondeu a 97,1 kg de CO₂ por ano, numa árvore com 755,5 kg de carbono armazenado. Os estudos sobre estas espécies em espaços urbanos são escassos, mas existem alguns trabalhos anteriores sobre o seu potencial de sequestro de carbono em florestas Mediterrânicas. O sequestro de carbono em olivais no Sul da Espanha foi quantificado entre 7,52 e 15,05 t CO₂/ha ano⁻¹ (Lopez-Bellido *et al.* 2016). Na região do Algarve, o sequestro de carbono por *C. siliqua* foi estimado em 0,668 t CO₂/ha (Sæbø *et al.* 2012). Outros autores (Correia *et al.* 2017) demonstraram que em sistemas de agricultura de sequeiro, o sequestro de carbono por *C. siliqua* e *O. europea* pode fundamentar um novo incentivo económico ecológico que pode melhorar o rendimento dos agricultores, pelos serviços ecossistémicos prestados.

Como seria de esperar, na generalidade, a massa de carbono armazenado sob a forma de biomassa aumenta com a altura das árvores estudadas nos dois municípios, com a única exceção do *P. pinea* (Figura 1). Neste caso, a relação negativa observada para *P. pinea* deve-se ao curto intervalo de altura das árvores estudadas (8,8 m a 9,9 m), onde, provavelmente, a árvore mais alta foi mais severamente podada que a mais baixa, levando a que o carbono armazenado seja inferior. Isto não significa que árvores com uma altura fora deste intervalo mantenham a mesma relação. Entre as espécies estudadas em Faro, *Q. suber* destaca-se como sendo a que mais carbono armazena em função da sua altura.

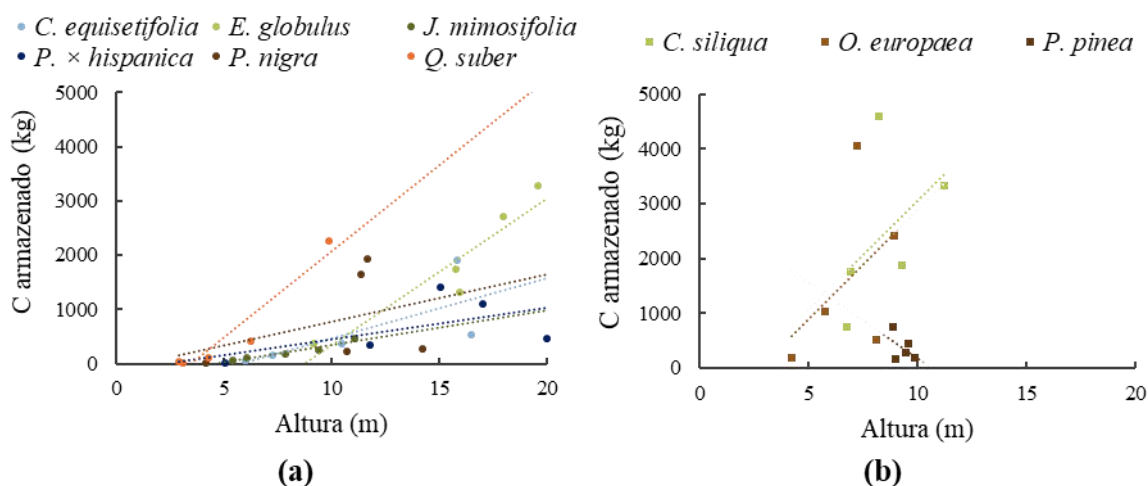


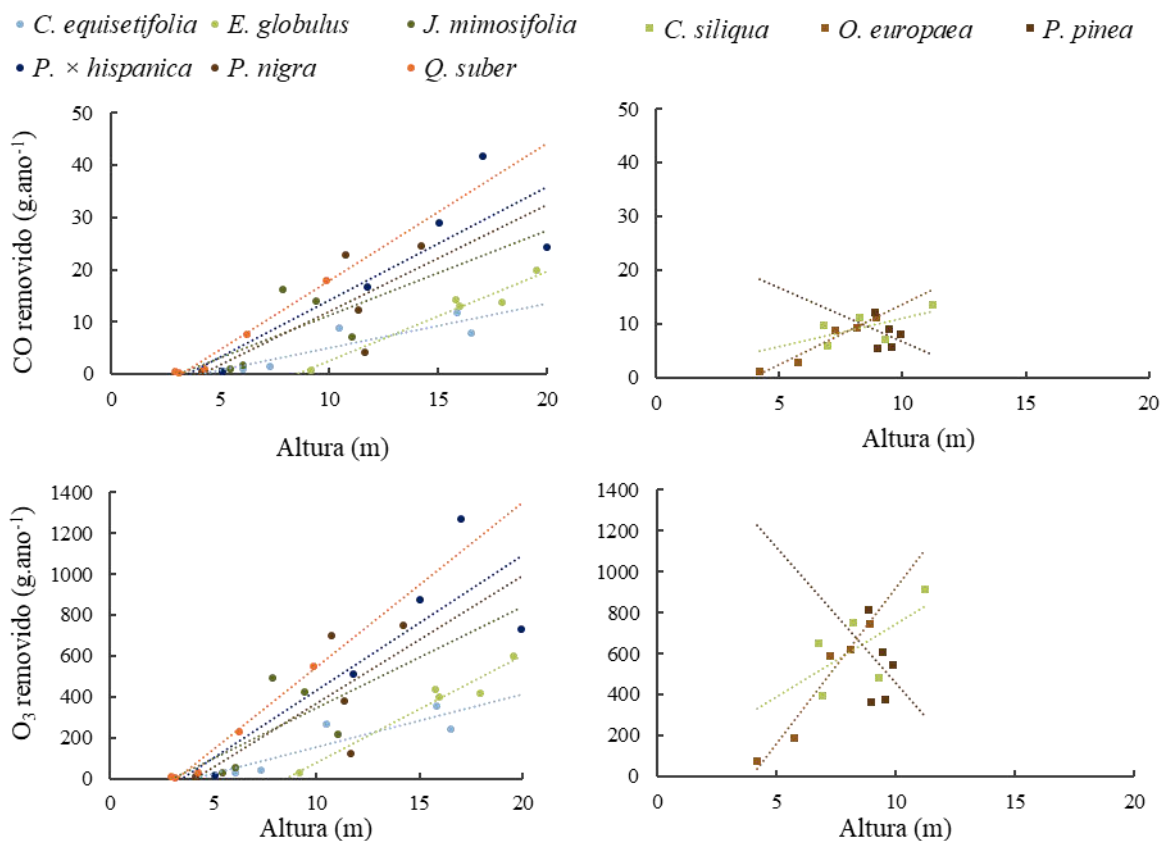
Figura 1. Armazenamento de carbono na biomassa das espécies arbóreas em função da sua altura, nos dois casos de estudo, Faro (a) e Loulé (b).

Remoção de Poluentes Atmosféricos

A eficiência das diferentes espécies arbóreas para a remoção de poluentes atmosféricos, depende em grande parte das características das suas folhas, nomeadamente do seu tamanho, morfologia, espessura, pubescência e rugosidade superficial. Por outro lado, as condições climáticas como a precipitação, o vento, o nível de contaminação atmosférica e a diversidade de poluentes, também afetam a eficiência das espécies na sua remoção (Vigevani *et al.* 2022;

Weyens *et al.* 2015; Yousofpour *et al.* 2024). De acordo com estudos anteriores noutras cidades europeias (Vigevani *et al.* 2022), espécies arbóreas com folhas mais largas como *P. ×hispanica* apresentam características mais favoráveis para a deposição e acumulação de PM_{10} e $PM_{2,5}$, do que espécies com folhas aciculadas, embora exista uma dinâmica complexa associada à sua ressuspensão na atmosfera, de acordo com a precipitação.

O modelo utilizado neste estudo apresenta a limitação de não incluir no cálculo da remoção de poluentes atmosféricos o efeito das características intrínsecas a cada espécie (já anteriormente mencionadas), mas apenas a área foliar de cada árvore. Para além disso, os dados de poluição foram obtidos a partir de uma estação da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) na proximidade dos locais de estudo, assumindo que a concentração de poluentes se manteria constante ao longo do dia. Trata-se de outra limitação, uma vez que a eficiência da vegetação para remover poluentes atmosféricos também depende da sua concentração na atmosfera (Graça *et al.* 2018). De qualquer forma, por apresentarem portes, densidades de folhagem e áreas foliares diferentes, algumas das espécies arbóreas estudadas destacam-se na eficiência da remoção dos poluentes atmosféricos em função da sua altura (Figura 2 Remoção de poluentes atmosféricos pelas espécies arbóreas estudadas nos dois casos de estudo, Faro (a) e Loulé (b)).



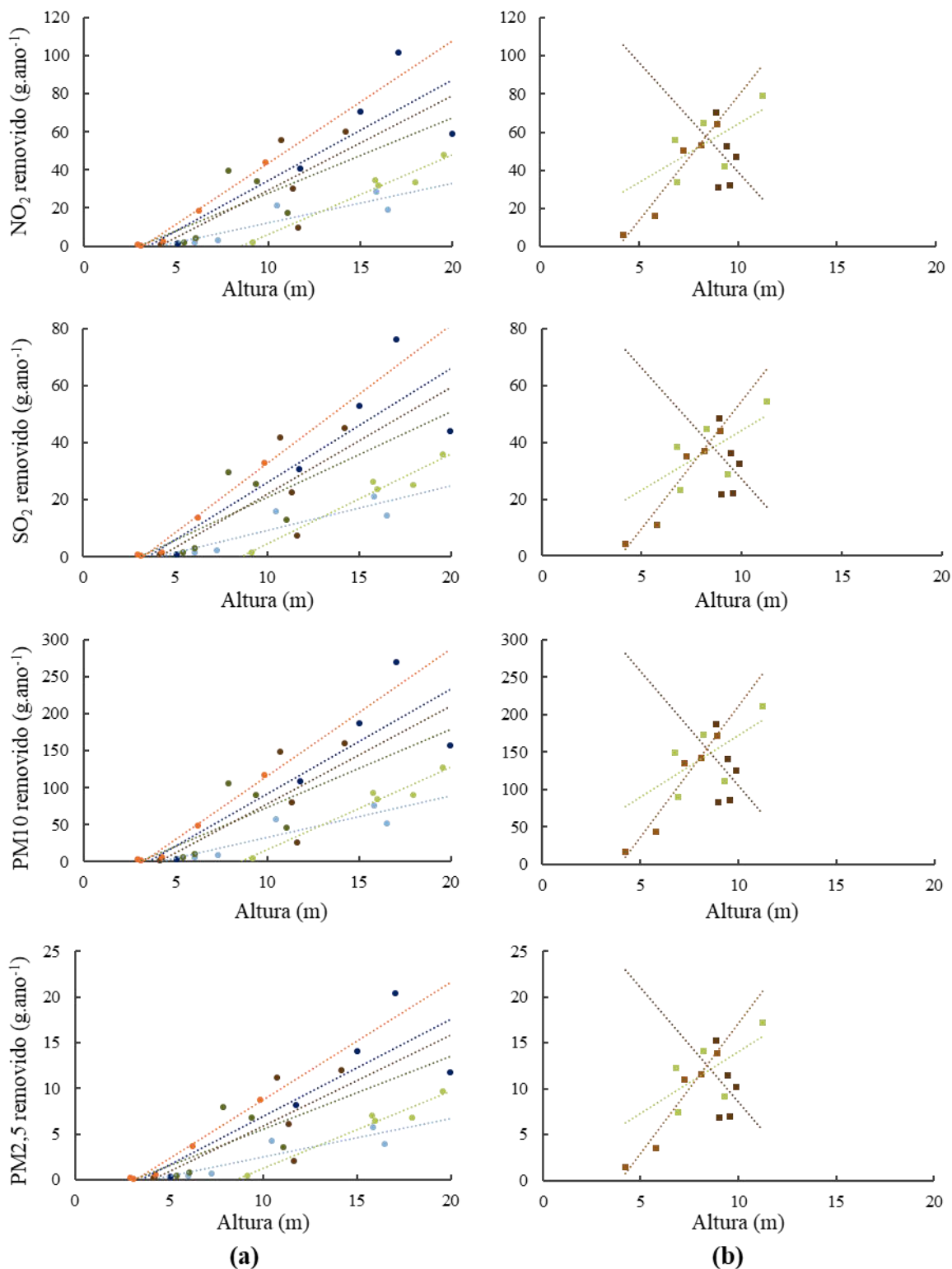


Figura 2 Remoção de poluentes atmosféricos pelas espécies arbóreas estudadas nos dois casos de estudo, Faro (a) e Loulé (b).

Efeitos Hidrológicos

A vegetação urbana interfere de forma significativa no ciclo urbano da água. Absorvendo a água, principalmente através das raízes, e utilizando-a para diversos processos metabólicos essenciais, como a fotossíntese, a respiração celular, o transporte de nutrientes e outros. Parte

da água absorvida é libertada para a atmosfera sobre a forma de vapor de água, através da transpiração. Por outro lado, em momentos de precipitação, as folhas e os ramos na copa das árvores interceptam a água, atrasando a sua acumulação ao nível do solo/pavimento, o que reduz o escoamento superficial. A transpiração, ou libertação de vapor de água para a atmosfera principalmente através dos estomas, depende em grande medida da área foliar e, portanto, da dimensão da copa e da altura da árvore(Figura 3). Igualmente, a água interceptada pelas folhas, e por consequência a redução do escoamento superficial, também dependem da área foliar e, portanto, da altura da árvore.

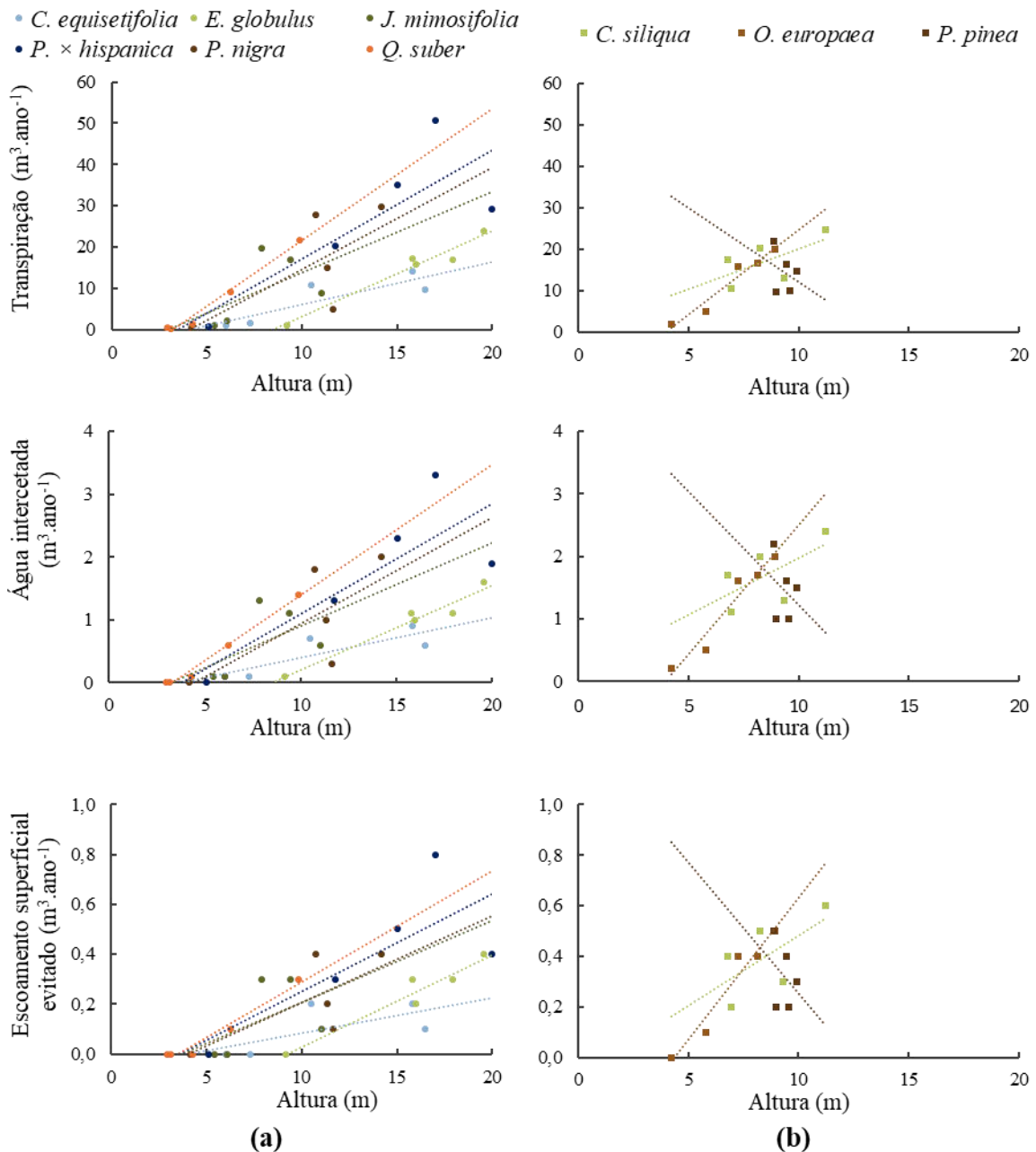


Figura 3 Efeitos hidrológicos das espécies arbóreas estudadas nos dois casos de estudo, Faro (a) e Loulé (b).

Estes resultados confirmam que as árvores, de acordo com as espécies selecionadas, têm um papel relevante no ciclo urbano da água. Verificou-se uma relação positiva entre a altura da

árvore e os efeitos hidrológicos em todas as espécies estudadas, com exceção do pinheiro-manso. Árvores mais altas apresentam uma área foliar maior e, por isso, transpiram mais e interceptam mais água, sendo mais eficazes a reduzir o escoamento superficial. No caso do pinheiro-manso a poda das árvores mais altas terá levado à remoção de parte da copa, o que terá levado à relação negativa observada.

A transpiração por acréscimo de altura não é a mesma para as diferentes espécies medidas, sendo da maior para a menor: oliveira > sobreiro > plátano > choupo > eucalipto > jacarandá > alfarrobeira > pinheiro-australiano. Em Faro, o eucalipto e o pinheiro-australiano parecem apresentar valores de transpiração mais baixos que as restantes espécies, para a mesma altura. No caso do eucalipto isto pode dever-se à densidade da folhagem, sendo que esta espécie apresenta uma folhagem mais esparsa que o plátano, por exemplo. No caso do pinheiro-australiano isto parece estar relacionado com a morfologia da folha. As folhas do pinheiro-australiano, ao serem estreitas, apresentam uma área foliar menor do que as de um plátano com a mesma altura.

A água interceptada está intimamente relacionada com a área foliar das árvores e, por isso, as diferenças entre as espécies apresentam um padrão semelhante. Semelhante também para o escoamento superficial, já que este depende diretamente da quantidade de água interceptada. Em ambos os casos de estudo, os fenómenos de precipitação extrema são um dos principais constrangimentos ambientais, pelo que a capacidade das árvores para interceptarem a água da chuva e diminuir o escoamento superficial pode ser determinante na redução do número de inundações urbanas e/ou na diminuição dos respetivos prejuízos. Por outro lado, no Algarve, com uma precipitação média anual inferior a 600 mm (IPMA 2022), através da transpiração, as árvores dão um contributo relevante para a manutenção da humidade atmosférica e, portanto, para diminuir a frequência das ondas de calor, outro constrangimento ambiental muito relevante na região.

4 CONCLUSÕES

Este estudo realizado em cinco espaços verdes urbanos, nos municípios de Faro e Loulé, no Algarve, demonstrou a importância da inclusão de árvores no planeamento urbano, no atual cenário de alterações antrópicas e climáticas. Foram quantificadas as capacidades de nove espécies arbóreas já implementadas, incluindo autóctones e exóticas, verificando-se que apresentam diferentes eficiências para os diversos serviços ecossistémicos, e que dentro da mesma espécie as árvores mais altas, são na generalidade mais eficientes. Assim é fundamental assegurar-se a biodiversidade dentro dos espaços urbanos, selecionando-se as espécies de acordo com as características específicas de cada local e com os serviços ecossistémicos mais necessários, sem se deixar de privilegiar as árvores de grande porte.

5 REFERÊNCIAS

- Ahlgren, K., W. Kutsch, and S. Parampil. 2023. “Nature-based carbon sinks have a dual role in climate action.” *Fluxes*, 2: 6–11.
- Brauer, M., B. Casadei, R. A. Harrington, R. Kovacs, K. Sliwa, M. Brauer, N. Davaakhuu, M. Hadley, D. Kass, M. Miller, M. Consuelo Escamilla Nuñez, D. Prabhakaran, T.-C. Su, I. C. H. Vaartjes, and R. Vedanthan. 2021. “Taking a Stand Against Air Pollution—The Impact on Cardiovascular Disease.” *J Am Coll Cardiol*, 77 (13): 1684–1688. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2020.12.003>.

- Correia, P. J., J. F. Guerreiro, M. Pestana, and M. A. Martins-Loução. 2017. “Management of carob tree orchards in Mediterranean ecosystems: strategies for a carbon economy implementation.” *Agroforestry Systems*, 91 (2): 295–306. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9929-8>.
- EP, E. P. 2023. “What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?” **European Parliament**. Accessed September 21, 2023. <https://www.europarl.europa.eu>.
- Graça, M., P. Alves, J. Gonçalves, D. J. Nowak, R. Hoehn, P. Farinha-Marques, and M. Cunha. 2018. “Assessing how green space types affect ecosystem services delivery in Porto, Portugal.” *Landsc Urban Plan*, 170: 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.007>.
- Guzmán, P., P. Tarín-Carrasco, M. Morales-Suárez-Varela, and P. Jiménez-Guerrero. 2022a. “Effects of air pollution on dementia over Europe for present and future climate change scenarios.” *Environ Res*, 204: 112012. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112012>.
- Guzmán, P., P. Tarín-Carrasco, M. Morales-Suárez-Varela, and P. Jiménez-Guerrero. 2022b. “Effects of air pollution on dementia over Europe for present and future climate change scenarios.” *Environ Res*, 204: 112012. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112012>.
- IPMA, I. P. do M. e da A. 2022. “Monitorização climática.” Accessed May 20, 2024. <https://www.ipma.pt/en/oclima/monitorizacao/index.jsp?selTipo=m&selVar=tx&selAna=an&selAno=2020>.
- de Jong, M., S. Joss, D. Schraven, C. Zhan, and M. Weijnen. 2015. “Sustainable–smart–resilient–low carbon–eco–knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization.” *J Clean Prod*, 109: 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.004>.
- Lopez-Bellido, P. J., L. Lopez-Bellido, P. Fernandez-Garcia, V. Muñoz-Romero, and F. J. Lopez-Bellido. 2016. “Assessment of carbon sequestration and the carbon footprint in olive groves in Southern Spain.” *Carbon Manag*, 7 (3–4): 161–170. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1213126>.
- Luhtaniemi, M. 2023. “Forest carbon sinks under pressure.” *Fluxes*, 2: 18–29.
- Mimi, M. B., Md. G. Kibria, and Md. M. I. Selim. 2024. “How do economic, health, environmental and demographic factors affect life expectancy? – a novel attempt for developed and developing economies.” *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/13504509.2024.2335269>.
- Oral, H. V., P. Carvalho, M. Gajewska, N. Ursino, F. Masi, E. D. van Hullebusch, J. K. Kazak, A. Exposito, G. Cipolletta, T. R. Andersen, D. C. Finger, L. Simperler, M. Regelsberger, V. Rous, M. Radinja, G. Buttiglieri, P. Krzeminski, A. Rizzo, K. Dehghanian, M. Nikolova, and M. Zimmermann. 2020. “A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature.” *Blue-Green Systems*, 2 (1): 112–136. <https://doi.org/10.2166/bgs.2020.932>.
- PORDATA, E. sobre P. e E. 2021. “Conheça o seu Município.” Accessed May 20, 2024. <https://www.pordata.pt/Municipios>.
- Ritchie, H., and M. Roser. 2018. “Urbanization.” **OurWorld in Data.org**. Accessed May 6, 2024. <https://ourworldindata.org/urbanization>.
- Sæbø, A., R. Popek, B. Nawrot, H. M. Hanslin, H. Gawronska, and S. W. Gawronski. 2012. “Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces.” *Science of The Total Environment*, 427–428: 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>.
- Snehlata, A. Rajlaxmi, and M. Kumar. 2021. “Urban tree carbon density and CO2 equivalent of National Zoological Park, Delhi.” *Environ Monit Assess*, 193 (12): 841. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09619-5>.

- Strohbach, M. W., E. Arnold, and D. Haase. 2012. "The carbon footprint of urban green space-A life cycle approach." **Landsc Urban Plan**, 104 (2): 220–229. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.013>.
- Sun, M., T. Liu, X. Wang, T. Liu, M. Li, G. Chen, and D. Jiang. 2023. "Roles of thermal energy storage technology for carbon neutrality." **Carbon Neutrality**, 2 (1): 12. <https://doi.org/10.1007/s43979-023-00052-w>.
- Tao, P., Y. Lin, X. Wang, J. Li, C. Ma, Z. Wang, X. Dong, P. Yao, and M. Shao. 2023. "Optimization of Green Spaces in Plain Urban Areas to Enhance Carbon Sequestration." **Land (Basel)**, 12 (6): 1218. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/land12061218>.
- UN-DESA, U. N. D. of E. and S. A. 2023. "World Population Prospects 2022." **Population Division. Summary of Results**. Accessed September 15, 2023. <https://www.un.org/en/desa>.
- Vigevani, I., D. Corsini, J. Mori, A. Pasquinelli, M. Gibin, S. Comin, P. Szwalko, E. Cagnolati, F. Ferrini, and A. Fini. 2022. "Particulate Pollution Capture by Seventeen Woody Species Growing in Parks or along Roads in Two European Cities." **Sustainability**, 14 (3): 1113. <https://doi.org/10.3390/su14031113>.
- Wang, Y., Q. Chang, and X. Li. 2021. "Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing." **Urban For Urban Green**, 64. Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127291>.
- Weyens, N., S. Thijs, R. Popek, N. Witters, A. Przybysz, J. Espenshade, H. Gawronska, J. Vangronsveld, and S. Gawronski. 2015. "The Role of Plant–Microbe Interactions and Their Exploitation for Phytoremediation of Air Pollutants." **Int J Mol Sci**, 16 (10): 25576–25604. <https://doi.org/10.3390/ijms161025576>.
- Xu, F., X. Wang, and L. Li. 2023. "NPP and Vegetation Carbon Sink Capacity Estimation of Urban Green Space Using the Optimized CASA Model: A Case Study of Five Chinese Cities." **Atmosphere (Basel)**, 14 (7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/atmos14071161>.
- Yousoufpour, Y., L. Abolhassani, S. Hirabayashi, D. Burgess, M. Sabouhi Sabouni, and M. Daneshvarkakhi. 2024. "Ecosystem services and economic values provided by urban park trees in the air polluted city of Mashhad." **Sustain Cities Soc**, 101: 105110. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105110>.