



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Pascual Ceriani Guerra

**IMPACTO DE LAS VARIACIONES MICROCLIMÁTICAS URBANAS EN LAS
CARGAS TÉRMICAS DE EDIFICACIONES RESIDENCIALES EN EL CLIMA DE
LA CIUDAD DE MONTEVIDEO – URUGUAY.**

Florianópolis

2023

Pascual Ceriani Guerra

**IMPACTO DE LAS VARIACIONES MICROCLIMÁTICAS URBANAS EN LAS
CARGAS TÉRMICAS DE EDIFICACIONES RESIDENCIALES EN EL CLIMA DE
LA CIUDAD DE MONTEVIDEO – URUGUAY.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador(a): Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ceriani, Pascual

IMPACTO DE LAS VARIACIONES MICROCLIMÁTICAS URBANAS EN
LAS CARGAS TÉRMICAS DE EDIFICACIONES RESIDENCIALES EN EL
CLIMA DE LA CIUDAD DE MONTEVIDEO - URUGUAY. / Pascual
Ceriani ; orientador, Martin Ordenes Mizgier, 2022.

134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Microclima urbano. 3.
Adensamento urbano. 4. Simulação energética de edifícios. I.
Ordenes Mizgier, Martin. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Pascual Ceriani Guerra

Impacto de las variaciones microclimáticas urbanas en las cargas térmicas de edificaciones residenciales en el clima de la ciudad de Montevideo – Uruguay

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 20 de dezembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Universidad Federal de Santa Catarina

Prof. Noelia Liliana Alchapar Dra.
Instituto de Hábitat, Ambiente y Energía. Centro
Científico y Tecnológico Mendoza – INAHE - CONICET

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Maíra Longhinotti Felipe, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por estar siempre presentes de alguna forma u otra en cada etapa de la vida. Y mis amigos que fueron gran apoyo en estos años de crecimiento profesional y personal.

A el profesor Martin Ordenes por la orientación, discusión y apoyo para el desarrollo de este trabajo y mi vínculo con el PósARQ. Así como a Mariany por estar siempre a disposición para resolver todas mis consultas administrativas a la distancia.

A los colegas del PósARQ, con quienes compartimos diferentes espacios de aprendizaje a pesar de la distancia. Especialmente a Bianca, con quien compartimos varias instancias dentro del aula, pero también fuera en mi pasaje por Florianópolis.

A Denise Duarte, Corilna Gusson y Paula Shinzato, por la gran disposición y recepción a todas mis dudas y consultas respecto al trabajo con modelos microclimáticos urbanos.

A mis colegas docentes de la Licenciatura en Diseño Integrado y del Departamento Regional Norte de Arquitectura, por permitirme disponer del tiempo para dedicarme a este trabajo.

A la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República del Uruguay por el apoyo para la movilidad y pasantía en la etapa final del estudio.

RESUMEN

El aumento de la población en las áreas urbanas en conjunto con la densificación, han generado transformaciones morfológicas como la verticalización de la ciudad. Estos cambios han demostrado tener impacto sobre el comportamiento energético de las edificaciones, dependiendo del clima, ya sea por el Efecto Isla de Calor Urbana, la disminución de acceso de radiación solar o variación de los flujos del viento en el cañón urbano causados por los cambios morfológicos. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo realizar un primer abordaje para analizar el impacto de las variaciones microclimáticas producidas por la verticalización en la ciudad de Montevideo (UY), sobre las cargas térmicas de edificaciones residenciales. Mediante Rhinoceros, Grasshopper y el conjunto de herramientas de Ladybug. Fue utilizado el Energyplus para la simulación energética de edificios, integrando los resultados microclimáticos de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento simulados con el ENVI-met v5.0.2, para evaluar el impacto del microclima en las cargas térmicas de refrigeración y calefacción del edificio. Fueron estudiados dos escenarios morfológicos teóricos, variando la altura máxima de las edificaciones que componen el cañón urbano de 6 metros a 31 metros, y rotando el eje del cañón Norte-Sur y Este-Oeste. De acuerdo con los resultados microclimáticos, la temperatura del aire no mostró variaciones significativas respecto a los cambios morfológicos. La velocidad del viento mostro variaciones de hasta 0.5m/s al modificar la altura de las edificaciones. Se identifica disminución de hasta 44% de la radiación solar directa que ingresa al cañón urbano variando la altura de los edificios. En cañones con relación A/L = 1.29, se observó una reducción de 6.5 kWh/m²/a (-7%) en las cargas térmicas totales, con un aumento de 21.7 kWh/m²/a (+53%) de calefacción y una reducción de 28.2kWh/m²/a (-47%) de refrigeración. Al considerar las condiciones microclimáticas del entorno urbano en la simulación energética se observó un aumento del 0.03 kWh/m² (+3%) en las cargas térmicas de refrigeración. Por lo tanto, se puede destacar que pensar el diseño urbano en función del desempeño energético de las edificaciones podría ser una estrategia en la búsqueda de un desarrollo urbano sostenible.

Palabras clave: Microclima urbano; Densificación urbana; Simulación energética de edificios.

ABSTRACT

Population increase in urban areas, together with urban densification, has generated morphological transformations such as compactness and verticalization of the city. These have been shown to have an impact on the energy behaviour of buildings, depending on the climate, either due to the Urban Heat Island Effect, decreased access to solar radiation, or variation in the wind flows in the urban canyon. Therefore, this work aims to carry out a first approach to analyze the impact of microclimatic variations produced by verticalization in the city of Montevideo (UY), on the thermal loads of residential buildings. Through Rhinoceros, Grasshopper and the Ladybug tool set. Urban microclimate conditions were simulated with ENVI-met v5.0.2 of two theoretical morphological scenarios, varying the maximum height of the buildings that generate the urban canyon from 6 to 31 meters, and rotating the orientation of the canyon axis North-South and East-West. Energyplus was used for the energy simulation of the building, integrating the microclimatic results of air temperature, relative humidity and wind speed simulated with ENVI-met, to assess the impact of the urban microclimate on the cooling and heating thermal loads of the building. According to the microclimatic results, the air temperature did not show significant variations regarding the morphological changes. The wind speed showed variations of up to 0.5 m/s when modifying the height of the buildings. A reduction of up to 44% of the direct solar radiation that enters the urban canyon is identified by varying the height of the buildings. In canyons with a ratio $A/L = 1.29$, a 6.5 kWh/m²/a (-7%) reduction in total thermal loads was observed, with an increase of 21.7 kWh/m²/a (+53%) in heating and a reduction of 28.2 kWh/m²/a to (-47%) cooling. When considering the microclimatic conditions of the urban environment in the energy simulation, a 0.03 kWh/m² (+3%) increase in cooling thermal loads was observed on the analysis day. Therefore, it can be highlighted that thinking about urban design based on the energy performance of buildings could be a strategy in the search for sustainable urban development.

Keywords: Urban microclimate; Urban density; Building energy simulation.

RESUMO

O aumento populacional nas áreas urbanas, aliado ao adensamento, tem gerado transformações morfológicas como a verticalização das cidades. Estas alterações demonstraram ter um impacto no comportamento energético dos edifícios, dependendo do clima, seja devido ao Efeito Ilha de Calor Urbano, diminuição do acesso à radiação solar ou variação nos fluxos de vento no cânion urbano causado pelas alterações morfológicas. Portanto, este trabalho visa realizar uma primeira abordagem para analisar o impacto das variações microclimáticas produzidas pela verticalização na cidade de Montevideu (UY), sobre as cargas térmicas de edifícios residenciais. Através do conjunto de ferramentas Rhinoceros, Grasshopper e Ladybug. O Energyplus foi utilizado para a simulação energética do edifício, integrando os resultados microclimáticos de temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento simulados com o ENVI-met v5.0.0, para avaliar o impacto do microclima urbano nas cargas térmicas de refrigeração e aquecimento do edifício. Foram avaliados dois cenários morfológicos teóricos, variando a altura máxima das edificações que compõem o cânion urbano de 6 metros a 31 metros, e rotando a orientação do eixo do cânion Norte-Sul e Leste-Oeste. De acordo com os resultados microclimáticos, a temperatura do ar não apresentou variações significativas quanto às alterações morfológicas. A velocidade do vento apresentou variações de até 0,5m/s ao modificar a altura das edificações. Uma redução de até 44% da radiação solar direta que entra no cânion urbano é identificada pela variação da altura das edificações. Em cânions com edificações de 31 metros, observou-se uma redução de -7% nas cargas térmicas totais, com aumento de 21,7 kWh/m²/a (+53%) no aquecimento e redução de 28,2kWh/m²/a para (-47%) resfriamento. Ao considerar as condições microclimáticas do ambiente urbano na simulação energética, observou-se um aumento de 3% nas cargas térmicas de resfriamento. Portanto, pode-se destacar que pensar o desenho urbano baseado no desempenho energético das edificações pode ser uma estratégia na busca pelo desenvolvimento urbano sustentável.

Palavras-chave: Microclima urbano; Adensamento urbano; Simulação energética de edifícios.

RESUMO EXPANDIDO

Introdução

O aumento da população em centros urbanos gera transformações morfológicas na cidade. Somado a isso, os problemas climáticos e ambientais trazem consigo a necessidade de modelos de desenvolvimento urbanos mais sustentáveis, e uso eficiente da energia para a redução das emissões de gases poluentes. Uma das grandes transformações urbana é a verticalização da cidade. Na procura de modelos de desenvolvimento urbanos sustentáveis, baseado no aumento da densificação, estão também os motivos econômicos, como diminuir a distância que se deve percorrer até o lugar de trabalho, a geração de centros econômicos, e a inversão imobiliária.

As mudanças urbanas têm demonstrado variações, por exemplo, o aumento da temperatura do ar gerado pelo Efeito Ilha de Calor Urbana (ICU), a redução da velocidade do vento pelo adensamento urbano, assim como a redução solar direta que atinge as superfícies no cânion urbano, produto do sombreamento gerado pelas edificações. O efeito Ilha de Calor Urbana tem demonstrado grande influência no desempenho energético dos edifícios, aumentando a demanda média de refrigeração no centro da cidade com relação a áreas menos adensadas. Também se observou uma relação entre a geometria urbana e a demanda energética para a calefação e refrigeração das edificações, principalmente causada pela sombra entre os edifícios e múltiplas reflexões, variando em função da zona climática. Por tanto, o setor das edificações é responsável por 30% da energia primária consumida a nível mundial pelo setor das edificações. Por outro lado, o modelo de cidade compacta é considerado como uma forma sustentável. Observa-se relevante entender como as transformações morfológicas da cidade podem impactar sobre o comportamento energético dos edifícios, responsáveis por 27% das emissões de gases poluentes para a atmosfera.

Objetivos

O objetivo geral do trabalho é analisar utilizando simulação computacional o impacto das variações microclimáticas urbanas produzidas pela verticalização da cidade nas

cargas térmicas de uma tipologia de edificação residencial, no clima da cidade de Montevidéu, Uruguai. Especificamente:

- Caracterizar o contexto urbano e a densificação de uma área de estudo mediante análises da altura máxima permitida de construção, a partir de sistemas de informação geográfica.
- Comparar o impacto das variações da forma urbana nos parâmetros microclimáticos no cânion urbano, a partir da simulação microclimática no ENVI-met.
- Avaliar a integração do modelo energético Energyplus e o modelo microclimático ENVI-met para calcular as cargas térmicas de edificações em contextos urbanos.

Metodologia

Definiu-se como caso de estudo um modelo gerado a partir das características urbanas do cânion urbano da avenida *8 de Octubre*, entre Merino Moreno e *Pan de Azúcar*, na cidade de Montevidéu. Foram selecionadas devido a que os prédios voltados para a avenida estão afetadas pelo novo Decreto N°31.912, modificando o limite máximo da altura de construção das edificações até os 31 metros. Atualmente, a zona conta com um perfil urbano de edificações baixas e com uso principalmente comercial. A partir do levantamento e sistematização da informação georreferenciada do governo de Montevidéu, foi identificado que a maioria das edificações atualmente sobre a avenida, estão em torno dos 6 metros de altura.

A partir dos parâmetros urbanos da área de estudo, com a ferramenta Rhinocero 7 e Grasshopper, foi gerada a geometria do ambiente urbano de estudo. Foram definidos dois cenários morfológicos variando a altura das edificações sobre a avenida de 6 metros e 31 metros.

Para avaliar as características microclimáticas dos cenários urbanos foi utilizado o ENVI-met v5.0.2 mediante o complemento Dragonfly 0.69 no Grasshopper, permitindo transformar a geometria a um formato compatível com o modelo ENVI-met. O tamanho da área de estudo é de 339.0m x 246.0m, e foi utilizada uma grade com células de 5 metros nos eixos x, y e z. Para iniciar o modelo foram utilizados os dados climáticos do dia 12 de fevereiro, compreendido na

semana extrema do verão, definido no arquivo climático EPW registrado no aeroporto Internacional de Carrasco. Para a simulação utilizou-se o método *Full Forcing*, a partir das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar e radiação solar do arquivo EPW. Por fim, devido a um erro causado a partir da rápida variação dos dados ao longo das horas no arquivo EWP, a velocidade e a direção do vento, de acordo com sugestões da equipe de suporte do ENV-met, foram definidos valores fixos para a simulação. Deve-se destacar, que a definição de valores fixos gera uma limitação nos resultados obtidos, já que o modelo considera os valores constantes ao longo de todas as horas de simulação.

Para a análise energética foi definido um modelo térmico de edifício de uso residencial, por tanto, não segue o projeto arquitetônico. O zoneamento interior foi definido a partir de quatro zonas perimetrais. A profundidade das zonas foi definida a partir da considerar duas vezes a altura de cada andar, sendo não necessária a definição de uma zona central. Os ambientes são considerados naturalmente ventilados, quando a temperatura do ar exterior for maior que 12°C e menor do que 26°C, e a temperatura do ar interior esteja na faixa de 22°C até 25°C. Também foi definido um sistema de tipo *Ideal Loads* quando a temperatura interior esteja fora da faixa 18°C até 26°C. Para a simulação foram utilizados o Ladybug 1.4 e o Honeybee 1.4 com o motor de cálculo Energyplus, permitindo trabalhar dentro do ambiente do Grasshopper.

Para avaliar a influência das características microclimáticas do entorno urbano nas cargas térmicas das edificações, foi implementada uma integração dos resultados do ENVI-met na simulação no Energyplus, mediante a modificação do arquivo climático EPW. As variáveis modificadas foram a temperatura do ar e a velocidade do vento, obtidas do ENVI-met, a partir da média horária dos dados de cada célula do modelo na frente da fachada do edifício. A umidade relativa do ar foi obtida do ENVI-met, a partir da média horária registrada em cada célula do modelo dentro do cânion urbano. A integração permitiu considerar as características microclimáticas específicas do entorno urbano estudado unicamente para o dia 13 de fevereiro, dia seguinte ao dia de inicialização do modelo (12 de fevereiro). Na bibliografia, sugere-se descartar as primeiras 24hs de simulação. Para avaliar o impacto das variações microclimáticas nas cargas térmicas do edifício, foi feita uma simulação com o arquivo climático EPW original e outra com arquivo climático EPW

modificado a partir dos dados do ENVI-met, comparando os resultados das cargas térmicas de resfriamento de todos os andares.

Resultados e discussão

A temperatura média do ar na frente da fachada do edifício e a umidade relativa média dentro do cânion urbano, apresentou baixa variação quando foi modificada a altura das edificações e a orientação do cânion no ENVI-met. Variando a altura de 6 metros para 31 metros, a temperatura mostrou um aumento de $0,3^{\circ}\text{C}$ no segundo caso. A baixa variação de esta variável concorda com os resultados obtidos em pesquisas anteriores, onde destacam a pouca sensibilidade da temperatura do ar aos câmbios morfológicos no ENVI-met.

A velocidade do vento apresenta maior variação quando são modificados os cenários morfológicos. Observou-se que o uso de valores fixos de velocidade e direção do vento para inicializar o modelo microclimático gera uma estabilização dos resultados da velocidade do vento ao longo de todo o período, com um valor médio de $1,2\text{m/s}$ no cenário com edificações de 6 metros e $0,7\text{m/s}$ no cenário de 31 metros. Além disso, identificou-se uma variação de $0,5\text{m/s}$ variando a altura das edificações de 6 metros para 31 metros. Também se identificou uma variação de $0,3\text{m/s}$ na velocidade do vento na frente da fachada do edifício de um lado do cânion e no outro, o que concorda com resultados de pesquisas anteriores.

Observou-se variação na radiação solar direta que ingressa no cânion urbano quando é modificada a altura das edificações de 6 metro para 31 metros e a orientação do cânion. Observa-se uma redução de 997.1W/m^2 (-44%) na radiação solar direta dentro do cânion ao longo do dia, com orientação Leste-Oeste quando é modificada a altura das edificações de 6 metros para 31 metros. No cânion com orientação Norte-Sul observa-se uma redução de 775.3W/m^2 (-9%).

Identifica-se uma relação clara entre a forma urbana e as cargas térmicas da edificação analisada. O entorno urbano abaixo de 6 metros de altura, apresentou menor influência nas cargas térmicas das edificações com relação ao entorno com edificações de 31 metros. Esses resultados são coerentes devido a que quando são considerados entornos mais altos, as cargas térmicas estão muito influenciadas pela quantidade de radiação solar que ingressa na edificação. Na edificação de 31 metros quando é considerado o entorno urbano, observou-se redução nas cargas

térmicas de refrigeração entre 2.0kWh/m² (-33%) no andar 9 e 3.6 kWh/m² (-50%) no andar 5. No entanto as cargas de aquecimento aumentaram significativamente nos andares baixos, até 9.5kWh/m² (+149%) no andar 1, e em menor medida em até 0.1kWh/m² (+3%), no andar 9. Observou-se quando é considerado o entorno, as cargas térmicas totais de aquecimento aumentam um 21.7kWh/m² (+53%), no entanto a refrigeração diminuiu 28.2kWh/m² (-47%).

A partir da simulação integrada observa-se que as cargas térmicas de refrigeração variam de acordo com as variações microclimáticas do entorno urbano. Identificou-se um aumento das cargas térmicas de refrigeração totais da edificação para o dia de estudo, 13 de fevereiro, de 0.03kWh/m² (+3%). O andar 9 apresentou a maior variação de 0.02 kWh/m² (10%). Observa-se que os resultados da simulação integrada estão fortemente influenciados pela variação da velocidade do vento, considerada a partir dos dados do ENVI-met.

Por fim, observou-se a possibilidade de trabalhar numa integração entre os resultados do modelo ENVI-met no Energyplus mediante Grasshopper. Ainda é necessário aprofundar no método utilizado, principalmente avaliar a possibilidade de utilizar a velocidade e direção do vento do arquivo EPW para iniciar a simulação microclimática. Assim como também, a necessidade de realizar uma calibração do modelo microclimático com dados locais.

Considerações finais

As variações da morfologia urbana abordadas neste estudo, altura das edificações e orientação do cânion urbano, não afetam da mesma forma as variáveis microclimáticas urbanas. A temperatura do ar e a humidade relativa apresentam menor sensibilidade às mudanças morfológicas. Por outro lado, a velocidade do vento e a radiação solar estão mais fortemente ligadas às variações morfológicas. Por exemplo, os fluxos do ar apresentam uma redução na velocidade em cânions com maior relação A/L. Na mesma linha a radiação solar direta que entra dentro do cânion apresenta importante redução quando aumenta a relação A/L, da mesma forma que quando é modificada a orientação do cânion.

As características da forma urbana afetam o desempenho energético das edificações. Enquanto a relação A/L aumenta, os cânions tornam-se mais profundos, e observa-se um aumento nas cargas térmicas totais de aquecimento e redução na

refrigeração. A principal causa é redução da radiação solar que ingressa no cânion, modificando os ganhos solares na edificação. Apresentando comportamento distinto nos andares mais baixos com respeito aos mais altos, onde os primeiros apresentam maior aumento nas cargas térmicas de aquecimento por causa do entorno urbano. Por tanto, essas mudanças no comportamento energético influenciam na tomada de decisões de estratégias de desenho para aumentar a eficiência energética e o conforto das edificações.

Observa-se que o método de simulação integrada, modificando o arquivo climático EPW, permite avaliar o efeito das variações microclimáticas urbanas nas cargas térmicas das edificações. Observou-se aumento nas cargas térmicas totais da edificação quando é considerado o microclima urbano. A modificação da velocidade do vento no arquivo climático EPW apresentou a maior influência na variação, o que está relacionado ao método de simulação microclimática utilizado, onde foi considerado um valor fixo ao longo da simulação.

Por outro lado, o estudo aqui apresentado permite realizar uma primeira abordagem sobre a importância que tem a morfologia urbana da cidade e as diretrizes do planejamento urbano, tanto pelas modificações no ambiente urbano externo, assim como o impacto que gera no comportamento energético dos edifícios. Nesse sentido, e partindo da base que o setor das edificações consome grande parte da energia primária e gera grande parte dos gases poluentes a nível mundial, permite-se pensar na importância do planejamento energético urbano desde o ponto de vista formal. É importante continuar pesquisando nesta relação, e entender qual é o ponto de equilíbrio entre a cidade compacta, a sustentabilidade e o desenho urbano eficiente energeticamente.

Futuras pesquisas deveriam contemplar o uso de modelos microclimáticos calibrados com dados experimentais, assim como efeito do calor antropogênico gerado no entorno urbano pelas atividades humanas. Também, aproveitando a capacidade do Grasshopper como ambiente de integração, poderia ser gerada uma integração maior a partir das superfícies do modelo e os dados do ENVI-met, o que permitiria utilizar dados de trocas de radiação de onda longa ou variação dos coeficientes convectivos.

Palavras-chave: Microclima urbano; Adensamento urbano; Simulação energética de edifícios.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representación esquemática de las capas de la atmosfera en las áreas urbanas | 25 |
| Figura 2 - Esquema del balance energético urbano | 26 |
| Figura 3 - Representación esquemática de los flujos energéticos en las superficies del cañón urbano..... | 28 |
| Figura 4 - Patrones de los flujos de viento en el cañón urbano..... | 34 |
| Figura 5 - Clasificación de los Modelos Climáticos Urbanos de acuerdo con la escala de análisis | 35 |
| Figura 6 - Descripción esquemática de los modelos que componen el ENVI-met | 36 |
| Figura 7 - Definición de la grilla de ENVI-met en el eje vertical..... | 37 |
| Figura 8 - Esfera de visión de la celda en el módulo IVS | 38 |
| Figura 9 - Escenarios urbanos considerados | 48 |
| Figura 10 - Zonificación climática de Uruguay de acuerdo con la UNIT 1026:99 | 50 |
| Figura 11 Esquema de la propuesta morfológica del Decreto N°37.912 | 53 |
| Figura 12 Flujograma de la metodología | 56 |
| Figura 13 Esquema de las avenidas comprendidas en el Decreto N°37.912..... | 56 |
| Figura 14 Imagen del perfil de la avenida de estudio | 57 |
| Figura 15 Esquema general del procesamiento en QGIS para la estimación de las alturas aproximadas de las edificaciones en el área de estudio..... | 58 |
| Figura 16 Distribución de la altura promedio de las parcelas frentistas a la avenida de estudio..... | 59 |
| Figura 17 Planta urbana de las manzanas del escenario analizado | 61 |
| Figura 18 - Representación geométrica de los escenarios urbanos..... | 62 |
| Figura 19 Datos climáticos de la semana extrema del período cálido..... | 63 |
| Figura 20 Materiales de paredes de los edificios en ENVI-met..... | 65 |
| Figura 21 - Materiales de la cubierta de los edificios en ENVI-met | 66 |
| Figura 22 - Zonificación interior del edificio de estudio..... | 69 |
| Figura 23 – Configuración de la ventilación natural..... | 69 |
| Figura 24 – Datos microclimáticos del modelo frente a la fachada del edificio | 72 |
| Figura 25 - Serie de datos microclimáticos del periodo cálido para modificar el archivo EPW caso de 31 metros | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 26 - Serie de datos microclimáticos del periodo cálido para modificar el archivo EPW caso de 6 metros | 74 |
| Figura 27 - Representación geométrica de los escenarios morfológicos | 75 |
| Figura 28 – Resultados de la temperatura del aire a las 13hs de ENVI-met..... | 79 |
| Figura 29 – Resultados de la temperatura del aire a las 5hs de ENVI-met..... | 80 |
| Figura 30 - Temperatura del aire en el cañón urbano con orientación Este-Oeste en el periodo cálido | 82 |
| Figura 31 – Gradiente de la temperatura del aire en el cañón urbano de 31 metros . | 82 |
| Figura 32 – Velocidad del viento dentro del cañón urbano de ENVI-met..... | 83 |
| Figura 33 – Comportamiento de la velocidad del viento en el cañón urbano en vertical..... | 84 |
| Figura 34 – Gradiente de la velocidad del viento en el cañón urbano de 31 metros . | 85 |
| Figura 35 – Comportamiento de la velocidad del viento dentro del cañón urbano con orientación Este-Oeste en el periodo cálido..... | 85 |
| Figura 36 – Humedad relativa en el cañón urbano periodo cálido | 86 |
| Figura 37 – Velocidad del viento en el cañón urbano periodo cálido | 87 |
| Figura 38 – Radiación solar directa en el cañón urbano con orientación Este-Oeste en el periodo cálido | 88 |
| Figura 39 – Radiación solar directa en el cañón urbano con orientación Norte-Sur en el periodo cálido | 88 |
| Figura 40 – Cargas térmicas totales anuales desagregadas del escenario C31mEO con y sin entorno | 90 |
| Figura 41 – Cargas térmicas totales anuales escenario C31mEO con y sin entorno urbano | 92 |
| Figura 42 – Ganancias de calor por convección de las superficies del piso 1 y piso 2 sin entorno..... | 92 |
| Figura 43 – Cargas térmicas de calefacción y refrigeración del escenario C31mEO con y sin entorno urbano..... | 95 |
| Figura 44 – Incidencia de radiación solar del escenario C31mEO | 95 |
| Figura 45 – Cargas térmicas totales anuales desagregadas del escenario C31mNS con y sin entorno | 97 |
| Figura 46 – Cargas térmicas con y sin entorno en el cañón urbano Norte-Sur del escenario C31mNS | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 47 – Cargas térmicas totales anuales desagregadas con y sin entorno del escenario C6mEO | 100 |
| Figura 48 – Cargas térmicas de refrigeración del escenario C31mEO a partir de la simulación energética integrada..... | 101 |
| Figura 49 – Comportamiento del ambiente interior del piso 9 con la simulación integrada en el escenario C31mEO | 103 |
| Figura 50 – Balance de a partir de la simulación energética integrada en el escenario C31mEO..... | 103 |
| Figura 51 – Comportamiento de la superficie exterior de la fachada del piso 9 en el escenario C31mEO a partir de la simulación energética integrada..... | 105 |
| Figura 52 – Intercambios por convección interior del piso 9 en el escenario C31mEO a partir de la simulación energética integrada | 105 |
| Figura 53 – Velocidad del viento frente a la fachada y coeficiente convectivo en el escenario C31mEO | 106 |
| Figura 54 – Análisis individual de variables climáticas en la simulación energética integrada del escenario C31mEOPC | 107 |
| Figura 55 – Cargas térmicas de refrigeración del escenario C6mEO a partir de la simulación energética integrada..... | 108 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1 - Estadísticas climáticas Montevideo | 51 |
| Cuadro 2 - Datos para la definición del área de estudio en ENVI-met | 64 |
| Cuadro 3 - Materiales constructivos del edificio en EnergyPlus | 67 |
| Cuadro 4 - Características de los vidrios del edificio | 68 |
| Cuadro 5 - Configuración de <i>SetPoint</i> | 70 |
| Cuadro 6 - Tasa metabólica y fracción radiante para los usuarios..... | 70 |
| Cuadro 7 - Densidad de potencia instalada, fracción radiante y visible para los sistemas de iluminación | 71 |
| Cuadro 8 - Densidad de cargas internas y fracción radiante para equipos | 71 |
| Cuadro 9 - Programación de cargas internas..... | 71 |
| Cuadro 10 - Variables modificadas en el archivo EPW | 78 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Parámetros urbanos fijos..... | 60 |
| Tabla 2 Parámetros variables de los escenarios urbanos..... | 61 |
| Tabla 3 - Cargas térmicas totales por piso con y sin entorno urbano..... | 91 |
| Tabla 4 - Cargas térmicas desagregadas por piso del caso C31mEO..... | 94 |
| Tabla 5 - Cargas térmicas desagregadas por piso del caso C31mNS..... | 99 |
| Tabla 6 Cargas térmicas de refrigeración de simulación energética integrada del caso C31mEO..... | 102 |
| Tabla 7 Pérdidas y ganancias de energía con archivo climático EPWo y EPWm del caso C31mEO..... | 104 |

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ICU – Isla de Calor Urbana
CFD – Dinámica de Fluidos Computacionales (*computational fluid dynamics*)
SIG – Sistema de Información Geográfica
A/L – Relación entre altura media de las edificaciones y el ancho de la calle
FVC – Factor de Visión del Cielo
PET – *Physiological Equivalente Temperature*
UTCI – *Universal Thermal Climate Index*
CEPAL – Comisión Económica para América Latina y el Caribe
IPCC – Panel Intergubernamental del Cambio Climático
FOS – Factor de Ocupación del Suelo
FOT – Factor de Ocupación Total
OMM – Organización Meteorológica Mundial
CDU – Capa del Doseil Urbano
CLU – Capa Limite Urbana
ZCL – Zonas Climáticas Locales
TRM – Temperatura Radiante Media
Tar – Temperatura del Aire
Hr – Humedad Relativa del Aire
Vv – Velocidad del aire
Rsdirec – Radiación Solar Directa
MCU – Modelo Climáticos Urbanos
BEM – *Building Energy Modeling*
DOE – *U.S. Department of Energy*
TMY – *Typical Meteorological Year*
EPW – *EnergyPlus Weather*
POT – Plan de Ordenamiento Territorial
IM – Intendencia de Montevideo
IVS – *Indexed View Sphere*
NBR – Norma Brasileira Registrada

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 19 |
| 1.1.1 | Objetivo general | 19 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 20 |
| 1.2 | ESTRUCTURA DEL TRABAJO | 20 |
| 2 | REVISIÓN DE LITERATURA | 22 |
| 2.1 | FORMA URBANA | 22 |
| 2.2 | CLIMATOLOGÍA URBANA | 24 |
| 2.2.1 | Escalas del clima urbano | 24 |
| 2.2.2 | Balance energético urbano | 26 |
| 2.2.3 | Microclima urbano | 30 |
| 2.2.4 | Modelo ENVI-met | 34 |
| 2.2.4.1 | <i>Trabajos en ENVI-met</i> | 40 |
| 2.3 | DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE EDIFICIOS EN ENTORNOS URBANOS 42 | |
| 2.3.1 | Demanda energética de edificaciones | 42 |
| 2.3.2 | Simulación energética integrada | 47 |
| 2.4 | EL CONTEXTO DE URUGUAY | 49 |
| 2.4.1 | El clima | 49 |
| 2.4.2 | Contexto histórico – urbano de la ciudad de Montevideo | 52 |
| 2.5 | COMENTARIOS FINALES DE LA SECCIÓN | 54 |
| 3 | METODOLOGÍA | 55 |
| 3.1 | PREPROCESAMIENTO | 56 |
| 3.2 | CONSTRUCCIÓN..... | 60 |
| 3.3 | SIMULACIÓN..... | 62 |
| 3.3.1 | Datos climáticos | 62 |
| 3.3.2 | Simulación microclimática | 63 |
| 3.3.3 | Simulación energética de edificios | 67 |
| 3.3.4 | Simulación energética integrada | 71 |
| 3.4 | TRTAMIENTO Y ANALISIS | 75 |
| 3.4.1 | Variaciones microclimáticas y forma urbana | 75 |
| 3.4.2 | Impacto del entorno en las cargas térmicas | 76 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4 | RESULTADOS | 79 |
| 4.1 | VARIACIONES MICROCLIMÁTICAS EN EL CAÑÓN URBANO..... | 79 |
| 4.2 | VARIACIÓN CARGAS TÉRMICAS..... | 90 |
| 4.2.1 | Influencia del entorno urbano..... | 90 |
| 4.2.2 | Influencia de la orientación del cañón urbano | 96 |
| 4.2.3 | Influencia del entorno urbano bajo | 100 |
| 4.2.4 | Cargas térmicas partir de la simulación integrada | 101 |
| 5 | CONCLUSIONES | 109 |
| 5.1 | LIMITACIONES..... | 112 |
| 5.2 | SUGERENCIAS DE TRABAJOS FUTUROS..... | 113 |
| | REFERÊNCIAS | 115 |

1 INTRODUCCIÓN

Más del 50% de la población mundial vive en ciudades, con una tendencia a que continúen aumentando. Se espera que para el año 2050 alcance hasta el 68%. Se prevé que el aumento ocurra principalmente en Asia y África (NU, 2018). De acuerdo con los datos de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL), la población urbana en América Latina alcanza hasta el 80%. Por lo cual, el abordaje y adecuación de las áreas urbanas han sido un tema de relevancia buscando el desarrollo sustentable de las comunidades.

Desde el año 2015 es impulsada la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, donde los estados miembros se comprometieron a orientar los procesos para el desarrollo sostenible (NU-HABITAT, 2020). Entre los cuales, por ejemplo, debido al crecimiento poblacional y al aumento en el consumo de energía, se plantea la necesidad, no solo de garantizar la accesibilidad, sino de transitar hacia las fuentes de producción de energías limpias, solar, eólica, térmica, ya que es uno de los factores principales que influye en el cambio climático. Por tanto, también es de relevancia el uso eficiente en los diferentes sectores. Así también se plantea, debido a la rápida urbanización, y que las ciudades a nivel global representan entre el 60% y el 80% del consumo de la energía, y el aumento de urbanizaciones con servicios e infraestructuras inadecuadas, la necesidad de transitar hacia ciudades y comunidades sostenibles.

Los términos de urbanismo sustentable, ciudad y comunidades sustentables refieren a una expresión de deseo, mientras que el desarrollo urbano sustentable refiere a un proceso para alcanzar ese estado deseado (SHEN et al., 2011). Podría definirse que para un desarrollo urbano sustentable es necesario un balance entre las tres principales dimensiones, los factores económicos, ambientales y sociales en las áreas urbanas.

Compacidad, densidad, diversidad, uso mixto del suelo, transporte sustentable y áreas verdes, son las principales estrategias de la ciudad compacta para alcanzar los objetivos de sostenibilidad. El motivo por el cual las ciudades han sido desarrolladas de forma compacta fueron cambiando a lo largo del tiempo. Principalmente tiene sus orígenes en la conservación de los recursos, como la energía de fuentes fósiles y la disminución de residuos, particularmente las emisiones de carbono. Así, los abordajes contemporáneos de la ciudad compacta se

tornaron una forma de alcanzar el desarrollo urbano sustentable. Hay también una serie de otras justificativas, económicas, sociales, culturales y políticas para iniciativas de ciudades compactas y políticas diferentes, muchas veces contradictorias (JENKS; BURGESS, 2004).

En su revisión AHLFELDT; PIETROSTEFANI, (2017) observaron que la ciudad compacta está asociada con modos de transporte más sustentables, mejora en el acceso a los servicios, disminución del crimen, igualdad social, aumento del valor de la tierra, disminución de los tiempos de transporte, menor consumo de energía, y mayor eficiencia de los servicios públicos locales. Por otro lado, observan aspectos negativos en cuanto a la salud, bienestar de las personas, congestionamiento del tráfico, y la preservación de los espacios abiertos. Algunos autores observan que los objetivos económicos predominan sobre los ambientales y los sociales, sin embargo, la afirmación de las tres dimensiones de sustentabilidad es igualmente importante en el plano discursivo (HOFSTAD, 2012). Por lo tanto, varias medidas están siendo implementadas para fortalecer su influencia en la planificación urbana y en las prácticas de desarrollo (BIBRI; KROGSTIE; KÄRRHOLM, 2020).

Por otro lado, el cambio climático surge como un tema central en la discusión de políticas y en la planificación urbana. Se estima, si el ritmo actual de producción y desarrollo continua, que la temperatura de la superficie global podría aumentar en torno a 1.5°C para los años 2030-2050 (IPCC, 2018). Lo cual sería una situación determinante para la humanidad. A nivel mundial el crecimiento económico y demográfico continúan siendo los principales causantes del aumento de las emisiones de CO₂ (IPCC, 2014). Por otro lado, se observa que los eventos climáticos extremos también generan impacto en la salud de las personas. En el año 2003 se registraron en torno a 70.000 muertes más por causa de la ola de calor en el verano en Europa (ROBINE et al., 2008). En ese sentido LONG; RICE, (2019) destacan la importancia de una transición a un modelo de desarrollo urbano resiliente al clima, como urbanismo climático, con una orientación de las políticas que promueven las ciudades como los lugares más apropiados para la acción climática, y priorizar los esfuerzos para proteger las infraestructuras y la salud ante el cambio climático.

En las áreas urbanas el aumento de la temperatura se intensifica por causa de las infraestructuras urbanas y la generación de calor producto de las actividades

humanas, por lo tanto, se destaca como uno de los mayores problemas del siglo XXI como resultado de la urbanización y la industrialización (RIZWAN; DENNIS; LIU, 2008). La forma urbana afecta el aumento de la temperatura generando el efecto Isla de Calor Urbana (ICU) (GAGO et al., 2013), uno de los fenómenos que ha sido ampliamente abordado en estudios de climatología urbana (SANTAMOURIS, 2015; STEWART, 2011). Es principalmente causado por las modificaciones que ocurren en el balance energético en los entornos urbanos (OKE et al., 2017), por el almacenamiento de la energía solar en los materiales, reducción de los flujos de radiación de onda larga emitida para la atmosfera, la generación de calor antropogénico, la pérdida de evapotranspiración y reducción de los flujos convectivos de remoción de calor (SANTAMOURIS et al., 2001). La magnitud del efecto es medida a través de la comparación de la diferencia de temperatura del aire en un punto dentro del área urbana y un área rural fuera de la ciudad. Así el efecto ICU es relevante ya que influye en el desempeño energético de los edificios, variando de acuerdo con el clima (SANTAMOURIS, 2014), al igual que la forma urbana (ALLEGRI; DORER; CARMELIET, 2012; RATTI; BAKER; STEEMERS, 2005). Por lo cual es preciso entender su relación y la variación del consumo energético en las ciudades.

Las edificaciones son las estructuras predominantes en los entornos urbanos, con una participación relevante en el consumo de energía global. En el año 2019 las edificaciones fueron responsables por el 35% del consumo total final de energía a nivel mundial, contribuyendo al 38% de las emisiones de CO₂ relacionado al consumo de energía (UN-EP, 2020). Lo que contribuye directamente con el calentamiento global de la tierra (NACIONES UNIDAS, 2021). Debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes y adaptarse a modelos de desarrollo más sustentables, las edificaciones han sido un área importante en la búsqueda de la reducción en el consumo energético y el confort de las personas.

El estudio mediante simulación computacional del desempeño energético de edificaciones en entornos urbanos es uno de los temas que viene siendo de gran interés. Por ejemplo, en Estados Unidos, el entorno urbano de las edificaciones puede generar, de acuerdo con la zona climática, una subestimación de la demanda energética para calefacción de hasta 32% y una sobre estimación de 58% para refrigeración (PISELLO et al., 2012). En el norte de Europa, se observa que la geometría urbana presenta un impacto significativo en el consumo de energía,

aumentando hasta 30% para edificios de oficina y 19% para edificios residenciales (STRØMANN-ANDERSEN; SATTRUP, 2011). En Brasil, se observó que el entorno urbano generó una reducción en las cargas térmicas de refrigeración de 16-18% (LIMA; SCALCO; LAMBERTS, 2019). También fue analizado el impacto del clima en entornos urbanos. Por ejemplo, en Grecia, se identificó una reducción de 30% en la demanda de energía para calefacción en edificaciones localizadas en el centro de la ciudad respecto a las áreas menos urbanizadas (SANTAMOURIS et al., 2001). Se observó que las edificaciones en contextos urbanos pueden tener un 13% más de demanda media de refrigeración comparado con entornos rurales (SANTAMOURIS, 2014).

Por lo tanto, se observa, por un lado, la relevancia del desarrollo de la ciudad compacta y sus beneficios, generalmente asociado a la dimensión económica y productiva. Pero también son contrapuestos con algunas visiones más recientes sobre el bienestar de las personas y la calidad de vida. Surgen los temas climáticos como motivo para impulsar grandes cambios, como también su importante participación en ellos. Por lo tanto, surge una pregunta relacionada al modelo de desarrollo de ciudad y la necesidad de cuestionarlo para reforzar la importancia de la dimensión ambiental: ¿cómo la verticalización de la ciudad y la modificación de la morfología urbana impacta en el desempeño energético de las edificaciones? Por lo tanto, este trabajo busca un análisis inédito en Uruguay, introduciendo una dimensión de análisis para el desarrollo urbano de la ciudad de Montevideo, así como un análisis en la interacción entre el diseño urbano y el desempeño energético de edificios.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Analizar el impacto de las variaciones microclimáticas urbanas producidas por la verticalización de la ciudad en las cargas térmicas de una tipología de edificio residencial, mediante simulación energética en EnergyPlus a partir de los datos microclimáticos simulados en ENVI-met, para el clima de la ciudad de Montevideo, Uruguay.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el contexto urbano y de densificación del área de estudio mediante el análisis de la altura máxima permitida, a partir de un sistema de información geográfica;
- Comparar el impacto de las variaciones de la forma urbana en los parámetros microclimáticos en el cañón urbano a partir de la simulación microclimática con ENVI-met.
- Evaluar la integración del modelo energético EnergyPlus y el modelo microclimático ENVI-met para calcular las cargas térmicas de edificios en contextos urbanos.

1.2 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo se divide en cinco capítulos. Primeramente se realiza una introducción al tema abordado, la contextualización y la pregunta de estudio que justifican los objetivos propuestos para el desarrollo de la investigación.

El segundo capítulo trae la revisión bibliográfica, la cual está dividida en tres secciones. Primero se presentan algunos descriptores utilizados para definir la forma urbana. Posteriormente se introduce a la climatología urbana, las diferentes escalas climáticas de estudio, la modificación del balance energético en espacios urbano por causa de la modificación de los materiales, la forma, y su interacción con el microclima. Y se introduce el modelo ENVI-met, utilizado para la simulación del microclima. Posteriormente se presentan algunos trabajos para describir la influencia del entorno urbano en la simulación energética de edificios y cómo impacta en el desempeño energético. Finalmente se introduce la simulación energética integrada, donde se busca unir los resultados del modelo microclimático ENVI-met en la simulación con EnergyPlus.

En el tercer capítulo se describen el procedimiento metodológico utilizado para alcanzar los objetivos. Se divide en el preprocesamiento, donde se analiza el área de estudio y se obtiene la información urbana para la siguiente etapa. En la etapa de construcción se generan los escenarios morfológicos urbanos a simular y la

edificación. Posteriormente en la etapa de simulación, se presentan los procedimientos para la simulación microclimática en ENVI-met, la simulación energética en EnergyPlus y la simulación integrada de ambos. Finalmente el tratamiento y análisis de los resultados.

Por último, se presentan los resultados, discusiones de la investigación y las principales conclusiones. Así también las referencias bibliográficas que fueron utilizadas para el desarrollo del trabajo.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

La revisión de literatura está dividida en tres apartados principales. Primeramente, se introducen algunos conceptos para la definición de la morfología urbana que están relacionados con los estudios de climatología urbana. Posteriormente son descritos los principales conceptos que definen el clima urbano y los modelos climáticos utilizados para su estudio. Por último, es analizado el desempeño energético de edificaciones en contextos urbanos.

2.1 FORMA URBANA

De acuerdo con OKE et al., (2017), en los estudios de climatología urbana pueden ser determinadas cuatro clases de propiedades, las cuales deben ser descritas y cuantificadas para describir las características de la superficie de la ciudad: materiales, cobertura superficial, estructura o elementos y metabolismo urbanos. El uso de los materiales en la ciudad es variado, utilizados para la construcción de edificios, calles, pavimentos o conservación de la cobertura natural del suelo, con diferentes propiedades, y dependiendo la escala de análisis es posible, a veces, generalizar sus características en grandes áreas. Por otro lado, es necesario estudiar la relación entre la superficie ocupada por las estructuras y elementos respecto al área total del suelo, así como las dimensiones de esos elementos y su organización espacial. Así también la utilización de recursos en la dinámica del ecosistema urbano, devolviendo elementos degradados al ambiente, como por ejemplo que degradan la atmosfera, teniendo un papel fundamental en el clima urbano.

Para describir la forma urbana es pertinente tomar la visión jerárquica presentada en el trabajo de OLIVEIRA, (2016), donde destaca los elementos que componen generalmente el tejido urbano, calles, manzanas, parcelas y edificios. Así la organización de estos elementos da lugar a diferentes formas de tejidos urbanos, incluso dentro de una misma ciudad. El contexto natural es la primera condición para establecer la organización espacial de los diferentes elementos. Las calles definen las manzanas y diferencian lo público de lo privado. Existe una gran variedad de calles, con formas y tamaños diferentes, influenciada por otros elementos urbanos, como la existencia de parcelas en uno o ambos lados, o la ubicación y relación de

altura de los edificios con el ancho de la calle. Por otro lado, las parcelas separan el espacio de dominio público del privado, siendo un elemento fundamental que define la forma urbana, generalmente con una estabilidad considerable a lo largo del tiempo. Generalmente sus dimensiones aumentan a medida que aumenta la distancia al centro de la ciudad. Por último, los edificios son uno de los elementos urbanos más visibles. Su posicionamiento dentro de las parcelas define la forma del paisaje urbano, donde su relación de altura con el ancho de calle y su alineación sobre esta, son características importantes que definen la forma urbana.

Son utilizados diferentes parámetros para describir la forma urbana, tanto en la dimensión horizontal como en la vertical, o en conjunto (OKE et al., 2017). Para caracterizar la densificación o compacidad urbana, se puede definir la relación de cobertura del sitio o Factor de Ocupación del Suelo (FOS), que determina la relación entre la proyección horizontal de la edificación y el área total de la parcela, permitiendo cuantificar el área cubierta por las estructuras urbanas. Así como también el área total construida o Factor de Ocupación Total (FOT), determina la relación entre el área total construida, sumando el área de todos los pisos de la edificación, y el área total de la parcela. Permitiendo el análisis en la dimensión horizontal y vertical, ya que permite calcular la cantidad máxima de metros cuadrados que pueden ser construidos en la parcela. Por ejemplo, en su trabajo PETRALLI et al., (2014) observaron en Florencia (Italia) que un incremento del 10% en el área cubierta por edificios, presentó un aumento de la temperatura del aire entre 0.30°C y 0.60°C. En la misma línea, en China LIU et al., (2020) observaron que la reducción de la densificación urbana tiene un efecto significativo en la reducción del efecto ICU, y disminución en la duración del efecto de un 30%. También en China, YANG et al., (2021) identificaron una correlación positiva entre el aumento de la densidad de construcción y la temperatura de la superficie terrestre, y que la densificación de edificios afecta principalmente las condiciones térmicas debido a su influencia en los flujos de viento.

En su trabajo SALVATI et al., (2019) destacan también que es fundamental describir las dimensiones y forma de los edificios para estudiar la interacción entre la superficie urbana y la atmosfera. Por lo tanto, proponen considerar la densificación vertical urbana a partir de la relación entre el área de fachada de los edificios y área del sitio. Así como también la altura media de los edificios. Observaron en el clima Mediterráneo que el aumento de la densificación horizontal muestra un aumento de

la intensidad del ICU en invierno, mientras que el aumento de la densificación vertical presenta mayor intensidad de la ICU en verano.

Por otro lado, en estudios de climatología urbana son utilizados otros parámetros para describir la geometría urbana y la relación con otros elementos. La relación de altura del edificio/ancho de la calle (A/L), permite describir la geometría del cañón urbano conformado por los edificios en ambos lados de la calle. Así el Factor de Visión de Cielo (FVC), es un indicador tridimensional utilizado para caracterizar la geometría del cañón urbano, determinando el área de cielo “vista” a partir de un punto determinado, permitiendo analizar los flujos de radiación entre la superficie y la atmosfera. Por tanto, el estudio de estos parámetros, en conjunto con la orientación del cañón urbano, son importantes ya que se relacionan directamente con la radiación solar que alcanza las superficies del cañón urbano, los intercambios de radiación emitida por los elementos y con la modificación de los flujos de viento (LIN et al., 2017; XI et al., 2012).

2.2 CLIMATOLOGÍA URBANA

En esta sección son presentados los principales conceptos para describir el clima en áreas urbanas y sus alteraciones.

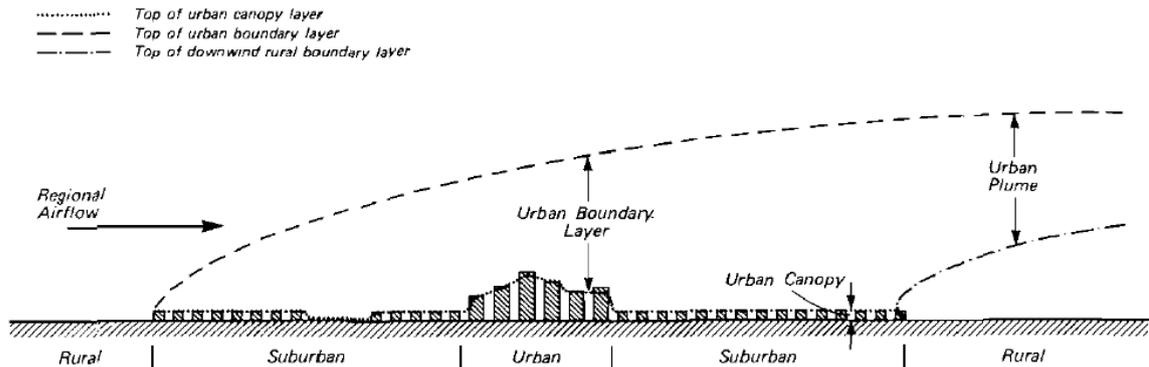
2.2.1 Escalas del clima urbano

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el clima de una región está definido generalmente a partir del estudio estadístico de las variaciones a lo largo de un período de 30 años o más. Descrito por las principales variables superficiales, como temperatura del aire, humedad relativa del aire, cantidad o disponibilidad de radiación de onda corta y onda larga, velocidad del viento y dirección, precipitaciones, presión y vapor de agua (OMM).

Las estructuras urbanas generan modificaciones en la superficie terrestre, produciendo impactos en las condiciones climáticas locales y en la atmosfera. Para estudiar el clima en áreas urbanas, se pueden identificar dos capas principales en la atmosfera de forma vertical (OKE, 1976), Figura 1. Por un lado, la capa del dosel urbano (CDU) o *urban canopy layer*, definida por el aire contenido entre los elementos urbanos desde la superficie del suelo hasta la altura de los edificios. Por

otro lado, la capa límite urbana (CLU) o *urban boundary layer*, está definida por el espacio de aires sobre la ciudad que es influenciado por las características urbanas, por tanto, generalmente refiere a una escala local o meso.

Figura 1 - Representación esquemática de las capas de la atmosfera en las áreas urbanas



Fuente: (OKE, 1976)

Por otro lado, además de la dimensión vertical, los estudios del clima urbano pueden estar referidos a la escala horizontal (OKE, 2006). En la microescala, vinculada a edificaciones individuales, árboles, calles, jardines, etc. La escala local, por ejemplo, barrios o área de una ciudad con características similares. Y en la meso escala, que puede abarcar ciudades enteras.

A veces, en los estudios de climatología urbana, es utilizada una visión dicotómica, donde es comparado el clima en áreas urbanas respecto a las áreas rurales. En este sentido, para evitar esa visión es propuesta la clasificación de zonas climáticas locales (ZCL) (STEWART; OKE, 2012). El método permite la representación de forma genérica diferentes patrones de organización de los elementos urbanos, no representando las particularidades de cada zona urbana específica. Además, es posible medir todas las propiedades físicas. Esta clasificación fue adoptada por ejemplo para la creación de bases de datos urbanas mundiales (BECHTEL et al., 2015), en estudios del microclima urbano (MIDDEL et al., 2014), y en estudios buscando entender las complejas y variadas dimensiones del ambiente urbano (PACIFICI; RAMA; DE CASTRO MARINS, 2019).

Por otro lado, el análisis del clima en la microescala permite un estudio más detallado de las particularidades y la diversidad urbana. Por ejemplo, la correlación entre la geometría del cañón urbano y las variaciones microclimáticas (ERELL;

WILLIAMSON, 2007; OKE, 1981), el efecto de las áreas verdes (CHEN; WONG, 2006), la diversidad de materiales y sus propiedades (DOULOS; SANTAMOURIS; LIVADA, 2004; TAHA, 1997), evaluación de las condiciones de confort térmico de las personas en los espacios exteriores (CHATZIDIMITRIOU; YANNAS, 2017; EMMANUEL; ROSENLUND; JOHANSSON, 2007; KRÜGER; MINELLA; RASIA, 2011). Así como también el efecto de la forma urbana en el desempeño energético de las edificaciones (ALLEGRIANI; DORER; CARMELIET, 2012; NATANIAN; AUER, 2020; SANTAMOURIS et al., 2001).

2.2.2 Balance energético urbano

Para describir el clima en la escala del cañón urbano, es necesario entender los fenómenos físicos que en él ocurren, ya que influyen directamente en las características del microclima. Está determinado principalmente por el balance energético en la superficie, descrito por el resultado del intercambio de flujos energéticos por radiación, convección y conducción entre los elementos urbanos y la atmósfera (OKE et al., 2017), Figura 2. El mismo se puede describir a partir de la ecuación (1) (OKE, 1987).

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

Q^* - Radiación de onda corta y larga;

Q_F - Calor antropogénico;

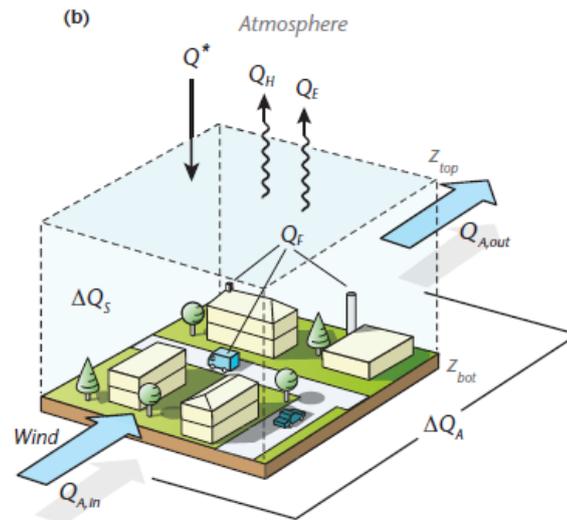
Q_H - Calor sensible;

Q_E - Calor latente;

ΔQ_S - Calor neto almacenado en el dosel;

ΔQ_A - Calor neto adicionado o sustraído por convección horizontal.

Figura 2 - Esquema del balance energético urbano



Fuente: (OKE et al., 2017)

La radiación de onda corta proveniente del sol es la principal fuente de energía en la superficie terrestre. La forma en que alcanza las superficies urbanas está dividida en radiación directa y difusa, dependiendo principalmente de las condiciones atmosféricas. Las propiedades de los materiales, absorptancia, reflectancia y transmitancia determinan en que proporción la radiación incidente es absorbida, reflejada o transmitida. Así, la cantidad de energía que es reflejada para por las superficies urbanas para la atmosfera, es determinada en dos niveles, por un lado, el albedo de los materiales individuales, y por otro, la organización espacial de los elementos urbanos, que determinan el llamado “albedo urbano” (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Por otro lado, cualquier objeto a una temperatura mayor que cero absoluto (0 K), emite radiación en diferentes longitudes de onda. El flujo de energía emitido por una superficie en una longitud de onda determinada está definido por la ecuación (2), ley de Stefan-Boltzman. Es importante destacar que este trabajo se enfocó en los flujos energéticos emitidos en la longitud de onda infrarroja o radiación de onda larga.

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2)$$

E – Flujo total de energía;

ε – Emisividad;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$);

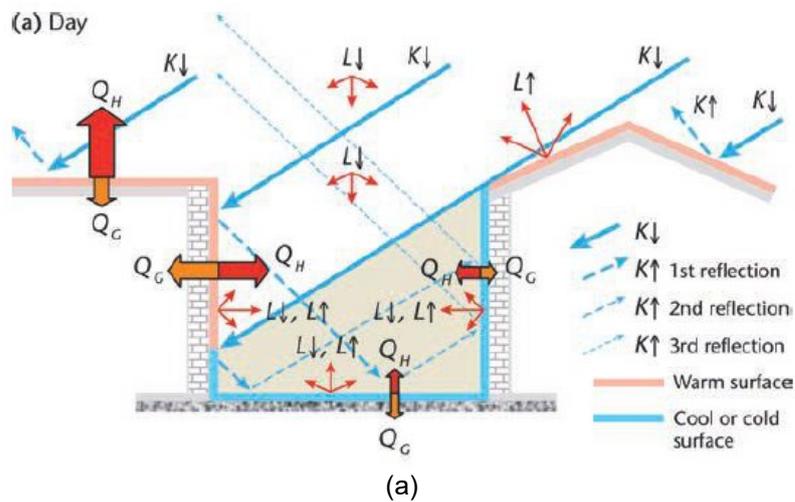
T – Temperatura;

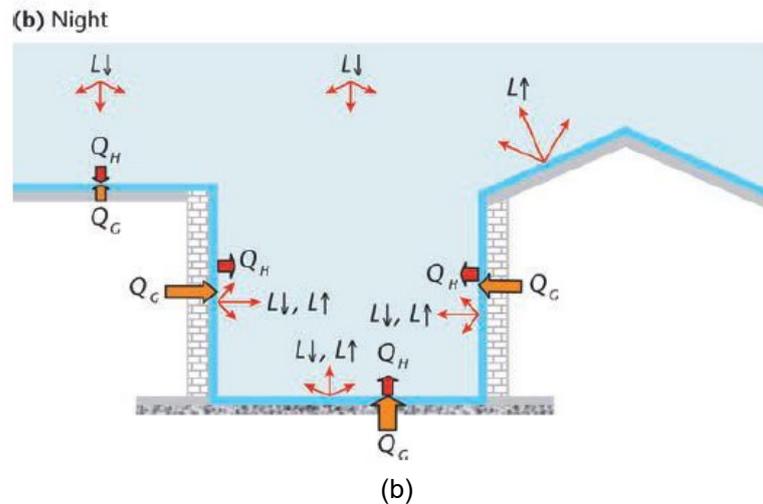
Así, el balance de radiación de cualquier superficie puede ser descrito por la ecuación (3). Donde las flechas indican cuando el flujo de energía es emitido al ambiente (\uparrow) o es absorbido en la superficie (\downarrow). En la Figura 3 se presenta un esquema de los flujos de radiación en el cañón urbano durante el día y la noche. Se observa que, durante el período diurno, los flujos están principalmente determinados por la radiación de onda corta, donde parte de la radiación es absorbida por los materiales y otra reflejada, pudiendo ocurrir múltiples reflexiones entre las superficies. Durante la noche, los flujos de radiación están principalmente determinados por la radiación de onda larga emitida desde los materiales al ambiente.

$$Q^* = K^* + L^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2)$$

Q^* – Flujo neto de energía;
 K^* – Flujo neto de radiación de onda corta;
 L^* – Flujo neto de radiación de onda larga;

Figura 3 - Representación esquemática de los flujos energéticos en las superficies del cañón urbano





(a) día y (b) noche. Fuente: (OKE et al., 2017)

Por otro lado, el calor sensible, refiere a la energía suministrada a un cuerpo sin cambio de fase o modificación de su estructura. Es la principal forma de disipación de calor en los entornos urbanos por los flujos convectivos generados por la diferencia de temperatura del aire y las superficies. Así como por los flujos turbulentos influenciados por el viento, los cuales presentan mayor dificultad para su predicción por la variación constante de velocidad y dirección. El calor latente, refiere a la energía necesaria suministrada en una sustancia para cambiar de estado o fase, por ejemplo, de sólido a líquido o líquido a gaseoso. Un ejemplo es el proceso de evaporación del agua, en cuerpos de agua, suelo húmedo o el proceso de evapotranspiración de las plantas. Por tanto, la disponibilidad de humedad afecta directamente la magnitud de los flujos de calor latente (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

El calor antropogénico, por otro lado, es producto del consumo de energía en las actividades humanas, transporte, uso de sistemas de acondicionamiento en los edificios o procesos industriales. La magnitud del calor generado depende de muchos factores, como la densidad poblacional y el uso de energía per cápita, el uso de refrigeración o calefacción en edificios de acuerdo con las características climáticas, tipos de transporte y procesos industriales (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). En su trabajo HONG et al., (2020) destacan que las emisiones de energía (calor) de los edificios puede ser hasta 2.5 veces mayor que la energía utilizada. También observaron que la energía liberada al ambiente varía de acuerdo con el uso del edificio, así como el clima y el uso de sistemas de acondicionamiento.

Así, el calor almacenado en el dosel urbano está principalmente determinado por los flujos de radiación y el calor antropogénico generado, y está vinculado a tres factores principales, propiedades térmicas de los materiales, disponibilidad de humedad y forma geométrica de los elementos urbanos (OKE et al., 2017). Por lo tanto, el factor de visión de cielo (FVC) resulta adecuado para analizar la relación entre la forma urbana y la energía emitida y recibida por las superficies. Pero es importante destacar que no puede ser tomado como único parámetro, ya que para estudios de climatología urbana más de un parámetro deben ser considerados (SALVATI et al., 2019).

2.2.3 Microclima urbano

Para este trabajo se adoptó la definición del microclima entendido como el conjunto de condiciones climáticas medidas en áreas localizadas en la capa de aire cercana a la superficie del suelo, caracterizado por variaciones rápidas tanto en la horizontal como en la vertical debido al contacto con el suelo, superficies, vegetación, humedad, entre otras (GEIGER; ARON; TODHUNTER, 1961). Definido por las principales variables, temperatura (T_{ar}) y humedad relativa (H_r) del aire, velocidad (V_v) y dirección (V_d) del viento y radiación solar directa (R_{dir}). Desde el área de la ecología entender el microclima ha sido sumamente importante por la influencia que genera en los procesos ecológicos, como la regeneración y el crecimiento de las plantas, respiración del suelo, ciclo de los nutrientes o el hábitat de la vida salvaje (CHEN et al., 1999).

Así como el microclima es responsable de los patrones ecológicos de plantas y animales, influenciando los procesos como el crecimiento y la mortalidad de organismos. Las áreas urbanas sustituyen la cobertura natural de la superficie terrestre con diferentes tipos de materiales, generando alteraciones en la radiación, la temperatura, humedad y las propiedades aerodinámicas del ambiente. Por lo tanto, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, en el área de la ecología, la influencia del microclima en los seres humanos ha sido estudiada, por ejemplo, respecto al las condiciones de confort en los espacios urbanos (NIKOLOPOULOU; LYKOUDIS, 2006), así como también el efecto del cambio climático y eventos climáticos extremos (BOUMANS et al., 2014; LUBER; MCGEEHIN, 2008), por su influencia en la salud y bienestar humano.

Para el estudio de las condiciones de confort y describir el estrés térmico de las personas, son utilizados índices biometeorológicos, definidos a partir de variables meteorológicas y parámetros termo físicos (MAYER, 1993). El índice de temperatura equivalente fisiológica (*Physiological Equivalent Temperature – PET*) es calculado a partir de las cuatro variables meteorológicas que influyen el balance energético de las personas, temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del viento y por la temperatura radiante media (TRM) (MATZARAKIS; MAYER, 1999). Describe en términos de la temperatura del aire para alcanzar condiciones de un ambiente de referencia, de una persona en el interior, sin influencia del viento y radiación solar (HÖPPE, 1999). Por otro lado, el índice de clima térmico universal (*Universal Thermal Climate Index – UTCI*), es similar al PET, pero utiliza como referencia a una persona caminando en un ambiente exterior.

Varios estudios analizaron la relación de la forma del cañón urbano y las condiciones de confort térmico de las personas. Por ejemplo, en el clima seco y cálido de Gandaya (Argelia), en el verano, fue observada una disminución de la temperatura del aire de 3°C y de 8°C en el índice PET, cuando se aumentó la relación A/L del cañón urbano de 0.5 hasta 4, considerando diferentes orientaciones (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006). En el clima tropical cálido húmedo de la ciudad de Colombo (Sri Lanka), observaron que aumentando la relación A/L, en las horas del mediodía, la temperatura del aire en el índice PET disminuye hasta 10°C y la TRM hasta 24°C (EMMANUEL; ROSENLUND; JOHANSSON, 2007). En la ciudad de San Paulo (Brasil), se observó que las diferencias de altura de los edificios y el factor de ocupación del suelo sumados pueden disminuir la TRM en hasta 14°C y la TEP hasta 7.7°C (GUSSON, 2020).

Fue observado por ANDREOU, (2013) que el confort está directamente afectado por la exposición a la radiación solar. Por lo tanto, la relación A/L y la orientación de las calles tienen un efecto significativo en las condiciones de confort de las personas. En la misma línea NG; CHENG, (2012) observaron en el clima húmedo y cálido en la ciudad de Hong Kong, que la temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación solar, son los factores que determinan el confort de las personas en los espacios exteriores. También es importante destacar que el análisis cuantitativo de los parámetros físicos ha demostrado que los parámetros microclimáticos influyen en torno al 50% del confort, teniendo gran relevancia las

condiciones psicológicas de adaptación de las personas en el ambiente (NIKOLOPOULOU; STEEMERS, 2003).

Por otro lado, fue estudiado en varios trabajos la relación entre la geometría urbana y las variables microclimáticas. Por ejemplo, ALI-TOUDERT; MAYER, (2006) observaron que, durante el día, la temperatura del aire disminuye a medida que aumenta la relación de aspecto A/L del cañón, con una diferencia máxima de 3K entre el cañón más abierto ($A/L = 0.5$) respecto al más profundo ($A/L = 4$). Identificaron que el cañón con orientación Este-Oeste (EO) con una relación $A/L = 0.5$ presentó las temperaturas más altas, mientras que con orientación Norte-Sur (NS) y relación $A/L = 4$, presentó las temperaturas más bajas. Pero al comparar cañones con la misma relación A/L observaron leves variaciones de la temperatura del aire, por lo tanto, concluyen que la temperatura del aire tiende a ser más sensible a la relación A/L que a la orientación del cañón.

En el estudio de ERELL; WILLIAMSON, (2007) observaron para el clima de Adelaida (Australia), que el cañón con orientación NS y relación $A/L = 1.35$, presentó temperaturas levemente mayores a la orientación EO, cerca del mediodía. Así también que el cañón con orientación EO, es más cálido que el NS en las primeras horas de la mañana y en las últimas horas de la tarde. Identificando que las diferencias de temperatura están definidas por la cantidad de radiación solar que ingresa al cañón. En días soleados o parcialmente nublados, la diferencia de temperatura del aire entre los cañones fue de entornos a 1.4°C , mientras que en días nublados fue de 0.2°C .

En otro estudio ALI-TOUDERT; MAYER, (2007) compararon las variaciones de la temperatura del aire en cañones asimétricos, con edificios de diferentes alturas en ambos lados de la calle. Identificaron que la orientación EO presentó temperaturas más altas, con diferencias de hasta 1.5K durante las horas de la tarde, debido a la mayor exposición a la radiación solar respecto a la orientación NS. También al variar la geometría para la misma orientación genera variaciones leves, alcanzando 0.6K el más cálido. Y que el caso con mayor FVC muestra una tendencia a enfriarse más rápido. Por lo tanto, concluyen que la temperatura del aire es poco sensible a los cambios de la geometría urbana. En otro estudio en la ciudad de Putrajay (Malasia), con clima tropical, QAID; OSSEN, (2015) analizaron diferentes configuraciones de cañones asimétricos variando la altura de los edificios en ambos lados de la calle, donde identificaron un comportamiento distinto de la temperatura

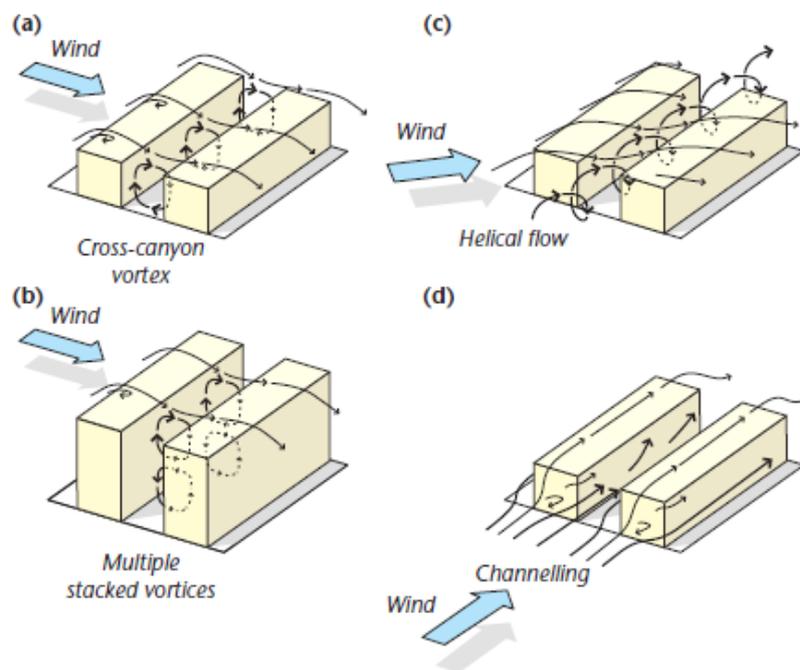
del aire durante el día y la noche cuando las edificaciones más altas se ubican del lado SE o NO de la calle. Identificando, para el clima de la ciudad, que los cañones asimétricos son más favorables que los cañones simétricos bajos para mejorar el flujo de viento y protegerse de la radiación solar.

Al analizar la distribución vertical de la temperatura del aire dentro del cañón urbano, por ejemplo, en la ciudad de Atenas (Grecia) mediante un estudio experimental, se observó muy baja estratificación de la temperatura del aire durante el día, donde las máximas no exceden los 2-3°C. Durante la noche, se identificaron variaciones menores, donde las máximas no exceden los 0.5°C, y las mayores temperaturas siempre se encuentran más cercanas al suelo, disminuyendo en función de la altura a la que se registra (SANTAMOURIS et al., 1999). En la misma ciudad TSOKA et al., (2020) analizaron el perfil vertical de la temperatura del aire, observando una desviación baja durante la noche y un pico más alto al mediodía. Generalmente la temperatura del aire disminuye a medida que se aumenta la altura de registro. La mayor diferencia fue dada por la cantidad de radiación que ingresa en el cañón, ósea por la radiación recibida por las superficies y el calor sensible liberado al ambiente.

En la ciudad de Salónica (Grecia), caracterizada por veranos cálidos e inviernos fríos, CHATZIDIMITRIOU; YANNAS, (2017) observaron a partir de registros experimentales que la geometría y la orientación del cañón presentó poca influencia en la temperatura del aire, las variaciones generalmente no son superiores a 1K. Las mayores diferencias fueron observadas en las horas del mediodía, principalmente en los cañones más abiertos. Por la noche las diferencias fueron en torno a 0.5K. Por otro lado, en su estudio observaron una importante relación de la orientación del cañón urbano y la dirección del viento, de acuerdo con si los flujos son paralelo o perpendicular al eje cañón, observando variaciones de entre 1m/s y 2.5ms. De acuerdo con ALLARD; GHIAUS; SZUCS, (2010) en cañones predominantemente normales a la dirección del viento, la generación de múltiples vórtices reduce la velocidad del aire a nivel de la calle entre 5 y 10 veces, mientras que cañones paralelos la variación vertical disminuye y se genera un flujo a lo largo del cañón con una velocidad del viento entre 40% y 70% de la velocidad del viento sobre el cañón, para relaciones A/L relativamente amplias ($A/L = 1$). Esos comportamientos fueron por ejemplo observados en el estudio experimental de SANTAMOURIS et al., (1999) en la ciudad de Atenas (Grecia). En la Figura 4 se

muestran de forma esquemática los patrones típicos de los flujos de viento en función de la orientación y dirección del viento. Por un lado, cuando el viento es perpendicular a la dirección del cañón, se genera un vórtice en el interior del cañón urbano. En cambio, cuando la dirección del viento es perpendicular al cañón, pero la altura de las edificaciones aumenta, pueden generarse dos vórtices, superior e inferior con movimientos en direcciones opuestas. Cuando la dirección del viento es en torno a 45°, se genera vórtices con movimientos helicoidales. Cuando el viento tiene la misma dirección que el cañón se produce en efecto de canal.

Figura 4 - Patrones de los flujos de viento en el cañón urbano



Fuente: (OKE et al., 2017)

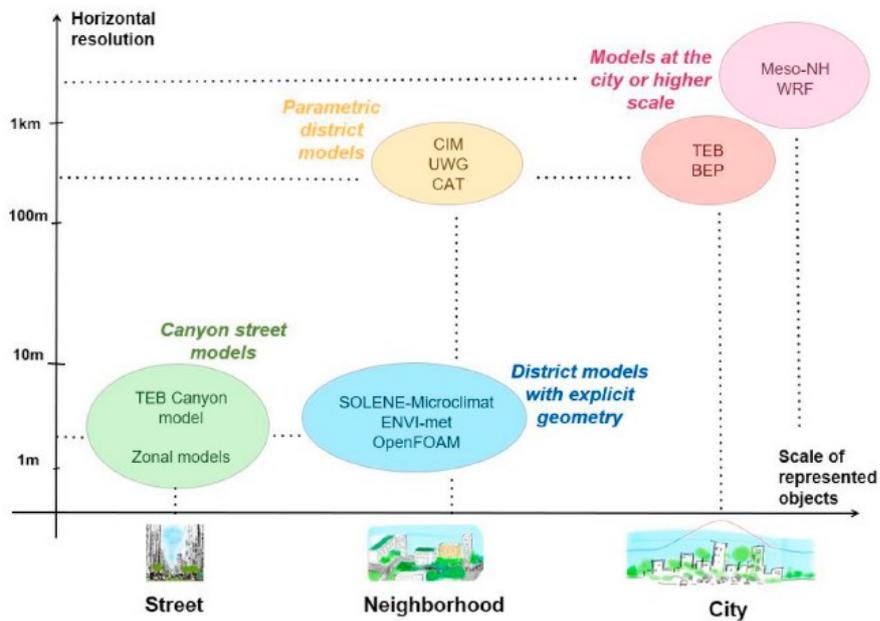
2.2.4 Modelo ENVI-met

Un modelo básicamente busca representar la realidad de forma simplificada, y generalmente pueden ser divididos en modelos matemáticos y físicos (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Para la utilización de modelos es posible definir el siguiente flujo: i) definir el propósito del modelo; ii) definición del modelo conceptual de la interacción de las variables que caracterizan el fenómeno estudiado; iii) el diseño del modelo; iv) donde es generado el modelo numérico; v) calibración o validación, comparando los resultados del modelo con observaciones

experimentales; vi) simulación de predicción, permite explorar alternativas a partir del modelo calibrado; vi) análisis de resultados e incertidumbre.

Para describir y representar el microclima urbano, debido a la compleja y gran variedad tanto de condiciones morfológicas y físicas de la ciudad, en la Figura 5 se muestran algunos de los principales Modelos Climáticos Urbanos (MCU) que permiten su representación en diferentes escalas de análisis. Se observa que modelo que permiten representar una escala de varios kilómetros, como una ciudad. En una escala de algunos cientos de metros hasta algunos kilómetros, generalmente permite representar los fenómenos meteorológicos en la capa del dosel urbano (CDU). Y, por último, con una resolución de algunos metros, los modelos permiten representar más detalladamente los procesos físicos y su interacción con las características de la superficie urbana (LAUZET et al., 2019).

Figura 5 - Clasificación de los Modelos Climáticos Urbanos de acuerdo con la escala de análisis



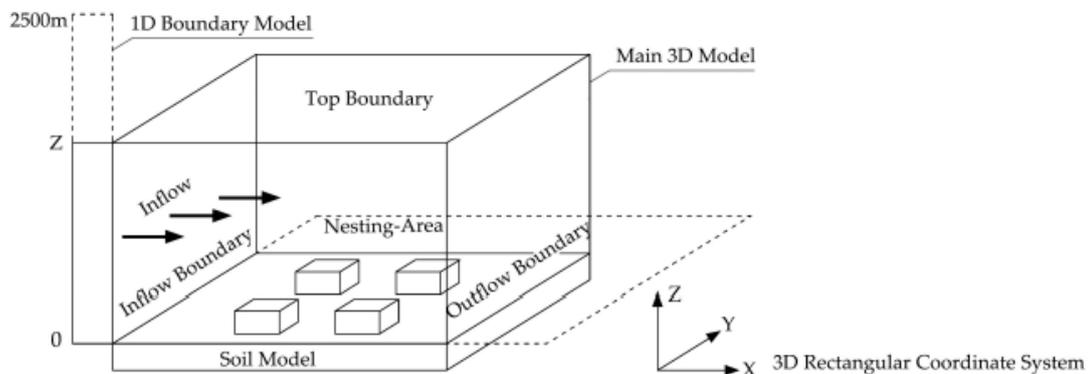
Fuente: (LAUZET et al., 2019).

Una descripción de cada modelo puede ser encontrada en (LAUZET et al., 2019). En este trabajo específicamente se presentan las principales características del modelo ENVI-met, ya que ha sido utilizado en diversas investigaciones de climatología urbana y también vinculado al estudio del desempeño energético de edificios. Permitiendo estudios en la escala de barrio y en la microescala del cañón

urbano a partir de dinámica de fluidos computacionales (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). El ENVI-met es un modelo tridimensional no hidrostático que permite simular la interacción entre las superficies urbanas, vegetación y la atmosfera, con resoluciones espaciales de 0.5m hasta 10m y temporales de hasta 10 segundos (BRUSE; FLEER, 1998).

El modelo consiste básicamente en varios modelos que interactúan entre ellos Figura 6. Por un lado, el modelo llamado unidimensional (1D) de condiciones limites, que es utilizado para definir las condiciones de inicialización del modelo y las condiciones límites del modelo tridimensional atmosférico. El cual se extiende desde el nivel del suelo ($z = 0$) hasta una altura de $H = 2500\text{m}$. Por otro lado, se define el modelo atmosférico tridimensional (3D) y el modelo del suelo.

Figura 6 - Descripción esquemática de los modelos que componen el ENVI-met

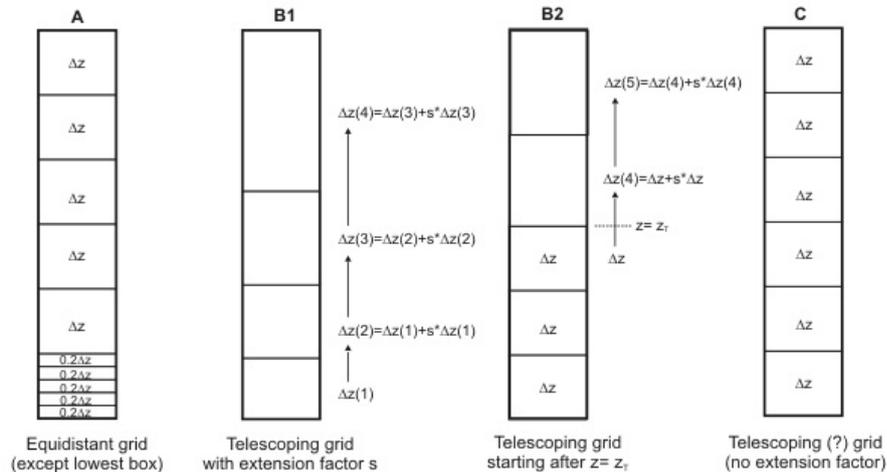


Fuente: (JIN et al., 2017)

El modelo 3D se divide en celdas rectangulares con dimensión en los ejes x - y - z . El total de celdas en los tres ejes determina el dominio del modelo. Así, los elementos del modelo se tienen que adaptar a las dimensiones de las celdas. Es importante comprender que cuanto menor es el tamaño de las celdas, mayor detalle del modelo, por lo tanto, implica mayor tiempo de simulación. Por ese motivo, el modelo permite en el eje z varias configuraciones Figura 7. La grilla equidistante, mantiene el valor de z igual en todas las celdas, pero la primera es dividida en cinco partes iguales, para conseguir mayor detalle. La grilla telescópica con factor de extensión, a partir de un factor definido aumenta el tamaño de la celda en z . La grilla telescópica a partir de una altura específica permite mantener el valor de z hasta una

determinada altura y a partir de allí aplicar el factor para aumentar el tamaño de las celdas superiores.

Figura 7 - Definición de la grilla de ENVI-met en el eje vertical



(A) Grilla equidistante, (B1) grilla telescópica con factor de extensión, (B2) grilla telescópica a partir de una altura, y (C) grilla telescópica sin factor de extensión.

Fuente: (ENVI-MET, 2021)

Las principales variables que el modelo permite simular son: velocidad y dirección del viento, temperatura del suelo y del aire, humedad del suelo y del aire, flujos turbulentos, flujos de radiación y dispersión de partículas y gases (HUTTNER, 2012). Una descripción más detallada se puede encontrar en trabajos anteriores de BRUSE; FLEER, (1998) y GUSSON, (2020).

Los cálculos del modelo incluyen:

- Flujos de radiación de onda larga y corta, incluyendo múltiples reflexiones, respecto a las construcciones, superficies y vegetación.
- Transpiración, evapotranspiración y flujo de calor sensible de la vegetación en el aire, incluyendo todos los parámetros físicos de los vegetales.
- Cálculo dinámico de la temperatura de las superficies, incluyendo techos y fachadas de los edificios.
- Intercambio de agua y calor dentro del suelo.
- Representación 3D de la vegetación, incluyendo el balance hídrico.

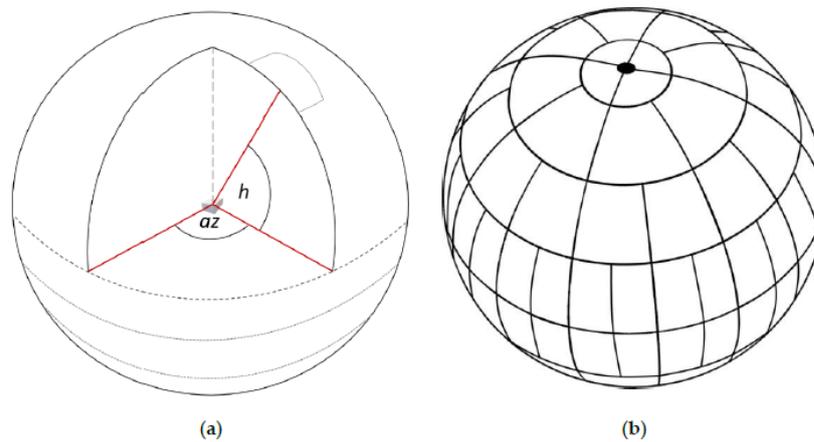
- Dispersión de gases y partículas.
- Índices biometeorológicos, como PET y UTCI.

Para inicializar el modelo y definir las condiciones límites existen dos modos, forzado simple (*Simple Forcing - SF*) y forzado total (*Full Forcing - FF*). El primero permite utilizar datos de la temperatura y humedad del aire en escala horaria, valores constantes de velocidad y dirección del viento y cobertura de nubes. Por otro lado, el FF permite ingresar todas las variables climáticas, incluyendo, temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, radiación solar o cobertura de nubes y precipitaciones, definidas cada 30 minutos (ENVI-MET, 2021).

Los flujos de viento son calculados en el modelo atmosférico a partir de un modelo CFD 3D completo, que resuelve las ecuaciones de Navir-Stokes para cada una de las celdas del modelo, incluyendo los efectos turbulentos producidos por los elementos urbanos. Este tipo de modelos permite obtener informaciones muy detalladas de los flujos en los entornos urbanos, por lo tanto, ha sido utilizado para diferentes análisis, de contaminación del aire, ventilación natural de edificios, estudios de transferencia de calor por convección, entre otros (BLOCKEN; JANSSEN; VAN HOOFF, 2012).

Respecto a los flujos de radiación, el modelo cuenta con el módulo de cálculo de radiación de alta resolución (*Indexed View Sphere - IVS*). Anteriormente el modelo realizaba una simplificación de los flujos de radiación secundarios, como son la radiación de onda corta reflejada u la radiación de onda larga emitida por los objetos, realizando un promedio para cada superficie (HUTTNER, 2012). Esa simplificación genera variaciones por ejemplo en el cálculo de la radiación y la temperatura radiante media (TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018). Por lo tanto, el módulo IVS representa las contribuciones por radiación de los objetos con cada una de las celdas del modelo (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2021). En la Figura 8 se observa una representación teórica del IVS, donde la idea fundamental es cuantificar y guardar el resultado de los intercambios de radiación para determinado ángulo de visión de la celda.

Figura 8 - Esfera de visión de la celda en el módulo IVS



Esfera de visión para una celda representando el ángulo azimutal (az) y el ángulo de altura (h). (a) Distribución individual de la cara vista por ángulo de altura y (b) muestra que el número de caras disminuye al aumentar el ángulo de altura. Fuente: (SIMON; SINSEL; BRUSE, 2021)

ENVI-met permite representar los elementos del entorno construido de forma 3D, por ejemplo, las edificaciones. Permite la definición detallada de la envolvente de los edificios, permitiendo definir los materiales individualmente, tanto en las paredes o techos, a partir de tres capas diferentes de materiales con propiedades física diferentes, como absorción, transmitancia, reflectancia, emisividad, calor específico, conductividad térmica y densidad. Así, el modelo considera la transferencia de calor a través de la envolvente utilizando el modelo de estado transitorio múltiple, utilizado en conjunto con el método de las diferencias finitas. El modelo simula el balance térmico de las superficies considerando cada celda y utilizando las condiciones del microclima cercano a la capa exterior, los efectos de la radiación solar, radiación de onda larga y flujos de viento. Información más detallada puede ser encontrada en los trabajos de FOROUZANDEH, (2021), HUTTNER, (2012) y SIMON; BRUSE, (2017).

Por último, el modelo considera la temperatura interior de las edificaciones de dos formas: a) temperatura constante a lo largo de todas las horas de simulación; b) cálculo predictivo a partir del intercambio de calor y radiación a través de la envolvente (HUTTNER, 2012). Los flujos de energía en las zonas térmicas ocurren a partir de la transferencia de calor sensible desde la capa interior de la pared y por la radiación solar directa transmitida por las ventanas (SIMON; BRUSE, 2017). A partir de las últimas versiones permite dividir el interior de los edificios en zonas térmicas.

2.2.4.1 Trabajos en ENVI-met

El ENVI-met se ha utilizado en diversos trabajos. En la mayoría se comparan los datos simulados con datos experimentales registrado, lo que permite observar la capacidad de reproducir de forma ajustada a la realidad del fenómeno que se estudia (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Para la evaluación pueden ser utilizados, por ejemplo, el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (*Root Mean Square Error – RMSE*) y el índice de ajuste (d).

En clima templado de Holanda, TALEGHANI et al., (2015) analizaron el confort térmico para cinco formas urbanas variando la orientación a partir de ENVI-met v3.1. A partir de los resultados se observa que la diferencia de temperatura del aire entre los escenarios estudiados no supera los 0.4°C . También observaron que la mayor desviación de los resultados simulados respecto a los experimentales fue de 2.5°C , donde identifican que esas variaciones pueden producirse por las diferentes condiciones de cielo, cobertura de nubes y también que la versión de ENVI-met utilizada no consideró el calor almacenado en las superficies.

En el clima tropical de la ciudad de Colombo (Sri Lanka), EMMANUEL; ROSENLUND; JOHANSSON, (2007) utilizaron ENVI-met v3.0 para analizar el efecto de diferentes opciones de diseño urbano, albedo, árboles y relación A/L del cañón, en la temperatura del aire, las superficies y las condiciones de confort exterior. Observaron una reducción de la temperatura del aire al aumentar el albedo de los materiales y con relaciones A/L más altas, pero las variaciones no superaron 1.0°C . Comparando las dos orientaciones NS y EO no se observaron grandes variaciones de la temperatura del aire, se identificó levemente una diferencia al comparar el registro en diferentes alturas, a 1.2m y la parte más alta del cañón, con una variación de 0.2°C . Identificaron una subestimación de la temperatura del aire máxima durante el día simulada respecto a la experimental, 5.0°C y 3.78°C respectivamente. Destacan la limitación del ENVI-met de no considerar la masa térmica de los edificios.

En el clima subtropical húmedo de Hong Kong, NG et al., (2012) analizaron el efecto de las áreas verdes, ubicación, cantidad y tipo, para la planificación urbana, comparando su influencia y la altura de los edificios, en la temperatura del aire a nivel del peatón. Observaron que los árboles son más efectivos que las áreas verdes con pasto para disminuir la temperatura del aire. Para bajar en 1°C se necesita

aproximadamente un 33% del área urbana cubierta por árboles. Así también que el efecto de refrescamiento está relacionado con la relación A/L. Puede haber una diferencia significativa de 0.8-1.3K en la temperatura del aire cuando se compara un área con parque respecto a áreas más edificadas cercanas. Por último, al comparar los datos simulados con mediciones experimentales instantáneas y anuales, obtuvieron un $R^2 = 0.765$ y $R^2 = 0.625$ respectivamente, por lo cual concluyen que el modelo presenta un buen ajuste y permite ser utilizado para el clima de Hong Kong, considerando la limitación de que no considera el efecto del calor antropogénico en la temperatura del aire.

En el clima subtropical de la ciudad de San Paulo (Brasil) GUSSON; DUARTE, (2016) analizaron el ajuste del modelo ENVI-met v4.0 en dos áreas de la ciudad con densidad alta (Bela Vista) y densidad baja (Brasilandia). Observaron que, a pesar de utilizar los datos registrados experimentalmente como datos de inicialización del modelo, la temperatura del aire simulada presenta hasta 3.3°C de diferencia respecto a los registros experimentales. Observa un comportamiento razonable de la temperatura en el área menos densificada, con mayor temperatura del aire durante el día y menor durante la noche. Obtuvieron para Bela Vista un $RMSE = 1.6^\circ\text{C}$, $MAE = 1,4^\circ\text{C}$ y $d = 0.85$, y para Brasilandia, $RMSE = 1.9^\circ\text{C}$, $MAE = 1.8^\circ\text{C}$ y $d = 0.92$. En su trabajo reciente GUSSON, (2020) a partir del ENVI-met v4.4.3 observó que la variación de temperatura del aire al considerar diferentes escenarios de densificación urbana fue baja. Por otro lado, utilizando el modelo *Full Forcing*, obtuvo valores de $R^2 = 0.99$ para en la temperatura del aire simulada respecto a los datos experimentales.

En el clima de la ciudad de Beijing (China) CHEN et al., (2020) analizaron el impacto de la geometría urbana en la temperatura superficial de los elementos (techo, calles y paredes en las cuatro orientaciones), a partir del ENVI-met v4.0. Observaron diferentes patrones de comportamiento de la temperatura de las superficies de acuerdo con la orientación y posición del sol, por ejemplo, la hora en que cada superficie alcanza la temperatura máxima varía. Una menor densidad y mayor altura de las edificaciones permite mayor enfriamiento de las superficies, por la sombra y la distancia entre los edificios, lo que promueve mayores pérdidas de calor. Se observó una diferencia importante, de hasta 15°C entre las superficies de los pisos más bajos y los más altos. Por ejemplo, destacan que las paredes orientadas para el norte y sur presentan una relación inversa, en la parte más baja la

temperatura es más alta, explicado por la influencia de la radiación emitida por el suelo. A partir de la comparación de los datos medidos experimentalmente y los resultados de la simulación, obtuvieron un R^2 mayor a 0.98 para la mayoría de los casos y un RMSE menor a 1.7°C en todos los componentes. Por lo tanto, consideran que el modelo permite investigar el efecto de la geometría urbana en las temperaturas superficiales de los componentes urbanos.

En la ciudad de Hanover (Alemania) evaluó la capacidad del ENVI-met 4.4.4 en predecir la temperatura superficial de los edificios, en verano e invierno. Sugiere utilizar la configuración *Full Forcing (FF)*. Mantener la temperatura interior de los edificios constante en invierno y variable en verano. Para calcular los intercambios de calor por convección utilizar el método ISO DIN 6946. Y por la influencia de la radiación de onda larga proveniente de la atmósfera, sugiere forzar la cobertura de nubes.

2.3 DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE EDIFICIOS EN ENTORNOS URBANOS

En esta sección es introducida la simulación energética de edificaciones y el efecto de las diferentes configuraciones urbanas en el desempeño energético de los edificios.

2.3.1 Demanda energética de edificaciones

Existen varios modelos físicos que permiten analizar y predecir el comportamiento termo-energético de las edificaciones, los cuales se basan en resolver las ecuaciones de transferencia de calor, donde los principales flujos presentes son la conducción a través de las paredes, la convección, la radiación de onda larga y corta y la ventilación (FOUCQUIER et al., 2013). Uno de los modelos más populares en la comunidad científica es Energy Plus, desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (*U.S. Department of Energy – DOE*). Siendo una plataforma gratuita y de código abierto, ha sido ampliamente validado por la comunidad científica.

Como fue mencionado anteriormente, los modelos energéticos de edificios (*Building Energy Modeling - BEM*), están basados en los principios de transferencia de calor, por tanto, son necesarios diversos datos de entrada para su construcción,

geometría de los edificios y elementos, materiales, datos climáticos, potencia de iluminación, potencia de equipos, sistemas de aire acondicionado, comportamiento de los usuarios, etc. La información climática es fundamental ya que directamente determina los flujos energéticos del modelo, por lo tanto, determina entre otras, el uso de energía para calefacción y refrigeración de un edificio, uno de los principales usos finales de la energía (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008).

El desempeño energético de las edificaciones varía en función de los datos climáticos utilizados (HUANG; CRAWLEY, 1996). A partir de diferentes bases de datos climáticas es posible observar variaciones en el consumo anual de energía de hasta +/- 7%, y en escala mensual las cargas térmicas del edificio pueden variar hasta +/- 40% (BHANDARI; SHRESTHA; NEW, 2012). El archivo meteorológico típico (*Typical Meteorological Year - TMY*) es uno de los formatos más utilizados (FUMO, 2014). Construido generalmente con informaciones registradas en diez o más años, seleccionando los meses más representativos. Por otro lado, el archivo *Energy Plus Weather (EPW)*, fue optimizado para las simulaciones energéticas de edificios, permitiendo incluir condiciones especiales de diseño, periodos extremos e informaciones sub horarias (CASINI, 2022).

Diversos estudios comparan el desempeño energético de edificaciones en contextos urbanos y rurales. Por ejemplo, en Roma (Italia) observaron un aumento de hasta el 46% en la demanda de energía para refrigeración, en edificios residenciales en el centro de la ciudad por causa del efecto de Isla de Calor Urbana (ZINZI; CARNIELO, 2017). En Barcelona (España) observaron un aumento de las cargas de refrigeración entre 18% y 28% en edificios residenciales, dependiendo de la intensidad de la ICU, la cantidad de ganancias solares y la temperatura de *SetPoint* de refrigeración (SALVATI; COCH ROURA; CECERE, 2017). El aumento de la temperatura en áreas urbanas mostró un aumento promedio de 17.25% de energía para refrigeración y una disminución promedio de 17.04% de energía para calefacción para el clima de 15 ciudades de Estados Unidos (SUN; AUGENBROE, 2014). En su revisión LI et al., (2019) observaron que el efecto ICU presentó un aumento promedio en la demanda energética de refrigeración de 19%, variando entre 10% hasta 120%, y una disminución promedio en la calefacción de 18.7%, variando de 3% hasta 45%. De acuerdo con SANTAMOURIS et al., (2015) uno de los principales problemas del aumento de la temperatura está relacionado a la posible demanda de energía eléctrica, donde el aumento de un grado en la

temperatura del aire puede incrementar entre un 0.5% hasta 8.5% la demanda total de electricidad, pudiendo traer consigo problemas en el suministro e infraestructura de la red.

Por otro lado, otras investigaciones presentaron el efecto de las variaciones del entorno urbano en el desempeño energético de edificaciones. En Italia CASTALDO et al., (2018) analizó el efecto de implementar medidas para la mitigación de la ICU, superficies frías (con alta reflectancia), vegetación y la combinación de ambas, en el desempeño energético de edificaciones. Identificaron un ahorro de energía anual máximo de en torno a 4-5% y durante el verano entre 10-19%, cuando son aplicadas las estrategias en conjunto.

Otros estudios observaron el efecto de la geometría urbana. En Atenas (Grecia) SANTAMOURIS et al., (2001) observó que el potencial de ventilación natural en edificaciones en el cañón urbano se reduce de forma significativa por la reducción de la velocidad del viento que se produce dentro del cañón, de hasta 10 veces respecto a áreas rurales. En su estudio GEORGAKIS; SANTAMOURIS, (2006) identificaron que el flujo de aire de espacios con ventilación unilateral y con ventilación cruzada es reducido entorno al 82% y 68% respectivamente dentro del cañón urbano.

En el norte de Europa en la ciudad de Copenhague (Dinamarca) STRØMANN-ANDERSEN; SATTRUP, (2011) analizaron la distribución de la radiación solar, los niveles de iluminación natural y el desempeño energético de edificios variando la forma del cañón urbano. Observaron que la geometría del cañón tiene un impacto relativo en el consumo de energía total, cuando es comparado con el caso sin entorno, de hasta +30% para edificios de oficinas y de +19% para edificios residenciales. Destacan que la iluminación producto de las múltiples reflexiones tiene una gran influencia en el consumo de energía, además de tener una gran influencia en la iluminación natural que reciben los pisos más bajos.

En las ciudades de Miami y Minneapolis (USA) PISELLO et al., (2012) presento el termino *Inter-Building Effect (IBE)* para describir la influencia de las edificaciones vecinas en términos de energía. Los resultados mostraron que las edificaciones generan impactos mutuos, variando la magnitud de acuerdo con el contexto climático y las estaciones. Por ejemplo, para la ciudad de Miami en el verano observaron una variación de 42% en la demanda energética, y para la ciudad de Minneapolis, en invierno la variación fue de 22%. En un estudio posterior HAN;

TAYLOR; PISELLO, (2017) analizaron detalladamente el IBE, donde identificaron que la sombra mutua entre edificaciones tiene mayor influencia en la demanda energética respecto a las reflexiones mutuas. También observaron mayor impacto en los climas cálidos.

En la ciudad de Maceió (Brasil) LIMA; SCALCO; LAMBERTS, (2019) analizaron la influencia del contexto urbano en el desempeño energético de un edificio de oficinas, a partir de las cargas de refrigeración. Estudiaron la influencia de la radiación solar con base en los valores de reflectancia de las paredes y el porcentaje de área vidriada de los elementos, y la sombra generada por la geometría del entorno. También consideraron el efecto ICU. Cuando la geometría del entorno es considerada, observan una diferencia en las cargas térmicas de refrigeración entre los pisos más bajos y los más altos, con una reducción de hasta 29% en los primeros respecto a los segundos. Y una reducción media en torno a los 16-18%. Identificaron poca variación, de 3%, cuando es considerado el efecto de la ICU, lo cual se explica debido a que el uso de las oficinas es diurno y los mayores efectos de la ICU ocurren principalmente en la noche.

Los intercambios de calor de los edificios en entornos urbanos están principalmente definidos por las múltiples reflexiones y la disminución del coeficiente convectivo por causa de la reducción de los flujos de aire (ALLEGRIINI; DORER; CARMELIET, 2012), así como la temperatura de las fachadas de los edificios también está influenciada por la distancia entre ellos (ALLEGRIINI; DORER; CARMELIET, 2015). En este sentido, algunos estudios analizaron los intercambios de energía en las superficies. En su trabajo LUO; HONG; TANG, (2020) observaron que la radiación de onda larga puede impactar en el uso de energía anual entre 0.1% hasta 3.3% en el aumento de la refrigeración, y 0.3% hasta 3.6% en la disminución de la calefacción. Observaron que la temperatura de las superficies exteriores puede variar hasta 10°C. De acuerdo con XIE et al., (2022), a partir del análisis del efecto de los intercambios de radiación de onda larga con las edificaciones vecinas en EnergyPlus, observó que las temperaturas de las superficies pueden tener una subestimación de hasta 3°C. Que la demanda de refrigeración puede ser subestimada hasta 17% y la calefacción super estimada hasta 6% de acuerdo con el clima. Y que la temperatura operativa interior media puede ser subestimada hasta 1.4°C.

Por otro lado, en su revisión MIRSADEGHI et al., (2013) observaron que la variación del coeficiente de transferencia de calor por convección en las superficies exteriores de los edificios genera grandes variaciones en la demanda energética. De acuerdo con LIU et al., (2015), observaron que un incremento en el consumo de energía de 4% para refrigeración y una reducción de 1.3% para calefacción por causa del coeficiente de transferencia de calor por convección, cuando fue variada la densidad del entorno construido de 0.04 (edificio sin entorno) para 0.44 (ciudad densificada). Identificaron variaciones máximas en la temperatura externa de las superficies de 9.1K y 3.6K en la orientación sur y norte respectivamente.

Varios estudios también han abordado el efecto del entorno urbano a partir de las condiciones micro climáticas sobre el desempeño energético de los edificios, para lo cual se presentan diferentes métodos para integrar resultados de modelos micro climáticos con modelos energéticos de edificios. En el clima cálido y húmedo de Taipéi (Taiwán) HUANG; LI, (2017) a partir del ENVI-met y EnergyPlus analizaron como afecta la forma del cañón urbano y la vegetación el desempeño energético de edificios. Identificaron que la relación A/L de cañón tiene el mayor impacto en el consumo de energía para refrigeración, seguido por la orientación y por la densidad de vegetación en la calle. El mayor consumo de energía fue observado en el cañón con orientación N-S, en torno a los 16.9% más que SO-NE. Edificios en cañones con A/L = 0.5 consumen 37.13% más que con A/L = 2.0. Sugieren que los cañones con poca profundidad, donde los propios edificios no generan suficiente sombra, la vegetación en la calle mejora el consumo energético de los edificios. Lo cual es consistente con las observaciones en el microclima en la investigación de NG et al., (2012), donde observó que los árboles tienen mayor influencia en cañones más amplios, por ejemplo, menores a A/L = 1.

Por otro lado, en la ciudad de Nanjing (China) ZHANG; GAO, (2021) observaron que considerar el efecto del microclima urbano en la simulación energética puede presentar una diferencia de hasta 23.4% en las cargas térmicas. A partir del análisis correlativo entre la temperatura del aire y la humedad relativa con la refrigeración y calefacción, observó que la refrigeración esta correlacionada positivamente con la temperatura del aire y negativamente con la humedad relativa. La calefacción mostró un comportamiento contrario, negativamente correlacionada con la temperatura del aire y positivamente con la humedad relativa.

2.3.2 Simulación energética integrada

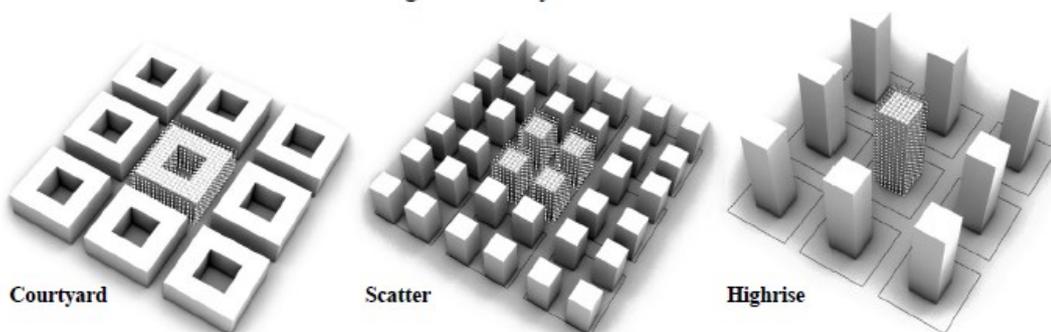
De acuerdo con la influencia que genera el microclima en el desempeño energético de los edificios, algunos autores proponen algunos métodos para integrar el modelo microclimático de ENVI-met con EnergyPlus. En su trabajo YANG et al., (2012) presentaron un método para integrar los resultados del ENVI-met con la simulación energética de edificios en EnergyPlus mediante la plataforma *Building Controls Virtual Test Bed (BCTVB)*. Para la integración considera todas las variables microclimáticas, radiación solar, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación de onda larga. El método propone a partir de los resultados horarios del ENVI-met en fachadas del edificio, integrarlos en cada time step del EnergyPlus a través de la plataforma BCTVB. Observaron una reducción de 18.8% en las cargas de refrigeración cuando fueron consideradas las obstrucciones del entorno urbano. Una reducción de 10.6% en las cargas de refrigeración fue observada considerando el microclima urbano, incluyendo radiación solar, radiación de onda larga, temperatura y humedad del aire y velocidad del viento en la fachada de los edificios. Y por otro lado observaron un aumento de 0.3% en la calefacción considerando todos los factores anteriores.

En el clima mediterráneo de la ciudad de Tel Aviv (Israel) NATANIAN; ALEKSANDROWICZ; AUER, (2019) realizaron un estudio paramétrico de varias tipologías urbanas utilizando la herramienta *Grasshopper* con un total de 1920 iteraciones. Para cada iteración fueron evaluados los parámetros de los edificios (distancia entre edificios, *Floor Area Ratio – FAR* y orientación), para edificios residenciales y escritorios. Aprovechando el ambiente paramétrico del *Grasshopper* y las posibilidades que ofrece el *Honeybee* y *Ladybug*, fue analizada la iluminación natural, generación de energética fotovoltaica y demanda energética, considerando cinco escenarios urbanos. Descubrieron que la eficiencia de las configuraciones urbanas espaciadas en todas las tipologías y usos, fueron consideradas secundarias respecto a los beneficios de iluminación natural y rendimiento energético de la misma configuración. Observaron que mayor área vidriada mejora los niveles de iluminación considerablemente y reduce las cargas térmicas de iluminación artificial, pero aumenta las cargas de refrigeración y reduce el potencial de producción de energía fotovoltaica en las fachadas. Considerando un *FAR* alto y menor distancia

entre los edificios, reduce las cargas térmicas de refrigeración además de la iluminación natural y la producción de energía fotovoltaica.

En otro trabajo de los autores, NATANIAN et al., (2019) presentaron un método para unir los resultados microclimáticos de ENVI-met con la simulación energética de edificios utilizando *Grasshopper*. Consideraron la temperatura y humedad del aire y el punto de rocío frente a la fachada de los edificios, calculando un promedio de cada punto y posteriormente esos datos horarios son utilizados para modificar el archivo EPW original para la simulación energética. La radiación directa y difusa fue mantenida igual al archivo EPW original. La demanda de refrigeración fue calculada con *Honeybee* para tres escenarios urbanos Figura 9. El archivo EPW modificado presento un aumento de la temperatura del aire por la noche de hasta 3°C, pero con una caída de hasta 1.5°C durante el día. Identificaron una tendencia de que cuando el A/L aumenta se observa mayor intensidad de la ICU. También aumento en la demanda de refrigeración de hasta 49% más cuando fue utilizando el archivo EPW modificado. Los autores concuerdan que el flujo de trabajo funciona, pero son necesarios aún más estudios para su aplicación, considerando otros parámetros.

Figura 9 - Escenarios urbanos considerados



Fuente: (NATANIAN et al., 2019)

En su trabajo TSOKA et al., (2018) presentan un método para la generación de un archivo climático EPW anual, modificado a partir de las variaciones microclimáticas en el cañón urbano del ENVI-met. La novedad del método es la utilización de la herramienta *Meteonorm*¹, que permite a partir de la selección de 12 días representativos, uno para cada mes del año, permite mediante una distribución

¹ <https://meteonorm.com/en/>

estadística de las variables meteorológicas (temperatura de bulbo seco, humedad relativa del aire, radiación global y velocidad del viento), generar series de datos horarias anuales. Los resultados mostraron una desviación diaria de hasta 1.0°C en febrero y 0.75°C en julio respecto a los datos de referencia. Así también que la velocidad del viento dentro del entorno urbano es menor respecto a las áreas de referencia.

En la ciudad de Mendoza (Argentina) BALTER et al., (2021) evaluaron el efecto de los árboles en el desempeño termo-energético de una edificación en altura. El método propone la integración de los resultados del modelo ENVI-met en el EnergyPlus. Utilizaron dos métodos para la integración, por un lado, a través de la configuración *RunPeriod*, utilizando el archivo climático anual EPW, en el cual se seleccionó un período específico para simular, donde se repitieron los datos en un período de 10 días antes para conseguir una estabilización del modelo. Por otro lado, mediante un día de diseño se ingresaron manualmente los datos. A partir de los resultados del ENVI-met las variables consideradas fueron: radiación global y radiación difusa sobre superficie horizontal, temperatura de bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad de viento. Obtuvieron un alto grado de ajuste en los resultados, con diferencias de 0.50°C en la temperatura del aire interior considerando los datos microclimáticos obtenidos del ENVI-met. Observaron una diferencia en los resultados comparando los dos métodos, debido a que utilizando la configuración *RunPeriod* además de considerar la radiación difusa y directa, considera la radiación directa normal al haz, así el EnergyPlus consigue reproducir mejor el efecto de la sombra.

2.4 EL CONTEXTO DE URUGUAY

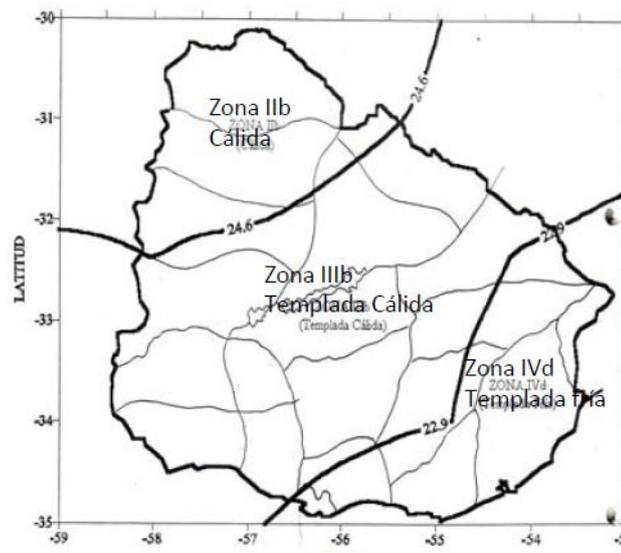
En esta sección se presenta el contexto de Uruguay. Se presenta el contexto climático de Uruguay y las características urbanas de la ciudad de estudio.

2.4.1 El clima

Según la clasificación de Köpper, Uruguay corresponde con la clasificación cfa: c, por ser templado y húmedo; f, debido a que tiene precipitaciones a lo largo de todo el año; y a, porque la temperatura del mes más cálido es superior a 22°C. Con

base en la norma de Zonificación Climática UNIT 1026:99, desarrollada por el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, el territorio uruguayo se divide en tres zonas, Figura 10: Zona II b cálida; Zona III b templada cálida; y Zona IV templada fría.

Figura 10 - Zonificación climática de Uruguay de acuerdo con la UNIT 1026:99



Fuente: UNIT 1026:99

La ciudad de Montevideo está localizada en la Latitud $34^{\circ}52'60''$ Sur y Longitud $56^{\circ}10'0''$, en la zona IV templada fría de acuerdo con la clasificación UNIT 1026:99. Por la cercanía con el Río de la Plata el clima presenta influencia marítima. En el Cuadro 1 se presentan las estadísticas climáticas del período 1991-2020 del Instituto Nacional Uruguayo de Meteorología para la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto internacional de Carrasco. Se observa una temperatura media anual de 16.8°C , con máximas medias anuales de 21.1°C , alcanzando en el mes de enero 27.3°C . Mínimas medias anuales de 12.4°C , alcanzando 6.6°C en el mes de julio. Por otro lado, se observan temperaturas máximas absolutas anuales de 39.8°C , mínimas absolutas anuales de -4.5°C . Una humedad relativa media anual de 75%. Velocidad media anual del viento de 5.7m/s.

Cuadro 1 - Estadísticas climáticas Montevideo

| Estación Meteorológica: Carrasco (Período 1991 - 2020) | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ubicación: -34.8328 -56.0126 | | | | | | | | | | | | | |
| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC | ANUAL |
| TME D | 22.6 | 22.3 | 20.8 | 17.7 | 14.4 | 11.5 | 10.6 | 12.1 | 13.4 | 16 | 18.6 | 21.2 | 16.8 |
| TX | 39 | 37.8 | 35 | 35 | 29.2 | 28.2 | 28.6 | 33.2 | 32.1 | 33.6 | 35.6 | 39.8 | 39.8 |
| TN | 9.5 | 8 | 7.4 | 2.9 | 0.9 | -4.5 | -3.1 | -2 | 0.6 | 1.8 | 3.6 | 7 | -4.5 |
| TXM | 27.3 | 26.7 | 25.2 | 21.9 | 18.5 | 15.6 | 14.5 | 16.5 | 17.6 | 20.2 | 23.2 | 26 | 21.1 |
| TNM | 17.9 | 17.9 | 16.4 | 13.5 | 10.3 | 7.4 | 6.6 | 7.7 | 9.2 | 11.7 | 13.9 | 16.3 | 12.4 |
| HR | 69 | 72 | 73 | 76 | 79 | 82 | 82 | 77 | 75 | 73 | 70 | 68 | 75 |
| P | 1011.2 | 1012.4 | 1014.1 | 1015.6 | 1016.2 | 1017.7 | 1018.3 | 1018.2 | 1018.4 | 1015.4 | 1013.2 | 1011.8 | 1015.2 |
| HS | 297.4 | 236.7 | 237.7 | 190.4 | 171 | 142.4 | 154.5 | 172.6 | 208.2 | 242.6 | 250.3 | 291.7 | 2595.5 |
| PV | 19.1 | 19.3 | 17.7 | 14.9 | 12.5 | 10.7 | 10.5 | 10.5 | 11.4 | 13.1 | 14.8 | 17.1 | 14.3 |
| VEL | 6.1 | 5.7 | 5.5 | 5.2 | 5.2 | 5.5 | 5.6 | 5.6 | 6.1 | 6 | 6 | 6.1 | 5.7 |
| RR | 92 | 92 | 106 | 87 | 90 | 79 | 89 | 92 | 93 | 107 | 94 | 78 | 1098 |
| FRR | 6 | 6 | 7 | 6 | 7 | 7 | 8 | 6 | 6 | 7 | 7 | 6 | 79 |
| TMED Temperatura media, mensual o anual (°C) TX Temperatura Máxima absoluta del período, mensual o anual (°C) TN Temperatura Mínima absoluta del período, mensual o anual (°C) TXM Temperatura Máxima media, mensual o anual (°C) TN Temperatura Mínima media, mensual o anual (°C) HR Humedad Relativa media, mensual o anual (%) P Presión atmosférica (al nivel medio del mar), media mensual o anual (hPa) HS Tiempo de insolación directa, acumulada por mes, media anual o mensual del período (hrs) PV Presión del vapor, media mensual o anual (hPa) VEL Velocidad (del viento horizontal), media mensual o anual (m/s) RR Precipitación acumulada por mes, media mensual o anual del período (mm) FRR Días con precipitación >= 1mm, media mensual o anual | | | | | | | | | | | | | |

De acuerdo con PICCIÓN et al., (2009) el clima de la ciudad de Montevideo presenta periodos de calor cortos de 127 días, con amplitudes térmicas mayores que en el periodo frío. Presenta temperaturas medias en el verano de 22.5°C y de 10.7°C en el invierno. La amplitud media anual es de en torno a los 9.0°C. De acuerdo con los rangos de confort (18°C hasta 26°C), en el período frío la temperatura del aire exterior está más alejada. La humedad relativa en el invierno alcanza una media de 82%, con valores máximos medios de hasta 97%, lo que determina inviernos húmedos. En el verano la humedad relativa media es de 67%. Por otro lado, respecto a la radiación solar, varía la distribución de días cubiertos y soleados, con

niveles máximos de radiación en el mes de enero y mínimos en el mes de junio. La velocidad del viento es estable a lo largo del año, variando entre 3.4m/s y 4.2m/s, en el período cálido con mayor frecuencia desde la orientación Sureste (SE) y en el periodo frío desde el Noreste (NE).

2.4.2 Contexto histórico – urbano de la ciudad de Montevideo

Uruguay es un país con una población de aproximadamente 3.337.000 habitantes. Principalmente su distribución geográfica es de carácter urbano, con 93% en centros urbanos y 7% en zonas rurales. Montevideo es la capital y la ciudad con mayor población con 1.300.000 habitantes, donde el 96% vive en la ciudad.

El origen de la planificación de la ciudad de Montevideo fue a partir del ex novo Montevideo, como colonia del imperio español, que caracteriza el período 1724 – 1890. Basado en el modelo Indiano², el núcleo está conformado por manzanas organizadas ortogonalmente alrededor de la plaza, originalmente amurallada. A partir de la demolición del muro, la ciudad tuvo una expansión notoria. En el año 1885, fue creada la «Ley de Construcciones», donde las construcciones privadas comienzan a estar condicionadas por los espacios públicos, la movilidad, higiene, seguridad, entre otras. Destaca de la ley la limitación de las alturas de las edificaciones de acuerdo con el ancho de la calle y su alineación.

En el período de 1930 a 1980, fue retomada la idea de planificación con fin regulador de la ciudad. Fue definido en términos generales la organización del crecimiento urbano, considerando las modificaciones de la morfología del tejido urbano consolidado, incorporando el crecimiento de la ciudad en altura. Fueron establecidas las ordenanzas de higiene habitacional, para mejorar la salubridad de la población, modificando la forma de las manzanas en búsqueda de mayor higiene.

En el año 1946 fue aprobada la «Ley de División Horizontal de la propiedad» N°10.751, acentuando la diferencia en el valor de suelo, aumentando el precio en las áreas más densificadas, lo que generó mayor especulación inmobiliaria. Además, promovió la construcción de edificaciones en altura generando modificaciones en la morfología en algunas áreas de la ciudad. En el año 1956 fue encargado el estudio del Plan Director para la ciudad de Montevideo. Incorporando conceptos de planificación

² Modelo de las Leyes de Indias

basados en aspectos cuantitativos, medibles (división del territorio, altura de edificios, porcentaje de ocupación del suelo, etc.), plantando una visión jerárquica del territorio.

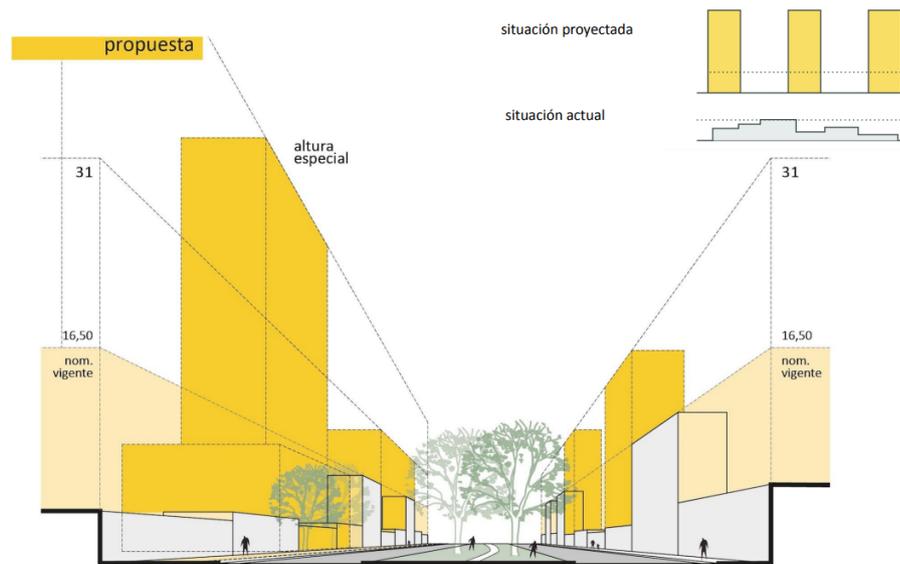
A partir de la creación de la «Ley Nacional de Vivienda» N°13.728, mejoro el acceso a la vivienda con gran inversión pública, generando transformaciones en áreas específicas de la ciudad, creando conjuntos habitacionales con una imagen del urbanismo de los CIAM³, por la repetición de bloques. Edificios de apartamentos en altura entre medianeras, con ubicación dispersa, pero principalmente localizados sobre las principales vías de circulación e en las áreas con mayor valor inmobiliario.

Finalmente, en el año 1996 comenzaron a trabajar en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Montevideo 1998-2005. Dentro de los objetivos generales, propone un desarrollo armonioso y sustentable del territorio. Entre otros, ordenando las actividades con impacto físico, con el objetivo de mejorar las condiciones de vida y el bienestar de los habitantes. Evitando exposiciones innecesarias, preservando las condiciones naturales del suelo, las características paisajísticas y patrimoniales arquitectónicas y urbanísticas. Además, para los fines de este trabajo es importante destacar los objetivos particulares respecto a la estimulación de la densificación urbana, recuperación de zonas centrales de la ciudad, abordando el concepto de la densificación urbana como una idea de desarrollo sostenible de la ciudad.

Recientemente fue aprobado en la ciudad de Montevideo el nuevo Decreto N°37.912, modificando principalmente la altura máxima permitida para la construcción de edificios en áreas de promoción de la ciudad. Tiene el objetivo de ser un incentivo para el desarrollo urbano sustentable, estimular la inversión privada y generación de mano de obra. La altura máxima permitida de los predios frentistas a las avenidas comprendidas en el Decreto se modifica, permitiendo la construcción hasta los 31m, en la mayoría de los casos, proponiéndose así una modificación de la morfología urbana en esas áreas de la ciudad Figura 11.

Figura 11 Esquema de la propuesta morfológica del Decreto N°37.912

³ CIAM – Congreso Internacional de Arquitectura Moderna



Esquema de los cambios morfológicos posibles a partir del nuevo Decreto N°37.912.
Fuente: Intendencia de Montevideo.

2.5 COMENTARIOS FINALES DE LA SECCIÓN

En este capítulo se presentó la revisión de literatura que permitió abordar el tema de la investigación y la definición de la metodología para alcanzar los objetivos propuestos. Se aclara que no es una revisión de todos los estudios hasta la actualidad, ya que, de acuerdo con las búsquedas en las bases de datos, el número de publicación es grande, por lo tanto, es necesario realizar una revisión sistémica detallada. Fueron utilizados diferentes términos para la búsqueda en la base de datos de Scopus: *“ENVI-met”, “Envimet”, “microclima”, “urban microclimate”, “urban form”, “morphology”, “canyon”, “Building performance simulation”, “coupling”*.

Primeramente, son presentados algunos de los principales conceptos o términos utilizados para describir la forma urbana. Fueron definidos los principales conceptos del clima urbano, sus variables y cómo el clima es afectado por los entornos urbanos. Se observa que entender el balance energético urbano es fundamental, por lo tanto, es necesario describir la morfología urbana, ya que afecta directamente el balance y el microclima urbano. La orientación y la forma del cañón urbano son dos descriptores fundamentales en los intercambios de radiación de onda larga y corta. Así, se presenta el ENVI-met, uno de los modelos que ha sido utilizado y validado ampliamente por la comunidad científica, basado en CFD

permite analizar las variaciones microclimáticas a partir de diferentes configuraciones urbanas.

Por otro lado, se introduce el tema de la simulación energética de edificios con EnergyPlus. Varios trabajos muestran como la forma del entorno urbano y las variaciones climáticas generan modificaciones en las cargas térmicas de los edificios, por ejemplo, aumento de las cargas de refrigeración en climas más cálidos. Por otro lado, el entorno urbano genera variación en los intercambios de radiación onda corta y larga, así como los intercambios por convección por causa de la reducción de los flujos de viento.

Algunos estudios proponen métodos para unir los datos obtenidos a partir de herramientas de simulación micro climática en la simulación energética de edificios. El método principal observado fue mediante la modificación del archivo climático que es utilizado para la simulación energética en EnergyPlus, a partir de los datos micro climáticos resultado del ENVI-met. También se destaca la posibilidad de integrar los dos modelos en el entorno de Grasshopper, permitiendo un flujo de trabajo, hasta una exploración paramétrica. Uno de los principales desafíos es que debido a que la simulación micro climática con ENVI-met está basada en la dinámica de fluidos CFD, los tiempos de simulación generalmente no permiten más de tres días. Por lo tanto, eso podría ser una limitación para la simulación energética de edificios, donde generalmente se estudia de forma anual.

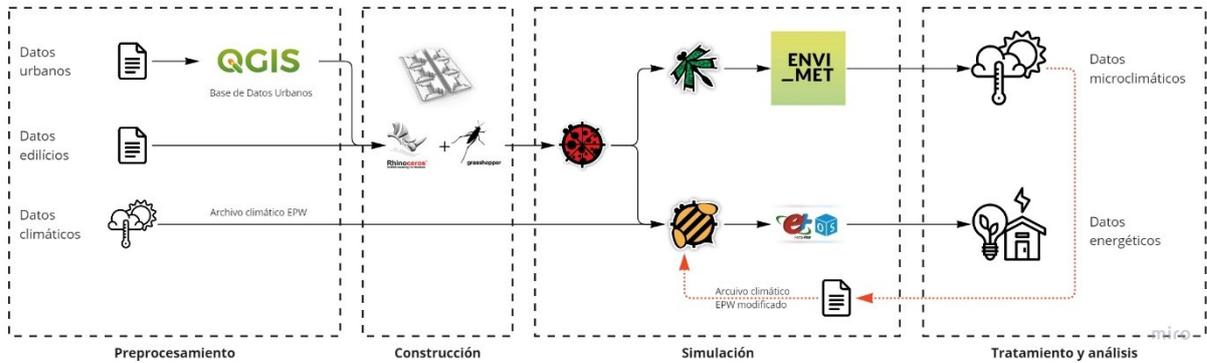
3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos del trabajo fue desarrollada una investigación de tipo explicativa, basada en un diseño no experimental y de carácter transversal, porque se realiza para un período concreto.

De acuerdo con el flujograma presentado en la Figura 12, la metodología es dividida en cuatro fases generales. Se inicia con la fase de preprocesamiento, donde es realizado el relevamiento y sistematización de informaciones, así como la caracterización del área de estudio a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG). En la segunda fase, de construcción, son definidos y generados los modelos morfológicos urbanos y del edificio de análisis. En la tercera fase, de simulación computacional, consiste en la definición y configuración del modelo micro climático en ENVI-met y energético de edificios en EnergyPlus. Así mismo en esta

fase también es definida la integración de ambos modelos. En la cuarta fase, de tratamiento y análisis, son analizados y discutidos los resultados.

Figura 12 Flujograma de la metodología

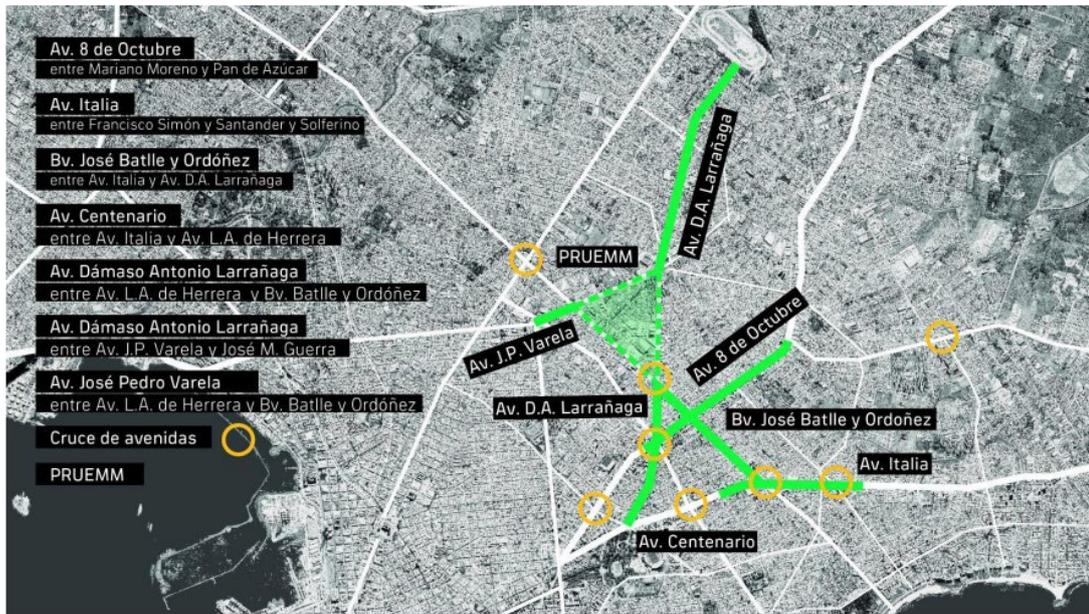


Fuente: Elaborado por el autor.

3.1 PREPROCESAMIENTO

Debido al foco de este trabajo, donde se analiza el efecto de la variación de la altura de las edificaciones en el cañón urbano, se optó por utilizar un caso teórico con base en las características urbanas de un área de la ciudad de Montevideo. El mismo se definió a partir del nuevo Decreto N°31.912, donde se seleccionó el tramo de la avenida 8 de octubre, entre las calles Merino Moreno y Pan de Azúcar, Figura 13. En este caso, se observa que la alteración de la altura máxima permitida por el nuevo Decreto respecto a la permitida anteriormente no es significativa, ya que los predios frentistas a esta avenida ya permitían la construcción de edificaciones hasta los 27 metros de altura, y actualmente el nuevo Decreto permite 31 metros. Pero, cuando se compara respecto a las otras avenidas, se observa que tiene el menor ancho de calle, 24 metros, mientras que las demás se encuentran en torno a los 45 metros y 50 metros, con presencia de áreas verdes. Así también de acuerdo con el recorrido visual de la zona realizado con la herramienta *Google Maps – Street View*, se puede identificar que las edificaciones generalmente no cuentan con más de 2 pisos, Figura 14 (a). Aun así, existen algunas edificaciones con mayor altura ya construidas sobre la avenida Figura 14 (b).

Figura 13 Esquema de las avenidas comprendidas en el Decreto N°37.912



Fuente: Intendencia de Montevideo

Figura 14 Imagen del perfil de la avenida de estudio



(a)



(b)

(a) Imagen general del cañón estudiado, e (b) edificaciones con mayor altura ya existentes.

Fuente: Google Maps.

Debido a que en este trabajo no fue realizado un estudio experimental o relevamiento *in situ*, para describir la altura promedio actual de las edificaciones, fue desarrollado un método a través de información espacial pública disponible. Para lo cual se consultó el Sistema de Información Geográfica de la Intendencia de Montevideo⁴ (SIG-IM), a partir del cual se obtuvo la información georreferenciada de todos los predios de la ciudad de Montevideo.

En esta fase se trabajó con el software QGIS, sistema de información geográfica libre de código abierto. Entre las diversas posibilidades permite trabajar con formatos de archivo raster o mapas de bits y vectoriales, así como también con

⁴ <https://sig.montevideo.gub.uy>

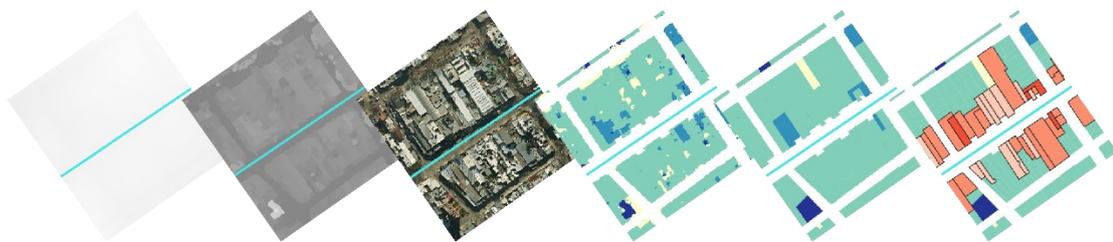
bases de datos. De las principales aplicaciones destaca la posibilidad de visualizar, generar y diseñar mapas, así como analizar datos georreferenciados espacialmente.

A partir del SIG-IM, se obtuvieron las informaciones de todas las parcelas de Montevideo en formato *.shp* (*shape file*), adecuado para trabajar en QGIS. Específicamente fue seleccionado el conjunto de datos «Información Catastral⁵», donde entre otros, dispone de los siguientes datos:

- Área total de la parcela «AREATOT»
- Categoría del suelo (Urbano, Suburbano y Rural) «CATEGORIA»
- Retiro obligatorio de la edificación «RETIRO»
- Altura máxima permitida de la edificación «ALTURA»
- Factor de ocupación (FOS) «FOS»

Por otro lado, a partir de las imágenes de cobertura nacional de Uruguay, del levantamiento aéreo fotogramétrico de uso libre disponible en la web de Infraestructura de Datos espaciales (IDEuy)⁶. Específicamente se utilizó el Modelo Digital de Terreno⁷ (MDT) y el Modelo Digital de Superficie⁸ (MDS). Básicamente el primero permite representar la topografía del terreno, y el segundo, además de la topografía, también todos los elementos en la superficie de la tierra (edificios, árboles, estructuras, etc.). La información de esos productos está representada en formato raster *.tiff* (*Tagged Image File Format*), donde cada píxel de la imagen contiene información, correspondiente con la altura del elemento. De esta forma es posible tener una aproximación de la altura de las edificaciones, Figura 15.

Figura 15 Esquema general del procesamiento en QGIS para la estimación de las alturas aproximadas de las edificaciones en el área de estudio



⁵<https://geoweb.montevideo.gub.uy/geonetwork/srv/es/metadata.show?uuid=6b49748c-6fb7-41e4-9540-29656de8ad74>

⁶ https://visualizador.ide.uy/ideuy/core/load_public_project/ideuy/

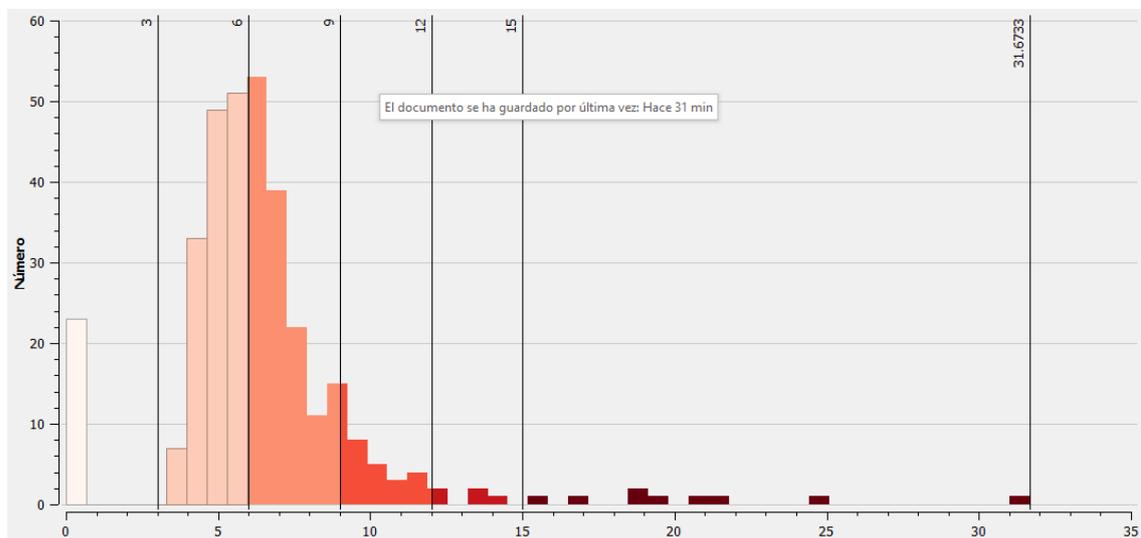
⁷<https://visualizador.ide.uy/geonetwork/srv/api/records/5a232406-7c67-f54b-b728-5d3ffecf63c6>

⁸<https://visualizador.ide.uy/geonetwork/srv/api/records/35f11141-3046-c94c-991b-b292c8fcd753>

De izquierda a derecha se muestra: Modelo Digital de Terreno (MDT); Modelo Digital de Superficie (MDS); Imagen raster; Reclasificación de los píxeles del raster de acuerdo con el valor de altura; Reclasificación de las parcelas por altura estimada a partir del promedio del valor de todos los píxeles dentro de la parcela; y Reclasificación de las parcelas sobre la avenida de estudio.
Fuente: Elaborado por el autor.

Por último, para estimar la altura de los elementos construidos dentro de cada parcela se realizó un promedio del valor de cada píxel dentro de la parcela. Así en la Figura 16 se presenta la distribución de las alturas medias de cada parcela frentista a la avenida 8 de Octubre. Los datos fueron clasificados a partir de 6 calases, [0-3m), [3-6m), [6-9m), [9-12m), [12-15m) e [\geq 15m], donde “[” significa incluido y “)” no incluido. Esos grupos fueron considerando 3 metros como altura promedio de piso a techo. Se observa que la mayoría de las parcelas presentan alturas en torno a los 3 y 9 metros, pero más próximo a los 6m. Es importante aclarar que se aplicaron algunos filtros previos para eliminar el mayor ruido posible, ósea píxeles con datos de elementos que no fuesen edificaciones.

Figura 16 Distribución de la altura promedio de las parcelas frentistas a la avenida de estudio



Fuente: Elaborado por el autor.

El método aplicado en esta fase permitió un análisis más detallado del área de estudio para obtener información base para la construcción de uno de indicadores de la forma, la relación del cañón urbano A/L. Además, en conjunto con el procesamiento de imágenes satelitales permitió la caracterización del área de estudio y la construcción inicial de una base de datos urbana (BDU) del área, la cual

debe ser ampliada, ya que permite trabajar y comprender rápidamente la forma urbana mediante un análisis remoto.

3.2 CONSTRUCCIÓN

En esta fase son expuestos los procedimientos para la definición y construcción de los escenarios geométricos urbanos que son analizados. Se optó por el uso del software Rhinoceros, ya que permite trabajar en el ambiente de Grasshopper. Como fue observado en otros trabajos, por ejemplo: (NATANIAN, 2020; PACIFICI, 2019), este entorno permite gran flexibilidad, tanto para la construcción de modelos geométricos, estudios paramétricos, análisis energético y microclimático, etc. Dentro de Grasshopper se utilizó el complemento Ladybug 1.4, por la capacidad de visualización y análisis de datos climáticos; Honeybee 1.4, para la interacción entre la geometría 3D generada en Grasshopper con el modelo de simulación energética de edificios Energyplus/OpenStudio; por último, el Dragonfly 0.69, que permite la interacción de la geometría generada con el modelo microclimático ENVI-met. Información más detallada de las herramientas puede ser encontrada en: www.ladybug.tools/.

Debido a que el trabajo busca generar resultados generales a partir de modelos teóricos basados en datos urbanos de la ciudad de Montevideo, se implementó en Grasshopper el complemento *DeCodingSpace* (ABDULMAWLA et al., 2017), desarrollado por el *Computational Planning Group (CPLan)*, compuesto por varias instituciones académicas. Es un conjunto de componentes de análisis y generativo para la planificación urbana y de arquitectura, que permite, entre otras funciones, la generación aleatoria de formas urbanas con base en parámetros predefinidos por el usuario. En este caso fueron utilizados parámetros fijos obtenidos del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la ciudad para el área de estudio, presentados en la Tabla 1.

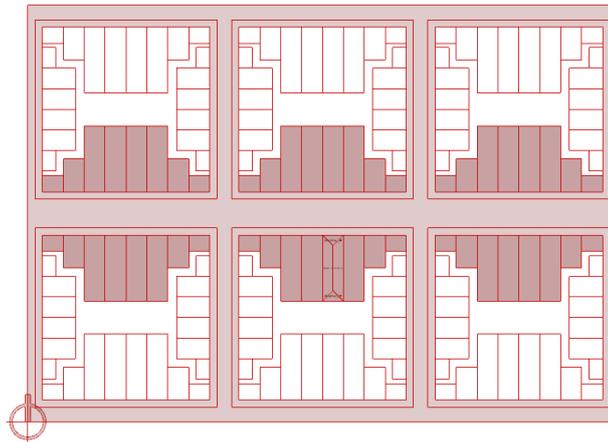
Tabla 1 Parámetros urbanos fijos

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------|
| Tasa de ocupación (TO) [%] | 80 |
| Retiro mínimo frontal [m] | 0 |
| Retiro mínimo lateral [m] | 0 |
| Retiro mínimo posterior [m] | 4 |

Fuente: Elaborado por el autor basado en (POT, 1998) y (IM, 2021)

A partir de la definición de los parámetros fijos en *DeCodingSpace* se dividieron las manzanas con una medida base de 100m x 100m y se generaron las parcelas. A partir de las parcelas la herramienta permite con base en los parámetros definir el área edificable de cada una. Así en la Figura 17 se presenta la planta urbana generada, donde son definidas dos cuadras a cada lado de la vía central, la cual representa la avenida 8 de Octubre. Los predios frentistas, resaltados en gris, representan los afectados por el nuevo Decreto y son los que componen el cañón urbano de estudio.

Figura 17 Planta urbana de las manzanas del escenario analizado



Fuente: Elaborado por el autor con la herramienta *DeCodingSpace*.

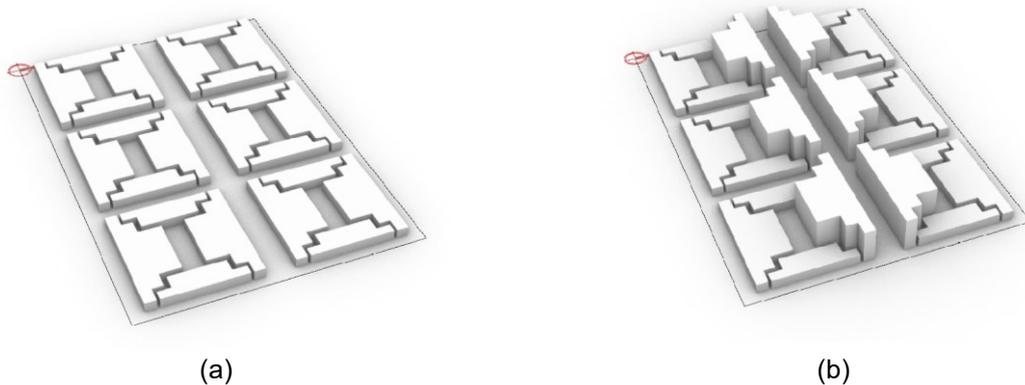
En la Tabla 2 se presentan los parámetros variables utilizados para la generación de los escenarios morfológicos de estudio. El ancho de la calle está basado en el relevamiento realizado en el área. Las alturas de las edificaciones son obtenidas a partir de la altura media estimada en las parcelas, calculada en la sección anterior, y las alturas máximas permitidas por el nuevo Decreto. En este caso se varía únicamente la altura de los edificios frentistas a la avenida de 6 metros a 31 metros, mientras la altura del entorno se mantiene siempre en 6 metros. La relación A/L es producto de los parámetros anteriores. Por último, son definidas dos posibles orientaciones del cañón urbano respecto al sol, Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EO). En la Figura 18 se presentan los modelos geométricos generados.

Tabla 2 Parámetros variables de los escenarios urbanos

| Parámetro | Valores |
|---------------------------------|-------------|
| Ancho de calle [m] | 24 |
| Altura de las edificaciones [m] | 6 / 31 |
| Relación A/L | 0,37 / 1,29 |
| Orientación del cañón | NS / LO |

Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 18 - Representación geométrica de los escenarios urbanos



Representación de los escenarios urbanos generados, (a) Orientación EO/NS y altura de las edificaciones de 6m; (b) Orientación EO/NS y altura de las edificaciones sobre la vía central de 31m.
Fuente: Elaborado por el autor.

3.3 SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los procedimientos y configuraciones realizadas para la simulación microclimática y energética de edificios. Así también el método para la integración de los dos modelos.

3.3.1 Datos climáticos

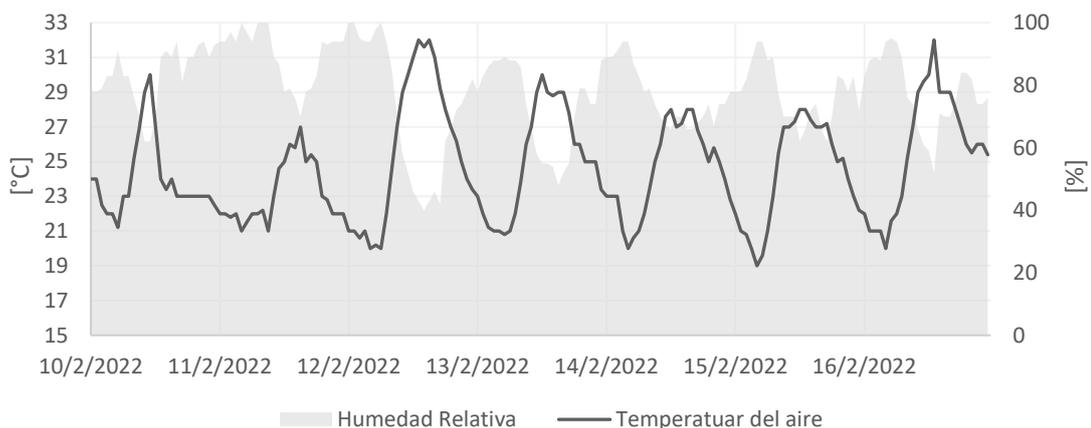
Para el estudio se utilizó el archivo climático EPW disponible en climate.onebuilding.org, a partir de los datos históricos de 58 años registrados en la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Carrasco, desde 1958 hasta 2018. La estación está ubicada a unos 15km del área de estudio.

Fueron considerados los períodos extremos disponibles en el archivo climático. Son definidos 6 períodos, dos para verano e invierno, uno para otoño y primavera. En el período cálido y frío es definido un período extremo y un período típico. En las estaciones medias solamente son definidos periodos típicos. En este

caso se decidió trabajar en el período cálido con la semana extrema desde 10/2 hasta el 16/2, correspondiendo con el año 2013. Fue tomado ese criterio ya que es esperable el aumento de la temperatura del aire en los próximos años, además de la estimación del aumento en el consumo de energía para refrigeración.

En la Figura 19 se presenta la semana extrema del período cálido. Se observa una temperatura del aire (T_{ar}) mínima de 19°C y una máxima de 32°C , con un promedio de 24.6°C , y una variación entorno de hasta 13°C . Respecto a la humedad relativa (H_r) se observa una mínima de 40%, máxima del 100%, con un promedio de 78.5%. Como día de referencia dentro de la semana se tomó el 12/2, ya que presenta la mayor temperatura, por tanto, se utilizan los datos de este día para la inicialización de la simulación microclimática del período cálido.

Figura 19 Datos climáticos de la semana extrema del período cálido



Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.2 Simulación microclimática

Para esta fase fue utilizado el ENVI-met v5.0.2 para la simulación de las condiciones microclimáticas del área de estudio. Fue utilizada la licencia *Science* del Departamento Regional Norte de Arquitectura, de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República.

Una de las posibilidades de Grasshopper es la interacción con el ENVI-met mediante el complemento Dragonfly. Así es posible utilizar la geometría diseñada en Grasshopper en un formato entendible por el ENVI-met, en este caso el archivo del

área de estudio .INX⁹. Este especifica la geometría de los edificios, vegetación, suelo, etc. Posteriormente es generado el archivo .SIMX, donde son configuradas las condiciones límites para el modelo y ejecutada la simulación.

Para generar los archivos necesarios para ejecutar la simulación, primero en el componente *DF Envimet Space* del Dragonfly son introducidos los parámetros que definen el modelo Cuadro 2. Posteriormente para la generación del archivo .SIMX, son introducidos en el componente *DF Envimet Config*, además de la geometría, los datos para la inicialización del modelo. Se utiliza el componente *DF Envime Config Main Setings* para introducir el archivo .INX, la fecha, hora y duración de la simulación. Para definir las condiciones de inicialización, temperatura y humedad relativa del aire y radiación solar, se utilizó el modo *Full Forcing*, a partir del archivo climático EPW. Esta configuración se realizó directamente en ENVI-met, en el ENVI-guide. A partir de recomendaciones del equipo de soporte del ENVI-met, se optó por no forzar la velocidad del viento desde el archivo EPW, por lo cual se definió una velocidad y dirección promedio del día de inicialización.

Cuadro 2 - Datos para la definición del área de estudio en ENVI-met

| | |
|---|--------------------|
| Case | C31mEOPC / C6mEOPC |
| Model area | |
| Main model area | |
| Grid Size [m] | 345,0x255,0 |
| Dx = size of X grid | dx = 5,0 |
| Dy = size of Y grid | dy = 5,0 |
| Dz = size of Z grid | dz = 5,0 |
| Number of grids for height domain | 16 / 5 |
| Telescoping percentage [%] | 10 |
| Z grid height for start telescoping | 31m / 6m |
| Highest Building in domain [m] | 31m / 6m |
| Difference model top to highest point [m] | 78.69m / 22.2m |
| Position | |
| Longitude (°) | 56°10'0" W |
| Latitude (°) | 34°52'60" S |
| Reference longitude | -45 |
| Start and duration | |
| Data of simulation | 12-2 |
| Start time | 05:00 |
| Total simulation time [h] | 72 |
| Forcing mode | Full Forcing |
| Initiate meteorological conditions | |

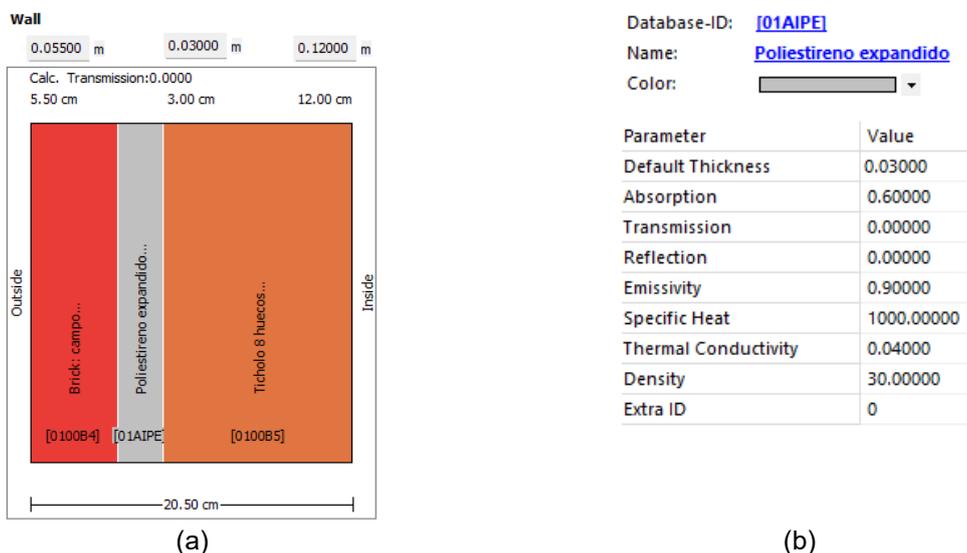
⁹ <https://envi-met.info/documents/onlinehelpv3/hs220.htm>

| | |
|---|--------------------------------|
| Roughness length at measurement site | 0.01 |
| Initial temperature of atmosphere [°C] | Dry bulb temperature from EPW. |
| Initial relative humidity [%] | Relative humidity from EPW. |
| Radiation (splitted into shortwave direct, diffuse, and longwave radiation) | Radiation from EPW. |
| Wind speed measured at 10m height [m/s] | 2.2 |
| Wind Direction (deg) (0° = from North, 18° = from South) | 135 |
| Building configuration | |
| Building interior temperature [°C] | 20,0 |
| Constant temperature | No |
| Configuration of radiation | |
| Index View Sphere – IVS | Yes |
| Fuente: Adaptado de (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017) | |

Para la definición del entorno urbano fueron utilizados perfiles de suelo con materiales propios de la base de datos de ENVI-met v5.0.3. Para las calles el *Asphalt Road* (ID 0100ST) fue seleccionado, con reflectancia de 0.20 y emisividad de 0.90. Par las veredas se utilizó el *Concrete Pavement Gray* (ID 0100PG), con reflectancia de 0.50 y emisividad de 0.90. Las dos superficies cuentan con un perfil de suelo con arcilla y arena debajo, *Sandy Loam* (ID 0000SL).

El ENVI-met permite definir únicamente tres capas de materiales para las paredes y techos de edificios. Para su configuración fueron definidos nuevos materiales que se agregaron a la base de datos Figura 20 y Figura 21, los cuales corresponden con los materiales utilizados en el modelo de EnergyPlus.

Figura 20 Materiales de paredes de los edificios en ENVI-met



Database-ID: [\[0100B4\]](#)
 Name: [Brick: campo](#)
 Color: 

| Parameter | Value |
|----------------------|------------|
| Default Thickness | 0.12000 |
| Absorption | 0.60000 |
| Transmission | 0.00000 |
| Reflection | 0.40000 |
| Emissivity | 0.90000 |
| Specific Heat | 1000.00000 |
| Thermal Conductivity | 0.79000 |
| Density | 1300.00000 |
| Extra ID | 0 |

Database-ID: [\[0100B5\]](#)
 Name: [Ticholo 8 huecos](#)
 Color: 

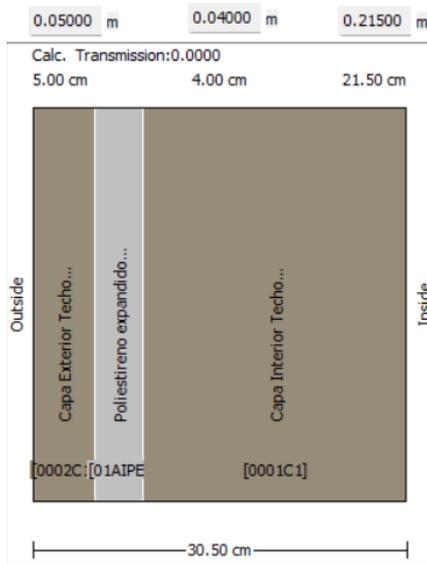
| Parameter | Value |
|----------------------|------------|
| Default Thickness | 0.12000 |
| Absorption | 0.60000 |
| Transmission | 0.00000 |
| Reflection | 0.40000 |
| Emissivity | 0.90000 |
| Specific Heat | 1000.00000 |
| Thermal Conductivity | 0.46200 |
| Density | 855.00000 |
| Extra ID | 0 |

(c)

(d)

(a)Esquema de las capas de la pared, (b)propiedades del aislación, (c)propiedades del ladrillo de campo, y (d)propiedades del ticholo cerámico. Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 21 - Materiales de la cubierta de los edificios en ENVI-met



(a)

Database-ID: [\[01A1PE\]](#)
 Name: [Poliestireno expandido](#)
 Color: 

| Parameter | Value |
|----------------------|------------|
| Default Thickness | 0.03000 |
| Absorption | 0.60000 |
| Transmission | 0.00000 |
| Reflection | 0.00000 |
| Emissivity | 0.90000 |
| Specific Heat | 1000.00000 |
| Thermal Conductivity | 0.04000 |
| Density | 30.00000 |
| Extra ID | 0 |

(b)

Database-ID: [\[0002C1\]](#)
 Name: [Capa Exterior Techo](#)
 Color: 

| Parameter | Value |
|----------------------|------------|
| Default Thickness | 0.05000 |
| Absorption | 0.70000 |
| Transmission | 0.00000 |
| Reflection | 0.30000 |
| Emissivity | 0.90000 |
| Specific Heat | 1000.00000 |
| Thermal Conductivity | 1.35000 |
| Density | 2000.00000 |
| Extra ID | 0 |

(c)

Database-ID: [\[0001C1\]](#)
 Name: [Capa Interior Techo](#)
 Color: 

| Parameter | Value |
|----------------------|------------|
| Default Thickness | 0.21500 |
| Absorption | 0.70000 |
| Transmission | 0.00000 |
| Reflection | 0.30000 |
| Emissivity | 0.90000 |
| Specific Heat | 840.00000 |
| Thermal Conductivity | 3.13000 |
| Density | 2000.00000 |
| Extra ID | 0 |

(d)

(a)Esquema de las capas de la cubierta, (b) propiedades del aislación, (c) capa exterior de la cubierta, y (d) capa interior de la cubierta. Fuente: Elaborado pelo autor.

Por otro lado, para este estudio se configuró la temperatura interior de las edificaciones inicial en 20°C variable a lo largo de la simulación. También fue

utilizada la configuración de *Index View Sphere (IVS)* para considerar las múltiples reflexiones entre las superficies y obtener resultados más detallados.

3.3.3 Simulación energética de edificios

La simulación energética de edificios se realizó utilizando el complemento Honeybee 1.4 en Grasshopper, con base en el motor de cálculo de Energyplus. Se tomó esa decisión ya que permitió una integración adecuada entre la geometría utilizada en ENVI-met y la geometría del edificio, lo que facilitó la integración de los dos modelos.

Para la definición de los materiales del edificio analizados, se utilizó la clasificación realizada en el trabajo de CURTO-RISO et al., (2021), donde analizaron la distribución de viviendas por tipo, tamaño, nivel socioeconómico, antigüedad y región geográfica del Uruguay, se identificó que los apartamentos más representativos en la ciudad de Montevideo están entre los 40 y 70m², en el decil de 8-10, con una antigüedad mayor que 30 años, lo cual representa un 1.925% del total de viviendas en Montevideo. Debido a que en este estudio se buscó trabajar con edificaciones que aún no fueron construidas, ya que considera escenarios a futuro, se optó por trabajar con casos con una antigüedad menor a los 10 años. Partiendo del supuesto que las características constructivas de este grupo de viviendas pueden ser más representativa de las edificaciones nuevas en el futuro. Por lo tanto, este tipo de construcción representa un 0.396% de los apartamentos en la ciudad de Montevideo.

En el Cuadro 3 se presentan los materiales constructivos para las paredes exteriores e interiores, piso y cubierta definidos para el edificio analizado. Las características de las ventanas se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 3 - Materiales constructivos del edificio en EnergyPlus

| CUBIERTA | | | | | | | |
|------------------------|-----|-------|----------|----------------|-----------|------------|------------|
| Material | Rug | e (m) | k (W/mK) | ρ (kg/m3) | c (J/kgK) | αt | αs |
| Contrapiso (Hormigón) | MS | 0.05 | 1.35 | 2000 | 1000 | 0.9 | 0.5 |
| Poliestireno expandido | MS | 0.04 | 0.04 | 30 | 1450 | | |
| Membrana asfáltica | | | | | | | |
| Mortero | MS | 0.02 | 1 | 1800 | 1000 | 0.9 | 0.5 |
| Hormigón de cascote | R | 0.08 | 0.95 | 1800 | 1000 | 0.9 | 0.5 |

| | | | | | | | |
|---|------------|--------------|-----------------|---|------------------|------------------------------|------------------------------|
| Hormigón armado | MR | 0.1 | 2.3 | 2300 | 1000 | 0.9 | 0.5 |
| Revoque | MS | 0.015 | 1 | 1800 | 1000 | 0.9 | 0.6 |
| PARED EXTERIOR | | | | | | | |
| Material | Rug | e (m) | k (W/mK) | ρ (kg/m³) | c (J/kgK) | α_t | α_s |
| Ladrillo de campo (expuesto) | MR | 0.055 | 0.79 | 1300 | 1000 | 0.93 | 0.55 |
| Poliestireno expandido | | 0.03 | 0.04 | 30 | 1450 | | |
| Revoque (densidad 2100) | MS | 0.015 | 1.4 | 2100 | 1000 | 0.9 | 0.6 |
| Ticholo (8 huecos) 12x25x25 | MR | 0.12 | 0.462 | 855 | 1000 | | |
| Revoque | MS | 0.015 | 1 | 1800 | 1000 | 0.9 | 0.2 |
| PARED INTERIOR | | | | | | | |
| Material | Rug | e (m) | k (W/mK) | ρ (kg/m³) | c (J/kgK) | α_t | α_s |
| Placa de yeso | S | 0.0125 | 0.25 | 900 | 1000 | 0.9 | 0.2 |
| Lana de roca (densidad 15-200) | MR | 0.05 | 0.04 | | | | |
| Placa de yeso | S | 0.0125 | 0.25 | 900 | 1000 | 0.9 | 0.2 |
| PISO | | | | | | | |
| Material | Rug | e (m) | k (W/mK) | ρ (kg/m³) | c (J/kgK) | α_t | α_s |
| Baldosa cerámica | S | 0.005 | 1 | 2000 | 800 | 0.95 | 0.45 |
| Mortero | S* | 0.02 | 0.41 | 999 | 1000 | 0.9 | 0.5 |
| Hormigón armado | MR | 0.1 | 2.3 | 2300 | 1000 | 0.9 | 0.5 |
| Revoque | MS | 0.02 | 1 | 1800 | 1000 | 0.9 | 0.6 |
| <p>Rug = Rugosidad (S – <i>Smuth</i>; S* - <i>Smooth ceramic coated</i>; MS – <i>Moderatly soft</i>; MR – <i>Moderatly rough</i>; R – <i>Rough</i>); e = Espesor; k = Conductividad térmica; ρ = densidad; c = calor específico; α_t = Absortividad a la longitud de onda larga; α_s = absortividad a la longitud de onda corta. Fuente: Adaptado de CURTO-RISO et al., (2021)</p> | | | | | | | |

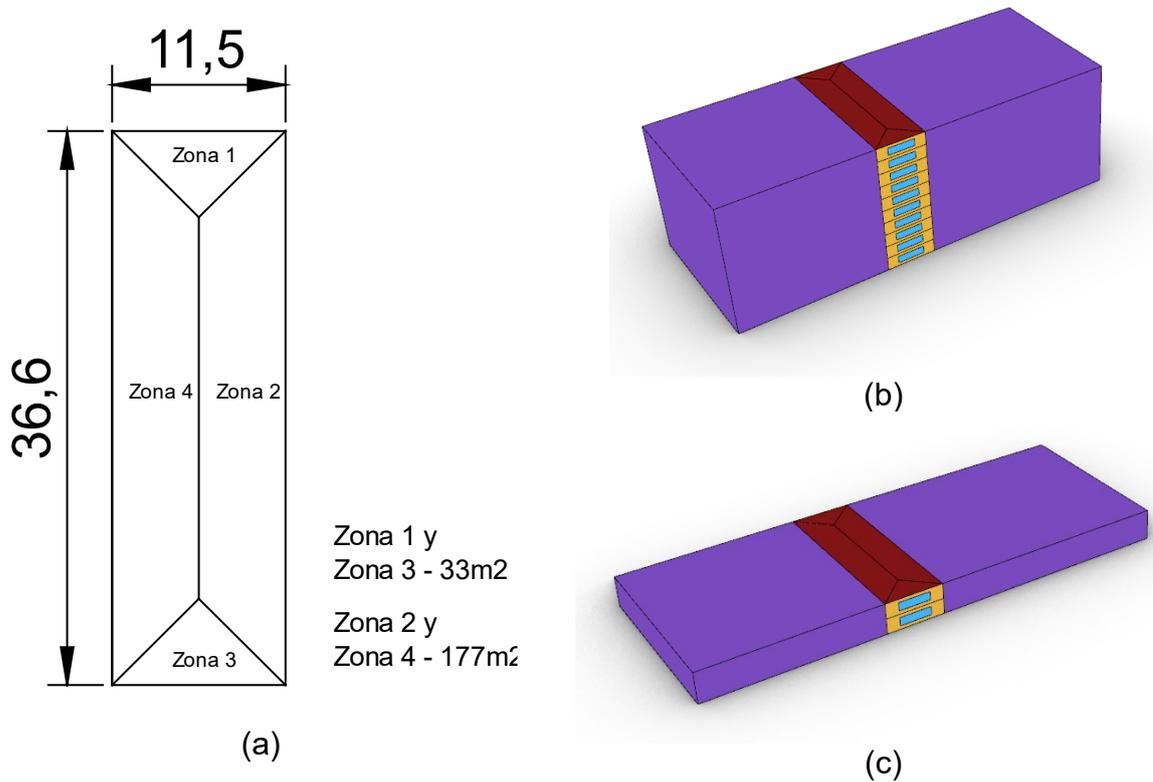
Cuadro 4 - Características de los vidrios del edificio

| | |
|---|----------------------|
| Material | Vidrio simple |
| Espesor [mm] | 4 |
| Transmisividad solar a incidencia normal | 0.88 |
| Transmisividad infrarroja | 0 |
| Reflectividad solar del lado frontal y posterior | 0.0808 |
| Transmisividad visible a incidencia normal | 0.88 |
| Reflectividad visible em la parte frontal y posterior | 0.0808 |
| Emisividad hemisférica infrarroja frontal y posterior | 0.84 |
| Conductividad [W/mK] | 1.4 |
| Fuente: Adaptado de CURTO-RISO et al., (2021) | |

En este trabajo se optó por simplificar la zonificación interior del edificio para su análisis a partir de 4 zonas térmicas perimetrales, Figura 22, basado en el trabajo

de NATANIAN, (2020). En este sentido, las paredes externas, en contacto con edificaciones laterales se consideraron como adiabáticas. Las paredes internas se consideraron sólidas y sin intercambio de aire.

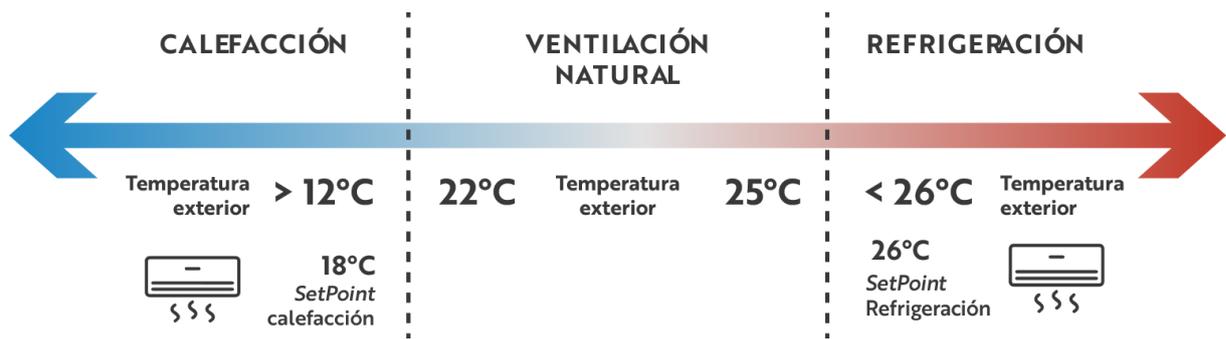
Figura 22 - Zonificación interior del edificio de estudio



(a)Planta del edificio; (b) Edificio de 31 metros de altura; (c) Edificio de 6 metros de altura.
Fuente: Elaborado por el autor.

El modelo fue considerado naturalmente ventilado cuando la temperatura del aire exterior es mayor a 12°C y menor a 26°C, y la interior es mayor a 22°C y menor a 25°C, Figura 23. Se tomó este criterio siguiendo el método propuesto por la **NBR 15.575** (ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), donde si bien sugiere la ventilación natural entre los 18°C a 26°C, en este caso se debió adecuar el rango para automatizar el cálculo directamente dentro de Energyplus. Separar estos rangos, si bien trae limitaciones, como reducir el potencial de uso de la ventilación natural, permitió trabajar con una única simulación energética en la cual se utiliza ventilación natural y acondicionamiento artificial, donde el software alterna automáticamente.

Figura 23 – Configuración de la ventilación natural



Fuente: Elaborado por el autor.

Para el cálculo de las cargas térmicas se consideró, un sistema *IdealLoads* con temperatura de *SetPoint* para calefacción de 18°C y refrigeración de 26°C. Se consideró calefacción únicamente durante el período frío, comprendido entre el 31/03 al 22/11, y refrigeración en el período cálido del 23/11 al 30/03, Cuadro 5.

Cuadro 5 - Configuración de *SetPoint*

| SetPoint | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Período | Refrigeración [°C] | Calefacción [°C] |
| Frío 31-03 al 22-11 | - | 18 |
| Cálido 23-11 al 30-03 | 26 | - |

Fuente: Adaptado de (Repartido AT01, FADU 1999)

Los ambientes se consideraron de uso mixto de acuerdo con CURTO-RISO et al., (2021), no tiene separado dormitorio de otro ambiente. Un ejemplo son los monoambientes. El calor generado en los ambientes interiores debido a la presencia de personas, sistemas de iluminación y equipos, son presentados en el Cuadro 6, Cuadro 7 y Cuadro 8 respectivamente. La programación utilizada es presentada en el Cuadro 9.

Cuadro 6 - Tasa metabólica y fracción radiante para los usuarios

| Zona | Actividad | Calor por área de superficie corporal [W/m²] | Calor producido por persona [W] | Fracción radiante |
|-------------|-----------------------|--|--|--------------------------|
| Uso mixto | Dormido o descansando | 45 | 81 | 0,30 |
| | Sentado o mirando TV | 60 | 108 | 0,30 |

Fuente: (CURTO-RISO et al., 2021) adaptado de acuerdo con a NBR 15575.

Cuadro 7 - Densidad de potencia instalada, fracción radiante y visible para los sistemas de iluminación

| Ambiente | DPI [W/m ²] | Fracción radiante | Fracción visible |
|----------|-------------------------|-------------------|------------------|
| Zona | 5 | 0,32 | 0,23 |

Fuente: Adaptado de la NBR 15575.

Cuadro 8 - Densidad de cargas internas y fracción radiante para equipos

| Ambiente | Potencia [W] | Fracción radiante |
|----------|--------------|-------------------|
| Zona | 120 | 0,30 |

Fuente: Adaptado de la NBR 15575.

Cuadro 9 - Programación de cargas internas

| Horario | Ocupación [%] | Iluminación [On/Off] | Equipos [On/Off] | HVAC [On/Off] |
|---------|---------------|----------------------|------------------|---------------|
| 0:00 | 100% | 0 | 0 | 1 |
| 1:00 | 100% | 0 | 0 | 1 |
| 2:00 | 100% | 0 | 0 | 1 |
| 3:00 | 100% | 0 | 0 | 1 |
| 4:00 | 100% | 0 | 0 | 1 |
| 5:00 | 100% | 0 | 0 | 1 |
| 6:00 | 100% | 1 | 0 | 1 |
| 7:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |
| 8:00 | 0% | 0 | 0 | 0 |
| 9:00 | 0% | 0 | 0 | 0 |
| 10:00 | 0% | 0 | 0 | 0 |
| 11:00 | 0% | 0 | 0 | 0 |
| 12:00 | 0% | 0 | 0 | 0 |
| 13:00 | 0% | 0 | 0 | 0 |
| 14:00 | 50% | 0 | 1 | 1 |
| 15:00 | 50% | 0 | 1 | 1 |
| 16:00 | 50% | 1 | 1 | 1 |
| 17:00 | 50% | 1 | 1 | 1 |
| 18:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |
| 19:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |
| 20:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |
| 21:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |
| 22:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |
| 23:00 | 100% | 1 | 1 | 1 |

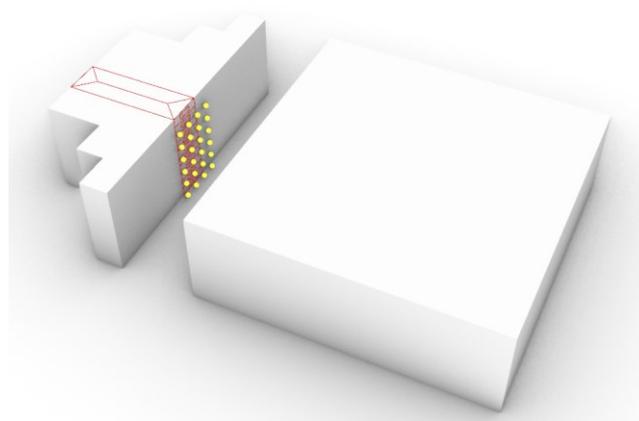
Fuente: Adaptado de la NBR 15575.

3.3.4 Simulación energética integrada

En esta etapa se presenta el método utilizado para la simulación energética del edificio en EnergyPlus considerando las condiciones microclimáticas del entorno urbano obtenidas de los resultados del ENVI-met. En este caso de acuerdo con la literatura se realiza mediante la modificación del archivo climático EPW con los datos de salida del ENVI-met. Se utilizó la herramienta *Elements*, creada para edición de archivos climáticos para simulación energética de edificios (ELEMENTS, 2016). Así los datos horarios de temperatura y humedad relativa del aire y velocidad del viento son modificados en el archivo EPW original.

Debido a que los tiempos de cálculo del ENVI-met no permiten realizar simulaciones anuales, se optó por analizar el día 13 de febrero del período caluroso. Día siguiente al de inicialización de la simulación microclimática. Para conseguir que el modelo EnergyPlus entre en régimen, se realizaron tres simulaciones en ENVI-met con una duración de 72hs cada una, con el objetivo de obtener los datos microclimáticos de cinco días previos a los de estudio, siempre solapando los datos del último día de simulación con el primero de la siguiente, con el fin de descartar las primeras 24hs de simulación. Finalmente, dentro de Grasshopper, de acuerdo con el método utilizado por NATANIAN et al., (2019), realizando un promedio para cada hora, se extrajeron los datos de temperatura del aire y velocidad del viento frente a la fachada del edificio Figura 24. La humedad relativa se obtuvo dentro del cañón urbano a una altura de 2.5m.

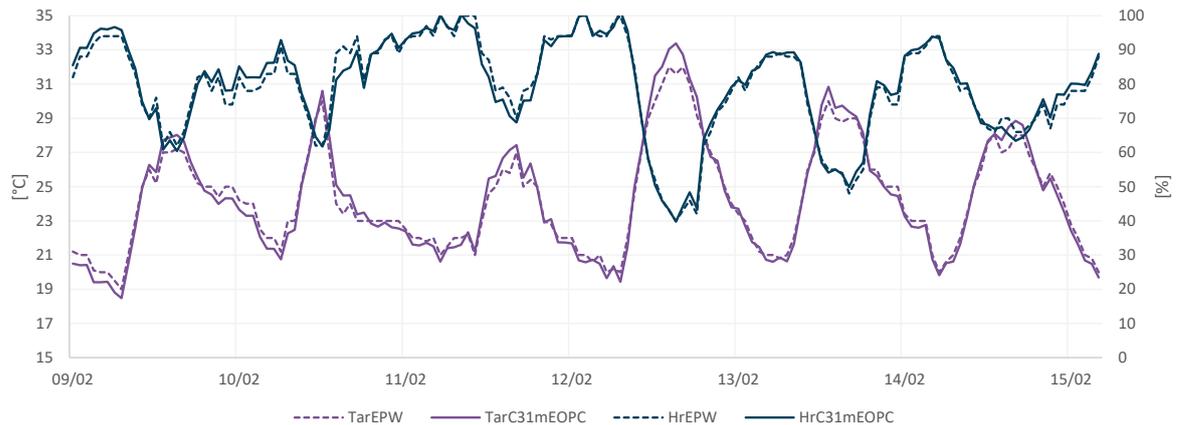
Figura 24 – Datos microclimáticos del modelo frente a la fachada del edificio



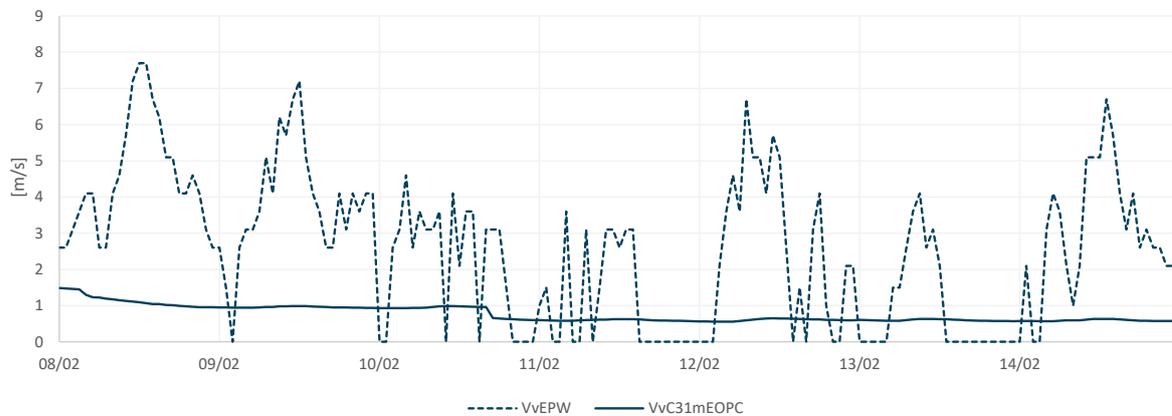
Puntos para la extracción de los datos de temperatura del aire y velocidad del viento frente a la fachada del edificio. Fuente: Elaborado por el autor.

Así se conformó una serie de datos desde el 9/2 al 14/2, con edificaciones de 31 metros en la Figura 25, y con edificaciones de 6m en la Figura 26. Estos datos se utilizaron para modificar en el archivo EPW utilizando *Elements*.

Figura 25 - Serie de datos microclimáticos del periodo cálido para modificar el archivo EPW caso de 31 metros



(a)



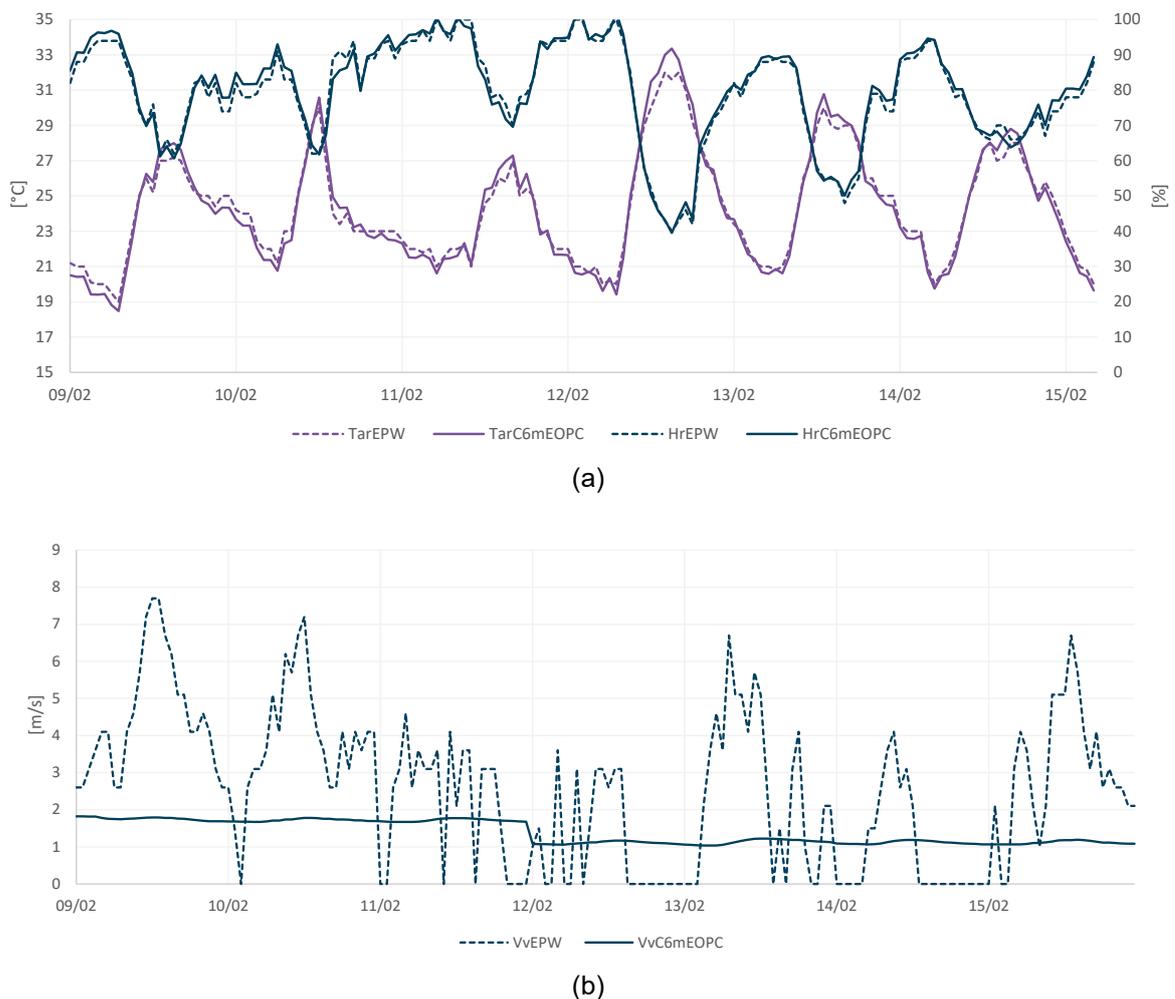
(b)

(a) Temperatura del aire y humedad relativa, (b) velocidad del viento. TarEPW, HrEPW y VvEPW = Temperatura del aire, Humedad Relativa y Velocidad del Viento del archivo EPW; TarC31mEOPC, HrC31mEOPC y VvC31mEOPC = Temperatura del aire, Humedad relativa y Velocidad del viento del escenario de 31m en el cañón con orientación Este-Oeste. Fuente. Elaborado por el autor.

En la Figura 25 se observa que, la serie de datos generada presenta una variación entre $+1.8^{\circ}\text{C}$ y de -0.9°C respecto a los datos de temperatura del aire del archivo EPW. La humedad relativa presentó una variación entre $+4.2\%$ y -7.7% . Respecto a la velocidad del viento es donde se observa la mayor diferencia y estabilidad en los datos de la simulación. La velocidad del viento varió entre $+1.0\text{m/s}$ y -6.6m/s . Las diferencias en la velocidad del viento siempre fueron negativas

respecto a los datos del archivo EPW. Muestra valores positivos cuando el archivo EPW tiene valor 0.0m/s. Esta diferencia se explica debido a que no se utilizó la velocidad del viento del archivo EPW como datos para el forzado en ENVI-met, se utilizó una velocidad constante a lo largo de toda la simulación. La velocidad se consideró a partir del promedio de cada día.

Figura 26 - Serie de datos microclimáticos del periodo cálido para modificar el archivo EPW caso de 6 metros



(a) Temperatura del aire y humedad relativa, (b) velocidad del viento. TarEPW, HrEPW y VvEPW = Temperatura del aire, Humedad Relativa y Velocidad del Viento del archivo EPW; TarC6mEOPC, HrC6mEOPC y VvC6mEOPC = Temperatura del aire, Humedad relativa y Velocidad del viento del escenario de 6m en el cañón con orientación Este-Oeste. Fuente. Elaborado por el autor.

En la Figura 26 se observa que, la temperatura del aire varía entre $+1.8^{\circ}\text{C}$ y -0.9°C respecto al archivo EPW. La humedad relativa varío entre $+3.9\%$ y -5.9% . Presentando una variación similar a la serie de datos simulada para el escenario anterior. La velocidad del viento varió entre $+1.8\text{m/s}$ y -5.9m/s . En esta serie de

datos se puede observar que los primeros días presentan una velocidad del viento mayor respecto a al día 11/2. Esto se explica ya que la velocidad media para los días previos fue mayor, por lo cual se debió modificar el dato de inicialización en ENVI-met para esos días. Se puede observar también que, respecto al caso anterior, la velocidad del viento se mantiene constante, pero con una velocidad mayor, en promedio 0.6m/s más. Así se puede identificar el efecto de la altura de las edificaciones en la velocidad del viento en el cañón urbano.

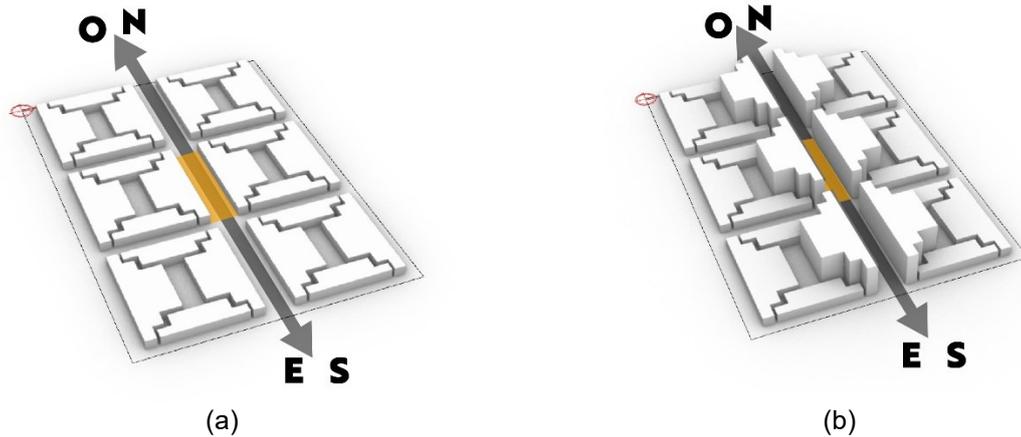
3.4 TRATAMIENTO Y ANALISIS

En esta sección se presenta el tratamiento y análisis de los resultados para conseguir responder al objetivo propuesto. Son analizadas las variaciones micro climáticas producidas por la modificación de la forma urbana. Por otro lado, es analizado el desempeño energético de la edificación de estudio a partir de la integración de ENVI-met y EnergyPlus.

3.4.1 Variaciones microclimáticas y forma urbana

Se analizo la variación microclimática de la temperatura del aire (Tar), humedad relativa (Hr), velocidad del viento (Vv) y radiación solar directa respecto a un plano horizontal perpendicular al rayo (Rsd_{dir}), en el cañón urbano al modificar la altura de las edificaciones sobre la calle central durante el período cálido, de 6m (C6mEOPC) a 31m (C31mEOPC), considerando el eje de orientación del cañón Este-Oeste y Norte-Sur, Figura 27. Se utilizan los datos del archivo climático EPW, utilizado para inicializar las simulación en en ENVI-met, y se comparan con el resultado de las propias simulaciones para evaluar la influencia del área urbana estudiada. Se comparan para las 5:00hs y 13:00hs del día 13 de febrero. El día se seleccionó en base a lo que se explica en la sección anterior, donde este día pertenece a la semana extrema del período cálido del archivo climático EPW. Los horarios se seleccionan ya que es cuando se registra la temperatura del aire máximas (13:00hs) y mínima (5:00hs).

Figura 27 - Representación geométrica de los escenarios morfológicos



Representación de los escenarios urbanos (a) 6mEO y 6mNS y (b) 31mEO y 31mNS.
Fuente: Elaborado por el autor.

La primer comparativa se realiza a través de mapas de color, generados en Grasshopper con los resultados del ENVI-met, que permiten visualizar de forma espacial el comportamiento de las variables microclimáticas estudiadas. Posteriormente, en Grasshopper se extraen los resultados de temperatura del aire y velocidad frente a la fachada del edificio, a partir del promedio horario de todas las celdas de ENVI-met que conciden con la fachada del edificio. Los datos de la humedad relativa y radiación solar directa se extraen del promedio horario de todos los puntos dentro del cañón urbano, a 2.5m de altura respecto de la calle. Se utiliza esta altura ya que es la menor posible por causa del tamaño de grilla utilizado para la simulación en ENVI-met (5x5m). Así se puede estudiar el comportamiento de las variables a lo largo de todo el día.

3.4.2 Impacto del entorno en las cargas térmicas

El análisis fue realizado a partir de las cargas térmicas (kWh/m²) a partir de la utilización de un sistema de aire acondicionado ideal (*ideal load*) en EnergyPlus, capaz de mantener la temperatura dentro del rango de *set point* definido. Los resultados de las cargas térmicas se obtienen a partir de las variables de salida del Energyplus *Zone Air System Sensible Heating Energy* y *Zone Air System Sensible Cooling Energy*. El análisis se realiza a partir de la suma total anual de cargas térmicas de refrigeración y calefacción para cada zona del edificio, considerando únicamente las que cuentan con fachada al cañón urbano de estudio. Posteriormente se analizan de forma separada.

En primera instancia se compararon las cargas térmicas del edificio aislado, sin entorno urbano, respecto a la misma edificación con entorno, considerando alturas de los edificios de 31m y de 6m. Los casos se denominaron C31mEO_CE y C31mEO_SE, donde (C31m) corresponde a que tiene edificaciones de 31m de altura sobre la calle central, (EO) el eje del cañón urbano está en el sentido Este-Oeste, (CE) con entorno urbano y (SE) sin entorno. Por otro lado los casos C6mEO_CE y C6mEO_SE, donde (6m) corresponde a que tiene edificaciones de 6m de altura sobre la calle central. Se evaluaron las cargas térmicas anuales de las zonas por piso, con orientación de su fachada principal al Norte. Se debe aclarar que la planta baja (o piso 0) no se consideró, ya que según la reglamentación este debería tener características comerciales, las cuales no se consideraron en este estudio.

Para analizar más detalladamente los flujos de calor en las zonas estudiadas, fue analizado el balance energético siguiendo el procedimiento presentado por ELI, L. (2020). Este análisis considera los intercambios por convección que ocurren en el ambiente interior con las superficies y las cargas internas, ganancias y pérdidas por infiltración a través de la ventilación natural y las cargas térmicas que se agregan o retiran del ambiente por el sistema de acondicionamiento de aire ideal. Así también debido a la importancia que tiene entender los flujos de radiación solar que ingresan al cañón urbano y como estos se modifican por causa del entorno urbano, también se consideró esta variable en el análisis. Los datos se obtuvieron a partir de las variables de salida del Energyplus: *Surface Inside Face Convection Heat Gain Energy; Zone Total Internal Convective Heating Energy; AFN Zone Infiltration Sensible Heat Gain Energy; AFN Zone Infiltration Sensible Heat Loss Energy; Zone Air System Sensible Heating Energy; Zone Air System Sensible Cooling Energy; Zone Windows Total Transmitted Solar Radiation Rate.*

Posteriormente se analizó la relación entre las cargas térmicas del edificio y la orientación del cañón urbano, para lo cual, se consideró el norte a 90° (a la orientación Oeste). Se consideraron los casos C31mEO_CE, C31mEO_SE, C31mNS_CE y C31mNS_SE, donde (NS) corresponde a que el eje central del cañón urbano tiene sentido Norte-Sur. En los dos primeros casos, se consideraron las mismas zonas térmicas definidas anteriormente, en los dos últimos, donde se modificó la orientación del cañón (NS), las zonas térmicas del edificio tienen

orientada su fachada principal al Este. La comparativa se realiza a partir de las cargas térmicas anuales de refrigeración y calefacción, de forma separada. Posteriormente la suma total anual de cargas térmicas.

Finalmente se evaluó el impacto de considerar las condiciones microclimáticas del entorno urbano generadas a partir de los resultados del modelo ENVI-met. En este apartado se realizó una simulación integrada en EnergyPlus a partir de la modificación del archivo EPW con resultados del ENVI-met. Para ello se consideraron las cargas térmicas, comparando el caso simulado con el archivo EPW original (EPWo) respecto al archivo EPW modificado (EPWm), en el escenario C31mEOPC y C6mEOPC, donde (PC) corresponde al período cálido. En este caso se analizó el comportamiento de las zonas térmicas para un día del año, 13 de febrero. Para analizar el impacto de la variación de cada parámetro que se modificó en el archivo climático, se generaron tres archivos climáticos donde se modificaron una a una las variables mientras las demás se mantienen fijas Cuadro 10, temperatura del aire (EPWm_Tar), velocidad del viento (EPWm_Vv), humedad relativa (EPW_Hr).

Cuadro 10 - Variables modificadas en el archivo EPW

| | Tar | Hr | Vv |
|--|------------|-----------|-----------|
| EPWo | - | - | - |
| EPWm | ENVI-met | ENVI-met | ENVI-met |
| EPWm_Tar | ENVI-met | - | - |
| EPWm_Hr | - | ENVI-met | - |
| EPWm_Vv | - | - | ENVI-met |
| ENVI-met corresponde a que se tomaron los datos de la variable a partir de los resultados del modelo microclimático. Fuente: Elaborado por el autor. | | | |

4 RESULTADOS

En esta sección se presentan los principales resultados de la investigación. Primeramente, respecto a las variaciones microclimáticas observadas en el cañón urbano producto de la modificación de la forma urbana. Posteriormente, el impacto en los resultados de la simulación energética al considerar las diferentes formas de entorno urbano. Finalmente, el resultado de la simulación energética integrada en EnergyPlus a partir de los datos microclimáticos obtenidos del modelo ENVI-met.

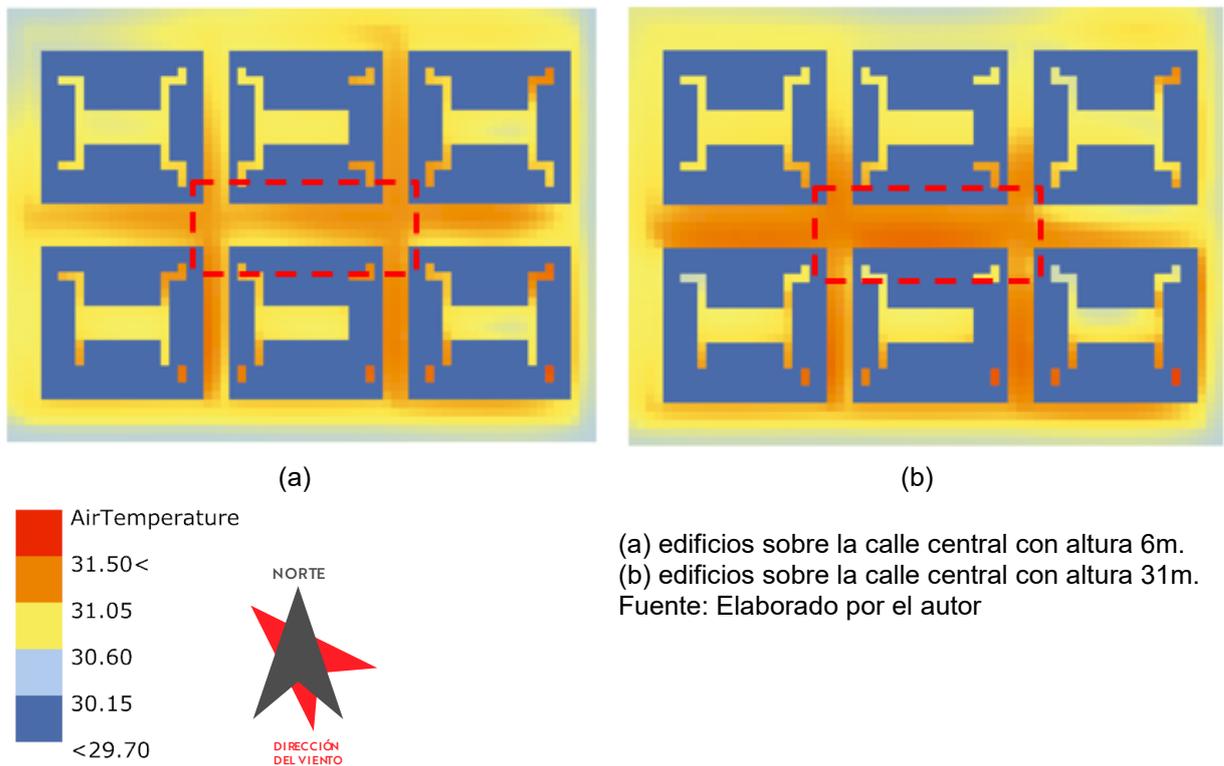
4.1 VARIACIONES MICROCLIMÁTICAS EN EL CAÑÓN URBANO

En la Figura 29 se presentan los resultados del modelo microclimático simulado en ENVI-met. Se tomaron como referencia para el día 13 de febrero las 13:00hs, donde se observa la temperatura más alta del día. Se comparan los resultados para los escenarios con edificios de 31m de altura (C31mEOPC) y con 6m (C6mEOPC) a los 2.5m de altura desde el suelo. Al comparar los datos diurnos, se observa baja variación en la temperatura del aire (Tar), encontrándose en ambos casos en el rango de 30.6°C a 31.05°C, con una diferencia de 0.45°C. Se puede apreciar que cambia la distribución de las temperaturas dentro del cañón al modificar la altura de los edificios, en el escenario con 6 metros, Figura 29 (a), se observa sobre el lado norte del cañón temperaturas levemente mayores que sobre el lado sur del cañón. Por otro lado, en el escenario de 31 metros, Figura 29 (b), se observa que la distribución de la temperatura dentro del cañón es más homogénea.

Figura 28 – Resultados de la temperatura del aire a las 13hs de ENVI-met

13/2 – 13:00hs

13/2 – 13:00hs

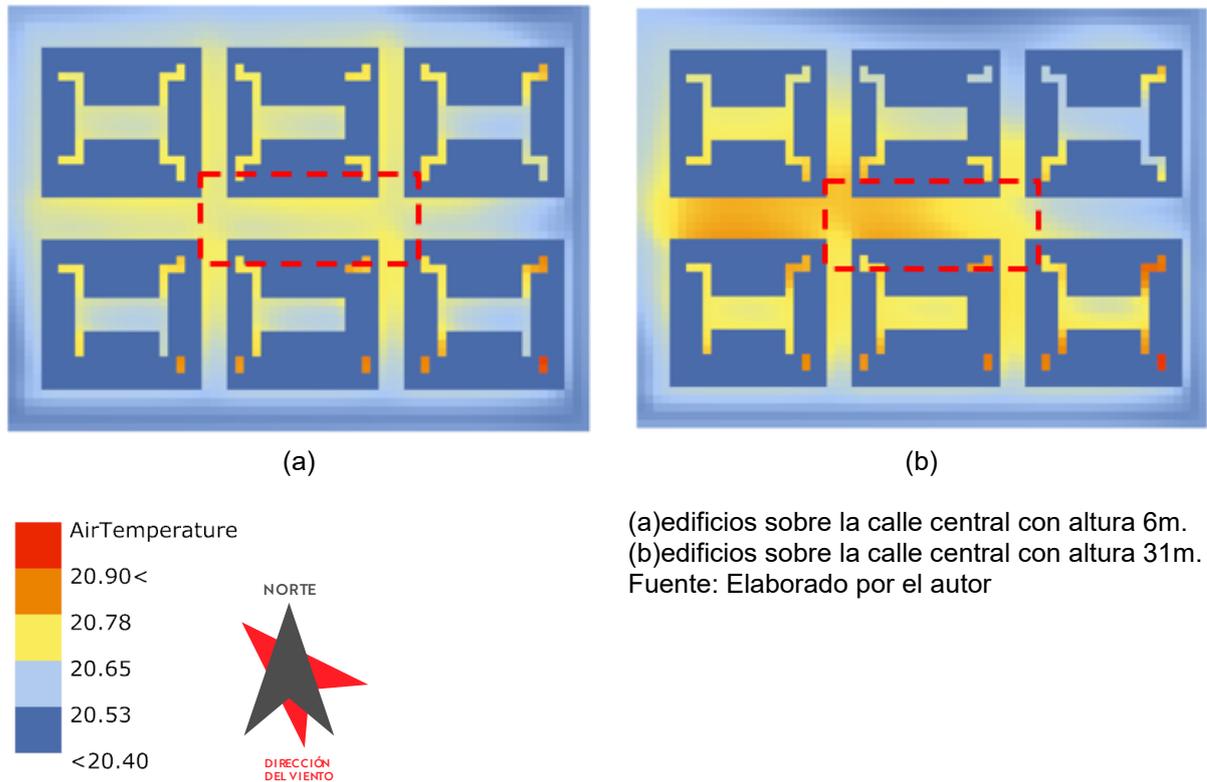


En la Figura 29 se muestran los resultados del modelo ENVI-met de temperatura del aire a las 5:00hs del día 13 de febrero, ya que es cuando se registra la menor temperatura. Se puede observar que la variación de temperatura del aire es leve, en el escenario con edificios de 6 metros de altura, Figura 29 (a), se observa una variación entre el rango de 20.53°C y 20.65°C , con una diferencia de 0.12°C . En el escenario con edificios de 31 metros de altura se identifican temperaturas levemente mayores, en el rango de los 20.65°C y 20.78°C , con una diferencia de 0.13°C . Por lo tanto, se observa una diferencia en la mínima de $+0.12^{\circ}\text{C}$ y en la máxima de $+0.13^{\circ}\text{C}$ en el escenario de 31 metros frente al escenario de 6 metros. En este sentido, esos resultados podrían indicar a priori el efecto de aumentar la altura de los edificios sobre el cañón urbano y el aumento de la temperatura del aire por causa de la disminución de las pérdidas de calor.

Figura 29 – Resultados de la temperatura del aire a las 5hs de ENVI-met

13/2 – 5:00hs

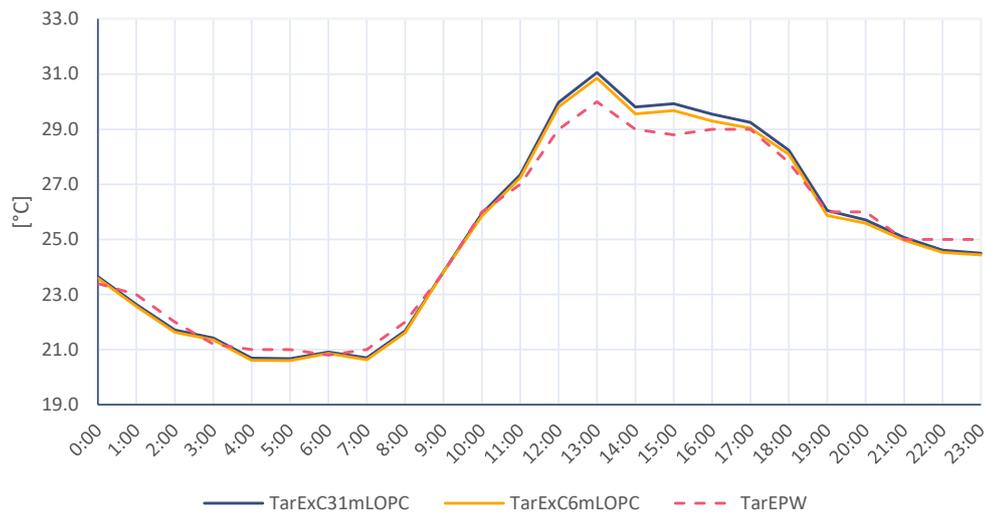
13/2 – 5:00hs



En la Figura 30 se muestra la comparación de la temperatura del aire para el día 13 de febrero del archivo climático EPW y simulada dentro del cañón urbano con ENVI-met para los escenarios con edificios de 31 metros de altura (C31mEOPC) y de 6 metros de altura (C6mEOPC). La Tar máxima del archivo EPW es de 30.0°C registrada a las 13hs. Los datos obtenidos de la simulación presentan una Tar máxima de 31.1°C y 30.9°C para los escenarios de 31 metros y 6 metros respectivamente, también a las 13hs. Por tanto, se observa una diferencia de 0.2°C entre los escenarios y de 1.1°C y 0.9°C respecto al archivo EPW. La mayor diferencia de la Tar entre los escenarios simulados se observa entre las 15hs y 16hs, en torno a 0.3°C , siendo mayor la Tar del escenario de 31 metros. Por otro lado, la Tar mínima del archivo EPW es de 20.8°C en torno a las 6hs, mientras que para el escenario de 31 metros y 6 metros es de 20.7°C y 20.6°C respectivamente, registrándose en torno a las 5hs y con una diferencia entre ambos casos de 0.1°C . Se puede observar que respecto a la mínima los resultados del modelo ENVI-met presentan diferencias muy bajas respecto al archivo climático EPW. En el trabajo de MOSTEIRO-ROMERO et al., (2020) observaron que los resultados del modelo presentaron una sobreestimación de la temperatura de hasta 2°C durante el día y

temperaturas menores durante la noche, respecto a los datos climáticos de referencia.

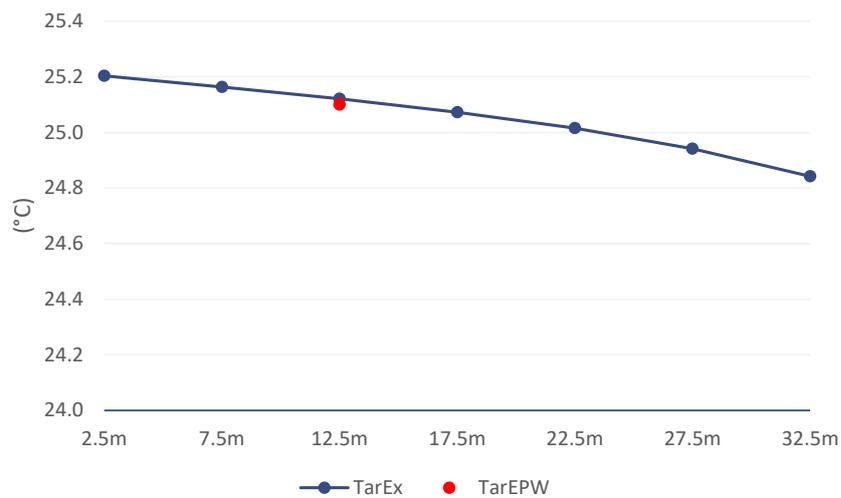
Figura 30 - Temperatura del aire en el cañón urbano con orientación Este-Oeste en el periodo cálido



TarEPW = Temperatura del aire del archivo EPW; TarExC31mLOPC y TarExC6mLOPC = Temperatura del aire del caso con edificios de 31m y de 6m. Fuente: Elaborado por el autor

A partir de la Figura 31 se puede observar el gradiente de temperatura dentro del cañón urbano con edificaciones de 31 metros de altura. Se puede observar que la diferencia entre el punto más bajo 2.5m y el más alto considerado dentro del cañón 27.5m, es de -0.26°C . Cuando la altura supera el cañón a los 32.5m, la diferencia aumenta a -0.36°C . Por otro lado, el punto rojo muestra la temperatura promedio del archivo climático EPW. Se puede observar que si se compara con el dato a la altura más próxima del ENVI-met, considerando que en el archivo EPW los datos se registran a los 10m de altura, no se identifican diferencias significativas con los datos simulados.

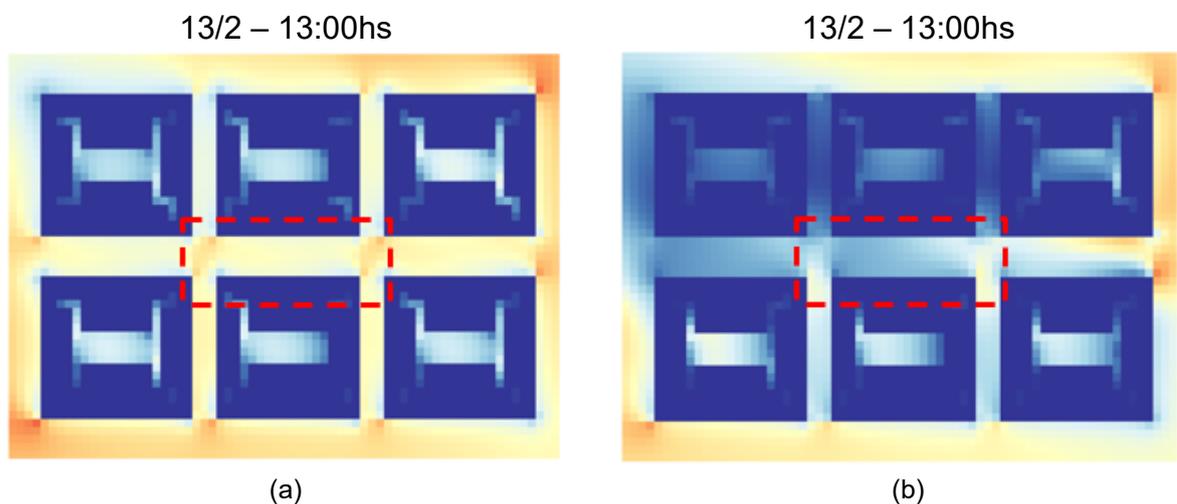
Figura 31 – Gradiente de la temperatura del aire en el cañón urbano de 31 metros

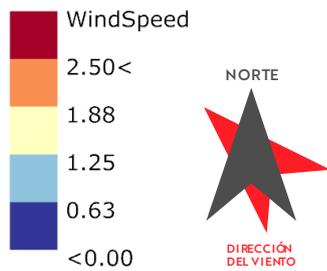


TarEx = Temperatura del aire exterior (ENVI-met); TarEPW = Temperatura del aire del archivo climático EPW. Fuente: Elaborado por el autor

Por otro lado, en la Figura 32 se presentan los resultados del modelo microclimático simulado en ENVI-met. Se tomó como referencia el día 13 de febrero las 13:00hs, donde se observa la temperatura más alta del día. Se comparan los resultados para los escenarios con edificios de 31m de altura (C31mEOPC), y con 6m (C6mEOPC). Se puede observar claramente la influencia de la altura de las edificaciones en la velocidad del viento dentro del cañón urbano. Se identifica en la Figura 32 (a) una velocidad del viento en el rango de 1.25m/s a 1.88m/s, mientras que en la Figura 32 (b) la velocidad se encuentra entre 0.63m/s y 1.25m/s. Por lo tanto, cuando se considera el escenario con edificaciones bajas, de 6 metros, se observan velocidades del viento mayores dentro del cañón urbano respecto al escenario de 31 metros.

Figura 32 – Velocidad del viento dentro del cañón urbano de ENVI-met

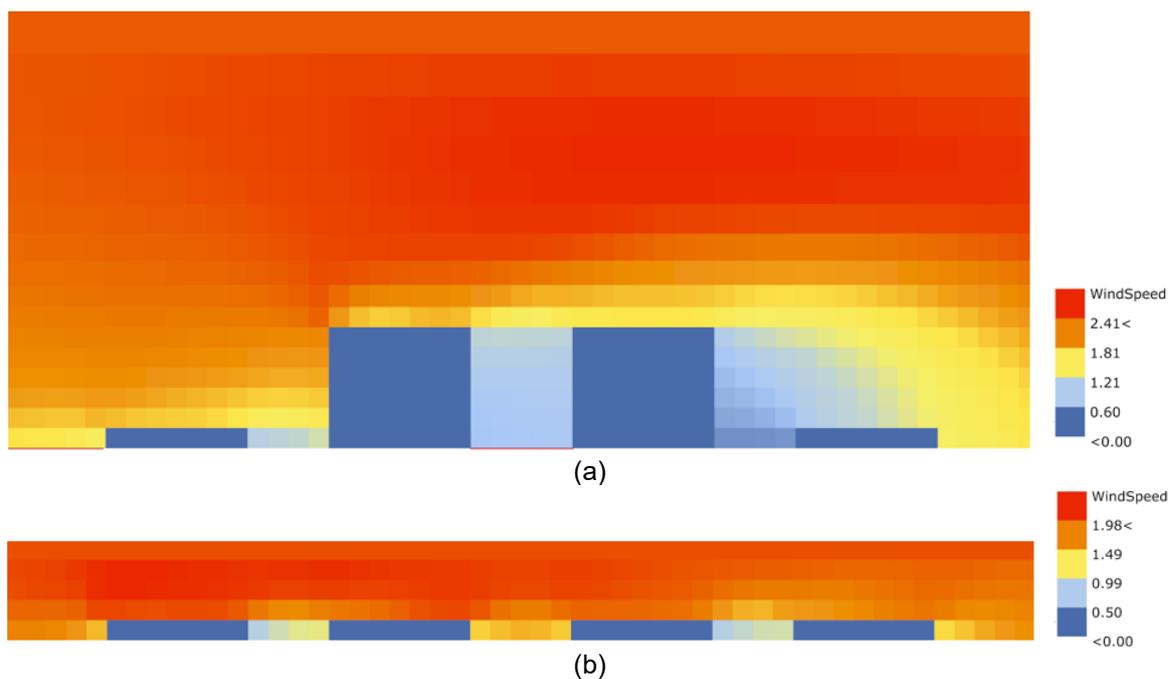




(a)escenario con edificios sobre la calle central con altura de 6m y (b) edificios con altura 31m. Fuente: Elaborado por el autor

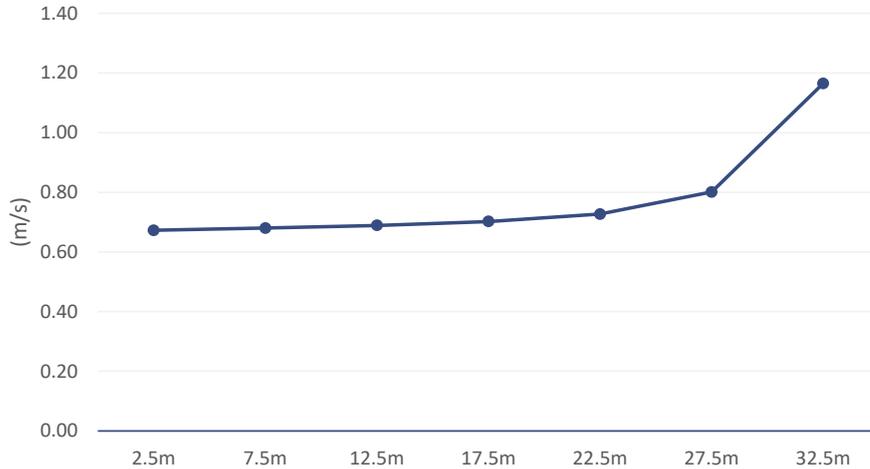
En la Figura 33 (a) y Figura 33 (b) se puede observar el comportamiento de la velocidad del viento cuando se observa en sentido vertical. Primeramente, se puede observar que en el caso con edificaciones de 31m dentro del cañón urbano se observa un gradiente de velocidad bajo, ósea con relativamente baja variación de la velocidad del viento a medida que aumenta la altura, hasta llegar al límite superior del cañón urbano, donde ocurre un notorio aumento de la velocidad. En el caso con edificaciones de 6m este efecto se presenta menos evidente. De acuerdo con la Figura 34 donde se muestra la variación de la velocidad del viento dentro del cañón urbano con edificaciones de 31 metros, se observa muy poca variación de la velocidad del viento hasta el punto antes de superar el límite del cañón (27.5m) y en el punto siguiente la variación es significativa.

Figura 33 – Comportamiento de la velocidad del viento en el cañón urbano en vertical



(a)Edificaciones de 31m y (b) edificaciones de 6m. Corte transversal en la cuadra central del modelo analizado. Fuente: Elaborado por el autor

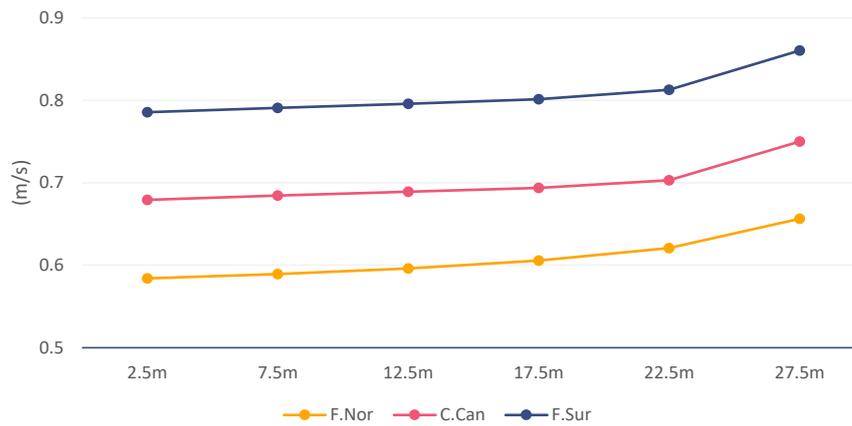
Figura 34 – Gradiente de la velocidad del viento en el cañón urbano de 31 metros



Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 35 se compara la velocidad del viento registrada en tres puntos del cañón urbano, del lado sur del cañón ósea frente a la fachada del edificio norte (F. Nor), del lado norte del cañón ósea frente a la fachada del edificio sur (F. Sur) y en el centro del cañón urbano (C. Can.), a diferentes alturas. Por un lado, se puede destacar que hay poca variabilidad de la velocidad del viento entre los 2.5m y los 22.5m, donde a partir de esta altura comienza a observarse un aumento de la velocidad del viento. Por otro lado, se identifica que la velocidad del viento es mayor sobre la fachada Sur respecto a la fachada Norte y a los datos registrados en el centro del cañón urbano. Se observa una diferencia entre las dos fachadas de en torno a 0.2m/s.

Figura 35 – Comportamiento de la velocidad del viento dentro del cañón urbano con orientación Este-Oeste en el periodo cálido



Los datos se obtuvieron a partir de la temperatura del aire frente a la fachada del edificio.
Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 36 se muestra la comparación de la Hr para el día 13 de febrero del archivo climático EPW y simulada con ENVI-met para los escenarios C31mEOPC y C6mEOPC. El archivo EPW muestra un Hr máxima de 89% a las 6hs y una mínima de 48% a las 16hs. El escenario C31mEOPC presentó una máxima de 89.4% a las 5hs y una mínima de 49.8% a las 16hs. El escenario C6mEOPC presentó una máxima de 89.7% a las 5hs y una mínima de 50.1% a las 16hs. Se observa que los escenarios simulados presentan su valor máximo una hora antes que el archivo EPW. Por otro lado, el escenario con edificaciones bajas de 6m presentó porcentajes levemente mayores que el de edificaciones de 31m.

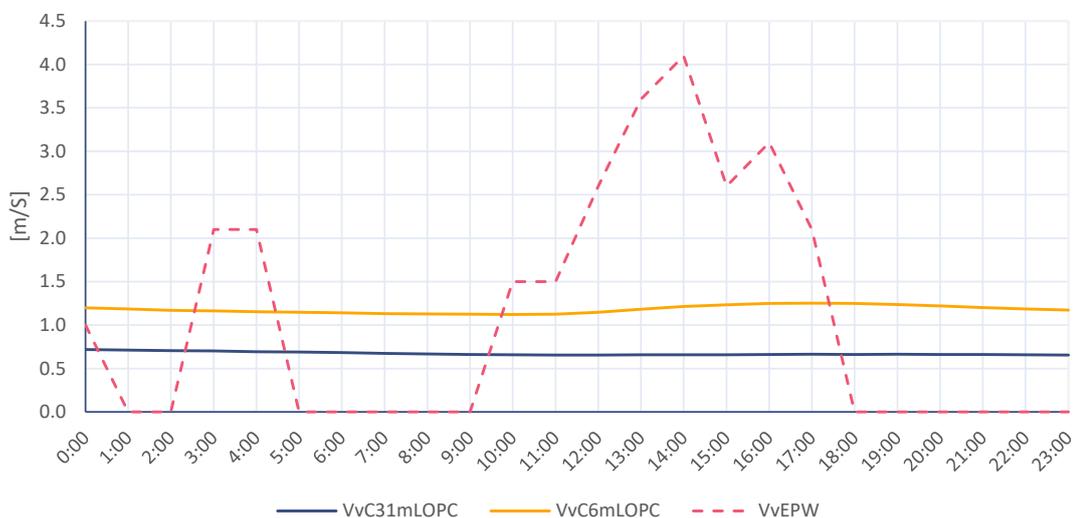
Figura 36 – Humedad relativa en el cañón urbano periodo cálido



Los datos se obtuvieron del promedio de todos los puntos dentro del cañón urbano a 2.5m de altura desde el nivel de calle. Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 37 se muestra la comparación de la V_v para el día 13 de febrero del archivo climático EPW y simulada con ENVI-met para los escenarios C31mEOPC y C6mEOPC. El archivo EPW muestra un V_v promedio diaria de 2.4m/s, con variaciones que alcanzando máximas de hasta 4.1m/s. Los escenarios simulados presentaron mayor estabilidad a lo largo del día, lo que se explica por el modo de simulación utilizado, donde no se forzó la velocidad del viento horaria. El escenario C31mEOPC presentó promedio diario de 0.7m/s, sin variación a lo largo del día. El escenario C6mEOPC presentó un promedio diario de 1.2m/s, con una leve variación de 0.1m/s. Se puede observar que el escenario con edificaciones bajas de 6m presentó velocidades del viento mayores, en torno a los 0.5m/s, respecto al caso con edificaciones de 31m. Siendo que para los dos casos se utilizó la misma velocidad del viento de inicialización, se puede observar la variación de la forma urbana en la velocidad del viento.

Figura 37 – Velocidad del viento en el cañón urbano periodo cálido

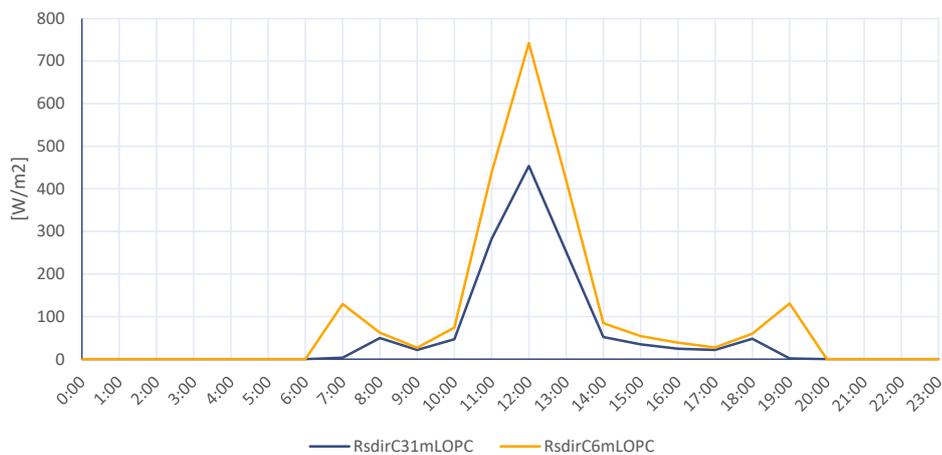


Los datos se obtuvieron del promedio de todos los puntos frente a la fachada del edificio. Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 38 se muestra la comparación de la radiación solar directa (R_{sdir}) para el día 13 de febrero simulada con ENVI-met para los escenarios C31mEOPC, C6mEOPC, C31mNSPC, C6mNSPC. Se observa a lo largo del día, que el primer escenario, con edificaciones altas de 31m presenta

menores valores, alcanzando una máxima a las 12hs de 453.6 W/m², mientras que el el segundo alcanza 742.2 W/m². También se observa que el primer escenario no recibe radiación solar directa dentro del cañón urbano hasta las 7hs, mientras que el segundo comienza a recibir una hora antes, a las 6hs. Por lo tanto, respecto la suma total de la radiación que ingresa en el cañón urbano, el escenario con edificaciones de 31m recibe un -44% (997.1w/m²) menos de radiación solar dentro del cañón urbano.

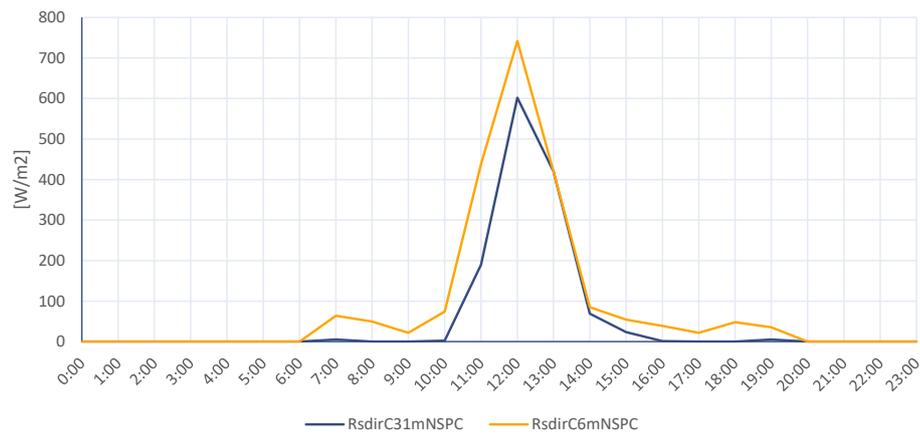
Figura 38 – Radiación solar directa en el cañón urbano con orientación Este-Oeste en el periodo cálido



Los datos se obtuvieron del promedio de todos los puntos dentro del cañón urbano a 2.5m de altura desde el nivel de calle. Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 33, se compara la radiación solar directa considerando el cañón urbano en la orientación Norte-Sur. Se comparan los escenarios C31mNSPC y C31mNSPC. Se puede observar que el pico de radiación en ambos escenarios ocurre a las 12hs, con 742.2 W/m² en el caso con edificaciones de 6m y 602.0 W/m² con edificaciones de 31m, con una diferencia de 140.2 W/m². Por otro lado, se observa con edificaciones de 31m el cañón no recibe radiación solar directa hasta en torno a las 10hs, mientras que con edificaciones de 6m comienza a recibir a las 6hs. Si se compara la radiación total diaria, el cañón con edificaciones de 31m recibe un -9% (775.3 w/m²) de radiación solar directa en el cañón urbano.

Figura 39 – Radiación solar directa en el cañón urbano con orientación Norte-Sur en el periodo cálido



Los datos se obtuvieron del promedio de todos los puntos dentro del cañón urbano a 2.5m de altura desde el nivel de calle. Fuente: Elaborado por el autor

A partir de los gráficos presentados anteriormente, se puede identificar que la temperatura del aire, al igual que la humedad relativa, de acuerdo con los resultados del ENVI-met, no presentaron grandes variaciones al modificar la altura de las edificaciones que conforman el cañón urbano. Así los resultados de la Tar concuerdan con las conclusiones de SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, (2017), donde ENVI-met muestra poca sensibilidad a los cambios morfológicos. Al analizar la variación de la Tar en el eje vertical para observar la existencia de un gradiente de temperatura, se observa poca variación hasta llegar al límite del cañón, lo cual concuerda con resultados de trabajos de GEORGAKIS; SANTAMOURIS, (2006).

Por otro lado, a pesar de la limitación del modo de simulación utilizado, donde no se utilizaron los datos horarios de velocidad y dirección del viento del archivo climático EPW para inicializar el modelo, aun así, se puede observar que la velocidad del viento muestra una variación al modificar la altura de las edificaciones. Se observa que la velocidad del viento sobre el límite del cañón comienza a aumentar a medida que se aumenta la altura. Por otro lado, también es importante resaltar la variación de la velocidad del viento al registrarse sobre la fachada Norte, fachada Sur y centro del cañón urbano. De acuerdo con el estudio SANTAMOURIS et al., (1999) estas variaciones se relacionan con la formación de vórtices dentro del cañón urbano, que varían de acuerdo con la velocidad del viento sobre el cañón, así como con la forma. En este caso se observa una diferencia menor, la cual puede estar dada por la baja velocidad del viento sobre cañón. De todas maneras, esta diferencia comienza a ser importante en los intercambios de energía de los edificios

los intercambios por convección entre las superficies de los edificios y el exterior, como lo señala LIU et al., (2015)

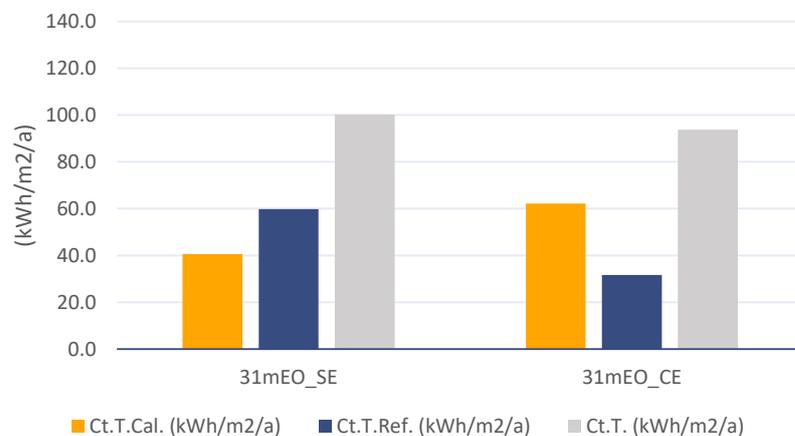
De igual forma la radiación solar directa recibida dentro del cañón urbano, muestra variaciones importantes al modificar la altura de las edificaciones, así como también al modificar la orientación del cañón urbano. En este sentido, de acuerdo con la importante influencia que tiene la radiación solar en el comportamiento energético de edificaciones en entornos urbanos, estas variaciones comienzan a tener relevancia, entre otras, en diseño de la forma urbana y el comportamiento energético de los edificios.

4.2 VARIACIÓN CARGAS TÉRMICAS

4.2.1 Influencia del entorno urbano

Al analizar las cargas térmicas totales del edificio para refrigeración (Ct.T.Ref) y calefacción (Ct.T.Cal), en la Figura 40 se observa que, al considerar el entorno (31mEO_CE), aumentan +21.7 kWh/m²/a (+53%) las de calefacción y se reducen un -28.2 kWh/m²/a (-47%) las de refrigeración. Disminuyendo en las cargas totales anuales un -6.5 kWh/m²/a (-7%). Lo cual indica que el entorno urbano genera una reducción de las cargas térmicas totales del edificio, pero genera una variación en la distribución de la composición de calefacción y refrigeración.

Figura 40 – Cargas térmicas totales anuales desagregadas del escenario C31mEO con y sin entorno



Ct.T. = Cargas térmicas Totales; Cal. = Calefacción; Ref = Refrigeración.
Fuente: Elaborado por el autor.

En la Figura 41 se muestran las cargas térmicas totales (Ct.T.) anuales (Calefacción + Refrigeración) para cada piso del edificio en el escenario urbano con 31 metros de altura y orientación del cañón urbano Este-Oeste (C31mEO). Cuando el edificio se considera aislado (31mEO_SE), se observa que las cargas térmicas totales presentan cierta estabilidad en todos los pisos. La menor Ct.T se observó en el piso 9 (P9) con 9.2 kWh/m²/a y la mayor en los pisos 2 (P2), 3 (P3) y 4 (P4) con en torno a 12 kWh/m². Observándose una diferencia entre ambos de 2.8 kWh/m²/a, por lo tanto, con una disminución de -28% de la Ct.T. en los pisos más altos respecto a los más bajos. Por otro lado, cuando se considera el entorno del edificio (C31mEO_CE), se observa que las Ct.T. presentan mayor diferencia, principalmente desde el piso 1 al piso 5 (P5). El P6 presentó la menor Ct.T con 7.1 kWh/m²/a, mientras que el P1 presentó la mayor con 17.7 kWh/m²/a, observándose una diferencia entre ambos de 10.6 kWh/m²/a, por lo tanto, con un diferencia de en torno al -60%. Desde el P6 al P7 ocurre un aumento de 0.7 kWh/m²/a y se mantiene similar hasta el P9.

Cuando se compara la variación al considerar el entorno urbano en las cargas térmicas totales, se observa la mayor variación en los pisos más bajos. A partir de la Tabla 3, se identifica que el P1 aumentó de 10.4 kWh/m²/a para 17.7 kWh/m²/a (+70%), y tiende a disminuir hasta el P5 y P6, donde varió de 11.6 kWh/m²/a para 7.1 kWh/m²/a (-39%) y 11.3 kWh/m²/a para 6.9 kWh/m²/a (-39%) respectivamente. A partir del piso 6 (P6) comienzan a aumentar, pero manteniéndose siempre menores a las cargas térmicas totales sin entorno, hasta el P9 donde varió de 9.2 kWh/m²/a para 7.3 kWh/m²/a (-21%). El comportamiento de los pisos más bajos, si se desagregan los datos, se explica debido a que las cargas térmicas de calefacción se ven fuertemente influenciadas por el entorno en estos pisos.

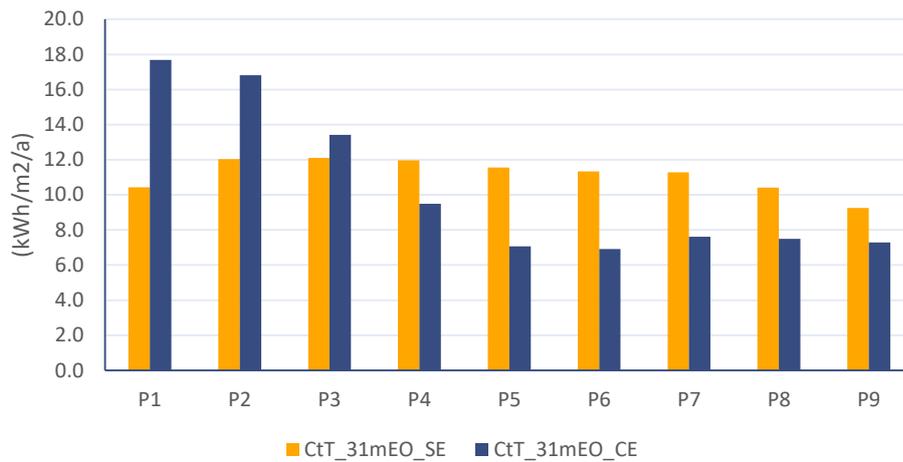
Tabla 3 - Cargas térmicas totales por piso con y sin entorno urbano

| Piso | Ct.T_31mEO_SE (kWh/m ² /a) | Ct.T_31mEO_CE (kWh/m ² /a) | Dif (kWh/m ² /a) | Dif (%) |
|------|--|--|--------------------------------|------------|
| P1 | 10.4 | 17.7 | 7.3 | 70% |
| P2 | 12.0 | 16.8 | 4.8 | 40% |
| P3 | 12.1 | 13.4 | 1.3 | 11% |
| P4 | 12.0 | 9.5 | -2.5 | -21% |

| | | | | |
|----|------|-----|------|------|
| P5 | 11.6 | 7.1 | -4.5 | -39% |
| P6 | 11.3 | 6.9 | -4.4 | -39% |
| P7 | 11.3 | 7.6 | -3.7 | -33% |
| P8 | 10.4 | 7.5 | -2.9 | -28% |
| P9 | 9.2 | 7.3 | -2.0 | -21% |

Fuente: Elaborado por el autor.

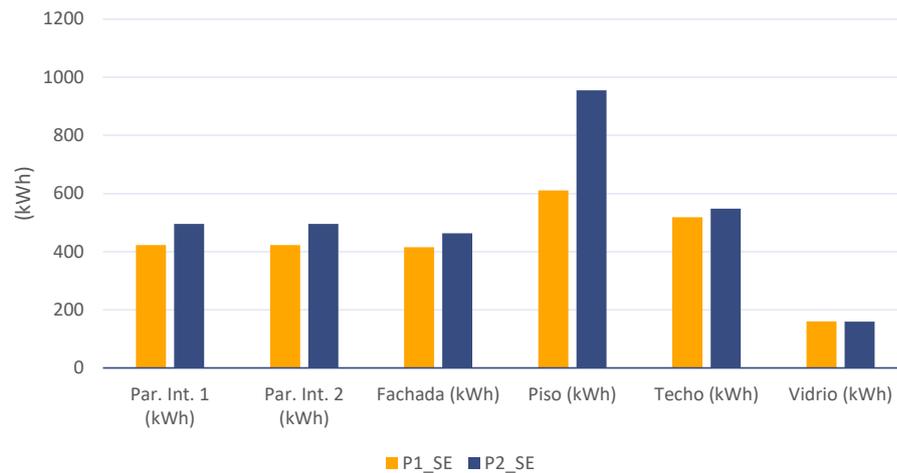
Figura 41 – Cargas térmicas totales anuales escenario C31mEO con y sin entorno urbano



Ct.T. = Cargas térmicas totales; SE = Sin Entorno; CE = Con Entorno. Fuente: Elaborado por el autor.

El aumento que ocurre en las cargas térmicas totales del P1 a P2 sin entorno, a partir del análisis del balance de energía por convección de la zona, se explica por el aumento de forma significativa de calor que se gana en la zona por la superficie del piso, Figura 42. Este comportamiento varía del P1 al P2 y no así tan significativamente en los demás pisos, debido a que el P1 se encuentra en contacto con la planta baja del edificio, la cual está en contacto con el suelo. De acuerdo con otras investigaciones anteriores, esto afecta de forma el desempeño energético (ELI et al., 2019). En esta investigación no se abordó en detalle el modelo de contacto con el suelo, pudiendo así influir en los resultados.

Figura 42 – Ganancias de calor por convección de las superficies del piso 1 y piso 2 sin entorno



P1_SE y P2_SE = Piso 1 y 2 sin entorno; Par. Int. 1 y Par. Int. 2 = Superficies paredes internas; Fachada = Fachada al cañón (exterior). Fuente: Elaborado por el autor.

Por otro lado, en la Figura 43 (a) se muestran los resultados de las cargas térmicas de calefacción por piso. Se identifica que las cargas para calefacción muestran poca variación entre los pisos del edificio sin entorno urbano. Las mayores cargas térmicas se observaron en el P1 con $6.3 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ y las menores en el P8 con $3.0 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$, por lo tanto, disminuye a medida que aumenta la altura, con una diferencia máxima entre el P1 y P8 de $-3.3 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ (-52%). Cuando se considera el entorno urbano, se puede observar que existe mayor diferencia de las cargas térmicas de calefacción entre los pisos. Las mayores cargas térmicas se observan en el P1 con $15.8 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ y las menores en el P6, P8 y P9 con $3.2 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Se observa que al igual que el caso anterior las cargas térmicas disminuyen con la altura, pero la diferencia máxima entre el P1 y P8 es de $-12.6 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ (-80%). Finalmente, a partir de la Tabla 4, cuando se comparan los resultados de las cargas térmicas para calefacción con y sin entorno, se observa que los pisos más bajos presentaron la mayor variación. El P1 presentó el mayor aumento de $6.3 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ para $15.8 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ (+149%). El P6 mostró la mayor reducción de $4.0 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ para $3.2 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ (-20%).

La diferencia en el comportamiento de los pisos entre el P1 a P5 y P6 a P9, podría estar explicado principalmente por la incidencia de radiación solar a las zonas estudiadas y la sombra que causa el entorno por el ángulo de incidencia solar, Figura 44. Si bien es una simplificación de la realidad, el esquema de la Figura 44 (b) permite observar el ángulo de la altitud solar para un momento específico del

período frío. Se observa que la mayor incidencia solar sobre la fachada del edificio ocurre a partir del piso 5, lo cual responde a los datos graficados en la Figura 43 (a).

Tabla 4 - Cargas térmicas desagregadas por piso del caso C31mEO

| Piso | 31mEO_SE (kWh/m ² /a) | 31mEO_CE (kWh/m ² /a) | Dif (kWh/m ² /a) | Dif (%) |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------|
| Ct.Cal_P1 | 6.3 | 15.8 | 9.5 | 149% |
| Ct.Cal_P2 | 5.8 | 13.7 | 7.9 | 137% |
| Ct.Cal_P3 | 5.2 | 10.0 | 4.8 | 93% |
| Ct.Cal_P4 | 4.8 | 5.9 | 1.1 | 23% |
| Ct.Cal_P5 | 4.3 | 3.5 | -0.8 | -19% |
| Ct.Cal_P6 | 4.0 | 3.2 | -0.8 | -20% |
| Ct.Cal_P7 | 3.9 | 3.6 | -0.3 | -7% |
| Ct.Cal_P8 | 3.0 | 3.2 | 0.2 | 6% |
| Ct.Cal_P9 | 3.1 | 3.2 | 0.1 | 3% |
| Ct.Ref_P1 | 4.1 | 1.9 | -2.2 | -54% |
| Ct.Ref_P2 | 6.2 | 3.1 | -3.1 | -50% |
| Ct.Ref_P3 | 6.9 | 3.4 | -3.5 | -51% |
| Ct.Ref_P4 | 7.1 | 3.6 | -3.6 | -50% |
| Ct.Ref_P5 | 7.2 | 3.6 | -3.6 | -50% |
| Ct.Ref_P6 | 7.3 | 3.7 | -3.6 | -49% |
| Ct.Ref_P7 | 7.4 | 4.0 | -3.4 | -46% |
| Ct.Ref_P8 | 7.4 | 4.3 | -3.1 | -42% |
| Ct.Ref_P9 | 6.1 | 4.1 | -2.0 | -33% |

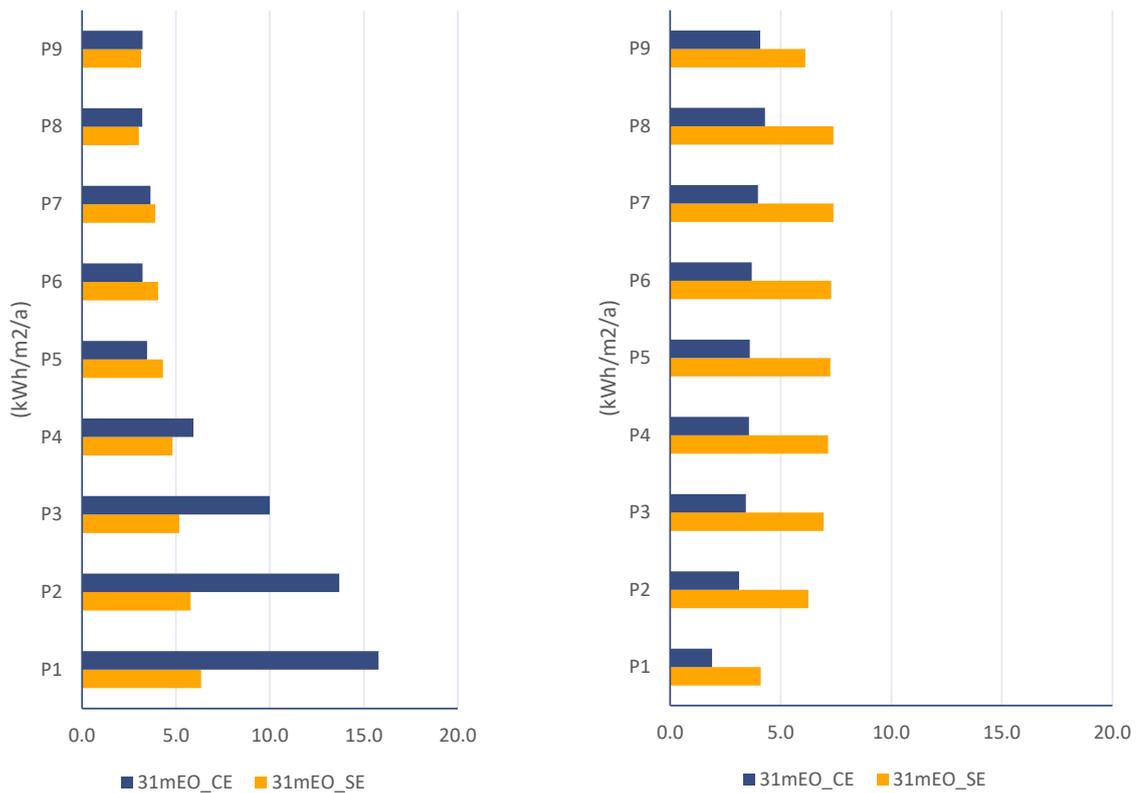
Ct.Cal. = Carga térmica de Calefacción; Ct.Ref. = Carga térmica de Refrigeración.

Fuente: Elaborado por el autor.

En la Figura 43 (b) se muestran los resultados de las cargas térmicas de refrigeración por piso. Se observa un comportamiento estable en todos los pisos. Al considerar el edificio aislado, se observa que las menores cargas térmicas se obtuvieron en el P1 con 4.1 kWh/m²/a y las mayores en el P7 y P8 con 7.4 kWh/m²/a. Por lo tanto, se observa una diferencia de 3.3 kWh/m²/a, siendo en los pisos más altos un +80% superiores las cargas térmicas. Cuando se considera el entorno urbano, los menores valores se observaron también en el P1 con 1.9 kWh/m² y los mayores en el P8 con 4.3 kWh/m²/a, presentando una diferencia de 2.4 kWh/m²/a, osea un +126% más altas. Se observa, que las cargas térmicas de refrigeración presentan un comportamiento inverso a las de calefacción, ya que aumentan a medida que aumenta la altura. Excepto en el último piso que se ve influenciado por la mayor área expuesta. Por otro lado, a partir de la Tabla 4 se observa que al comparar los resultados de las cargas térmicas de refrigeración con y sin entorno, el P1 presentó la mayor variación con una reducción de 4.1 kWh/m²/a

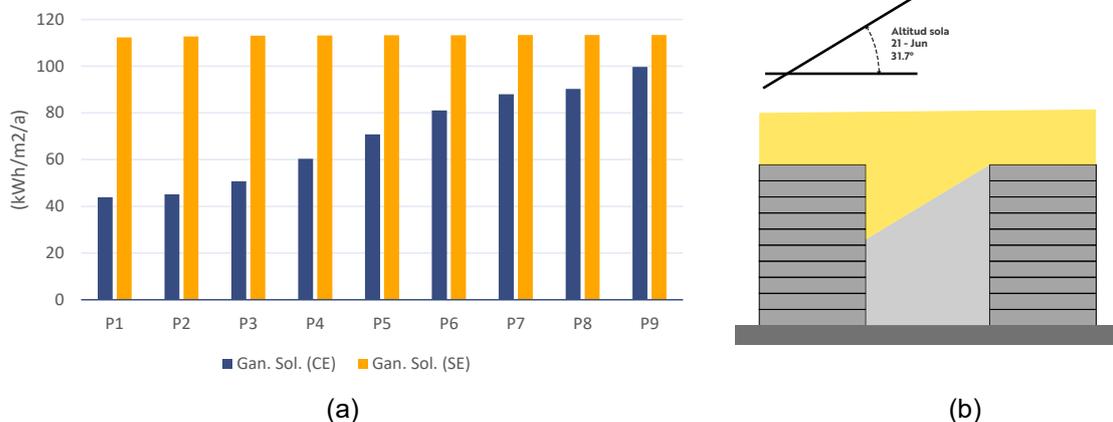
para 1.9 kWh/m²/a (-54%) y el P9 presentó la menor variación, también con una reducción, de 6.1 kWh/m²/a para 4.1 kWh/m²/a (-33%).

Figura 43 – Cargas térmicas de calefacción y refrigeración del escenario C31mEO con y sin entorno urbano



(a) Cargas térmicas de calefacción y (b) cargas térmicas de refrigeración. Fuente: Elaborado por el autor.

Figura 44 – Incidencia de radiación solar del escenario C31mEO



(a) Ganancias de radiación solar por las ventanas y (b) esquema de incidencia del sol en el cañón urbano para el 21 de junio a las 12hs. Gan.Sol = Ganancias Solares en la zona térmica, con entorno (CE) y sin entorno (SE). Fuente: Elaborado por el autor.

Los resultados hasta aquí presentados demuestran la importante influencia del entorno en las cargas térmicas de los edificios. Si bien se identifica una disminución de las cargas térmicas totales del edificio, se observa una importante variación al desagregarlas en cargas para calefacción (+53%) y refrigeración (-47%). Así también la importante variación que existe entre los pisos. Donde las cargas de calefacción se ven significativamente afectadas en los pisos más bajos y desciende a medida que aumenta la altura. Mientras que las cargas de refrigeración se ven afectadas de forma similar en todos los pisos, aumentando el impacto del entorno en los pisos más bajos.

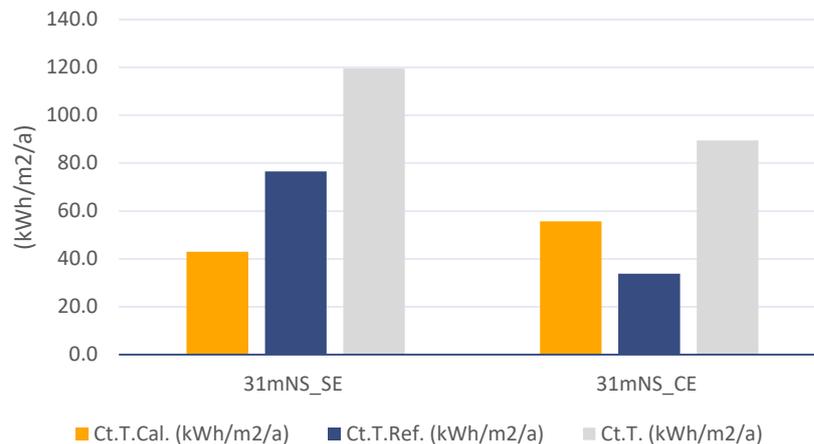
En la misma línea, otros estudios han demostrado el fuerte impacto del entorno en el comportamiento térmico de los edificios. En Estados Unidos PISELLO et al., (2012) identificó variaciones de 33-43% en refrigeración y de 22-20% de calefacción por causa del entorno urbano. Por otro lado, LIMA; SCALCO; LAMBERTS, (2019) en Brasil, identificó variaciones de entre 19-21% en las cargas térmicas de refrigeración y mayores diferencias en los pisos más bajos hasta 29%. Estos resultados si bien no son comparables debido a las características climáticas y tipo de edificios considerados en cada estudio, permite dimensionar la importancia del entorno.

4.2.2 Influencia de la orientación del cañón urbano

Al analizar las cargas térmicas totales del edificio para refrigeración (Ct.T.Ref) y calefacción (Ct.T.Cal) cuando se considera el cañón urbano con orientación de su eje principal Norte-Sur (NS), por lo tanto la fachada principal del edificio con orientación Este. En la Figura 40 se observa que, al considerar el entorno (31mNS_CE), aumentan +12.7 kWh/m²/a (+30%) las cargas de calefacción y se reducen un -42.7 kWh/m²/a (-56%) las de refrigeración. Disminuyendo en las cargas totales anuales un -30.0 kWh/m²/a (-25%). Por lo tanto, estos resultados indican que el entorno tiene mayor influencia en las cargas térmicas cuando el cañón urbano tiene orientación Norte-Sur y el edificio hacia el Este, respecto al cañón con orientación Este-Oeste y el edificio al Norte. Esto se explica principalmente al menor

aumento de las cargas térmicas de calefacción y a la mayor reducción de las cargas térmicas de refrigeración.

Figura 45 – Cargas térmicas totales anuales desagregadas del escenario C31mNS con y sin entorno



SE = Sin Entorno; CE = Con Entorno.

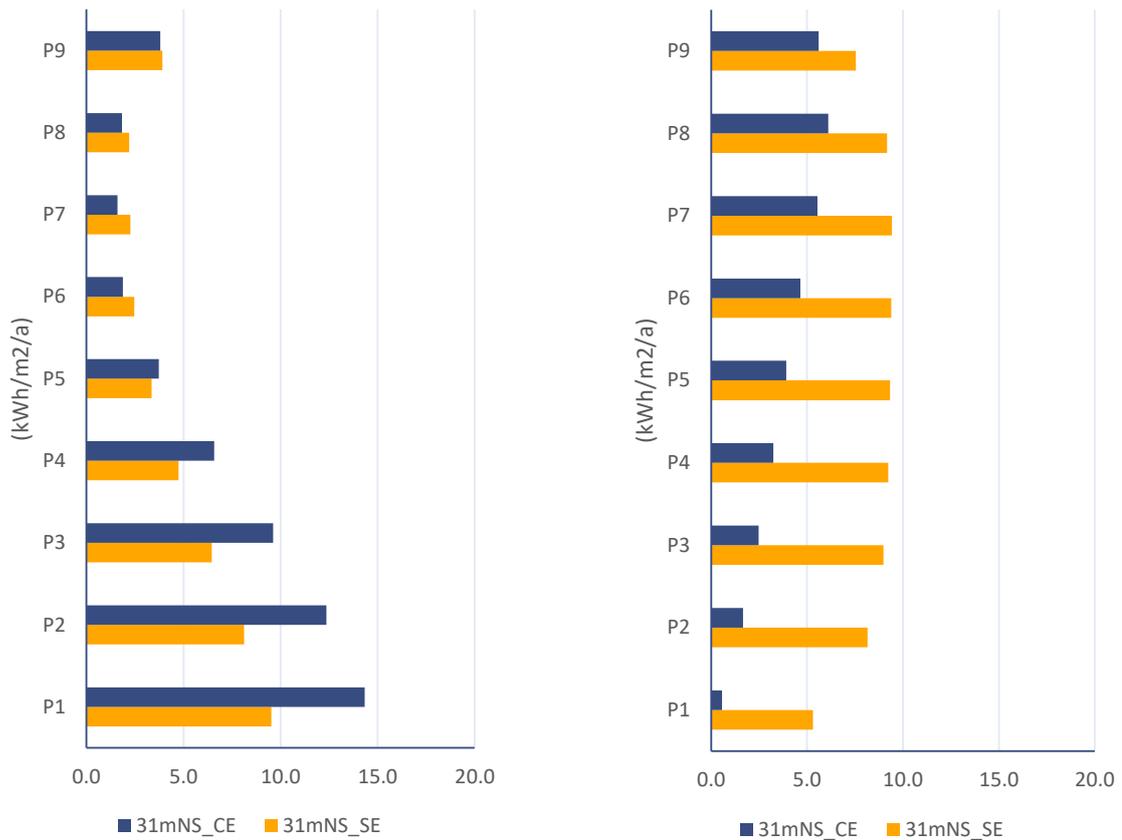
Fuente: Elaborado por el autor.

En la Figura 46 (a) se presentan las cargas térmicas de calefacción para cada piso del caso C31mNS. Se observa que, sin considerar el entorno, las mayores cargas térmicas se presentan en el P1 con 9.5 kWh/m²/a y las menores en el P8 con 2.2 kWh/m²/a, por lo tanto, se observa que las cargas descienden a medida que aumenta la altura, con una reducción entre el P1 y P8 de -59%. Cuando se considera el entorno urbano las mayores cargas térmicas se observan en el P1 con 14.3 kWh/m²/a y la menor en el P7 con 1.6 kWh/m²/a, por lo tanto, la diferencia entre el piso con mayor y menor cargas térmicas fue de -89%. Cuando se compara la variación entre el caso sin entorno y con entorno, se observa que las mayores variaciones se observaron en los pisos más bajos Tabla 5. El P2 presentó la mayor variación de 8.1 kWh/m²/a a 12.4 kWh/m²/a con un aumento en las cargas térmicas de (+52%). El P7 presentó la mayor reducción de las cargas térmicas de 2.3 kWh/m²/a a 1.6 kWh/m²/a (-29%). Se observa que del P1 al P5, las cargas descienden, pero son superiores en el caso con entorno. Del P6 al P9, las cargas térmicas son inferiores en el caso con entorno, aumentando a medida que aumenta la altura. Estos resultados indican una fuerte diferencia en el porcentaje de aumento de las cargas térmicas en los pisos más bajos respecto al cañón urbano con

orientación Este-Oeste. Por lo tanto, esto explica en parte el menor aumento de las cargas térmicas totales de calefacción.

En la Figura 46 (b) se presentan las cargas térmicas de refrigeración para cada piso del caso C31mNS. Las mayores cargas térmicas sin considerar el entorno se identifican en el P7 y P8 con 9.4 kWh/m²/a. Las menores cargas térmicas se observan en el P1 con 5.3 kWh/m². Por lo tanto, se puede observar una diferencia de 4.1 kWh/m²/a, lo cual muestra una disminución de -43%. Cuando se considera el entorno, se observa que el P1 presenta las menores cargas con 0.6 kWh/m²/a y el P8 las mayores con 6.1 kWh/m²/a, con una diferencia de 5.5 kWh/m²/a, lo que representa un aumento sustancial entre ambos pisos a medida que aumenta la altura. Finalmente, como se observa en la Tabla 5, cuando se compara la variación al considerar el entorno, se identifica que el P1 presentó la mayor diferencia con una reducción de 5.3 kWh/m²/a para 0.6 kWh/m²/a (-89%) y el P9 presentó la menor diferencia con una reducción de 7.5 kWh/m²/a para 5.6 kWh/m²/a (-26%). Por lo tanto, respecto al cañón con orientación Este-Oeste, se observa que desde el P5 al P1 la reducción de las cargas térmicas de refrigeración es mayor en el cañón con orientación Norte-Sur.

Figura 46 – Cargas térmicas con y sin entorno en el cañón urbano Norte-Sur del escenario C31mNS



(a)

(b)

(a) Cargas térmicas de refrigeración escenario C31mNS, y (b) calefacción para el escenario C31mNS.
Fuente: Elaborado por el autor.

Tabla 5 - Cargas térmicas desagregadas por piso del caso C31mNS

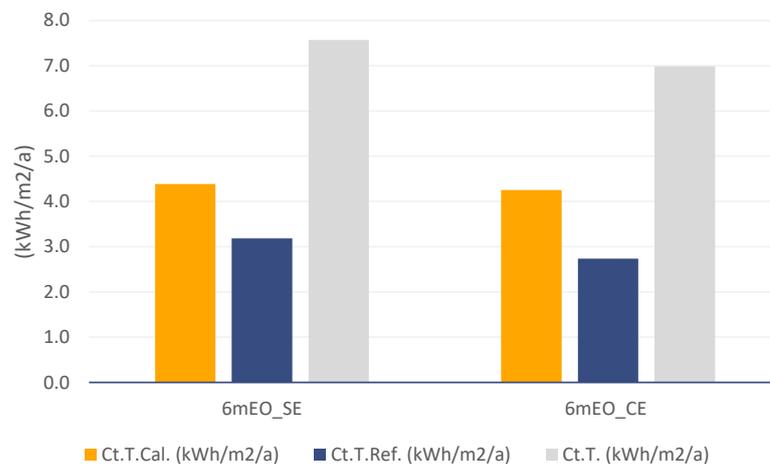
| Piso | 31mNS_SE (kWh/m ² /a) | 31mNS_CE (kWh/m ² /a) | Dif (kWh/m ² /a) | Dif (%) |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------|
| Ct.Cal_P1 | 9.5 | 14.3 | 4.8 | 51% |
| Ct.Cal_P2 | 8.1 | 12.4 | 4.2 | 52% |
| Ct.Cal_P3 | 6.5 | 9.6 | 3.2 | 49% |
| Ct.Cal_P4 | 4.7 | 6.6 | 1.8 | 38% |
| Ct.Cal_P5 | 3.4 | 3.7 | 0.4 | 11% |
| Ct.Cal_P6 | 2.5 | 1.9 | -0.6 | -24% |
| Ct.Cal_P7 | 2.3 | 1.6 | -0.7 | -29% |
| Ct.Cal_P8 | 2.2 | 1.8 | -0.4 | -17% |
| Ct.Cal_P9 | 3.9 | 3.8 | -0.1 | -2% |
| Ct.Ref_P1 | 5.3 | 0.6 | -4.7 | -89% |
| Ct.Ref_P2 | 8.2 | 1.7 | -6.5 | -80% |
| Ct.Ref_P3 | 9.0 | 2.5 | -6.5 | -73% |
| Ct.Ref_P4 | 9.2 | 3.2 | -6.0 | -65% |
| Ct.Ref_P5 | 9.3 | 3.9 | -5.4 | -58% |
| Ct.Ref_P6 | 9.4 | 4.7 | -4.7 | -50% |
| Ct.Ref_P7 | 9.4 | 5.5 | -3.9 | -41% |
| Ct.Ref_P8 | 9.2 | 6.1 | -3.1 | -33% |
| Ct.Ref_P9 | 7.5 | 5.6 | -1.9 | -26% |

Ct.Cal. = Carga térmica de Calefacción; Ct.Ref. = Carga térmica de Refrigeración.
Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.3 Influencia del entorno urbano bajo

Para comparar evaluar el comportamiento de una edificación baja, en un entorno bajo, el cual tiene las características morfológicas del área actual de estudio, en la Figura 47 se muestran los resultados de las cargas térmicas de calefacción y refrigeración, del piso 1 del edificio en el escenario de 6 metros (C6mEO). Al considerar la geometría del entorno urbano, se observa una reducción en las cargas de calefacción de 4.4 kWh/m²/a para 4.3 kWh/m²/a con una diferencia de -0.1 kWh/m²/a (-3%) y en refrigeración una reducción de 3.2 kWh/m²/a para 2.7 kWh/m²/a con una diferencia de -0.4 kWh/m²/a (-14%). Respecto a las cargas térmicas totales, se observa una reducción de 7.6 kWh/m²/a para 7.0 kWh/m²/a con una diferencia de -0.6 kWh/m²/a (-8%).

Figura 47 – Cargas térmicas totales anuales desagregadas con y sin entorno del escenario C6mEO



Fuente: Elaborado por el autor.

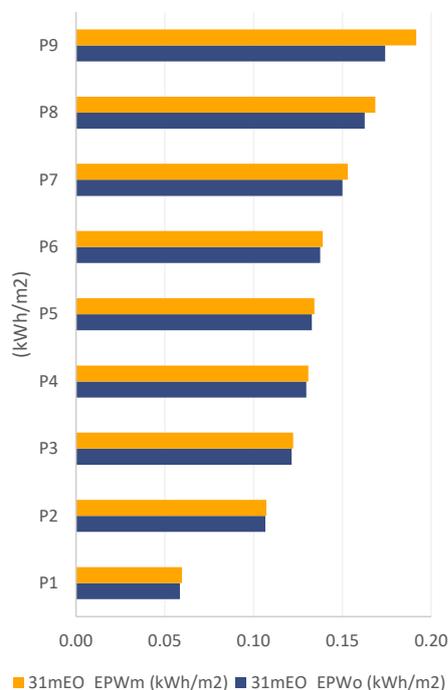
Estos resultados muestran que, si bien la reducción de las cargas térmicas totales presenta un porcentaje similar de reducción, con entorno de 31 metros -7% y con entorno de 6 metros -8%, muestra una fuerte diferencia en cuanto a la variación de las cargas de calefacción y refrigeración. Aun así, se observa que las cargas térmicas de calefacción presentan una reducción leve al igual que las de refrigeración. Lo cual se explica y afirma lo analizado anteriormente, el importante

impacto que tiene la forma urbana en el acceso de la radiación solar al cañón y como ganancias térmicas en los edificios.

4.2.4 Cargas térmicas partir de la simulación integrada

En la Figura 48 se muestran las cargas térmicas de refrigeración a partir de la simulación energética integrada para el día 13 de febrero. Se considera el edificio en el escenario con altura de 31 metros (31mEOPC), utilizando para la simulación energética el archivo climático EPW original (EPWo) y el archivo EPW modificado (EPWm) como se explicó en la sección de metodología. Se observa que al utilizar el archivo EPWm las cargas de refrigeración aumentan levemente. En los pisos más altos P8 y P9 es donde se observa mayor diferencia, pero no exceden los 0.017 kWh/m² (+10%).

Figura 48 – Cargas térmicas de refrigeración del escenario C31mEO a partir de la simulación energética integrada



Fuente: Elaborado por el autor

En la Tabla 6 se presentan los resultados de las cargas térmicas de refrigeración para cada piso, comparando la simulación con el archivo EPWo y la

simulación integrada con el archivo EPWm. Como se mencionó anteriormente, la variación en las cargas térmicas es baja, siendo más notoria en los últimos dos pisos. Si se observa la suma de las cargas térmicas totales del edificio, se puede ver que utilizar el archivo climático aumentó de 1.17 kWh/m² para 1.21 kWh/m² con una variación de 0.033 kWh/m² (+3%). Lo cual en principio indicaría que contemplar las condiciones microclimáticas del entrono estudiado genera un impacto en las cargas térmicas del edificio.

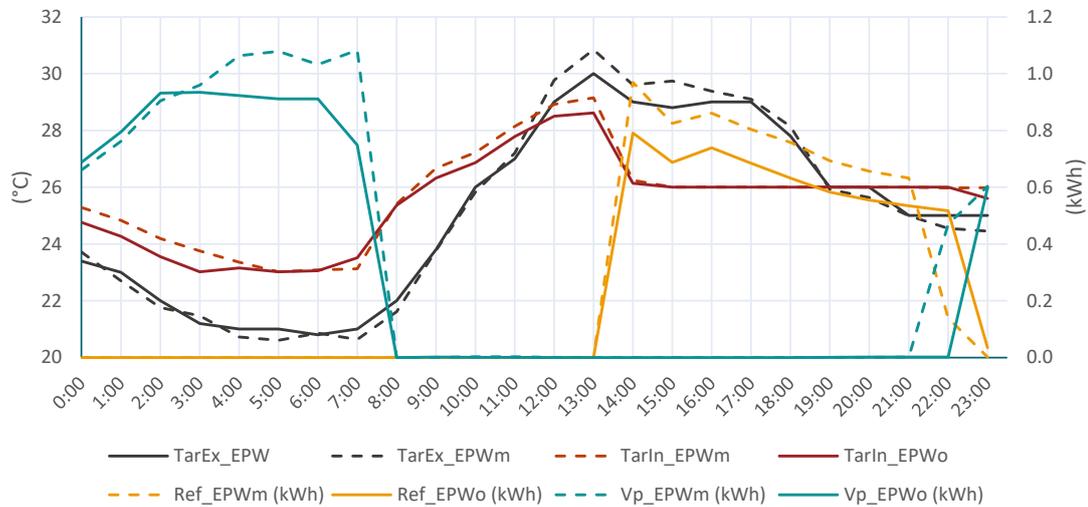
Tabla 6 Cargas térmicas de refrigeración de simulación energética integrada del caso C31mEO

| Piso | 31mEO_EPWo (kWh/m ²) | 31mEO_EPWm (kWh/m ²) | Dif (kWh/m ²) |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| P1 | 0.06 | 0.06 | 0.001 |
| P2 | 0.11 | 0.11 | 0.000 |
| P3 | 0.12 | 0.12 | 0.000 |
| P4 | 0.13 | 0.13 | 0.001 |
| P5 | 0.13 | 0.13 | 0.001 |
| P6 | 0.14 | 0.14 | 0.001 |
| P7 | 0.15 | 0.15 | 0.003 |
| P8 | 0.16 | 0.17 | 0.005 |
| P9 | 0.17 | 0.19 | 0.017 |
| Ct.T (kWh/m ²) | 1.17 | 1.21 | 0.033 |

Fuente: Elaborado por el autor.

En la Figura 49 se muestra el comportamiento interior del piso 9 debido a que fue la zona que mostró mayor variación al utilizar el archivo climático modificado. Por un lado, se presenta la temperatura del aire exterior (TarEx) utilizada en el archivo EPWo y EPWm. Como se comentó al inicio de la sección, la variación no es significativa en general, mientras que durante las horas del mediodía 11am hasta 17pm, se observa que la TarEx es mayor en el archivo EPWm alcanzando hasta +0.9°C respecto al EPWo. Por otro lado, se presenta la temperatura del aire interior (TarIn), resultado de la simulación con los dos archivos climáticos. En los dos casos se encuentra próxima, pero en promedio la TarIn_EPWm es 0.3°C mayor que la TarIn_EPWo. Con máximas diferencias de 0.7°C a las 3am y 0.5°C a las 13pm. Esto explica el comportamiento, por un lado, de la ventilación natural, que durante las horas de la madrugada 3 am a 8 am, aumenta el intercambio de energía con el exterior. Y, por otro lado, el aumento de las cargas térmicas de refrigeración desde las 14 pm hasta 21 pm.

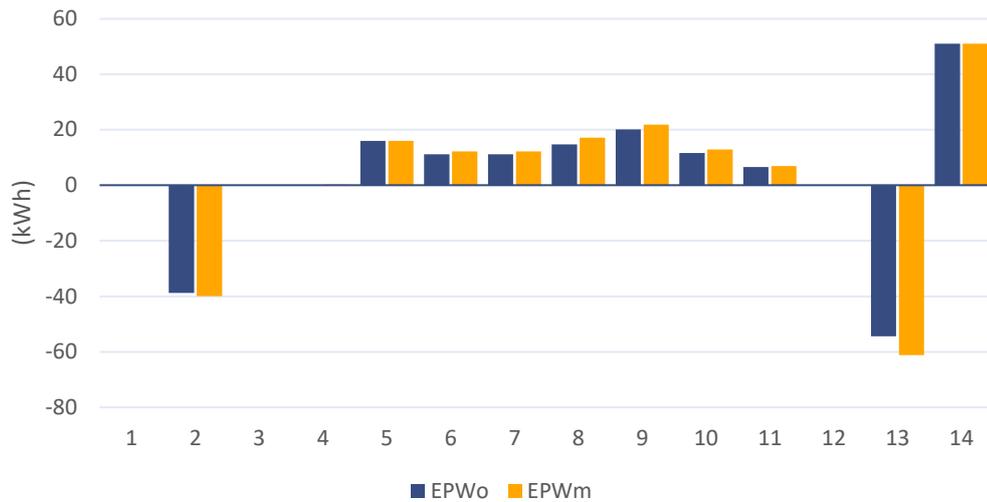
Figura 49 – Comportamiento del ambiente interior del piso 9 con la simulación integrada en el escenario C31mEO



Fuente: Elaborado por el autor

De acuerdo con el análisis de los datos microclimáticos realizado al inicio de esta sección, es esperable que las variaciones en las cargas térmicas no sean significativas, ya que el archivo climático presentó pocas variaciones. Por lo tanto, en la Figura 50 se analiza el balance de energía a partir de la suma de los intercambios por infiltraciones, cargas internas, por las superficies (paredes, piso, cubierta y vidrio), por ventilación natural y ganancias solares. Para este análisis se sumaron las ganancias y pérdidas de energía de todos los pisos para facilitar la visualización. Se observa que las principales variaciones en los intercambios de energía al simular con el archivo climático EPWm, es el aumento de ganancias de calor por las superficies al interior de la zona y el aumento en las pérdidas por ventilación natural. A partir de los datos de la Tabla 7, al sumar la diferencia del total de pérdidas y ganancias, resulta en +1.2 kWh, mientras que la diferencia en las cargas de refrigeración es de -1.1 kWh. Por lo cual se puede observar que el calor extra que ingresa en la zona es retirado casi en su totalidad, por el aumento en las cargas de refrigeración.

Figura 50 – Balance de a partir de la simulación energética integrada en el escenario C31mEO



1 - Calefacción (kWh); 2 - Refrigeración (kWh); 3 – Pérdidas por infiltración (kWh); 4 – Ganancias por infiltración (kWh); 5 - Cargas Internas (kWh); 6 – Gan. Pared Interna1 (kWh); 7 - Gan. Pared Interna 2 (kWh); 8 - Fachada (kWh); 9 - Piso (kWh); 10 - Cubierta (kWh); 11 – Por vidrio (kWh); 12 – Ganancias por Ventilación Natural (kWh); 13 – Pérdidas por Ventilación Natural (kWh); 14 – Ganancias Solares (W). Pérdidas y ganancias de energía para el día 13 de febrero.

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 7 Pérdidas y ganancias de energía con archivo climático EPWo y EPWm del caso C31mEO

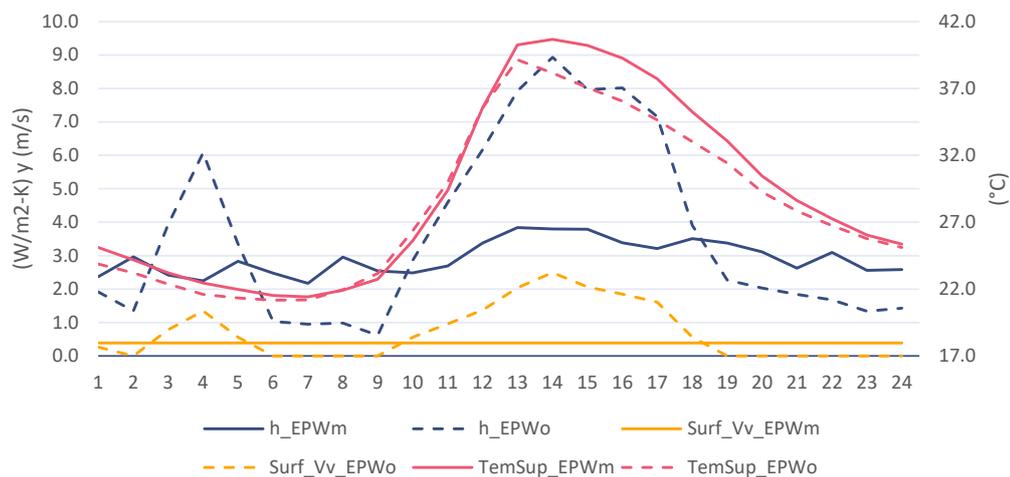
| | EPWo (kWh) | EPWm (kWh) | Dif (kWh) |
|-------------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Calefacción (kWh) | 0.00 | 0.00 | 0.0 |
| Refrigeración (kWh) | -38.8 | -39.9 | -1.1 |
| Pérdidas por infiltración (kWh) | -0.10 | -0.10 | -0.1 |
| Ganancias por infiltración (kWh) | 0.10 | 0.20 | 0.1 |
| Cargas Internas (kWh) | 16.0 | 16.0 | 0.0 |
| Pared Interior 1 (kWh) | 11.1 | 12.2 | 1.1 |
| Pared Interior 2 (kWh) | 11.1 | 12.2 | 1.1 |
| Fachada (kWh) | 14.7 | 17.1 | 2.4 |
| Piso (kWh) | 20.2 | 21.8 | 1.7 |
| Techo (kWh) | 11.6 | 12.9 | 1.3 |
| Vidrio (kWh) | 6.50 | 7.00 | 0.4 |
| Ganancias ventilación natural (kWh) | 0.10 | 0.10 | 0.0 |
| Pérdidas ventilación natural (kWh) | -54.4 | -61.2 | -6.8 |
| Ganancias por radiación solar (W) | 51.0 | 51.0 | 0.0 |

Fuente: Elaborado por el autor.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 7, se observa que la mayor variación en las ganancias de calor ocurre por la fachada principal de la zona, la cual se orienta hacia el cañón urbano de estudio. Por lo tanto, debido a que una limitante fue la baja velocidad del viento que presentó el archivo climático EPWm, en la Figura 51 se presenta la velocidad del viento frente a la fachada, el coeficiente

convectivo exterior y la temperatura superficial. Todos los datos son frente a la fachada del piso 9 de la simulación con el archivo EPWo y EPWm. Por un lado, se puede apreciar que la velocidad del viento frente a la fachada con el archivo EPWm se mantiene constante a lo largo de las 24hs, mientras que el archivo EPWo muestra una importante variación en ciertas horas del día. La variación de la velocidad del viento refleja su efecto en la modificación del coeficiente convectivo. Y, por ejemplo, si se compara la temperatura de la superficie exterior, se puede ver que cuando aumenta la velocidad del viento con el archivo EPWo, aumenta el coeficiente convectivo y desciende la temperatura de la superficie.

Figura 51 – Comportamiento de la superficie exterior de la fachada del piso 9 en el escenario C31mEO a partir de la simulación energética integrada

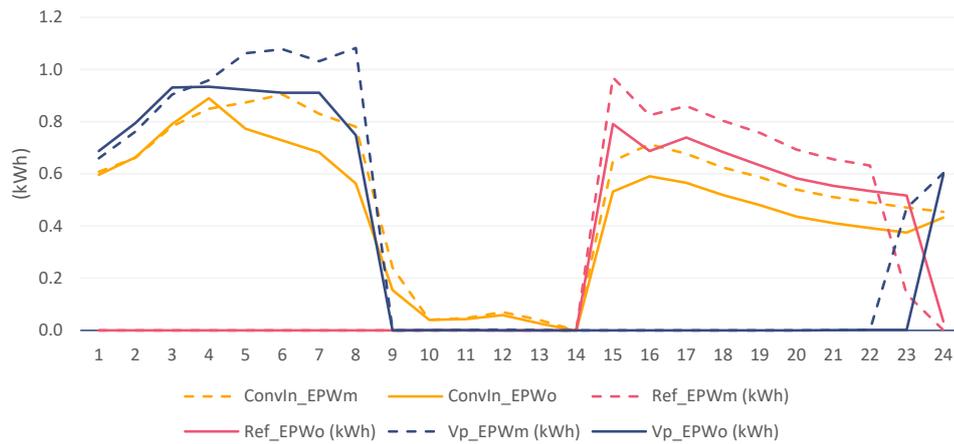


h = Coeficiente convectivo (W/m²-K); Surf_Vv = Velocidad del viento frente a la superficie exterior (m/s); y TemSup = Temperatura de la superficie exterior (°C).

Fuente: Elaborado por el autor

Por último, en la Figura 52 se comprobó el comportamiento del modelo respecto a los intercambios de calor por convección de las superficies al interior de la zona del piso 9. Se puede observar una variación entre 0.1 kWh/m² y 0.2 kWh/m² mayor cuando se utiliza el archivo EPWm. Se identifica que, la variación de las cargas térmicas de refrigeración y las pérdidas de energía por ventilación responde a la variación de las ganancias por convección desde las superficies.

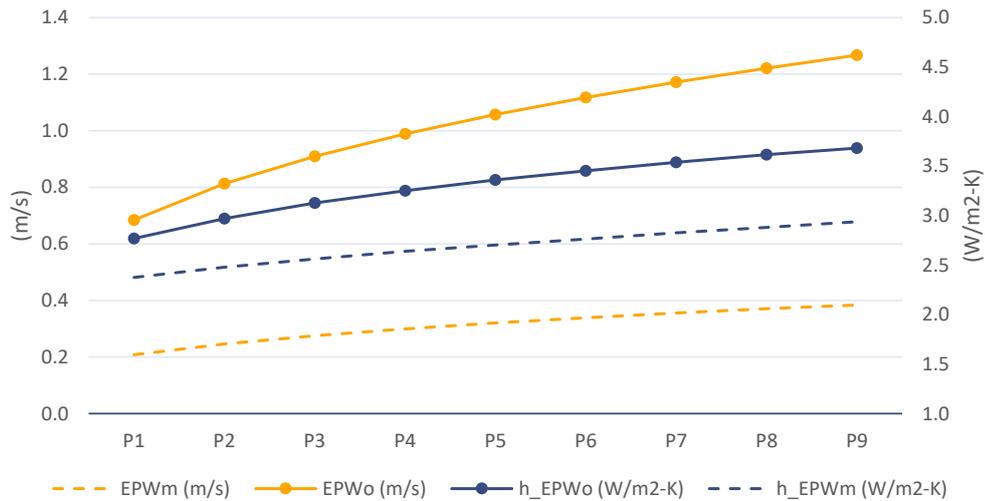
Figura 52 – Intercambios por convección interior del piso 9 en el escenario C31mEO a partir de la simulación energética integrada



Convn = Convección de la superficie interior; Ref = Cargas térmicas de refrigeración; Vp = Ventilación natural. Fuente: Elaborado por el autor

Debido a que el archivo EPWm cuenta con una velocidad de viento significativamente menor y más constante respecto al archivo climático EPWo, y por su importante contribución a los intercambios de energía por convección, se observó el comportamiento de la velocidad del viento sobre la fachada principal de todo el edificio. En la Figura 53 se puede observar la velocidad del viento frente a la fachada de cada piso del edificio, comparando el archivo EPWm y el EPWo. También se compara el coeficiente convectivo sobre la superficie exterior de la fachada. Se puede observar claramente la importante diferencia que presenta la velocidad del viento al utilizar uno u otro archivo climático, donde la menor diferencia se observa en el piso 1 con 0.5 m/s y la mayor en el piso 9 con 0.9 m/s. Por lo tanto, esto se ve reflejado también en los valores promedio de coeficiente convectivo exterior, donde en el piso 1 la diferencia es de 0.4 W/m²-K y a partir del piso 5 la diferencia se mantiene constante en torno a los 0.7 W/m²-K.

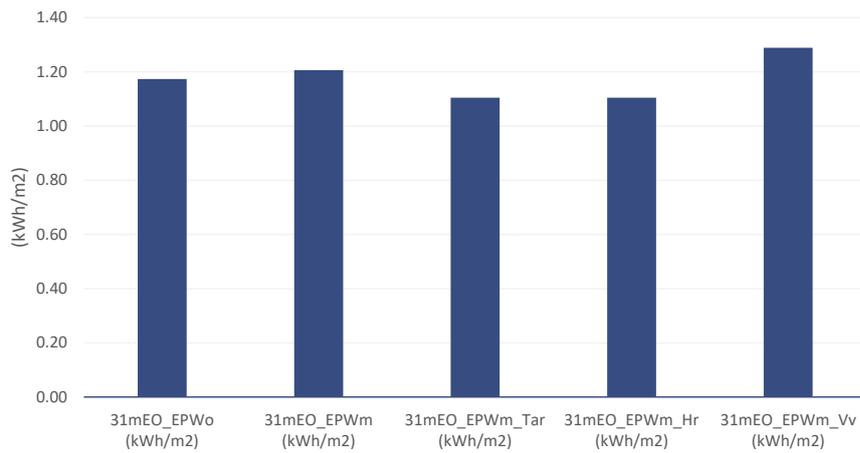
Figura 53 – Velocidad del viento frente a la fachada y coeficiente convectivo en el escenario C31mEO



h = Coeficiente convectivo. Fuente: Elaborado por el autor

Posteriormente, en la Figura 54 se muestran las cargas térmicas de refrigeración modificando una a una las variables de archivo climático EPWo, temperatura del aire (EPWm_Tar), humedad relativa (EPWm_Hr), velocidad del viento (EPWm_Vv). Comparando las cargas térmicas totales de todos los pisos, se puede observar una reducción de -6% con el EPWm_Tar, una reducción de -6% con el EPWm_Hr y un aumento de +10% con el EPWm_Vv. Se puede observar que debido a la baja diferencia entre en los valores de humedad relativa del modelo microclimático y del archivo climático EPW, resulta en que las variaciones en las cargas térmicas con el archivo EPWm_Tar y EPWm_Hr sean muy similares. Por otro lado, la disminución de la velocidad del viento es la variable que más afectó las cargas térmicas. Estos resultados son consistentes con el estudio de con LIU et al., (2015), donde observaron incremento en el consumo de energía para refrigeración de hasta 4% por causa del coeficiente de transferencia de calor por convección.

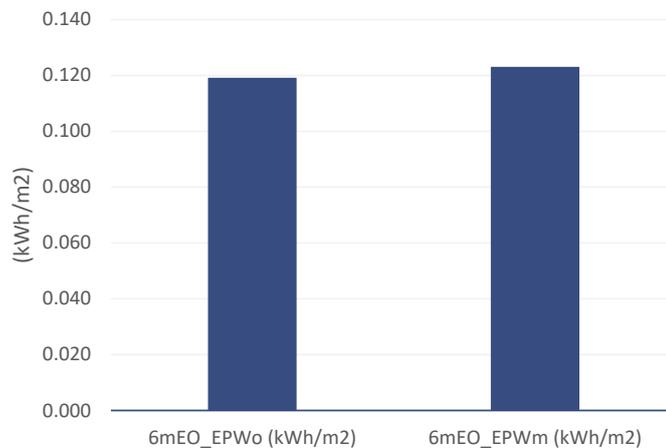
Figura 54 – Análisis individual de variables climáticas en la simulación energética integrada del escenario C31mEOPC



Fuente: Elaborado por el autor

En la Figura 55 se muestran las cargas térmicas de refrigeración a partir de la simulación energética integrada para el día 13 de febrero del escenario con edificaciones de 6 metros (C6mEOPC). Se utiliza para la simulación energética el archivo climático EPW original (EPWo) y el archivo EPW modificado (EPWm). Se puede observar que las cargas térmicas aumentan en torno a +3% respecto a utilizar el archivo EPWo, pero si se observa el valor de aumento fue de 0.004 kWh/m². Lo cual indica una variación similar en las cargas térmicas de refrigeración para este escenario.

Figura 55 – Cargas térmicas de refrigeración del escenario C6mEO a partir de la simulación energética integrada



Fuente: Elaborado por el autor

5 CONCLUSIONES

Por un lado, se puede observar que no todas las variables climáticas, respecto a las analizadas en este estudio, se afectan en igual medida al modificar la relación de altura y ancho (A/L) del cañón urbano. Modificando la altura de los edificios que conforman el cañón, de 6 metros para 31 metros, con un $A/L=0.25$ y $A/L=1.29$ respectivamente, se puede identificar que la temperatura del aire presenta variaciones bajas, la mayor diferencia fue de $+0.3^{\circ}\text{C}$ durante la tarde en el escenario de 31 metros. Durante las horas de la madrugada se puede identificar que la temperatura dentro del cañón $A/L=1.29$ presenta valores de temperatura levemente mayores de hasta $+0.13^{\circ}\text{C}$, lo cual indica mayor concentración de calor. Finalmente, se puede concluir que el modelo utilizado, al igual que sugieren investigaciones anteriores, no reproduce grandes variaciones de temperatura en función de la forma urbana. Lo cual confirma que la geometría urbana no es la variable que tiene mayor influencia en la variación de la temperatura del air.

La humedad relativa presenta una variación muy baja entre los escenarios, lo cual es esperable, ya que en este estudio no se consideró, por ejemplo, vegetación que pueda modificar la concentración de humedad en el modelo en conjunto con otras variables, como el viento. Por lo tanto, esos resultados sugieren la importancia de profundizar en la relación entre la variación humedad relativa en áreas urbanas y las cargas térmicas de los edificios.

Las variables más sensibles a los cambios morfológicos en el modelo fueron la velocidad del viento y la radiación solar. La primera mostró una variación de 0.5m/s al modificar la altura de los edificios de 6 metros para 31 metros. También se identifica un comportamiento distinto de los flujos del viento frente a la fachada de los edificios de uno u otro lado del cañón urbano, con una diferencia de 0.2m/s entre la fachada norte y sur. Estas variaciones ponen énfasis en la importancia de su entendimiento y como pueden modificar los intercambios energéticos de los edificios con el exterior, aumentando o disminuyendo el coeficiente convectivo por causa de la velocidad del viento. La radiación solar también varía de forma significativa al modificar la forma urbana. Comparando la suma total diaria de la radiación que ingresa en el cañón, al variar la altura de 6 metros para 31 metros, se recibe un 44% (997.1 w/m^2) menos de radiación solar directa en el cañón con orientación Este-Oeste, mientras que en el cañón Norte-Sur se reduce un 9% (775.3 w/m^2). Esta

variación es destacable ya que influye significativamente en las cargas térmicas de los edificios.

Los resultados de este trabajo permitieron observar la importancia del entorno urbano en la variación de las cargas térmicas de los edificios. Respecto a las cargas térmicas totales, se observa que la edificación estudiada en un cañón con relación $A/L = 1.29$, con entorno de 31 metros de altura, presentó una reducción de -6.5 kWh/m^2 (-7%). Donde sí se desagregan las cargas térmicas totales de calefacción y refrigeración, las primeras aumentan un $+21.7 \text{ kWh/m}^2$ (+53%) mientras que las segundas disminuyen -28.2 kWh/m^2 (-47%). Por lo tanto, la consideración del entorno en la simulación genera una disminución de las cargas térmicas totales del edificio. Modifica la participación de la calefacción y refrigeración, lo cual podría condicionar el potencial de uso de estrategias bioclimáticas, como el calentamiento solar pasivo, ya que se vio que uno de los factores que más influye es la reducción del ingreso de radiación solar.

Por otro lado, la edificación estudiada en el cañón con relación $A/L = 0.25$, presentó una reducción de -0.6 kWh/m^2 (-8%). Debido a las características del modelo, esa variación no es comparable con el caso anterior. Al desagregarlo en cargas térmicas de calefacción y refrigeración, se observa una reducción de -0.1 kWh/m^2 (-3%) en la primera y de -0.4 kWh/m^2 (-14%) en la segunda. Por lo cual estos resultados indican poca influencia del entorno en los resultados de la simulación energética.

Se observó que el comportamiento de las cargas térmicas varía de acuerdo con la altura, o sea, del piso del edificio. Se identificó, que las cargas térmicas de calefacción disminuyen a medida que aumenta la altura y las de refrigeración aumentan con la altura. Se observó una diferencia importante en las cargas de calefacción entre los pisos más bajos y los más altos, con una diferencia entre los pisos de hasta 12.6 kWh/m^2 , siendo mayor en los pisos más bajo. Al compararse el piso más bajo con y sin entorno, se observó una variación de $+9.5 \text{ kWh/m}^2$ (+149%) en las cargas térmicas de calefacción. Por otro lado, la refrigeración mostró un comportamiento más estable, con una diferencia máxima entre los pisos de 2.4 kWh/m^2 . La mayor variación al considerar el entorno se observó en el piso más bajo con -2.2 kWh/m^2 (54%). Estos resultados responden a las características de la geometría urbana estudiada, donde en los pisos más bajos por causa de la inclinación del sol, se reducen las ganancias por radiación solar y aumentan las

cargas de calefacción. Mientras que, durante el período cálido, donde se utiliza la refrigeración, el ángulo de incidencia solar es mayor, por lo tanto, el entorno genera menos sombras sobre el edificio. Aun así, se ve favorecida por la reducción del ingreso de radiación solar.

Por otro lado, a partir de la simulación energética integrada se puede analizar el impacto de variar las condiciones del entorno próximo al edificio. Se observó un aumento en las cargas térmicas totales de refrigeración para el día de estudio (13 de febrero) de $+0.03 \text{ kWh/m}^2$ (+3%). En este estudio se observó que la mayor diferencia ocurre debido al aumento de las ganancias de calor por convección desde las superficies al ambiente interior. Lo cual está relacionado a que la reducción de la velocidad del viento en el archivo climático modificado genera una importante reducción en las pérdidas de calor hacia el exterior, ya que se reduce la velocidad del viento frente a la fachada y el coeficiente de transferencia de calor por convección. Cuando se analizó la velocidad del viento frente a la fachada del edificio utilizando el archivo EPW original y el modificado, se puede observar variaciones significativas de entre 0.5 m/s en los pisos más bajos y 0.9 m/s en los pisos más altos.

Al analizar la sensibilidad de las variables del archivo climático, se observó que, cuando se modifica la velocidad del viento en el archivo EPW con los datos del ENVI-met, las cargas térmicas presentan la mayor variación aumentando un $+0.12 \text{ kWh/m}^2$ (+10%). Lo cual indica la importancia de profundizar y ajustar la forma en que se obtiene esta variable del modelo ENVI-met.

Debido a que la diferencia entre las variables del archivo climático original y el modificado no son significativas, excepto por la velocidad del viento, es esperable que la variación en las cargas térmicas no ocurra de forma importante. De acuerdo con resultados de otras investigaciones, donde utilizaron métodos similares de integración, sugieren que las variaciones podrían ser mayores, donde, por ejemplo, la humedad relativa del aire tiene una importante influencia.

Por otro lado, a partir del trabajo realizado, se puede concluir que es posible trabajar en una integración de los resultados del modelo ENVI-met y la simulación energética en Energyplus mediante Grasshopper. Pero aún es necesario profundizar en algunos ajustes, principalmente respecto al modelo microclimático.

Por último, también se puede concluir a partir de este primer abordaje sobre la importancia que tiene la forma de la ciudad y las directrices que se toman para la definición de reglamentación para la planificación urbana, tanto respecto a las

modificaciones del ambiente exterior, pero también como impacta en el comportamiento energético de los edificios. En este sentido tomando en cuenta la importancia de la participación de este sector en el consumo energético mundial y en las emisiones de gases contaminantes, refleja la importancia de pensar en una planificación sostenible, incluyendo la mirada energética. Por lo tanto, al hablar del modelo de ciudad compacta como una forma de desarrollo urbano sostenible también podría traer consigo este abordaje, y continuar trabajando para analizar hasta qué punto la sostenibilidad de esa forma de desarrollo urbano no se ve comprometida en cuanto al uso energético. Así como también respecto a otros aspectos sociales u económicos que se ven afectados de forma desigual por las características morfológicas que adopta la ciudad.

5.1 LIMITACIONES

Por un lado, si bien trabajar con modelos requiere calibrarlos para conseguir reproducir la realidad de manera más ajustada, en este estudio no se realizó la calibración de los modelos ya que buscó realizar un abordaje inicial al tema trabajando en base a modelos urbanos teóricos basado en características urbanas de la ciudad de estudio. También debido a que parte de los objetivos fueron explorar la integración de escenarios urbanos se necesita mayor abstracción para su análisis. En este sentido, aun así, se ha observado la limitación en cuanto a trabajar con un modelo microclimático sin calibrar, el cual impide obtener conclusiones respecto al comportamiento de las variables climáticas y la variación dentro del entorno urbano.

Si bien el ENVI-met v5.0.2 dispone del método de simulación *Full Forcing* de todas las variables climáticas del archivo EPW, al intentar forzar la velocidad y dirección del viento, el software entro en conflictos y no permitió ejecutar las simulaciones. De acuerdo con las consultas realizadas al equipo de soporte de ENVI-met, se sugirió no forzar esa variable desde el archivo EPW y utilizar un valor promedio. Si bien esto permitió ejecutar las simulaciones, se observó una fuerte reducción y estabilidad de la velocidad del viento a lo largo de la simulación, ya que el modelo la mantiene fija a lo largo de la simulación. Esto se observó como una limitación en cuanto a que, al integrar estos datos en la simulación energética de edificios, produce grandes variaciones en los coeficientes convectivos de las superficies del edificio alterando fuertemente ellos resultados.

La integración y análisis se realizó únicamente para el período cálido por los tiempos de simulación requeridos. Se observa una limitación ya que en el clima de la ciudad de estudio donde cuenta con períodos de fríos, sería interesante analizar el efecto de las características urbanas en el desempeño energético de los edificios para comparar. Ya que por las características climáticas de la ciudad de estudio las variaciones microclimáticas podrían tener efecto positivo en la reducción de cargas térmicas de calefacción (SANTAMOURIS et al., 2015)

En este caso se trabajó con un modelo de edificio simplificado, con rangos de ventilación natural ajustados de acuerdo con las pruebas que se realizaron para poder ejecutar las simulaciones, y que el modelo responda de forma más adecuada al abrir y cerrar las ventanas. También respecto a que el análisis energético para un día único, como se realizó en la simulación integrada, dificulta la posibilidad de observar el comportamiento del edificio a lo largo de todo el año.

5.2 SUGERENCIAS DE TRABAJOS FUTUROS

A partir de los recursos y el potencial de los Sistemas de Información Geográfica, es relevante su aplicación para poder generar relevamientos de características morfológicas urbanas, que permitan establecer una serie de escenarios urbanos, por ejemplo, en base a las zonas climáticas urbanas propuestas por STEWART; OKE, (2012).

Por un lado, a partir de la selección de un área urbana y una edificación de referencia, realizar mediciones de campo microclimáticas y termo-energéticas, para evaluar el ajuste de los modelos ENVI-met y Energyplus. Lo cual permitirá elaborar análisis más ajustados para el clima de Uruguay, pero también evaluar las configuraciones necesarios para el modelo microclimático, como la extensión del área de estudio, el nivel de detalle, tamaño de grilla, datos climáticos para inicialización, comparación del modelo *Simple Forcing* y *Full Forcing*.

Por otro lado, a partir del potencial de la herramienta Grasshopper y la posibilidad de realizar estudios generativos, se podría aumentar el número de variables de la morfología urbana estudiadas, por ejemplo, ancho de calles, orientación, cañones urbanos asimétricos, variación de los valores de densificación urbana, entre otros. De esta forma sería posible generar búsquedas estocásticas de formas urbanas en función del desempeño energético de los edificios.

También, a partir de los resultados de este trabajo y en base a otros anteriores, sería interesante profundizar el nivel de integración de los modelos. Siguiendo el método planteado por YANG et al., (2012), es oportuno utilizar la capacidad de Grasshopper y las herramientas Ladybag para generar mayor integración. Por ejemplo, considerando los intercambios de radiación de onda corta y larga de las superficies, y la modificación del coeficiente convectivo de cada superficie, a partir de los resultados del modelo de cálculo CFD de ENVI-met.

Finalmente, en línea con lo mencionado anteriormente, específicamente en cuanto a las edificaciones en contextos urbanos, sería relevante a partir de la integración de estos modelos evaluar el potencial de la estrategia de ventilación natural en edificios en entornos urbanos densificados, donde se puede observar que los flujos de viento dentro del cañón urbano tienen comportamientos diferentes. Este análisis es posible abordarlo aprovechando la capacidad de las herramientas de cálculo de CFD como ENVI-met.

REFERÊNCIAS

- ABDULMAWLA, A. et al. **DeCodingSpaces Toolbox**. Disponível em: <<https://toolbox.decodingspaces.net/>>. Acesso em: 15 maio. 2022.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho**. [s.l: s.n.].
- AHLFELDT, G. M.; PIETROSTEFANI, E. **The Compact City in Empirical Research: A Quantitative Literature Review**. , 2017.
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 94–108, 2006.
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. **Solar Energy**, v. 81, n. 6, p. 742–754, jun. 2007.
- ALLARD, F.; GHIAUS, C.; SZUCS, A. Natural ventilation in high density cities. In Designing high density cities. For social and environmental sustainability. Em: NG, E. (Ed.). **Designing High-Density cities. For Social & Environmental Sustainability**. 1. ed. UK: Earthscan, 2009. p. 137–162.
- ALLEGRIANI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 823–832, 1 dez. 2012.
- ALLEGRIANI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 144, p. 108–117, 1 set. 2015.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. 2. ed. UK: Elsevier, 2015.
- ANDREOU, E. Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. **Renewable Energy**, v. 55, p. 182–188, 1 jul. 2013.
- BALTER, J. et al. Modelado urbano microclimático para la simulación termoenergética de viviendas en edificios en altura en Mendoza, Argentina. Integración del software ENVI-met y EnergyPlus. **Informes de la Construcción**, v. 73, n. 561, p. e382, 2021.

BECHTEL, B. et al. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 199–219, 1 mar. 2015.

BHANDARI, M.; SHRESTHA, S.; NEW, J. Evaluation of weather datasets for building energy simulation. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 109–118, 1 jun. 2012.

BIBRI, S. E.; KROGSTIE, J.; KÄRRHOLM, M. Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. **Developments in the Built Environment**, v. 4, p. 100021, 1 nov. 2020.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environmental Modelling & Software**, v. 30, p. 15–34, 1 abr. 2012.

BOUMANS, R. J. M. et al. Developing a model for effects of climate change on human health and health–environment interactions: Heat stress in Austin, Texas. **Urban Climate**, v. 8, p. 78–99, 1 jun. 2014.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, v. 13, p. 373–384, 1998.

CASINI, M. Building performance simulation tools. **Construction 4.0**, p. 221–262, 1 jan. 2022.

CASTALDO, V. L. et al. How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: A new design-stage method for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy. **Renewable Energy**, v. 127, p. 920–935, 1 nov. 2018.

CHATZIDIMITRIOU, A.; YANNAS, S. Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. **Sustainable Cities and Society**, v. 33, p. 85–101, 1 ago. 2017.

CHEN, J. et al. Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes Microclimate directly influences ecological processes and reflects subtle changes in ecosystem function and landscape structure across scales. **BioScience**, v. 49, n. 4, p. 288–297, 1999.

CHEN, Y. et al. Evaluating the impact of the building density and height on the block surface temperature. **Building and Environment**, v. 168, 15 jan. 2020.

CHEN, Y.; WONG, N. H. Thermal benefits of city parks. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 2, p. 105–120, 1 fev. 2006.

CURTO-RISO, P. et al. **EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL. Situación actual y evaluación de estrategias de mejoramiento para distintas condiciones climáticas en el Uruguay. Primer Reporte Técnico.** Montevideo: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29567>>. Acesso em: 5 dez. 2022.

DOULOS, L.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. **Solar Energy**, v. 77, n. 2, p. 231–249, 1 jan. 2004.

ELEMENTS. **Elements | Big Ladder Software.** Disponível em: <<https://bigladdersoftware.com/projects/elements/>>. Acesso em: 11 jul. 2022.

ELI, L. et al. **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E INCERTEZAS DOS PARÂMETROS RELACIONADOS À MODELAGEM DO CONTATO DO PISO COM O SOLO NO PROGRAMA ENERGYPLUS.** 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/336103248>>

ELI, L. G. **O IMPACTO DO PADRÃO DE USO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES NO BRASIL Florianópolis 2020.** Mestrado—Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, 2020.

EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. Urban shading - A design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1995–2004, 30 nov. 2007.

ENVI-MET. **ENVI-met.** Disponível em: <<https://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>>. Acesso em: 11 dez. 2021.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban Microclimate.** 1. ed. UK: Earthscan, 2011.

ERELL, E.; WILLIAMSON, T. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 9, p. 1243–1255, jul. 2007.

FADU. **AT01**. Montevideoucpc / unidad de comunicación y producción cultural - Facultad de Arquitectura (UY), , 1999. Disponível em: <<http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-termico/files/2012/02/repartido-01.pdf>>.

Acesso em: 21 nov. 2022

FOROUZANDEH, A. Prediction of surface temperature of building surrounding envelopes using holistic microclimate ENVI-met model. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102878, 1 jul. 2021.

FOUCQUIER, A. et al. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 272–288, 1 jul. 2013.

FUMO, N. A review on the basics of building energy estimation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 53–60, 1 mar. 2014.

GAGO, E. J. et al. **The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013.

GEIGER, R.; ARON, R. H.; TODHUNTER, P. **The Climate Near the Ground**. 5. ed. Cambridge: Vieweg, 1961.

GEORGAKIS, C.; SANTAMOURIS, M. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 4, p. 367–376, 1 abr. 2006.

GUSSON, C. S. **O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios**. Doutorado—Sao Paulo: Universidade de São Paulo, 2020.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 2–10, 1 jan. 2016.

HAN, Y.; TAYLOR, J. E.; PISELLO, A. L. Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance. **Applied Energy**, v. 185, p. 1556–1564, 2017.

HOFSTAD, H. Compact city development: High ideals and emerging practices Compact city development: High ideals and emerging practices Hege Hofstad Author information. **European Journal of Spatial Development**, n. 49, 2012.

HONG, T. et al. Modeling and analysis of heat emissions from buildings to ambient air. **Applied Energy**, v. 277, 1 nov. 2020.

HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **Int J Biometeorol**, v. 43, p. 71–75, 1999.

HUANG, J.; CRAWLEY, D. B. **Does It Matter Which Weather Data You Use in Energy Simulations? Publication Date**. American Council for an Energy Efficient Economy Summer Study. **Anais...**California: 1996.

HUANG, K. T.; LI, Y. J. Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: A parametric analysis using orthogonal experiment. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 448–464, 1 nov. 2017.

HUTTNER, S. **Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met**. Doctor—Mainz: Johannes Gutenberg University Mainz, 2012.

IM. **Reglamentación - Montevideo más cerca | Intendencia de Montevideo**. Disponível em: <<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ciudad-y-urbanismo/montevideo-mas-cerca/reglamentacion-montevideo-mas-cerca>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

IPCC. **Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático**. Ginebra, Suiza.: IPCC, 2014.

IPCC. Summary for Policymakers. In: **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to. One Earth**, v. 1, n. 3, p. 374–381, 2018.

JENKS, M.; BURGESS, R. **Compact Cities: Sustainable Urban Forms for Developing Countries**. New York: Taylor & Francis Group, 2004.

JIN, H. et al. The effects of residential area building layout on outdoor wind environment at the pedestrian level in severe cold regions of China. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 12, 12 dez. 2017.

KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, v. 46, n. 3, p. 621–634, mar. 2011.

LAUZET, N. et al. How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 116, n. August, p. 109390, 2019.

LI, X. et al. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. **Energy**, v. 174, p. 407–419, 1 maio 2019.

LIMA, I.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 182, p. 30–44, 2019.

LIN, P. et al. **The impact of urban design descriptors on outdoor thermal environment: A literature review**. **Energies** MDPI AG, , 1 dez. 2017.

LIU, J. et al. The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities. **Energy and Buildings**, v. 86, p. 449–463, 1 jan. 2015.

LIU, Y. et al. Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. **Science of The Total Environment**, v. 743, p. 140589, 15 nov. 2020.

LONG, J.; RICE, J. L. From sustainable urbanism to climate urbanism. **Urban Studies**, v. 56, n. 5, p. 992–1008, 1 abr. 2019.

LUBER, G.; MCGEEHIN, M. Climate Change and Extreme Heat Events. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 35, n. 5, p. 429–435, 1 nov. 2008.

LUO, X.; HONG, T.; TANG, Y. H. Modeling thermal interactions between buildings in an urban context. **Energies**, v. 13, n. 9, 1 maio 2020.

MATZARAKIS, A.; MAYER, H. Matzarakis1999_ApplicationsOfAUniversalTherma. **Int J Biometeorol**, v. 43, p. 76–48, 1999.

MAYER, H. Urban bioclimatology. p. 957–963, 1993.

MIDDEL, A. et al. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. **Landscape and Urban Planning**, v. 122, p. 16–28, 2014.

MIRSADEGHI, M. et al. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. **Applied Thermal Engineering**, v. 56, n. 1–2, p. 134–151, 1 jul. 2013.

MOSTEIRO-ROMERO, M. et al. An Integrated Microclimate-Energy Demand Simulation Method for the Assessment of Urban Districts. **Frontiers in Built Environment**, v. 6, 17 set. 2020.

NACIONES UNIDAS. **Informe sobre la Brecha de Emisiones 2021. La calefacción está encendida: un mundo de compromisos climáticos aún por cumplirse. Resumen ejecutivo.** Nairobi: [s.n.]. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36991/EGR21_ESSP.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2022.

NATANIAN, J. et al. **Synergetic urban microclimate and energy simulation parametric workflow.** Journal of Physics: Conference Series. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 20 nov. 2019.

NATANIAN, J. **BEYOND ZERO ENERGY DISTRICTS A HOLISTIC ENERGY AND ENVIRONMENTAL QUALITY EVALUATION WORKFLOW FOR DENSE URBAN CONTEXTS IN HOT CLIMATES.** PhD—Munich: Technical University of Munich, nov. 2020.

NATANIAN, J.; ALEKSANDROWICZ, O.; AUER, T. A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. **Applied Energy**, v. 254, p. 113637, 15 nov. 2019.

NATANIAN, J.; AUER, T. Beyond nearly zero energy urban design: A holistic microclimatic energy and environmental quality evaluation workflow. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, p. 102094, 1 maio 2020.

NG, E. et al. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. **Building and Environment**, v. 47, n. 1, p. 256–271, 1 jan. 2012.

NG, E.; CHENG, V. Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 51–65, 1 dez. 2012.

NIKOLOPOULOU, M.; LYKOUDIS, S. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. **Building and Environment**, v. 41, n. 11, p. 1455–1470, 1 nov. 2006.

NIKOLOPOULOU, M.; STEEMERS, K. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 95–101, 1 jan. 2003.

NU. **World Urbanization Prospects The 2018 Revision**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2022.

NU-HABITAT. **World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization** | **UN-Habitat**. Disponível em: <<https://unhabitat.org/World%20Cities%20Report%202020>>. Acesso em: 23 jul. 2022.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1 dez. 1976.

OKE, T. R. CANYON GEOMETRY AND THE NOCTURNAL URBAN HEAT ISLAND: COMPARISON OF SCALE MODEL AND FIELD OBSERVATIONS. **JOURNAL OF CLIMATOLOGY**, v. 1, p. 237–254, 1981.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. [s.l.] Taylor and Francis, 1987.

OKE, T. R. **INITIAL GUIDANCE TO OBTAIN REPRESENTATIVE METEOROLOGICAL OBSERVATIONS AT URBAN SITES**. Canada : [s.n.]. Disponível em: <https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=9262#.YaoEc9BByM8>. Acesso em: 2 dez. 2021.

OKE, T. R. et al. **Urban Climates**. [s.l.] Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, V. **Urban Morphology**. 1. ed. Switzerland: Springer, Cham, 2016.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Climate**. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/climate>>. Acesso em: 3 ago. 2022a.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Essential Climate Variables**. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>>. Acesso em: 3 ago. 2022b.

PACIFICI, M. **Urban Morphology and Climate: field assessment and numerical modeling of interactions**. Doutorado—Sao Paulo: Universidade de São Paulo, 2019.

PACIFICI, M.; RAMA, F.; DE CASTRO MARINS, K. R. Analysis of temperature variability within outdoor urban spaces at multiple scales. **Urban Climate**, v. 27, p. 90–104, 1 mar. 2019.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

PETRALLI, M. et al. Urban planning indicators: Useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 4, p. 1236–1244, mar. 2014.

PICCIÓN, A. et al. **Pautas de diseño bioclimático para optimizar condiciones de confort y uso de energía en el sector residencial financiado por organismos públicos, para Uruguay, caso de clima complejo**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.fadu.edu.uy/ic/files/2012/03/documento-final_proyPDT06.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2021.

PISELLO, A. L. et al. Inter-building effect: Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance predictions. **Building and Environment**, v. 58, p. 37–45, 2012.

POT. **Plan Montevideo | Intendencia de Montevideo**. Disponível em: <<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/planificacion/ordenamiento-territorial/plan-montevideo>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

QAID, A.; OSSEN, D. R. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 6, p. 657–677, 1 jun. 2015.

RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Energy consumption and urban texture. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 7, p. 762–776, 1 jul. 2005.

RIZWAN, A. M.; DENNIS, L. Y. C.; LIU, C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 1, p. 120–128, 2008.

ROBINE, J. M. et al. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. **Comptes Rendus - Biologies**, v. 331, n. 2, p. 171–178, 2008.

SALVATI, A. et al. Climatic performance of urban textures: Analysis tools for a Mediterranean urban context. **Energy and Buildings**, v. 185, p. 162–179, 15 fev. 2019.

SALVATI, A.; COCH ROURA, H.; CECERE, C. Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. **Energy and Buildings**, v. 146, p. 38–54, 1 jul. 2017.

SANTAMOURIS, M. et al. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 27, p. 4503–4521, 1 nov. 1999.

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of building. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 201–216, 2001.

SANTAMOURIS, M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 100–113, 2014.

SANTAMOURIS, M. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. **Science of the Total Environment**, v. 512–513, p. 582–598, 5 abr. 2015.

SANTAMOURIS, M. et al. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. **Energy and Buildings**, v. 98, p. 119–124, 1 jul. 2015.

SHARMIN, T.; STEEMERS, K.; MATZARAKIS, A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 293–308, 1 out. 2017.

SHEN, L. Y. et al. The application of urban sustainability indicators – A comparison between various practices. **Habitat International**, v. 35, n. 1, p. 17–29, 1 jan. 2011.

SIMON, H.; BRUSE, M. **Evaluation of ENVI-met's multiple-node model and estimation of indoor climate**. Edingburgh: 2017. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/318561953>>

SIMON, H.; SINSEL, T.; BRUSE, M. Advances in simulating radiative transfer in complex environments. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 12, 2 jun. 2021.

STEWART, I. D. **A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature**. **International Journal of Climatology**, fev. 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, dez. 2012.

STRØMANN-ANDERSEN, J.; SATTRUP, P. A. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 8, p. 2011–2020, ago. 2011.

SUN, Y.; AUGENBROE, G. Urban heat island effect on energy application studies of office buildings. **Energy and Buildings**, v. 77, p. 171–179, 1 jul. 2014.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 99–103, 1 jan. 1997.

TALEGHANI, M. et al. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. **Building and Environment**, v. 83, p. 65–78, 1 jan. 2015.

TSOKA, S. et al. A method to account for the urban microclimate on the creation of ‘typical weather year’ datasets for building energy simulation, using stochastically generated data. **Energy and Buildings**, v. 165, p. 270–283, 15 abr. 2018.

TSOKA, S. et al. **Assessing the effect of the urban morphology on the ambient air temperature of urban street canyons under different meteorological conditions. Application in residential areas of Thessaloniki, Greece.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...Institute of Physics Publishing**, 24 jan. 2020.

TSOKA, S.; TSIKALOUDAKI, A.; THEODOSIOU, T. **Analyzing the ENVI-met microclimate model’s performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review.** **Sustainable Cities and Society** Elsevier Ltd, , 1 nov. 2018.

UN-EP. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.** Nairobi: [s.n.]. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2022.

XI, T. et al. Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas. **Building and Environment**, v. 52, p. 162–170, 1 jun. 2012.

XIE, X. et al. Impact of inter-building longwave radiative exchanges on building energy performance and indoor overheating. **Building and Environment**, v. 209, p. 108628, 1 fev. 2022.

YANG, J. et al. Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 72, 1 set. 2021.

YANG, X. et al. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 243–251, 2012.

ZHANG, M.; GAO, Z. Effect of urban form on microclimate and energy loads: Case study of generic residential district prototypes in Nanjing, China. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102930, 1 jul. 2021.

ZINZI, M.; CARNIELO, E. Impact of urban temperatures on energy performance and thermal comfort in residential buildings. The case of Rome, Italy. **Energy and Buildings**, v. 157, p. 20–29, 15 dez. 2017.

