

VIRUS

28

O DIGITAL E O SUL: TENSIONAMENTOS VOL. 1

PORUTGUÊS-ESPAÑOL | ENGLISH
REVISTA . JOURNAL
ISSN 2175-974X
CC-BY-NC-SA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
NOMADS.USP
REVISTAS.USP.BR/VIRUS
DEZEMBRO 2024



VI28

O DIGITAL E O SUL: TENSIONAMENTOS VOL. 1
THE DIGITAL AND THE SOUTH: QUESTIONINGS VOL. 1
LO DIGITAL Y EL SUR: CUESTIONAMIENTOS VOL. 1

EDITORIAL

- 001 O DIGITAL E O SUL: TENSIONAMENTOS VOL. 1
THE DIGITAL AND THE SOUTH: QUESTIONINGS VOL. 1
LO DIGITAL Y EL SUR: CUESTIONAMIENTOS VOL. 1
MARCELO TRAMONTANO, JULIANO PITA, PEDRO TEIXEIRA, CAIO NUNES, ISABELLA CAVALCANTI, RENAN TEIXEIRA, ALINE LOPES

ENTREVISTA

- 004 O DIGITAL COMO PRÁTICA COLETIVA
THE DIGITAL AS A COLLECTIVE PRACTICE
LO DIGITAL COMO PRÁCTICA COLECTIVA
GABRIELA CELANI, MARCELO TRAMONTANO

ÁGORA

- 014 EUGENIA MAQUÍNICA DO OLHAR: VISÃO COMPUTACIONAL, ETARISMO E GÊNERO
MACHINIC EUGENICS OF THE GAZE: COMPUTER VISION, AGEISM, AND GENDER
GISELLE BEIGUELMAN
- 029 DESDE AUTÓMATAS CELULARES HACIA IA Y FABRICACIÓN
FROM CELLULAR AUTOMATA TO AI AND FABRICATION
ALBERTO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ
- 042 E QUANDO A SMART CITY TRAVA?
WHAT HAPPENS WHEN THE SMART CITY CRASHES?
VINÍCIUS LOPACINSK
- 053 PLATAFORMAS COLABORATIVAS NO SUL GLOBAL: O CASO DO ARQUIGRAFIA
COLLABORATIVE PLATFORMS IN THE GLOBAL SOUTH: THE CASE OF ARQUIGRAFIA
SAYED ABDUL BASIR SAMIMI, ANA RIBEIRO FERREIRA DA COSTA, HENRIQUE SANTA CATHARINA JUNGES, ARTUR SIMÕES ROZESTRATEN

- 069 DO COMPUTACIONAL À FABRICAÇÃO: TEMAS E (DES)CAMINHOS NA AMÉRICA DO SUL
FROM COMPUTATION TO FABRICATION: THEMES AND (MIS)PATHS IN SOUTH AMERICA
RODRIGO SCHEEREN
- 079 DO VOO DO PÁSSARO AO OLHAR DEBRUÇADO: O VIRTUAL COMO MÉTODO
FROM A BIRD'S FLIGHT TO AN OVERLOOKING GAZE: VIRTUALITY AS A METHOD
PEDRO HENRIQUE VALE CARVALHO
- 090 CAMADAS URBANO-DIGITAIS: DA INFRAESTRUTURA GLOBAL DA INTERNET ÀS DARK KITCHENS
URBAN-DIGITAL LAYERS: FROM GLOBAL INTERNET INFRASTRUCTURE TO DARK KITCHENS
ALINE CRISTINA FORTUNATO CRUVINEL, LUISA DA CUNHA TEIXEIRA

PROJETO

- 101 REDUZINDO A BRECHA: EMPÍRICO VS. SIMULAÇÃO NA MODELAGEM DE FACHADAS VERDES
BRIDGING THE GAP: EMPIRICAL VS. SIMULATION IN GREEN FAÇADE MODELING
CAMILA DA ROCHA HENDZEL, CLAUDIO VÁSQUEZ ZALDÍVAR

REDUZINDO A BRECHA: EMPÍRICO VS. SIMULAÇÃO NA MODELAGEM DE FACHADAS VERDES

**BRIDGING THE GAP:
EMPIRICAL VS. SIMULATION IN GREEN FACADE MODELING**

CAMILA DA ROCHA HENDZEL, CLAUDIO VÁSQUEZ ZALDÍVAR

Camila Da Rocha Hendzel é Arquiteta e Mestre em Arquitetura e Energia Sustentável. É doutoranda em Arquitetura e Estudos Urbanos e pesquisadora do Grupo de Estudio de Arquitetura y Fachadas da Universidade do Chile. Investiga Modelos Higrotérmicos para fachadas verdes. Participa do projeto Fondecyt Nº 1241886 sobre Microclimas Urbanos e Conforto Urbano, focado em ilhas urbanas de calor.
cdarocha@uc.cl <https://orcid.org/0009-0002-2130-5789>

Claudio Vásquez Zaldívar é Arquiteto e Doutor em Arquitetura. É Professor Associado e Coordenador do curso de Mestrado em Arquitetura e Engenharia Sustentável da Universidade do Chile. É coordenador do Grupo de Estudio de Arquitetura y Fachadas e co-pesquisador do Projecto Fondecyt Nº 1241886, focado em Microclimas e Conforto Urbano, abordando especificamente em ilhas urbanas de calor.
cvz@uc.cl <https://orcid.org/0000-0001-5962-2291>

101

ARTIGO SUBMETIDO EM 4 DE AGOSTO DE 2024

Hendzel, C. R., & Zaldívar, C. V. (2024). Reduzindo a brecha: Empírico vs. Simulação na modelagem de fachadas verdes. *VIRUS*, (28). O Digital e o Sul: Tensionamentos Vol. 1. 101-115 <https://doi.org/10.11606/2175-974x.virus.v28.229573>

Resumo

Este artigo examina o papel transformador das ferramentas de simulação digital no design arquitetônico, com foco na implementação e avaliação de desempenho de fachadas verdes no Sul Global, em particular no Chile. Em alinhamento com o tema “O digital e o Sul: tensionamentos”, o estudo destaca como as simulações digitais permitem uma reavaliação crítica das tecnologias sustentáveis, diante dos desafios climáticos, sociais e urbanos únicos das regiões do Cone Sul do continente. Ao abordar a brecha de desempenho – a discrepância entre o projeto teórico e o desempenho empírico das edificações –, esta pesquisa explora como as ferramentas digitais podem reduzir esta diferença, fornecendo *insights* essenciais, difíceis de alcançar em contextos climáticos e urbanos específicos. O objetivo deste estudo é explorar como a modelagem digital pode preencher esta lacuna, oferecendo uma compreensão mais profunda dos impactos ambientais e energéticos das fachadas verdes, em diferentes microclimas urbanos. Utilizando uma metodologia mista, que combina estudos de casos, medições empíricas e simulações digitais avançadas, a pesquisa avalia o potencial das fachadas verdes para aprimorar a resiliência climática urbana e a eficiência energética. Os resultados indicam que a eficácia dessas fachadas varia, significativamente, com base nas condições climáticas locais e nas características específicas do local, ressaltando a necessidade de soluções arquitetônicas personalizadas para otimizar o desempenho. Ao refinar modelos de simulação para capturar interações ambientais complexas, este artigo contribui para estratégias de design sustentável mais precisas e eficazes, posicionando a simulação digital como uma ferramenta fundamental para adaptar as práticas arquitetônicas às realidades distintas do Sul Global.

Palavras-chave: Simulação digital, Fachadas verdes, Brecha de desempenho, Análise empírica, Design analítico

1 Introdução

À medida que as cidades do Sul Global se expandem e evoluem, a necessidade de soluções arquitetônicas sustentáveis torna-se cada vez mais urgente, impulsionada pela rápida urbanização e pelos crescentes impactos das mudanças climáticas. Esta região, caracterizada por condições climáticas diversas e restrições socioeconômicas, enfrenta desafios únicos, que demandam abordagens inovadoras para o desenvolvimento de edificações. Estes desafios são intensificados pelas condições climáticas extremas e pelo desenvolvimento urbano acelerado, exigindo soluções não apenas visualmente atraentes, mas também eficazes em melhorar a eficiência energética e a resiliência climática. Entre as soluções mais promissoras para estes desafios está a integração de infraestruturas verdes, particularmente fachadas verdes, na arquitetura urbana. As fachadas verdes oferecem uma forma de melhorar o desempenho dos edifícios, enquanto abordam questões ambientais, como ilhas de calor urbanas e consumo de energia.

A pesquisa sobre tecnologias de fachadas verdes ocorreu, predominantemente, no Hemisfério Norte, levando a uma lacuna de estudos apropriados para o contexto do Sul Global, particularmente no Chile. De acordo com uma revisão de Mela e co-autores (2023), a Europa é o principal local geográfico com pesquisas sobre jardins verticais, representando 51% de todas as publicações documentadas, seguida pela Ásia, com 31%, Oceania, com 7%, América do Sul, com 6% e América do Norte, com 5%. Na América do Sul, a maior parte das pesquisas foi realizada na Argentina e no Brasil, com uma quantidade menor no Chile. Esta concentração geográfica ressalta a necessidade urgente de mais pesquisas no Hemisfério Sul, onde as condições climáticas diferem significativamente daquelas do Norte e onde são necessárias soluções adaptadas para enfrentar desafios ambientais específicos.

Para preencher esta lacuna, a integração de infraestruturas como fachadas e paredes verdes nos projetos arquitetônicos tem sido cada vez mais reconhecida (Su et al., 2024). Esses sistemas verdes não apenas contribuem para o bem-estar estético e psicológico dos ambientes urbanos, mas também desempenham um papel fundamental em abordar questões ambientais críticas, como ilhas de calor urbanas e consumo de energia (Bakhshoodeh et al., 2022; Fu et al., 2022). Ao utilizar ferramentas de simulação digital, os arquitetos podem otimizar a integração destas infraestruturas verdes nos projetos de edifícios, garantindo que maximizem seus benefícios ambientais e contribuam, de forma eficaz, para a sustentabilidade geral dos desenvolvimentos urbanos.

No contexto de “O digital e o Sul: tensionamentos”, este artigo posiciona a simulação digital como uma ferramenta crítica que capacita arquitetos a responder aos desafios ambientais únicos. A eficácia das ferramentas de modelagem digital na previsão do desempenho de

edifícios depende, significativamente, da experiência do usuário. Apesar de seus potenciais benefícios, a implementação prática, muitas vezes, não atende às expectativas, devido a uma brecha persistente entre o projeto teórico e o desempenho real, exacerbada pelo uso limitado de simulações avançadas na prática (Dwyer, 2013), conhecida como a brecha de desempenho. Esta brecha, particularmente predominante na arquitetura sustentável, pode levar o consumo real de energia a exceder os níveis previstos por margens substanciais, às vezes em até 483% (Bai et al., 2024). A aplicação eficaz é ainda mais complicada pela falta de critérios padronizados para projetar e implementar infraestruturas alternativas, como paredes verdes (Ascione et al., 2020).

Este artigo explora como os modelos de simulação digital estão transformando o processo de desenvolvimento arquitetônico no Sul Global, preenchendo a brecha entre o design intuitivo e a avaliação empírica de desempenho. Examina as barreiras para a adoção dessas tecnologias e o potencial dessas ferramentas para facilitar o design de edifícios energeticamente eficientes e responsivos ao clima, que atendam às condições ambientais específicas da região. Ao focar no caso das fachadas verdes verticais no Chile, este estudo visa demonstrar os benefícios práticos e os resultados de desempenho aprimorados, alcançáveis por meio de ferramentas de simulação avançadas, posicionando a tecnologia digital como um recurso indispensável nas práticas arquitetônicas sustentáveis do Sul Global.

1.1 Fachada verde e modelagem digital

O estudo das infraestruturas verdes, em particular as fachadas verdes, avançou consideravelmente nas últimas duas décadas, impulsionado pela necessidade de melhorar os microclimas urbanos e aumentar a eficiência dos edifícios (Bustami et al., 2018). Estes avanços são marcados por desenvolvimentos metodológicos significativos, nos quais as simulações computacionais surgiram como uma ferramenta crucial, que permite a arquitetos e urbanistas modelar e analisar os efeitos térmicos das fachadas verdes, otimizando seus projetos para maximizar benefícios ambientais e energéticos. Pesquisas pioneiras iniciais, como aquela conduzida por Stec, van Paassen e Maziarz (2005), utilizaram simulações paramétricas para avaliar a capacidade de sombreamento das plantas em fachadas de pele dupla, fornecendo valiosos *insights* sobre sua eficácia, em relação a soluções tradicionais, como persianas (Ip et al., 2010).

Apesar destes avanços, o campo da Arquitetura ainda não adotou plenamente as técnicas associadas às fachadas verdes. As ferramentas atuais, muitas vezes, falham em integrar as interações complexas entre fachadas verdes e o ambiente urbano mais amplo (Bakhshoodeh et al., 2022). Esta brecha destaca a necessidade de modelos higrotérmicos mais precisos e eficazes, que possam considerar estes fatores, fornecendo previsões mais precisas e práticas sobre o impacto das fachadas verdes em contextos urbanos. Ascione e co-autores (2020) enfatizam a necessidade de dados abrangentes para melhorar as decisões de desenvolvimento, particularmente em relação à seleção de plantas e resposta climática, essenciais para o desempenho das paredes verdes. As ferramentas digitais facilitam a modelagem de cenários para prever o desempenho, abordando, assim, a brecha de desempenho, ao permitir decisões baseadas em dados empíricos e aumentando a confiabilidade do design e seu impacto ambiental.

O estado da arte atual do estudo do impacto higrotérmico das fachadas verdes se baseia em uma fusão de metodologias, incluindo simulações computacionais, análises experimentais e estudos de caso. Estas abordagens permitem a exploração de uma variedade de cenários e configurações, onde parâmetros como a profundidade da cavidade entre a fachada verde e a parede, a densidade da vegetação e a orientação do edifício são variados, para identificar as configurações mais eficientes, em termos de energia. As simulações computacionais são particularmente fundamentais no estudo do desempenho térmico das fachadas verdes. Elas permitem a recriação de múltiplos cenários para avaliar o impacto desses sistemas em diferentes contextos, prevendo o comportamento térmico das fachadas verdes e sua influência no consumo energético dos edifícios (Bagheri et al., 2021).

Para complementar estas simulações, as análises experimentais fornecem resultados essenciais. Esses experimentos, conduzidos em ambientes controlados e em edifícios reais, envolvem a medição de temperaturas de superfície e do ar circundante, usando sensores de temperatura e umidade para monitorar o desempenho térmico das fachadas verdes, em tempo real (Bakhshoodeh et al., 2022). Os dados empíricos obtidos são fundamentais para validar os modelos de simulação e refiná-los para melhor prever os resultados no mundo real, contribuindo para práticas de design mais confiáveis e eficazes. Estudos de caso em contextos urbanos específicos contribuem ainda mais para se entender o impacto das fachadas verdes em condições operacionais reais. Esses estudos consideram variáveis, como o clima local, a densidade urbana e a configuração arquitetônica, oferecendo *insights* vitais para se adaptar os projetos a condições específicas no Sul Global. A combinação de simulações computacionais, análises experimentais e estudos de caso estabeleceu uma base sólida para se

entender o desempenho térmico das fachadas verdes. No entanto, permanece uma brecha considerável, na disponibilidade e aplicação de modelos higrotérmicos eficazes (Ascione et al., 2020). Isto levanta questões importantes sobre por que a arquitetura ainda não adotou plenamente essas técnicas, apesar de sua eficácia comprovada, destacando-se a necessidade de se preencher a lacuna entre o projeto teórico e o desempenho real.

1.2 Fachadas verdes no Chile

A necessidade de soluções personalizadas no Sul Global torna-se particularmente evidente ao se examinar a implementação de fachadas verdes em regiões como o Chile. Embora o potencial destas fachadas para enfrentar desafios ambientais, como ilhas de calor urbanas e consumo de energia, seja ampla e globalmente reconhecido, sua eficácia depende fortemente das condições climáticas e das características específicas de cada local.

Desde 2016, surgiram estudos mais específicos no Chile, particularmente focados em telhados verdes (Reyes et al., 2016). Outros estudos examinaram a aplicação desses telhados em grandes superfícies comerciais, em Santiago e outros climas, concluindo que são mais eficientes no controle de cargas de resfriamento do que o isolamento de telhados convencionais (Vera et al., 2018). Além disso, dois modelos para calcular o desempenho de telhados verdes foram validados, com base em medições experimentais, tendo Santiago como cidade de referência (Vera et al., 2019).

Para soluções verticais verdes, estudos de modelagem exploraram a capacidade de telhados e paredes vivas para mitigar material particulado (PM 2,5¹), em Santiago e outras cidades do mundo, concluindo que a implementação de telhados verdes com 50-75% de cobertura e 25% de paredes vivas poderia reduzir o material particulado em mais de 7% na cidade (Viecco et al., 2021). Os modelos de telhados verdes também foram adaptados para a análise de paredes vivas em Santiago, avaliando seu desempenho térmico em superfícies comerciais e constatando que eles podem reduzir a demanda de resfriamento em até 15%, enquanto as paredes vivas podem alcançar até 25% de redução, com potenciais reduções combinadas de até 37% (García et al., 2022).

Fachadas verdes de pele dupla têm sido integradas à arquitetura chilena há décadas. O Edifício Consorcio, de 1990, projetado pelos arquitetos Enrique Browne e Borja Huidobro, é um exemplo em que a integração da vegetação ao edifício demonstra seu alto potencial de aplicação, no clima chileno. Existem exemplos semelhantes com variados graus de sucesso em relação ao crescimento e adaptação das espécies vegetais utilizadas para melhorar o conforto térmico do edifício. Entretanto, a aplicação dessas soluções frequentemente se baseou na intuição e nas intenções dos arquitetos, e não em uma compreensão profunda de seu potencial energético. Em um estudo envolvendo medições *in situ* de temperatura e umidade relativa dentro da câmara de ar deste edifício e de outros três, os efeitos de controle térmico, considerados atributos dessas fachadas na literatura, foram plenamente confirmados. Estes efeitos incluem inversões de temperatura na câmara em relação ao exterior, com máximas de -8°C durante o dia e +5°C à noite, e inversões de umidade relativa de +15% durante o dia e -5% à noite, levando ao aumento das temperaturas noturnas (Vásquez et al., 2020).

No entanto, a implementação de fachadas verdes em Santiago tem sido esporádica e, muitas vezes, motivada mais por considerações estéticas do que por uma compreensão profunda de seu potencial energético. Exemplos como o Edifício Consorcio e o Edifício MBA, da Pontifícia Universidade Católica do Chile, de 2007, ilustrados na Figura 1, se destacam pelo design intuitivo e foco estético, mas carecem de uma avaliação prévia para garantir sua eficiência energética. Isto destaca um problema mais amplo: nem todas as soluções de fachadas verdes verticais são igualmente eficazes em diferentes climas e condições urbanas, evidenciando a importância de se adaptar estes sistemas a condições ambientais específicas.

¹ PM 2,5 refere-se a partículas com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros.



Fig. 1: À esquerda: Edifício MBA PUC (2007). Fonte: Puentes UC, 2019. Disponível em: <https://www.uc.cl/temas/mba-uc/pagina2>. À direita: Edifício Consorcio (1990), Santiago, Chile. Foto de Nico Saieh (2009). Fonte: ArchDaily, 2009. Disponível em: <https://www.archdaily.cl/cl/02-14392/edificio-consorcio-sede-santiago-enrique-browne-borja-huidobro>.

105

Por exemplo, um estudo de uma fachada verde direta em clima quente e úmido, na China, mostrou reduções significativas de temperatura de 20,8°C na fachada externa e de 7,7°C no interior. No entanto, uma fachada verde indireta no mesmo local registrou apenas reduções modestas de 3,1°C (Chen et al., 2013). Em contraste, no clima seco e de alta radiação de Santiago, Chile, fachadas verdes indiretas demonstraram diferenciais de temperatura impressionantes de -8°C e uma umidade relativa de +30% dentro da cavidade, em comparação com o exterior (Vásquez et al., 2020). Isto ilustra como a adequação e a eficácia de diferentes tipos de sistemas verdes variam de acordo com o clima e as condições específicas do local. Em climas secos como no Chile, nas zonas Central e Norte, as fachadas verdes de pele dupla são particularmente adequadas, devido ao alto potencial solar e à baixa umidade, que permitem que a câmara de ar, influenciada pela evapotranspiração das plantas, funcione em condições ideais. Além disso, em condições mais frias e com baixa radiação solar, as fachadas verdes de pele dupla ajudam a manter as paredes mais aquecidas, com a câmara de ar atuando como um isolante adicional, reduzindo a perda de calor e diminuindo a necessidade de aquecimento interno (Bakhshoodeh et al., 2022). Este desempenho térmico duplo facilita a economia de energia, tanto no aquecimento, quanto no resfriamento, tornando essas fachadas altamente adaptáveis às flutuações sazonais e diárias de temperatura, típicas de áreas com alta oscilação térmica, como as zonas Central e Norte do Chile.

2 Método

Este estudo visa demonstrar as capacidades preditivas de ferramentas digitais na avaliação do comportamento térmico de fachadas verdes, estabelecendo sua viabilidade como componentes integrais do processo de desenvolvimento arquitetônico. A metodologia abrange tanto a coleta de dados empíricos de edifícios existentes, quanto simulações digitais avançadas, proporcionando uma estrutura robusta para análise.

2.1 Coleta de dados do estudo de casos

Os dados empíricos foram obtidos de quatro edifícios com fachadas verdes em Santiago, Chile. Estes edifícios, examinados no artigo *Hygrothermal Potential of Applying Green Screen Façades in Warm-dry Summer Mediterranean Climates* (Vásquez et al., 2020), oferecem uma variedade de orientações de fachada, espécies e maturidade das plantas. Esta diversidade permite uma análise abrangente de diferentes configurações de fachadas verdes.

A temperatura e a umidade relativa foram medidas tanto fora, quanto dentro das cavidades atrás das fachadas verdes durante o verão, usando Termohigrômetros Voltcraft DL-121TH Data Logger. Estes sensores foram posicionados em três alturas distintas, dentro de cada cavidade da fachada (0,5m, 1,5m e 2,5m a partir do piso de monitoramento), para capturar perfis verticais detalhados das condições térmicas e de umidade. Os dados foram coletados ao longo de um período de cinco dias, em março de 2019, coincidindo com a densidade máxima da folhagem no verão chileno, quando os espaços de escritórios estão em uso regular e as folhas das plantas estão em sua plenitude. Este período foi escolhido para maximizar a representatividade dos efeitos de resfriamento e sombreamento, embora estudos futuros possam se expandir para outras estações para explorar variações anuais. As medições foram realizadas em intervalos de um minuto, para capturar mudanças dinâmicas de temperatura e umidade, oferecendo dados detalhados para se entender o desempenho das fachadas ao longo de cada dia.

2.2 Simulação digital

Paralelamente à coleta de dados empíricos, foram realizadas simulações digitais usando o programa computacional *EnergyPlus*, com rotinas personalizadas desenvolvidas na plataforma *Grasshopper* no *Rhinoceros 3D* (versão 7.3.21039.11201), integradas ao *Climate Studio* (versão 1.9.8389.21977), para controle aprimorado das simulações. Este modelo higrotérmico integra equações convencionais de transferência de calor e evapotranspiração das plantas, prevendo como estes processos impactam a temperatura ambiente e o potencial evaporativo da fachada.

O modelo inclui as seguintes variáveis e componentes de simulação:

- **Radiação solar incidente:** Estimada usando geometria solar, condições de cobertura de nuvens e orientação da fachada para calcular uma exposição realista da luz solar nas fachadas.
- **Densidade da folhagem:** O Índice de Área Foliar (LAI) foi usado para estimar a transmitância solar através da folhagem, convertendo a densidade da camada de vegetação em um fator de sombreamento quantificável.
- **Propriedades térmicas e ópticas:** As características ópticas das fachadas verdes foram representadas usando um material personalizado Radiance, adaptado para aproximar os efeitos de sombreamento de plantas trepadeiras, seguindo o consenso da literatura atual (Larsen et al., 2015). Embora esta simplificação ignore propriedades térmicas e ópticas específicas para diferentes espécies de plantas, fornece uma base prática.

Um modelo tridimensional do envelope do edifício e da camada de vegetação foi também construído para representar com precisão o comportamento térmico. O Método *Big Leaf* foi utilizado, tratando a camada de plantas como uma única tela solar uniforme, cobrindo toda a fachada (Larsen et al., 2015). Esta abordagem, amplamente reconhecida nas pesquisas atuais, facilita a representação simplificada dos efeitos de sombreamento, sem a complexidade das características individuais das folhas. O modelo exclui contribuições térmicas do substrato, consideradas desprezíveis.

O modelo higrotérmico avançado calcula o potencial de resfriamento das fachadas verdes de pele dupla, incorporando os efeitos térmicos da vegetação como um elemento adicional no balanço térmico do edifício. Este balanço inclui a liberação de calor sensível, a absorção de calor latente durante mudanças de fase da água e uma pequena porção de energia usada na fotossíntese. O modelo baseia-se em uma série de equações de última geração, ligadas para criar um motor de computação, com referências de estudos de Allen, Pereira, Raes e Smith (1998), Stec, van Paassen e Maziarz (2005), Susorova, Angulo, Bahrami e Brent (2013), Larsen, Filippín e Lesino (2015), entre outros.

2.3 Validação e comparação

Os modelos digitais foram validados com base nos dados empíricos coletados ao longo do período de cinco dias, com foco na comparação das tendências de temperatura. Os dados de temperatura e umidade foram calculados como uma média dos três sensores posicionados verticalmente em cada caso, para criar um único valor representativo para a calibração. Finalmente, os resultados das medições e das simulações digitais foram comparados, para se avaliar a eficácia da modelagem digital em apoiar o design arquitetônico. Esta comparação

avaliou a capacidade das ferramentas digitais de prever os efeitos de resfriamento e aquecimento passivos observados empiricamente, com implicações para a otimização de projetos de fachadas verdes para maximizar seu potencial de regulação térmica em diferentes contextos.

3 Estudo de casos

O estudo inclui quatro casos diferentes, cada um representando características únicas em tipo de edifício, orientação e estrutura da fachada. O Caso 1 consiste em um edifício universitário de doze andares, orientado para o Nordeste. A fachada verde deste edifício é sustentada por perfis verticais e fios horizontais, posicionados a 105 centímetros da superfície da fachada. A espécie vegetal utilizada é *Jasminum grandiflorum* (jasmim-espanhol), caracterizada por uma folhagem de baixa densidade, que oferece pouca sombra e proteção. As plantas são instaladas em caixas de plantio embutidas na base de cada andar, resultando em um padrão de crescimento irregular na fachada devido aos diferentes níveis de maturidade. A manutenção da vegetação é realizada pela equipe do edifício.

O Caso 2 focaliza um edifício de escritórios de dezessete andares, com orientação Sudoeste. Aqui, a fachada é sustentada por perfis horizontais e verticais, que acompanham a forma curva do edifício, mantendo uma distância de 120 centímetros entre o edifício e a estrutura de suporte. A espécie de planta selecionada é *Parthenocissus quinquefolia* (hera-virginiana), que possui folhagem de densidade média e galhos mais lenhosos próximos ao substrato. As plantas são instaladas em caixas de plantio embutidas, localizadas na base de cada três andares, proporcionando um nível moderado de sombreamento e uma densidade média, em comparação com os outros casos.

No Caso 3, é examinado um edifício universitário de quatro andares orientado para o Norte. A fachada verde deste edifício é sustentada por elementos verticais e fios horizontais, espaçados a 82 centímetros do envidraçamento. A espécie utilizada é a *Wisteria sinensis* (glicínia-chinesa), conhecida por sua folhagem de alta densidade. No entanto, o crescimento variou em altura e cobria apenas partes da fachada, no momento da medição, pois as plantas foram instaladas recentemente. As plantas são colocadas em caixas de plantio embutidas na base de cada dois andares, resultando em uma distribuição de folhagem não uniforme.

Por fim, o Caso 4 examina um edifício de escritórios de três andares orientado para o Noroeste. A fachada deste edifício possui uma estrutura de suporte composta por pilares e tela de metal expandido, posicionada a 70 centímetros do fechamento do edifício. A espécie *Parthenocissus quinquefolia* (hera-virginiana) é novamente a selecionada, apresentando folhagem muito densa, que cobre toda a altura do edifício, atingindo uma espessura de, pelo menos, 30 centímetros. Diferentemente dos outros casos, as plantas são plantadas diretamente no solo, o que promove um crescimento robusto e resulta na cobertura de vegetação mais densa dentre os quatro casos.



Fig. 2: Superior-esquerda: Imagem da fachada e zona de amortecimento do Estudo de Caso 1; Superior-direita: Imagem da fachada e zona de amortecimento do Estudo de Caso 2; Inferior-esquerda: Imagem da fachada e zona de amortecimento do Estudo de Caso 3; Inferior-direita: Imagem da fachada e zona de amortecimento do Estudo de Caso 4. Fonte: Vásquez et al., 2020.

4 Resultados

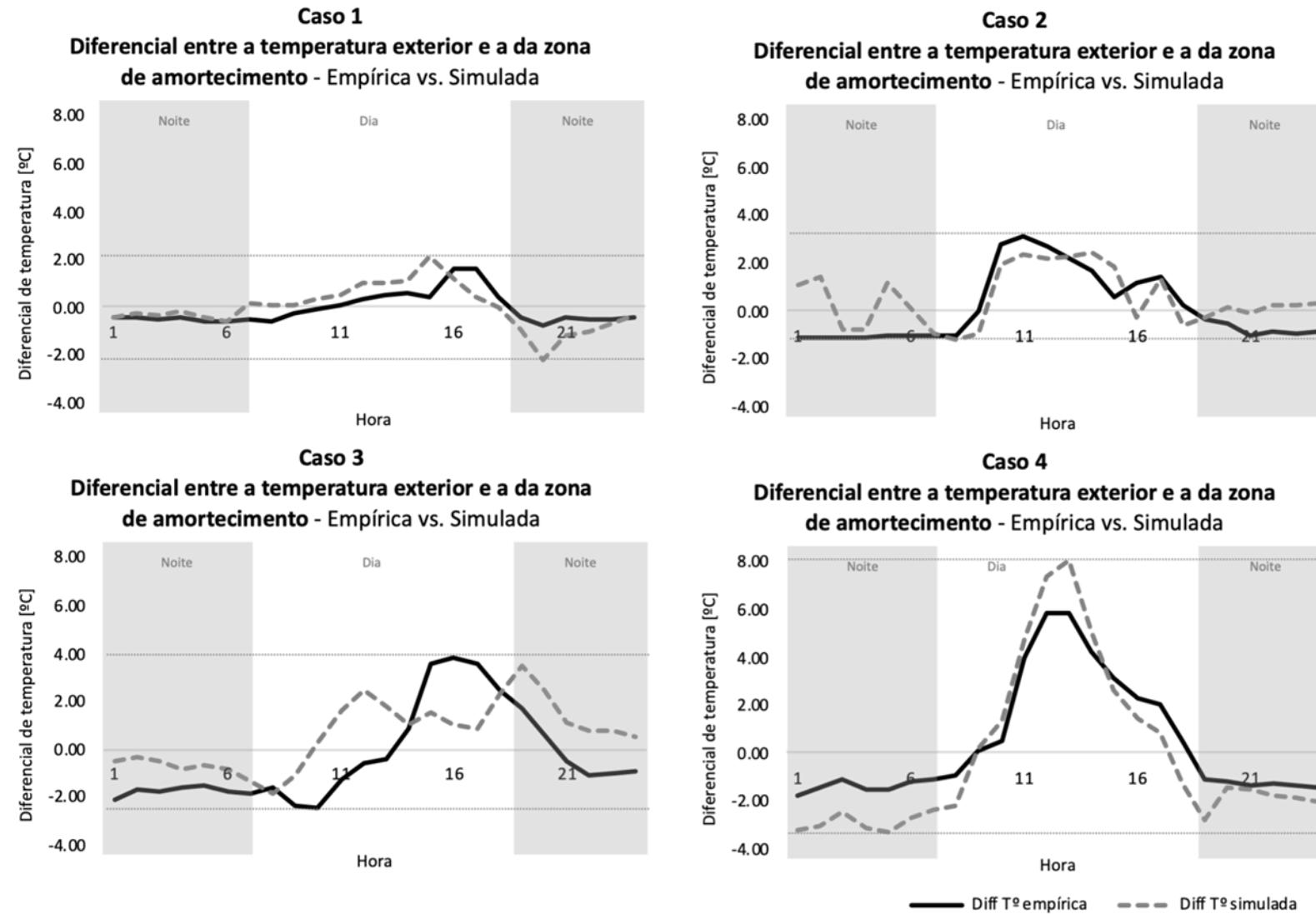


Fig. 3: Estes gráficos mostram os diferenciais de temperatura entre o exterior e as zonas de amortecimento ao longo do dia, segmentados por hora, para cada estudo de caso. Eles destacam as variações entre noite e dia, comparando as medições empíricas com as simulações. Fonte: Autores, 2024.

Em todos os estudos de caso, os dados geralmente mostraram um efeito de resfriamento acentuado durante o dia, devido à evapotranspiração, e um leve efeito de aquecimento à noite, decorrente das propriedades isolantes das plantas, como observado na figura 3. No entanto, a magnitude destes efeitos variou consideravelmente, influenciada pela densidade e cobertura da folhagem. As simulações, embora eficazes em capturar as tendências gerais, muitas vezes divergiram nos detalhes, especialmente em casos com densidade de folhagem média ou irregular.

As discrepâncias entre os dados simulados e empíricos destacam a necessidade de ajustes nos modelos digitais, particularmente em relação à representação das características das plantas e sua interação com as variáveis climáticas. Parte dessas discrepâncias pode ser atribuída ao desafio de se representar, com precisão, a variabilidade dinâmica do material vegetal, nas simulações. Tipicamente, esses modelos simplificam os componentes vegetais em condições homogêneas e estáticas, o que pode não capturar totalmente os comportamentos sutis das plantas vivas em resposta às mudanças ambientais. Melhorias nessas áreas poderiam aumentar a precisão preditiva das simulações, tornando-as ferramentas mais confiáveis no processo de design arquitetônico.

5 Discussão

5.1 Análise comparativa da precisão das simulações e brecha de desempenho

Para avaliar a eficácia das fachadas verdes pela lente da precisão das simulações, em comparação com as medições empíricas, foi realizada uma análise de regressão abrangente, em quatro estudos de caso distintos. A análise, centrada no coeficiente de determinação, R^2 , quantifica o quanto bem as variações nas medições de temperatura medidas são representadas pelos modelos de simulação.

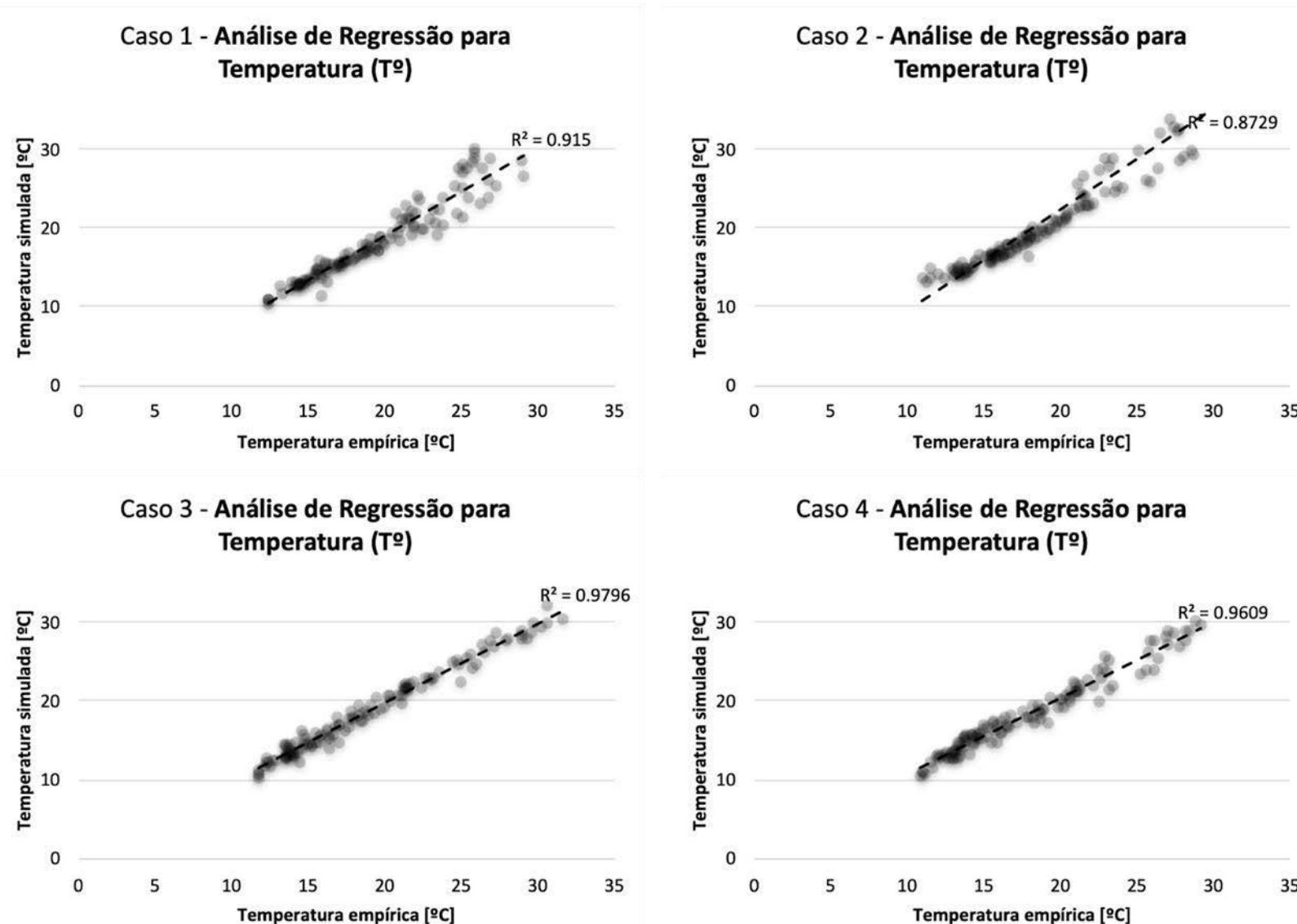


Fig. 4: Estes gráficos ilustram os valores para cada um dos quatro estudos de caso, indicando a precisão dos modelos de simulação na previsão dos dados empíricos de temperatura. Fonte: Autores, 2024.

Conforme mostrado na Figura 4, os valores de R^2 , relatados no estudo, indicam, de modo geral, um bom desempenho do modelo em todos os casos. O Caso 1 apresentou um R^2 de 0,92, indicando que as simulações foram altamente preditivas em relação aos dados empíricos, capturando efetivamente as dinâmicas térmicas. O Caso 2, com um R^2 de 0,87, embora ligeiramente inferior, ainda reflete um bom nível de precisão, sugerindo que, mesmo em condições menos ideais, o modelo funciona de forma robusta. O Caso 3 exibiu a maior precisão preditiva, com um R^2 de 0,98, demonstrando uma quase perfeita correspondência entre as medições simuladas e reais. Este nível de exatidão sugere que, com parâmetros de modelo finamente ajustados, as simulações podem refletir, com precisão, os resultados reais, sob diferentes condições ambientais. Da mesma forma, o Caso 4, com um R^2 de 0,96, também demonstrou alta precisão do modelo, confirmando a confiabilidade das simulações em cenários com cobertura vegetal densa.

A partir destes resultados, os valores consistentemente altos em diferentes casos destacam a eficácia destes modelos em reproduzir as dinâmicas de temperatura influenciadas pelas fachadas verdes, reforçando que modelos de simulação, quando devidamente calibrados, constituem uma ferramenta eficaz para prever o impacto das fachadas verdes.

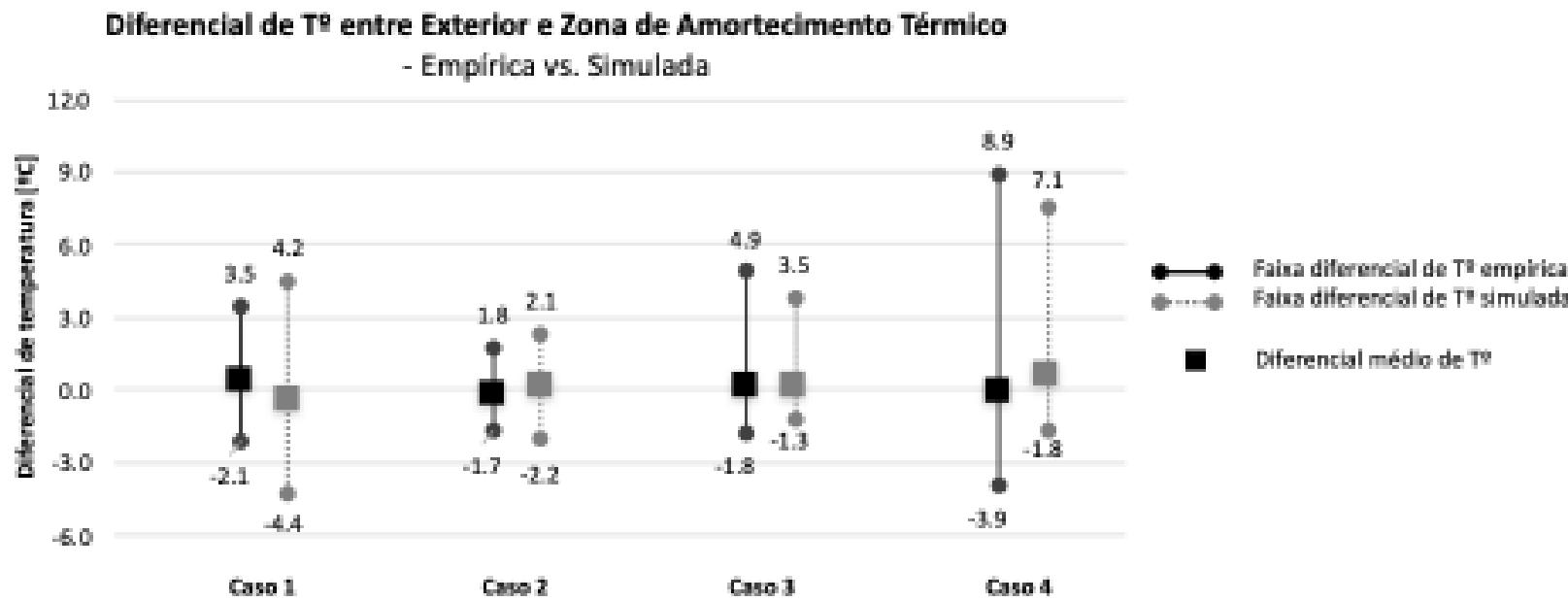


Fig. 5: Este gráfico exibe os diferenciais de temperatura mínimos, máximos e médios para cada estudo de caso, contrastando as medições empíricas com as previsões das simulações. Fonte: Autores, 2024.

Embora os modelos de simulação geralmente prevejam com exatidão as tendências de temperatura, há variações notáveis na precisão com que capturam os extremos das flutuações de temperatura. Por exemplo, no Caso 1, a simulação apresentou uma faixa mais ampla de diferenciais de temperatura e uma média inferior em comparação com as medições empíricas, indicando uma tendência do modelo a superestimar os efeitos extremos de moderação de temperatura. Isto contrasta com o Caso 2, onde os valores simulados refletiram de forma muito próxima os dados empíricos, sugerindo que o modelo é bastante eficaz na previsão do comportamento real da fachada verde nessas condições específicas. Nos casos 3 e 4, as simulações subestimaram tanto os diferenciais mínimos, quanto os máximos, em comparação com os dados empíricos, apontando lacunas de desempenho no modelo, especialmente em sua capacidade de capturar o potencial máximo de resfriamento observado empiricamente. Esta discrepância é especialmente evidente no Estudo de Caso 4, onde a simulação não capturou completamente o diferencial mínimo, embora tenha chegado perto do máximo, sugerindo algumas limitações na previsão precisa das condições mais frias da zona de amortecimento.

Estas diferenças entre os dados simulados e empíricos estão claramente ilustradas na Figura 5, no gráfico de diferencial de temperatura, que mostra os valores mínimos, máximos e médios para cada caso. A variabilidade na precisão da simulação ressalta a complexidade de se modelar interações dentro de fachadas verdes, que são influenciadas por múltiplos fatores, como densidade da vegetação, conteúdo de umidade e condições climáticas locais. Estes achados sugerem a necessidade de um refinamento iterativo dos modelos de simulação, incorporando uma compreensão mais profunda das propriedades fisiológicas das plantas e de sua interação com o ambiente.

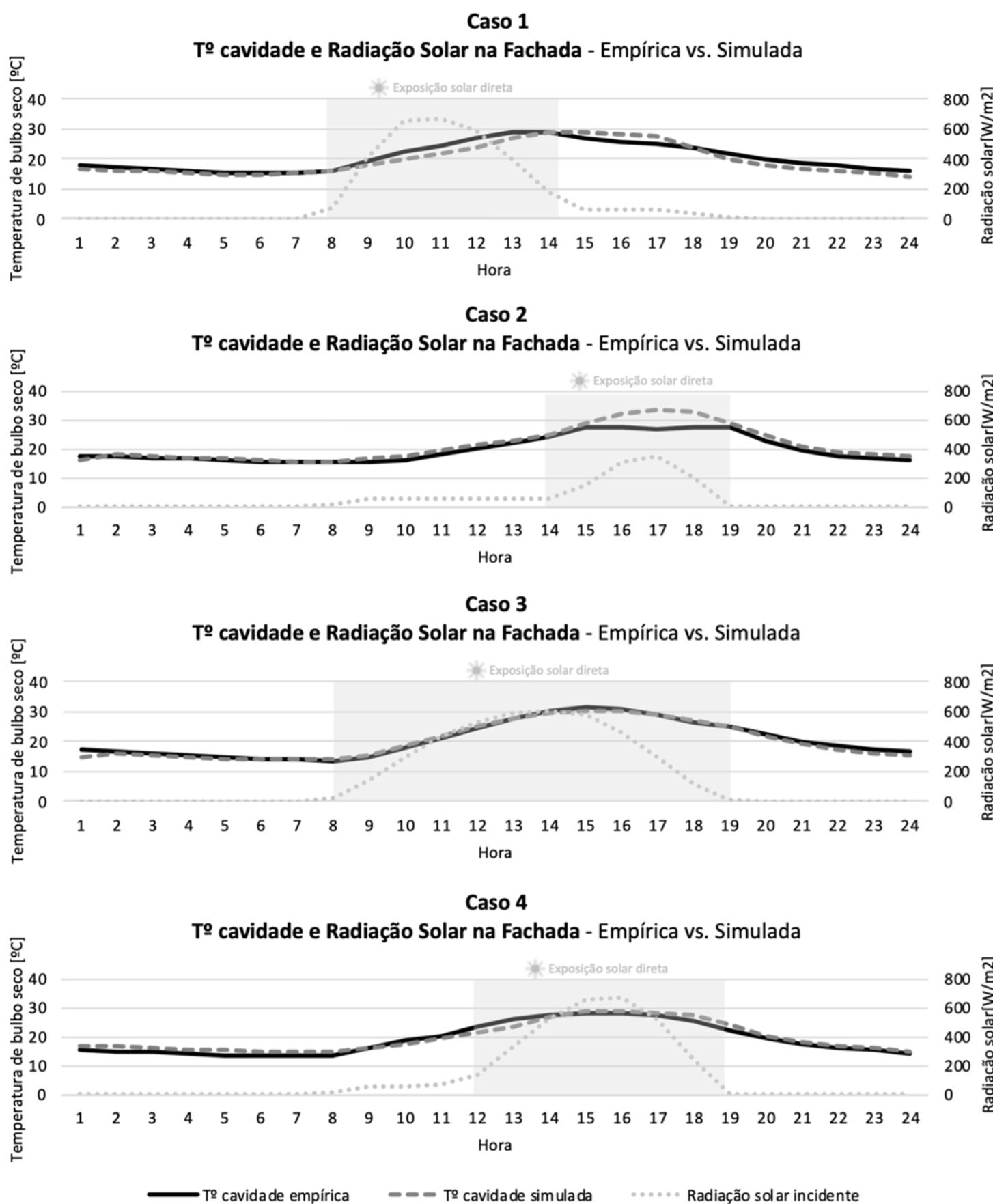


Fig. 6: Estes gráficos apresentam dados horários de temperatura na zona de amortecimento e radiação solar, para quatro estudos de caso distintos, cada um com diferentes orientações de fachada. Eles destacam, especificamente, as horas de radiação solar direta na fachada, comparando medições empíricas com simulações. Fonte: Autores, 2024.

5.2 Sensibilidade às variáveis ambientais

Notavelmente, casos com folhagem densa, como o Caso 2 e o Caso 4, mostraram um efeito de resfriamento mais significativo e um controle de umidade aprimorado. Isto sugere que uma vegetação mais densa pode criar alterações microclimáticas mais substanciais, contribuindo para a redução de temperaturas e a moderação dos níveis de umidade ao redor das fachadas. Em contraste, o Caso 1, que apresentava vegetação mais esparsa, exibiu efeitos térmicos e de umidade menos pronunciados. Isto indica que, embora fachadas verdes com folhagem esparsa possam contribuir para o controle ambiental, seu impacto é consideravelmente mais limitado em comparação com aquelas com cobertura mais densa.

Esta variação de desempenho entre os estudos de caso destaca o papel fundamental da seleção de plantas e do design, na eficácia das fachadas verdes. Sugere que, para otimizar os benefícios das infraestruturas verdes, especialmente em condições climáticas e urbanas diversas, como as do Sul Global, é essencial uma consideração cuidadosa do tipo de vegetação e de sua configuração. Por exemplo, selecionar espécies de plantas com maior densidade de folhagem pode ser particularmente vantajoso em ambientes onde se desejam efeitos de resfriamento mais intensos.

Além disso, os resultados ressaltam a necessidade de soluções arquitetônicas adaptadas que levem em conta fatores ambientais locais. Ao integrar características específicas das plantas que se alinham com as condições climáticas e os requisitos arquitetônicos de um edifício, os projetistas podem aumentar a sustentabilidade e a eficiência energética de seus projetos. Esta abordagem não só melhora o microclima ao redor dos edifícios, mas também contribui para metas de sustentabilidade mais amplas, reduzindo a necessidade de resfriamento mecânico e aumentando a eficiência energética geral do tecido urbano.

A Figura 6 apresenta dados de temperatura da zona de amortecimento e radiação solar para os quatro casos distintos, cada um com diferentes orientações de fachada. A análise de sensibilidade revelou que todas as fachadas verdes responderam dinamicamente às mudanças ambientais, especialmente à radiação solar e à temperatura. No entanto, o grau desta resposta variou, de acordo com o tipo de vegetação e sua configuração. Por exemplo, a folhagem densa, nos Casos 2 e 4, proporcionou um controle de resfriamento e umidade mais significativo, enquanto a cobertura mais esparsa, no Caso 1, resultou em efeitos menos pronunciados. Esta variação ressalta a importância da seleção de plantas e do design da fachada, na otimização de infraestruturas verdes para condições climáticas e urbanas específicas. Também destaca a necessidade de soluções arquitetônicas adaptadas, que considerem fatores ambientais locais para maximizar a sustentabilidade e a eficiência energética dos edifícios no Sul Global.

6 Conclusões

A exploração e incorporação de fachadas verdes em ambientes urbanos, especialmente no Sul Global, apresenta uma oportunidade transformadora para enfrentar as ilhas de calor urbanas e melhorar a eficiência energética no design de edifícios. Este estudo demonstrou o potencial e a variabilidade das fachadas verdes em modificar microclimas, por meio da interação dinâmica com fatores ambientais, como radiação solar e temperatura. As principais descobertas desta pesquisa ressaltam o impacto significativo que a seleção de plantas e a orientação da fachada têm no desempenho das fachadas verdes. Em certos estudos de caso, a vegetação densa proporcionou efeitos substanciais de resfriamento e controle de umidade, revelando-se mais eficaz na moderação dos microclimas interno e externo do que configurações de vegetação mais esparsas. Isto destaca o papel essencial de abordagens de design personalizadas, que considerem condições ambientais locais específicas e necessidades arquitetônicas.

Questionar os desafios únicos do Sul Global exige abordagens inovadoras em simulação e design. As ferramentas de simulação digital mostraram-se promissoras na previsão precisa do desempenho de fachadas verdes, como demonstrado em vários estudos de caso. Essas ferramentas permitem ajustes precisos nos parâmetros de design, facilitando a otimização das fachadas verdes para alcançar o máximo de benefícios ambientais e economia de energia. Ao incorporar essas ferramentas, arquitetos e estudantes podem obter uma compreensão mais profunda das interações dinâmicas entre elementos arquitetônicos e condições ambientais, promovendo um avanço analítico e correspondente ao design.

No entanto, as discrepâncias observadas entre os resultados simulados e os dados empíricos destacam a necessidade de um refinamento contínuo dessas ferramentas, para capturar, com maior precisão, a complexa interação entre o ambiente construído e os elementos naturais.

Estas diferenças também revelam limitações nas variáveis atuais utilizadas no estudo, incluindo o breve período de coleta de dados, características específicas das espécies, como densidade da folhagem e ciclos de decomposição das folhas, e variações nas condições de plantio. Futuras melhorias devem visar não apenas o avanço dos algoritmos de simulação, mas também a incorporação de uma gama mais ampla de variáveis. Expandir a coleta de dados para diferentes estações pode oferecer *insights* sobre variações anuais no comportamento da vegetação e no desempenho das fachadas, aprimorando, assim, a precisão dos modelos.

Em conclusão, a pesquisa contínua e a aplicação de modelos de simulação refinados são essenciais para avançar na compreensão e implementação desses sistemas, garantindo que atendam às demandas específicas de paisagens urbanas diversificadas. Este estudo contribui para o crescente corpo de conhecimento sobre fachadas verdes e estabelece uma base para futuras pesquisas voltadas a reduzir a lacuna entre o design teórico e o desempenho prático.

Agradecimentos

A pesquisa apresentada neste artigo é parte de uma tese de doutorado, que foi apoiada pela ANID BECAS/DOCTORADO NACIONAL 21110001.

Referências

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper. No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).

Ascione, F., De Masi, R., Mastellone, M., Ruggiero, S., & Vanoli, G. (2020). Green Walls, a Critical Review: Knowledge Gaps, Design Parameters, Thermal Performances and Multi-Criteria Design Approaches. *Energies*, 13(9), 2296. <https://doi.org/10.3390/en13092296>

Bagheri, F., Navarro, I., Redondo, E., Fort, J. M., & Giménez, L. (2021). Understanding the Performance of Vertical Gardens by Using Building Simulation and its Influences on Urban Landscape. *ACE: Architecture, City and Environment*, 16(47). <https://doi.org/10.5821/ace.16.47.10321>

Bai, Y., Yu, C., & Pan, W. (2024). Systematic examination of energy performance gap in low-energy buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114701. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114701>

Bakhshoodeh, R., Ocampo, C., & Oldham, C. (2022). Thermal performance of green façades: Review and analysis of published data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111744>

Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146(September), 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>

Chen, Q., Li, B., & Liu, X. (2013). An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 61, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030>

Dwyer, T. (2013). Knowledge is Power: Benchmarking and prediction of building energy consumption. *Building Services Engineering Research and Technology*, 34(1), 5–7. <https://doi.org/10.1177/0143624412471130>

Fu, J., Dupre, K., Tavares, S., King, D., & Banhalmi-Zakar, Z. (2022). Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review. *Frontiers of Architectural Research*, 11(3), 466–491. <https://doi.org/10.1016/j foar.2021.12.005>

García, M., Vera, S., Rouault, F., Gironás, J., & Bustamante, W. (2022). Cooling potential of greenery systems for a stand-alone retail building under semiarid and humid subtropical climates. *Energy and Buildings*, 259, 111897. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111897>

Ip, K., Lam, M., & Miller, A. (2010). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.003>

Larsen, S. F., Filippín, C., & Lesino, G. (2015). Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.033>

Mela, D., Martinez, A. C. P., & Zuin, A. H. L. (2023). Vertical greening: The state of the art in digital modeling and simulation. *International Journal of Architectural Computing*. <https://doi.org/10.1177/14780771231197788>

Reyes, R., Bustamante, W., Gironás, J., Pastén, P. A., Rojas, V., Suárez, F., Vera, S., Victorero, F., & Bonilla, C. A. (2016). Effect of substrate depth and roof layers on green roof temperature and water requirements in a semi-arid climate. *Ecological Engineering*, 97, 624–632. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.025>

Stec, W. J., van Paassen, A. H. C., & Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37(5), 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.008>

Su, M., Jie, P., Li, P., Yang, F., Huang, Z., & Shi, X. (2024). A review on the mechanisms behind thermal effect of building vertical greenery systems (VGS): Methodology, performance and impact factors. *Energy and Buildings*, 303, 113785. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113785>

Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., & Brent Stephens. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>

Vásquez, C., D'Alençon, R., De La Barra, P. P., Fagalde, M., & Salza, F. (2020). Hygrothermal Potential of Applying Green Screen Façades in Warm-dry Summer Mediterranean Climates. *Journal of Facade Design and Engineering*, 19-38 Pages. <https://doi.org/10.7480/JFDE.2020.2.5109>

Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C., & Bustamante, W. (2018). A critical review of heat and mass transfer in vegetative roof models used in building energy and urban environment simulation tools. *Applied Energy*, 232, 752–764. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.079>

Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C., Molina, G., Flamant, G., Bustamante, W., Pianella, A., & Kincaid, N. (2019). Analysis and comparison of two vegetative roof heat and mass transfer models in three different climates. *Energy and Buildings*, 202, 109367. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109367>

Viecco, M., Jorquera, H., Sharma, A., Bustamante, W., Fernando, H. J. S., & Vera, S. (2021). Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*, 204, 108120. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108120>