

FACHADAS VERDES DE DOBLE PIEL COMO INTERFAZ REGULADORA DE ISLAS DE CALOR EN PORTO

Regulación térmica del exterior e interior de edificios insertos en islas de calor que recurran a sistemas de enfriamiento activos

Natalia Contador Águila

FACHADAS VERDES DE DOBLE PIEL COMO INTERFAZ REGULADORA DE ISLAS DE CALOR EN PORTO

Regulación térmica del exterior e interior de edificios insertos en islas de calor que recurran a sistemas de enfriamiento activos

Seminario de licenciatura
Sostenibilidad y Hábitat
Semestre primavera 2022

Profesora Guía: Luz Cárdenas Jirón
Autora: Natalia Contador Águila

Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad de Chile

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por brindarme su apoyo y permitirme e incentivar me a vivir la experiencia de conocer otras realidades.

A mis amigos que vivieron todo este proceso conmigo.

A la profesora Luz Cárdenas por orientarme durante toda esta investigación e incentivar me a seguir desarrollándola de la mejor manera posible.

I. INTRODUCCIÓN		5
	Motivaciones	6
	Problema de investigación	6
	Preguntas de investigación	7
	Hipótesis	7
	Objetivo general y específicos	8
II. MARCO METODOLÓGICO		9
	Metodología	10
	identificación del problema y revisión de literatura	10
	Selección caso de estudio y softwares	10
	Etapas de la investigación	11
III. MARCO TEÓRICO		12
	Fachadas verdes de doble piel	13
	Islas de calor urbanas	15
	Sistemas de enfriamiento activos	16
IV. CASO DE ESTUDIO		17
	Condiciones meteorológicas y espaciales de Porto	18
	Identificación de islas de calor en Porto	22
	Selección del edificio	23
V. OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN		26
	Resultados esperados	27
	Simulación	27
	Resultados	30
	Discusión	40
VI. CONCLUSIONES		41
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		42

I. INTRODUCCIÓN

La primera parte de este documento busca mostrar de donde surgió el planteamiento inicial de esta investigación, por lo que se presentan las motivaciones, el problema de investigación, las preguntas de investigación, la hipótesis y un objetivo general desglosado en tres objetivos específicos.

MOTIVACIONES

Las circunstancias actuales en las que se encuentra el mundo en temas medioambientales me lleva a la pregunta de en qué forma se puede contribuir de una manera ecológica con la arquitectura como intermediaria. Por esta razón siempre he tenido interés en el área de la sostenibilidad, especialmente en la arquitectura bioclimática como infraestructura verde y medidas de acondicionamiento pasivas.

Otra experiencia que me conduce al estudio de las fachadas verdes como reguladoras térmicas se debe al intercambio en Portugal, donde he podido aprender en gran medida sobre paisajismo y visitado una amplia variedad de parques donde se nota el planeamiento desde la sostenibilidad y con una visión a futuro sobre la evolución del área. Pero donde de igual manera se echa en falta las acciones a través de la arquitectura como la infraestructura verde, por ejemplo techos y fachadas verdes. De igual manera, a pesar de ser una ciudad con un clima templado marítimo, en la mayoría de las viviendas se tienen aires acondicionados.

Por último, el apoyo familiar para seguir adquiriendo conocimientos sobre el tema, así como la toma de pequeñas acciones como grupo familiar que contribuyen al medioambiente.

Estas tres experiencias crean la motivación principal para llevar a cabo este estudio.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Hoy en día gran parte de la superficie terrestre se encuentra ocupada por ciudades, según el Banco Mundial (2020) aproximadamente el 55% de la población mundial habita en una zona urbana, debido a esto “los países latinoamericanos están experimentando un crecimiento urbano intensivo que se traduce en cambios morfológicos en el tejido urbano (...) que consisten en general en: densificación, crecimiento vertical y pérdida de áreas verdes” (Palme et al, 2016), es decir, cada vez se usan más espacios urbanos libres para el desarrollo de edificaciones y no para la creación de áreas verdes. En segundo lugar se suma el tipo de materiales usados en la infraestructura de la ciudad, predominantemente hormigón, y como tercer punto el calentamiento global. En conjunto, estos tres factores han causado un alza de la temperatura en la ciudad; es decir, que el aire en la zona urbana sea más cálido que en las zonas rurales (Oke, 1987), causando el fenómeno conocido como islas de calor urbanas.

Para contrarrestar los efectos de estas islas de calor dentro de las viviendas se recurre a sistemas de enfriamiento de aire activos, los cuales requieren de una fuente de energía externa para su funcionamiento. Estos sistemas se basan en una combinación entre un sistema pasivo y una turbina conectada a energía eléctrica que acelera el flujo de aire, un ejemplo de estos sistemas activos es el aire acondicionado. En cuanto al funcionamiento de un aire acondicionado, estos no generan aire frío sino que extraen el calor del aire a través de una unidad interna, para posteriormente expulsarlo al exterior por una unidad externa, en otras palabras, los aires acondicionados sacan el calor del interior hacia el exterior. Además de esto, al utilizar energía eléctrica se produce el efecto Joule, fenómeno en el cual parte de la energía cinética de los electrones se libera en forma de calor. “El calor Joule es el calor generado internamente debido a la resistencia de un conductor cuando pasa una corriente” (Shen et al., 2013).

Sintetizando, para combatir los efectos de las islas de calor urbana en el interior de los recintos se recurre a elementos de enfriamiento que durante su funcionamiento liberan calor hacia el exterior, contribuyendo a si mismo a las islas de calor anteriormente mencionadas. Se produce un círculo vicioso que no contribuye ni a un mejoramiento de los efectos de las islas de calor ni a la reducción de estas como tal.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el impacto térmico de las fachadas verdes de doble piel sobre los efectos de las islas de calor en el entorno urbano de una edificación residencial y en la disminución del uso de elementos de enfriamiento activos en el interior de la misma?

¿Qué índice de área foliar (IAF) contribuye a una mayor reducción de la temperatura ambiental alrededor de un edificio inserto en una isla de calor?

¿En cuánto se reduce la demanda energética de una edificación residencial en cuanto al uso de elementos de enfriamiento activos sin y con presencia de una fachada verde de doble piel?

HIPÓTESIS

La aplicación de fachadas verdes de doble piel en edificios que se encuentren dentro de una isla de calor contribuyen a la regulación térmica, evidenciado en la disminución de la temperatura del aire, del exterior y del interior del edificio, disminuyendo el uso de elementos de enfriamiento activos, causando una interrupción del círculo vicioso entre islas de calor y aires acondicionados.

OBJETIVOS

Evaluar la capacidad de regulación térmica de fachadas verdes de doble piel en la temperatura del aire en el entorno urbano de una edificación residencial, para comparar la reducción del uso de elementos de enfriamiento activo en el interior de edificios que se encuentren insertos en una isla de calor con y sin la presencia de fachadas verdes de doble piel.

1. Medir en cuantos grados varía la temperatura del aire en el entorno de un edificio que se encuentre en una isla de calor sin y con la presencia de fachada verde de doble piel.
2. Identificar el índice de área foliar (IAF) que tenga una mayor incidencia en la reducción de la temperatura tanto en el exterior como en el interior de un edificio dentro de una isla de calor.
3. Comparar el consumo energético de aire acondicionado al interior de un edificio residencial sin y con fachada verde de doble piel.

II. MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se busca describir la metodología utilizada para el desarrollo de esta investigación en el proceso de obtención de los datos que responderán a las preguntas de investigación planteadas con el fin de medir la variación de la temperatura del aire en el entorno urbano de una edificación en una isla de calor en presencia de una fachada verde de doble piel.

METODOLOGÍA

Después de recopilada la información necesaria, para el análisis de los datos y comprobación de la hipótesis se abordará la investigación desde un enfoque metodológico experimental, esto debido a que la hipótesis se basa en la relación de causalidad entre variables. Las dos variables que se definen son, una independiente o de tratamiento, para el caso de esta investigación se trataría de la implementación de la fachada verde de doble piel en el edificio; y una variable dependiente, correspondiente a la variación de temperatura del aire en el entorno urbano y al cambio en el uso de elementos de enfriamiento activo al interior de la vivienda. Para definir claramente estas variables se identifica una unidad de asignación y un elemento de comparación o de control, de acuerdo a Groat & Wang (2013) una unidad de control corresponde al elemento al cual se le aplicará la variable independiente, mientras que el elemento de comparación o control es el objeto al cual no se le aplicará el tratamiento, por lo tanto en este estudio corresponde al edificio modelado que tendrá la fachada verde de doble piel y a la edificación original que no tendrá, respectivamente.

Un ejemplo de esta metodología aplicada a una investigación donde se utilizó modelamiento por medio de softwares es el estudio de Stazi et al. (2012) “El comportamiento de los muros solares en edificios residenciales con diferentes niveles de aislamiento: Un estudio experimental y numérico.”

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y REVISIÓN LITERARIA

Primeramente se identificó una problemática en el aumento de la temperatura en la ciudad costera de Porto, al norte de Portugal, denominadas islas de calor urbanas, para contrarrestar estas alzas de temperaturas al interior de las viviendas se recurre a elementos de enfriamiento activos. En esta relación se reconoció un círculo vicioso por lo que se buscó algún elemento regulador que actuara como interfaz mitigadora entre ambos problemas, llegando finalmente a las fachadas verdes de doble piel ya que “las infraestructuras verdes son una solución alternativa para adaptar las ciudades al cambio climático. Los techos verdes y los muros verdes aportan numerosos beneficios económicos y socioambientales.” (Liberalesso et al., 2020).

Para definir claramente los conceptos claves de la investigación se realizó una recopilación de datos y de antecedentes relacionadas al tema, además de autores que trabajan los temas principales de esta investigación, correspondientes a Timothy Oke, Enrique Browne, Mattheos Santamouris, entre otros, en conjunto con estos autores se recurrió a investigaciones previas relacionadas con las fachadas verdes y las islas de calor específicamente.

SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO Y SOFTWARES

Se identificará un edificio que se encuentre inserto en una isla de calor urbana y que utilice sistemas de enfriamiento activos, se requiere que cumpla con las siguientes condiciones: ser un edificio de uso habitacional y tener orientación espacial sur debido a que es la orientación de fachada que recibe más incidencia de los rayos solares durante el día. En este caso de estudio se realizará mediciones de las temperaturas exteriores del edificio y una estimación del consumo energético de los aires acondicionados en softwares de modelación. Los softwares a utilizar serán ENVI-met, en su versión de prueba, Google Earth y páginas web que entreguen datos meteorológicos de la zona como WeatherSpark, Meteoblue y la página oficial del Instituto Portugues de Mar y Atmósfera (IPMA).

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

- 1. Recopilación de datos**
Consiste en la definición del marco teórico donde se definen los conceptos relevantes para la comprensión y desarrollo de esta investigación, primeramente por separado y luego en el conjunto de lo que sería una fachada verde doble piel como reguladora térmica de los efectos de las islas de calor.
- 2. Análisis caso de estudio**
Abarca el estudio de las características meteorológicas y topográficas de la ciudad de Porto en Portugal, así como la identificación de islas de calor urbanas en esta ciudad y la selección específica de un edificio de uso residencial inserto en una de estas islas de calor.
- 3. Simulación**
Corresponde a la puesta en práctica de la hipótesis planteada en la presente investigación a través del software de simulación Envi-MET.
- 4. Comparación de datos**
Se trata del análisis de los gráficos obtenidos de las simulaciones y su posterior comparación para confirmar o refutar la hipótesis y responder las preguntas de investigación establecidas.

III. MARCO TEÓRICO

La construcción del marco teórico corresponde a la primera etapa de la presente investigación, en esta sección se abordan por separado los conceptos principales que permiten definir y comprender el estudio y, posteriormente, como los mismos se relacionan y dan sustento a la hipótesis formulada.

FACHADAS VERDES DE DOBLE PIEL

La presente investigación propone la fachada verde de doble piel como regulador térmico de los efectos de las islas de calor debido a su estructura y funcionamiento. Antes que nada es necesario saber que las fachadas verdes son consideradas como estrategias bioclimáticas pasivas, ya que aprovechan los elementos disponibles en su entorno para alcanzar el acondicionamiento óptimo de una edificación, adaptándose a las condiciones climáticas locales y reduciendo el consumo energético del edificio. Esto se debe a algunas de las características de las plantas, una de ellas es la evapotranspiración que corresponde a “la evaporación del agua superficial libre (por ejemplo, charcos), el agua de los poros del suelo y el agua transpirada de la vegetación.” (Oke, 1987). También se considera el albedo de las plantas -albedo es la proporción de radiación incidente que una superficie puede reflejar, entre menor es el albedo, menor es la radiación que refleja-.

“El albedo de un puesto de vegetación es menor que el valor de sus hojas individuales porque la reflexión depende no solo de las propiedades radiativas de las superficies que lo componen, sino también de la arquitectura del puesto y del ángulo de incidencia solar.” (Oke, 1987)

En relación a esto es necesario abordar el concepto de índice de área foliar (IAF), el cual corresponde a “un valor adimensional que permite caracterizar la estructura y la densidad del follaje de las copas (...) se define como la superficie de hoja verde por unidad de superficie de suelo (IAF = superficie de hoja/superficie de suelo, m²/m²)” (Pérez et al., 2022). Es decir, entre mayor el IAF menor el albedo.

Es importante considerar ambos conceptos -albedo e índice de área foliar- al momento de estudiar la incidencia de una fachada verde en la temperatura ambiental ya que, entre mayor es la concentración y densidad de vegetación menos radiación se refleja, esto en conjunto con la forma de la superficie donde esta se encuentra ubicada y que tan directa reciba la luz solar ayudarían considerablemente a contrarrestar el alto albedo -alta reflexión- del hormigón, presente en casi la totalidad de las áreas urbanas actuales, lo que tal como se mencionó anteriormente, es un factor determinante en las islas de calor.

Ahora bien, dentro de la amplia variedad de fachadas verdes, para la presente investigación se seleccionaron las fachadas verdes de doble piel. Primeramente, se analiza la tipología de fachada de doble piel, estas se caracterizan por dejar un espacio entre las dos fachadas que componen la envolvente del edificio, en este vacío se produce un flujo de aire con la intención de generar “una capa de aire que va desde abajo hacia arriba, produciendo un efecto chimenea, aumentando la disipación del calor, bajando de esa manera la temperatura”. Enrique Browne (como se citó en Seguel, 2018), debido a esta funcionalidad esta tipología de fachada se caracteriza por ser buena reguladora térmica tanto en épocas de calor como de frío (Figura 1).

Al aplicar una fachada verde a la fachada exterior de una fachada de doble piel se potencia la regulación de la temperatura, tanto interior como exterior de la edificación, debido a las características anteriormente mencionadas como la evapotranspiración y el bajo albedo de las plantas. También juega un valor estético y uno en cuanto a la habitabilidad del edificio en comparación a otros sistemas de fachadas verdes.

“Los otros sistemas tienen varias desventajas en el punto de vista práctico, primero, como el verde va adosado al muro, en todas las partes que hay ventanas no podrían ir, porque las personas que están adentro verían tierra, entonces quedaría recortado en todas las partes que hay ventanas, entonces las personas de adentro del edificio no verían nunca el verde y solo lo verían las personas desde afuera. El segundo punto es que el sistema de doble piel permite que la gente de adentro vea la vegetación e intervenga en sus vistas y entorno, es decir, el usuario entra a tener participación.” Enrique Browne (como se citó en Seguel, 2018).

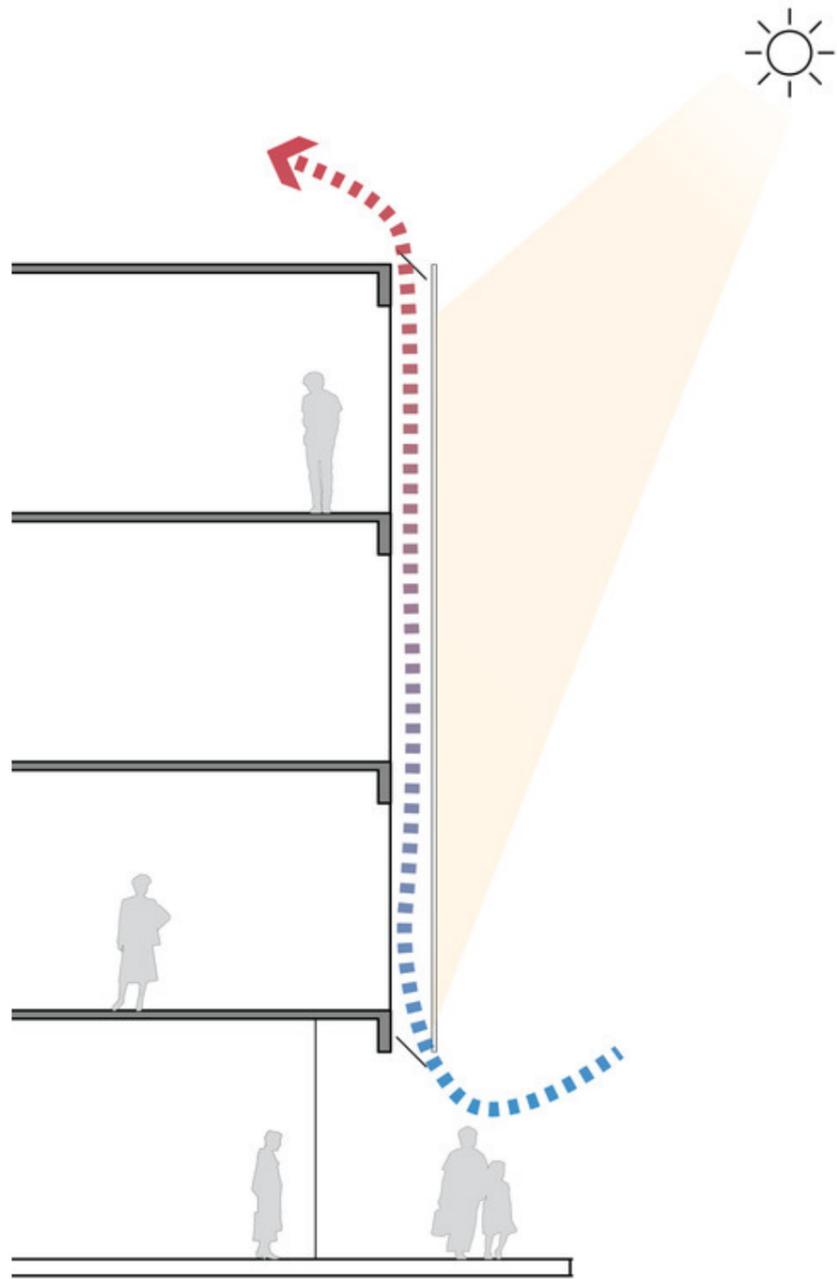


Figura 1: Efecto chimenea fachadas de doble piel.

Fuente: ArchDaily.

ISLAS DE CALOR URBANAS

Otro concepto importante para la definición de esta investigación corresponde al efecto de islas de calor urbanas el cual “se refiere al desarrollo de temperaturas urbanas más altas de una zona urbana en comparación con las temperaturas de zonas suburbanas y rurales circundantes.” (Santamouris, 2013) (Figura 2), como se mencionó anteriormente este fenómeno se da debido a las condiciones y materialidades actuales de la ciudad tales como aumento de la superficies de hormigón ya que debido a su alto albedo “(...) absorben grandes cantidades de radiación solar durante el día y la liberan durante la noche” (Cheela et al., 2021), radiación que finalmente no es disipada ya que la cantidad de vegetación no da abasto.

“Los pavimentos afectan en gran medida al clima urbano. Su balance térmico está determinado por la cantidad de radiación solar absorbida, la radiación infrarroja emitida, el calor transferido por convección al aire atmosférico, el calor almacenado en la masa del material y el calor conducido al suelo. (...) El impacto de los pavimentos en el desarrollo de la isla de calor urbana es muy importante.” (Santamouris, 2013)

Así como hay varias tipologías de fachadas verdes también las hay de islas de calor urbanas, variando su formación, magnitud y patrón temporal: islas de calor urbanas Subsuperficiales, islas de calor urbanas superficiales, islas de calor urbana de la atmósfera urbana inferior e islas de calor urbanas de la atmósfera urbana superior (Voogt y Oke, 2003; Weng et al, 2004; Yuan et al., 2005; Alcoforado et al., 2005; Yuan y Bauer, 2007; Kuttler, 2008; Lopes 2009; Zhao et al., 2018, como se citó en Lopes et al., 2021)

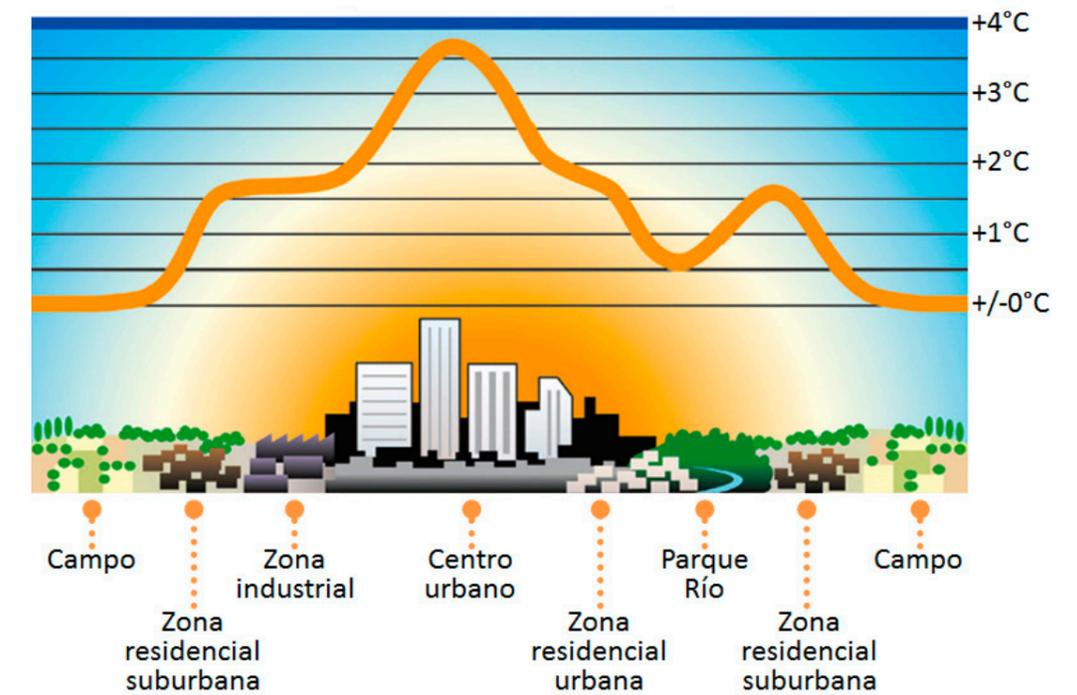


Figura 2: Isla de calor urbana. Perfil referencial de temperaturas urbanas en comparación con área rural.

Fuente: Arquitectura & Energía

SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO ACTIVOS

Como se dijo con anterioridad para reducir el impacto de las islas de calor urbana al interior de las viviendas se recurre a elementos de enfriamiento activos, mayoritariamente aires acondicionados, lo que genera un “(...) impacto importante en el consumo energético de los edificios y aumenta su consumo para la refrigeración. (...) Estudios han demostrado que el consumo de energía para refrigeración de los edificios puede duplicarse debido al importante aumento de las temperaturas urbanas.” (Santamouris, 2013), ocasionando no solamente un gasto mayor económicamente sino también una contribución a la isla de calor cuyos efectos se tratan de combatir.

Recopilando toda esta información, varios estudios ya han demostrado que la infraestructura verde contribuye a la mitigación de los efectos de las islas de calor, tanto en el interior, traduciéndose en la disminución de la demanda energética del edificio “se ha demostrado que los sistemas verticales verdes pueden reducir pasivamente el consumo de energía de un edificio hasta en un 34% durante el periodo de refrigeración, en el caso de una fachada verde de doble piel” (Pérez et al., 2022); como en el exterior de las viviendas, en el espacio público, “las zonas verdes urbanas contribuyen a reducir en gran medida el sobrecalentamiento urbano y eliminan los contaminantes, al tiempo que contribuyen a la retención y detención de la escorrentía de las aguas pluviales y al secuestro de carbono (...)” (Khan et al., 2022), sin embargo, a pesar de la gran cantidad de estudios que han confirmado el impacto de la vegetación en cuanto al “clima urbano y el potencial de enfriamiento, existe una gran incertidumbre sobre la magnitud del potencial de enfriamiento y el impacto en el clima urbano en las ciudades costeras con climas cálidos” (Khan et al., 2022).

IV. CASO DE ESTUDIO

El cuarto capítulo abarca el caso de estudio en el que se aplicará la hipótesis y mediante el cual se busca responder las preguntas de investigación. Los criterios generales para la selección del caso de estudio fueron dos: encontrarse inserto en una isla de calor y ser un edificio habitacional. Para esto, primeramente se realizó un estudio de las condiciones climáticas en las que se sitúa Porto, luego se identificaron las islas de calor presentes en la ciudad, finalmente se seleccionó un edificio y se estudiaron sus características de forma más detallada.

CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y ESPACIALES DE PORTO

La presente investigación se llevará a cabo en el municipio de Porto (Figura 3), ciudad ubicada al noroeste de Portugal a 41.15° latitud norte y 8.61° longitud oeste. Porto es la capital del Área Metropolitana de Porto, de la Región del Norte y del Distrito de Porto, tiene un área urbana aproximada de $41,42 \text{ km}^2$ y según el Censo 2021 cuenta con una población de 213.962 habitantes (INE, 2021). Es una ciudad costera que limita con el océano Atlántico al oeste y con el río Duoro al sur.

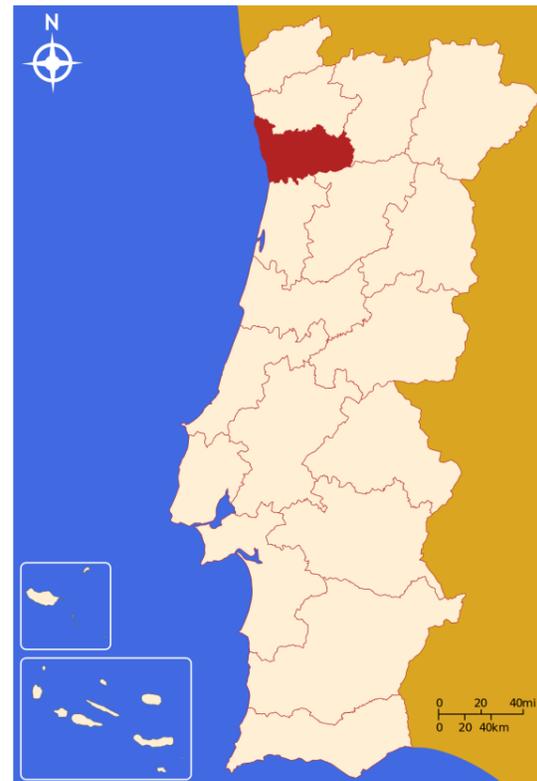


Figura 3: Localización de Porto.

Fuente: Wikipedia.

Cuenta con un clima templado marítimo con veranos secos y agradables e inviernos frescos y con precipitaciones. La temporada templada dura 3 meses aproximadamente entre los meses de Junio y Septiembre, y la temperatura máxima promedio diaria es de 22°C , mientras que la temporada fresca dura 3,5 meses, desde mediados de noviembre a principios de marzo, durante la cual la temperatura máxima promedio diaria es menos de 16°C .

En cuanto a la precipitaciones estas varían considerablemente durante el transcurso del año siendo mayores entre los meses de Octubre y Diciembre con un promedio aproximado de 130 mm de lluvia, y los meses con menores precipitaciones son desde Junio hasta Agosto con un promedio de 20 mm aproximadamente de lluvia. El total anual de precipitaciones en Porto varía entre 800 mm y 1500 mm dependiendo del año. En base al análisis de estos datos se genera un climograma de 30 años de Porto (Figura 4), aquí podemos dar cuenta de que la variación de las temperaturas medias durante el año no varían drásticamente, contrariamente al caso de las precipitaciones que si presentan una variación marcada de acuerdo a las estaciones del año.

Climograma de Oporto 1991 - 2021

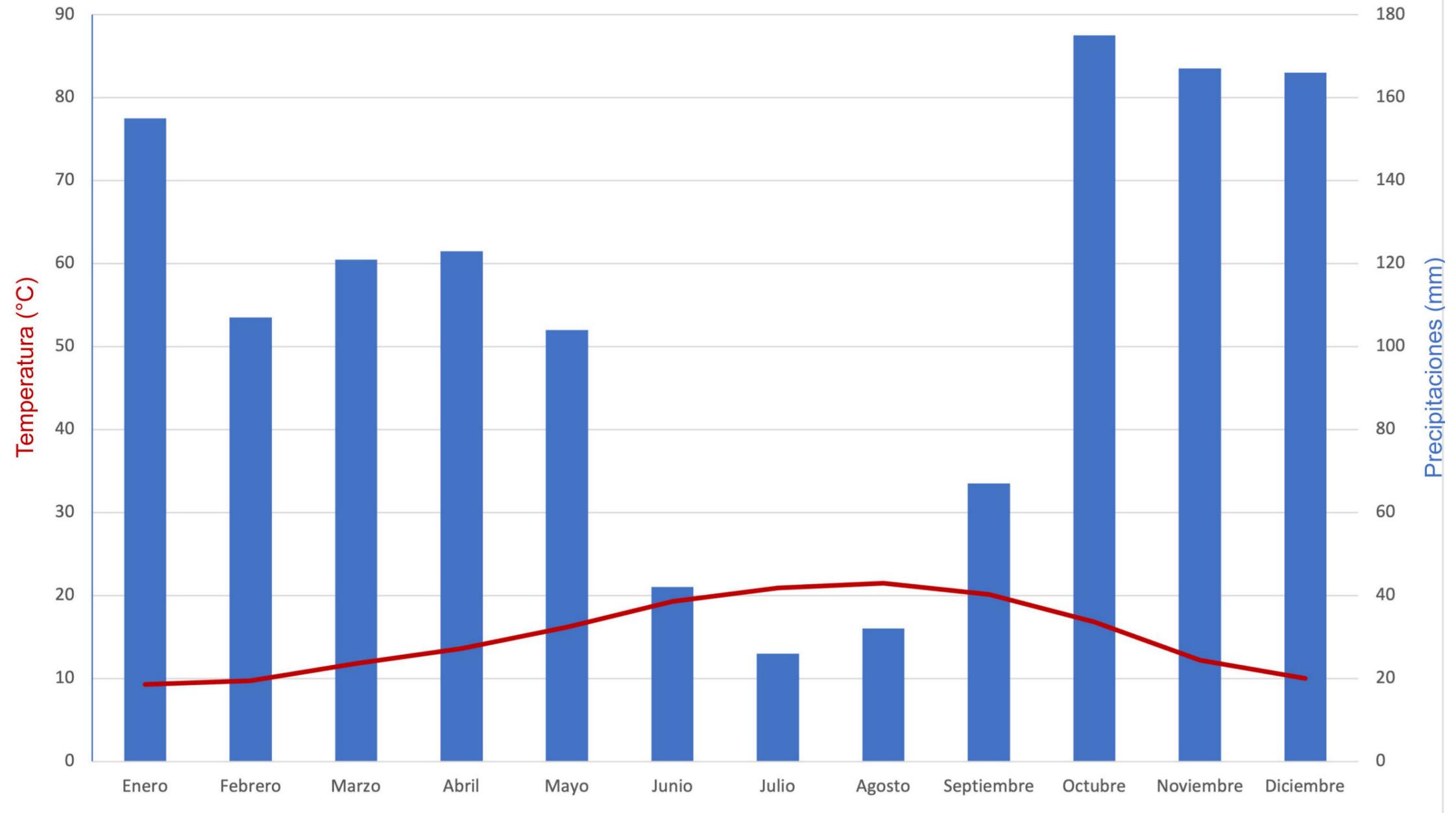


Figura 4: Climograma de Porto 1991-2021.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del IPMA y WeatherSpark.

Otro factor climático importante a considerar en la ciudad de Porto es el viento, la parte más ventosa del año dura 6,4 meses, desde Octubre hasta Mayo aproximadamente, con velocidades promedio del viento de más de 11,0 kilómetros por hora (3,06 metros por segundo). El mes más ventoso del año en Porto es diciembre, con vientos a una velocidad promedio de 12,6 kilómetros por hora (3,47 metros por segundo). En cuanto a la dirección del viento viene con más frecuencia del este en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, del norte desde febrero hasta octubre y del sur en octubre, noviembre, diciembre y enero. (Figura 5).

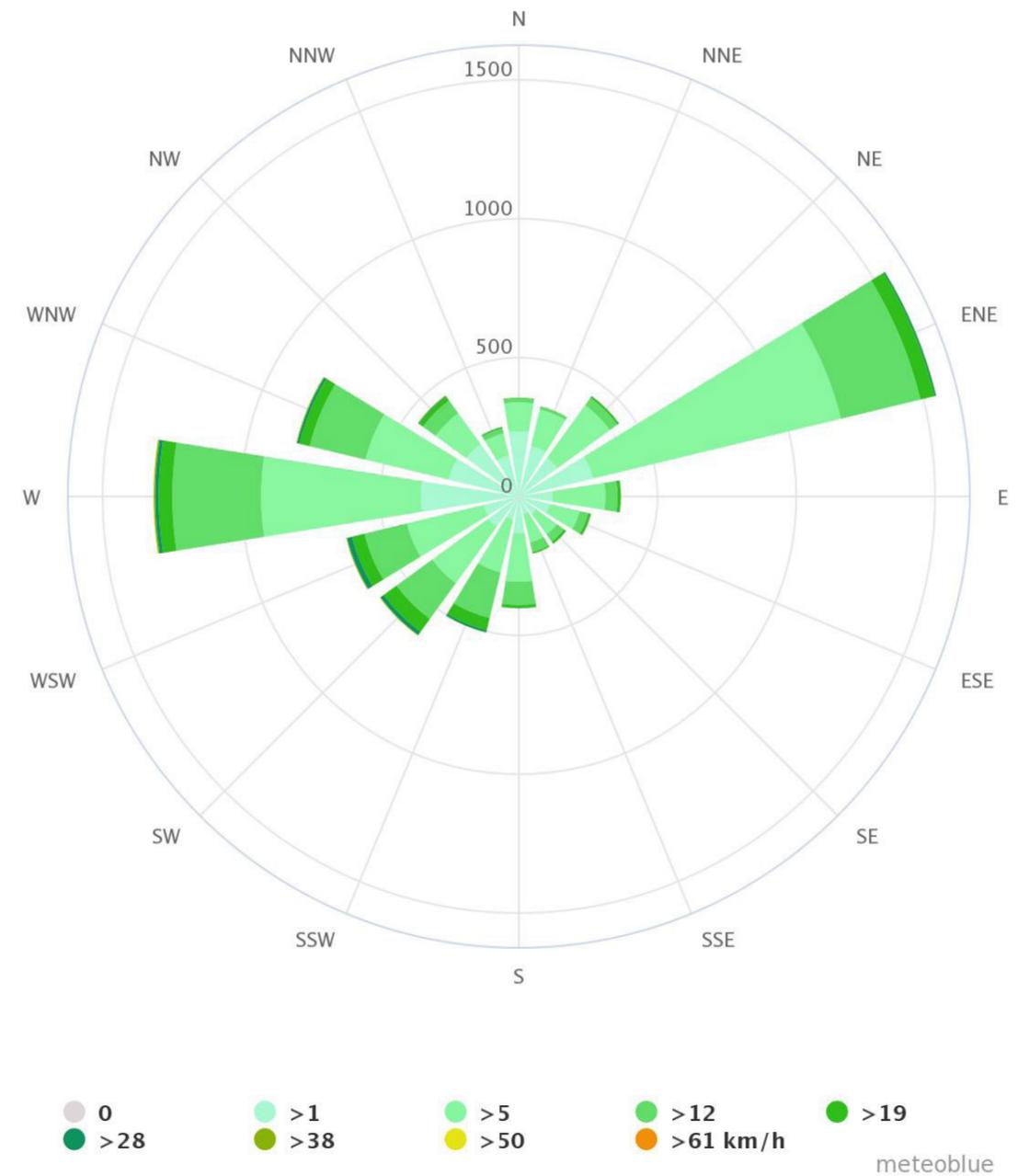


Figura 5: Rosa de los vientos para Porto.
Fuente: Meteoblue.

Topográficamente Porto tiene grandes cambios de altura con un máximo de 174 metros y con un promedio de 83 metros sobre el nivel del mar. (Weatherspark, 2022). (Figura 6).

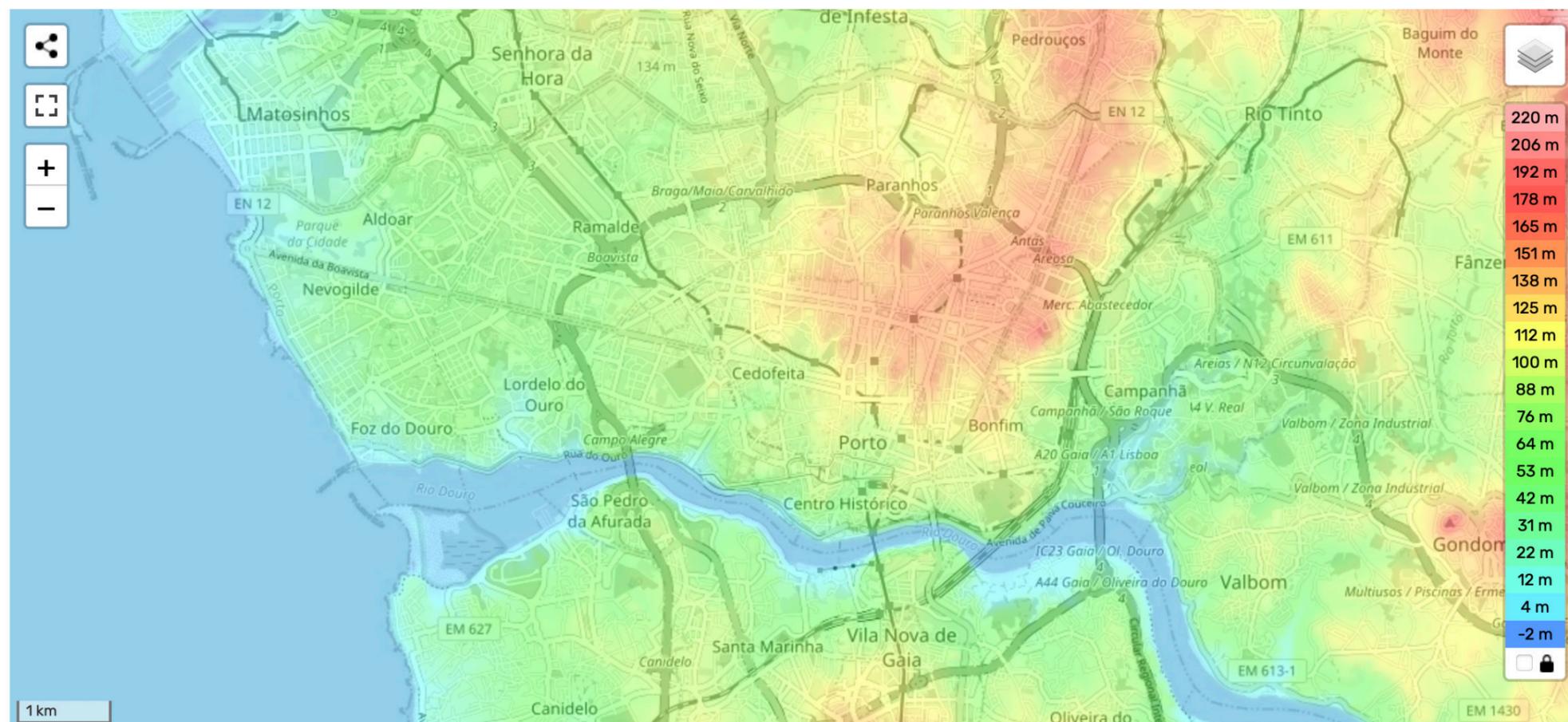


Figura 6: Mapa topográfico Porto
Fuente: Mapa Topográfico Mundial.

IDENTIFICACIÓN DE ISLAS DE CALOR EN PORTO

Para la identificación de las islas de calor urbanas presentes en Porto se recurrió fundamentalmente a dos estudios, primeramente el de Monteiro y Madureira (2009) “Forma y magnitud de las islas de calor de Porto como indicador de sostenibilidad” donde se observó la presencia de dos islas de calor que coincidían con el centro administrativo y funcional de la ciudad también incluyendo las áreas más usadas para la red de transporte, es decir de mejor accesibilidad al centro, también se observó que estas anomalías térmicas estaban directamente asociadas con la mayor densidad en el uso del espacio, áreas de mayor tráfico y áreas de alta actividad humana (Figura 7). Posteriormente para confirmar si las islas de calor seguían presentes, se analizó el estudio de Monteiro et al. (2017) “Temperaturas superficiales en Porto: análisis de los contextos bioclimáticos en los barrios sociales” (Figura 8). Al comparar la información entregada por ambos estudios se confirmó la distribución y permanencia de las islas de calor de Porto, seleccionando una de ellas para el caso de este estudio.

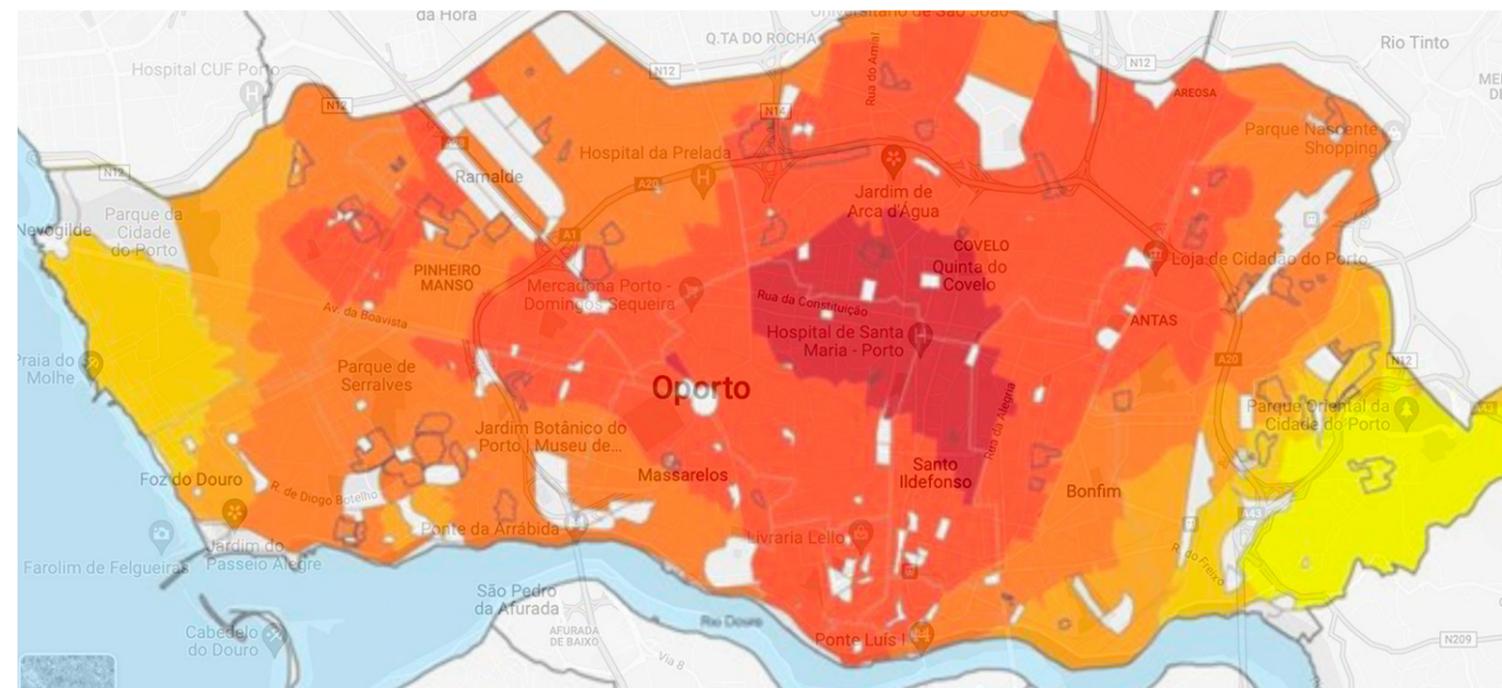
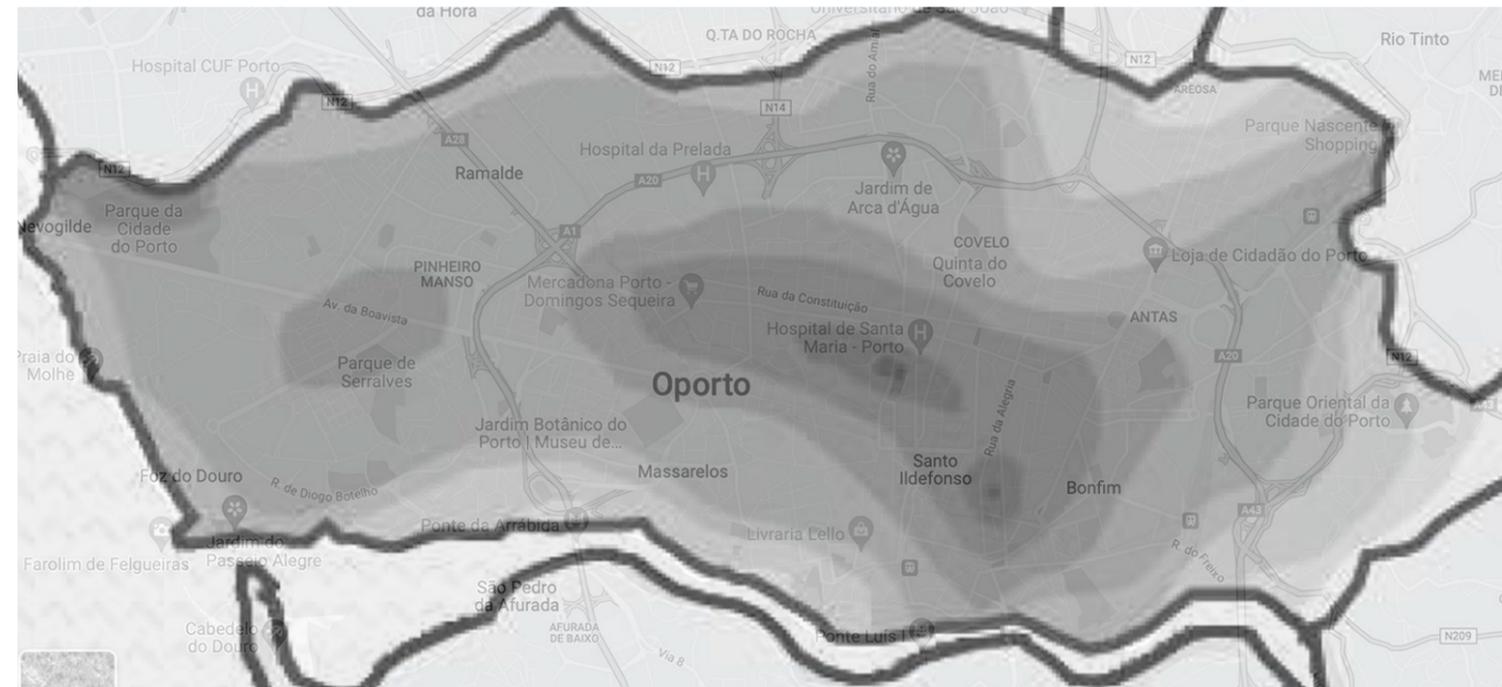
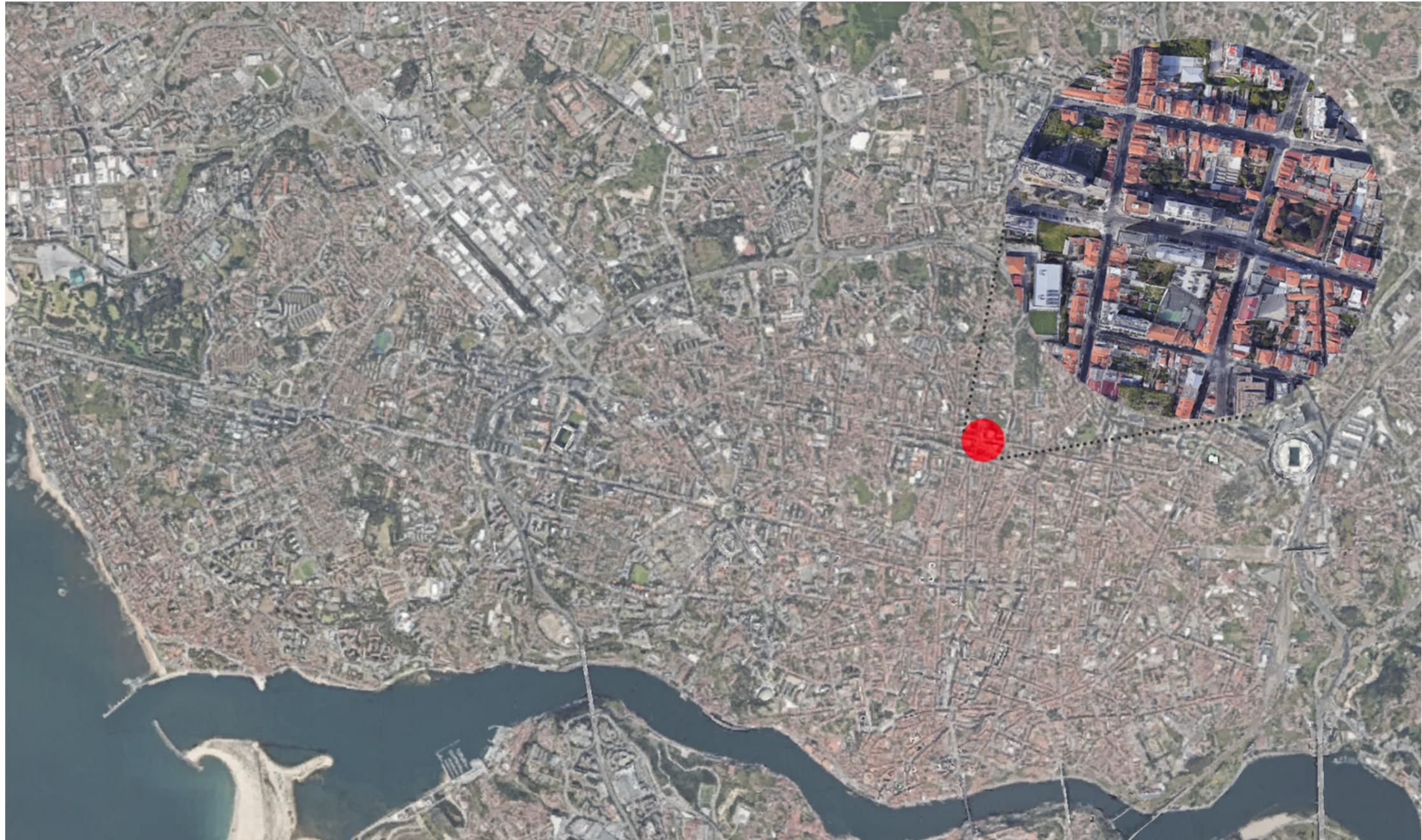


Figura 8: adaptado de “Temperaturas superficiales en Porto: análisis de los contextos bioclimáticos en los barrios sociales” (p. 491) por A. Monteiro, M. Amorim y F. Loureiro de Matos, 2017.

SELECCIÓN DEL EDIFICIO

Figura 9: Plano de ubicación caso de estudio.
Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.



Para la selección del edificio a analizar se realizó una visita a terreno a la isla de calor definida con anterioridad. Se identificó un barrio residencial y comercial entre las calles de Antero de Quental y calle de São Brás, para finalmente seleccionar un edificio residencial de 11 pisos en la calle de Damião de Goís (Figura 9), el primer nivel esta destinado a uso comercial y los demás pisos a uso residencial. (Figura 10)

De acuerdo al Plan Director Muicipal de Porto (PDM) este edificio se encuentra en una zona con clasificación de uso de suelo denominada áreas con fachada urbana continua tipo II (Figura 11) las cuales corresponden a las áreas estructuradas en manzanas con edificios ubicados predominantemente en el lado de la calle, donde el espacio público está definido y donde los frentes urbanos construidos están en proceso de transformación constructiva y de uso, pretendiendo el mantenimiento y la reestructuración de las mallas urbanas y la consolidación del tipo de relación entre lo construido y el espacio público existente, es decir, la uniformidad de la fachada urbana. (PDM, 2021)

Figura 10: ; Edificio seleccionado para la investigación.

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.



V. OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección primeramente se plantean los resultados esperados en base a la hipótesis, posteriormente se llevan a cabo la tercera y cuarta etapa de la investigación previamente descritas, correspondientes a simulación y comparación de datos respectivamente, en adición se discute sobre los elementos a mejorar y las contribuciones que la investigación desarrollo.

RESULTADOS ESPERADOS

Tras el desarrollo de la investigación se espera confirmar la hipótesis planteada de que la aplicación de fachadas verdes en las edificaciones contribuirá a regular la temperatura tanto del exterior como del interior de estas, lo que ayudará a disminuir la utilización de elementos de enfriamiento activos en las viviendas y a su vez contribuirá a la mitigación de los efectos de las islas de calor, causando una interrupción en la relación viciosa entre ambos fenómenos. Esta investigación tendría un valor práctico ya que permitiría conocer de manera certera la eficiencia de las fachadas verdes de doble piel, en un tipo de clima templado marítimo, como método para contrarrestar los efectos de las islas de calor urbanas tanto en el entorno urbano como en el interior de las viviendas

SIMULACIÓN

Como se describió anteriormente los datos se obtuvieron mediante el software de simulación Envi-MET, en total se realizaron cuatro simulaciones, todas con las mismas características meteorológicas, la misma fecha -día, mes y año-, y el mismo periodo de duración -24 horas-. La simulación se llevó a cabo entre las 05:00 am del 16 de Agosto y las 05:00 am del 17 de Agosto del 2022, se seleccionaron estos días ya que es pleno verano y Agosto es el mes con las temperaturas más altas registradas en Porto.

Únicamente una de las simulaciones fue con las características originales del edificio seleccionado, es decir, sin fachada verde, estructurado en base a hormigón armado (Figura 12), mientras que a las otras simulaciones se les adicionó una fachada verde de doble piel (Figura 13), variando unas de las otras únicamente en el índice de área foliar, siendo 1,0 m²/m², 2,0 m²/m² y 4,0 m²/m². La vegetación empleada para la fachada fue hiedra (*hedera helix*), esto debido a que se trata de una planta nativa de Europa, también está clasificada dentro de las plantas trepadoras, lo que la hace ideal para una fachada verde y necesita un asoleamiento de pleno sol o media sombra, además es la más idónea dentro de las opciones entregadas por la base de datos del software donde se llevó a cabo la simulación.

En cuanto al sustrato empleado, la hiedra requiere preferentemente de suelos fértiles y drenados de materia orgánica por lo que se utilizó arcilla, turba y una base de tabloncillos de madera (Figura 14).

En cada una de las simulaciones se analizaron cuatro horas del día: 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00, esto con el propósito de identificar la existencia de alguna variación en la influencia de la fachada verde en el transcurso del día.

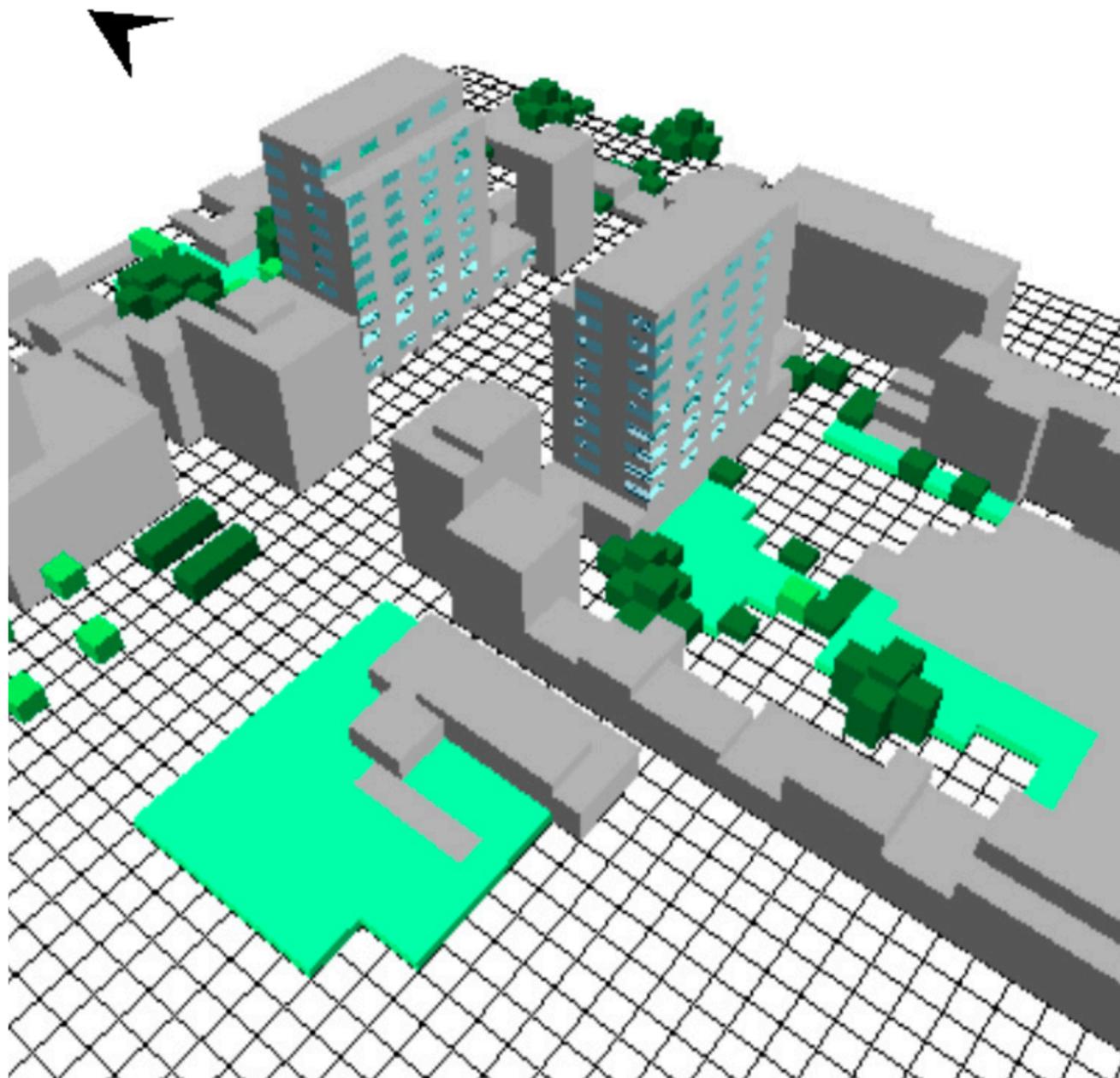


Figura 12: Modelo simulación sin fachada verde.

Fuente: Elaboración propia.

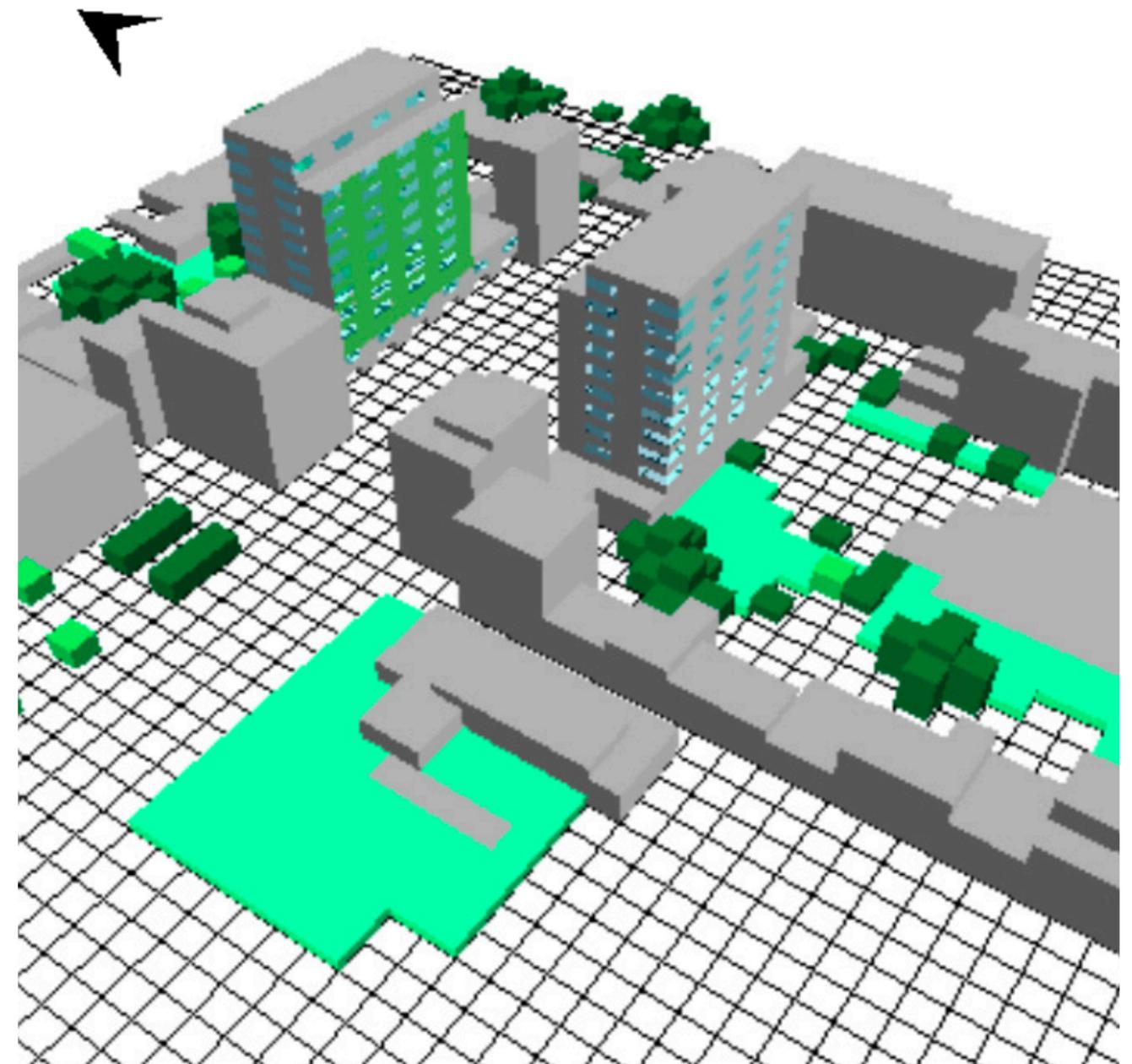
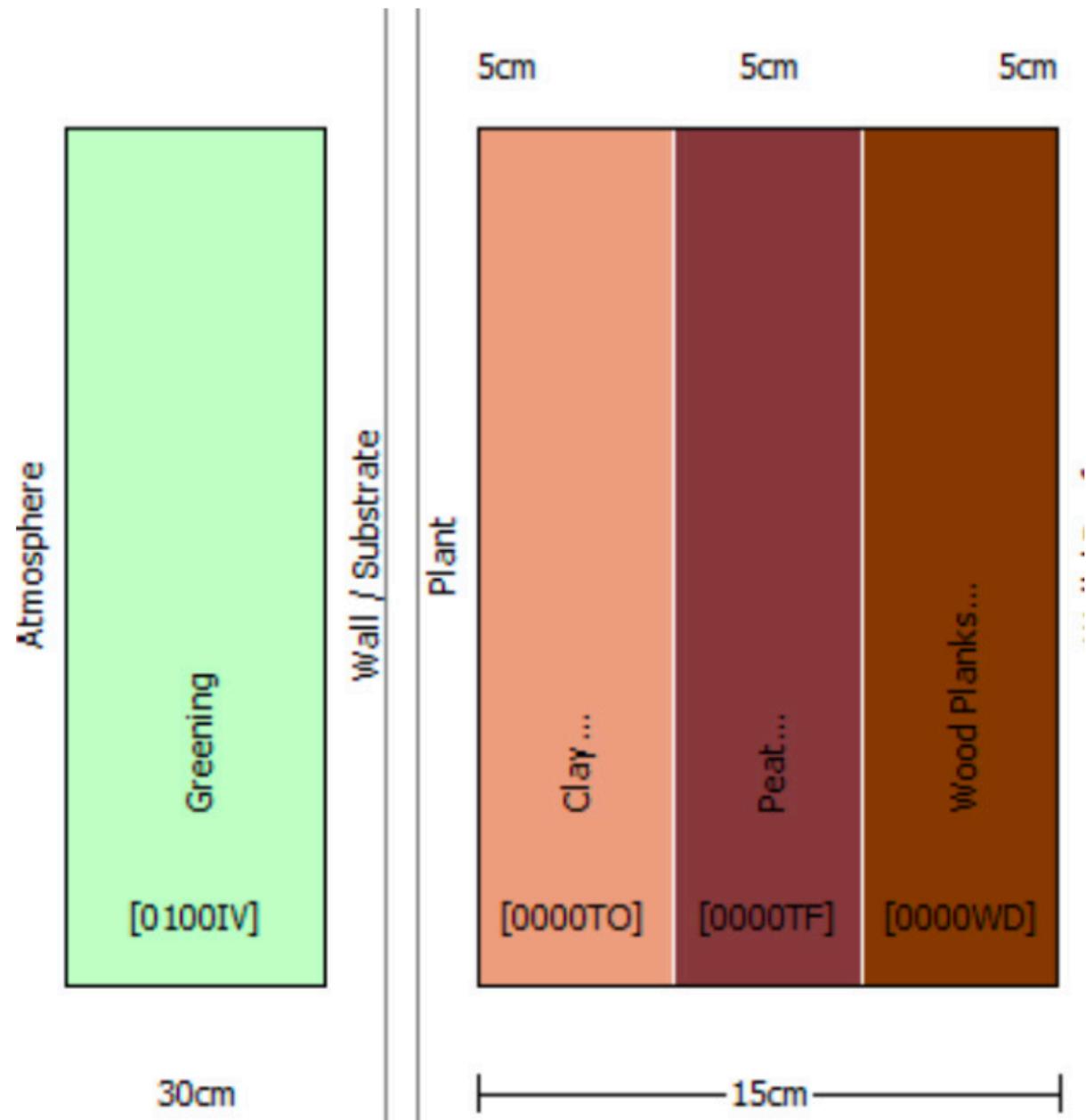


Figura 13: Modelo simulación con fachada verde.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Estructura sustrata fachada verde.

Fuente: Elaboración propia.



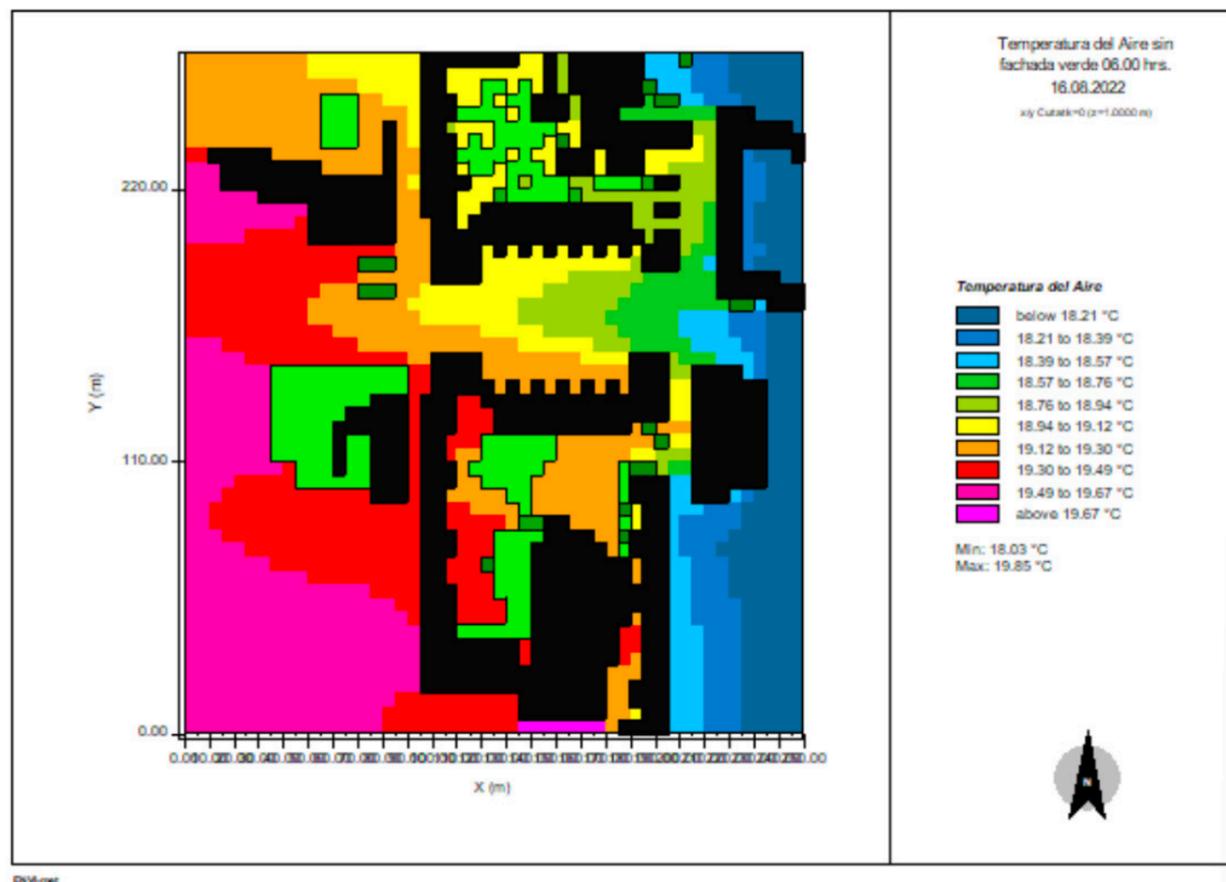
RESULTADOS

Ya refiriéndose a los datos obtenidos estos se materializan a través de gráficos que muestran visual y numéricamente la variación de temperatura del aire en grados Celsius, resultando cuatro graficos de cada simulación, las cuales son: sin fachada verde de doble piel (Figura 15), con fachada verde de doble piel IAF = 1,00 m²/m² (Figura 16), con fachada verde de doble piel IAF = 2,00 m²/m² (Figura 17) y por último, con fachada verde de doble piel IAF = 4,00 m²/m² (Figura 18).

SIN FACHADA VERDE DE DOBLE PIEL

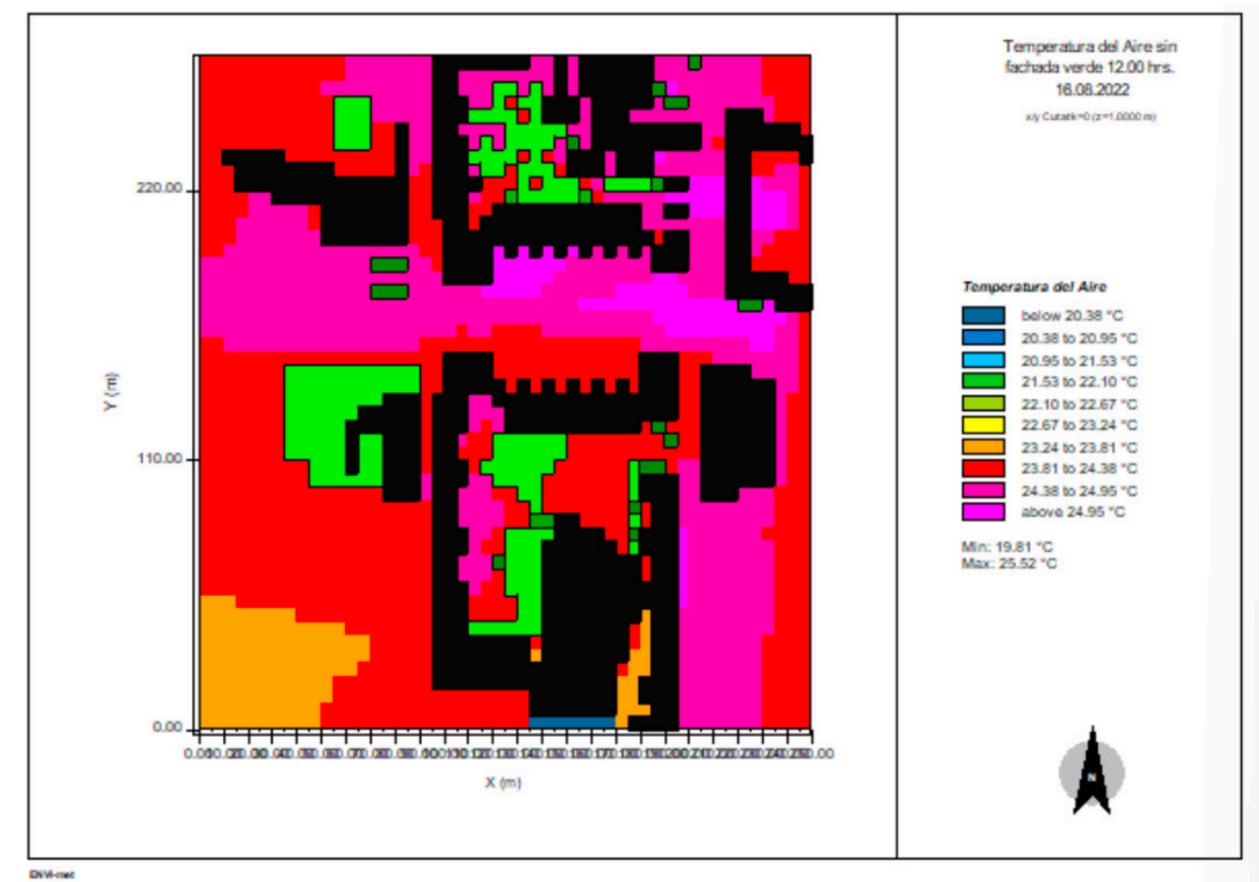
Figura 15: Temperatura del Aire sin fachada verde

Fuente: Elaboración propia a través de Envi_MET



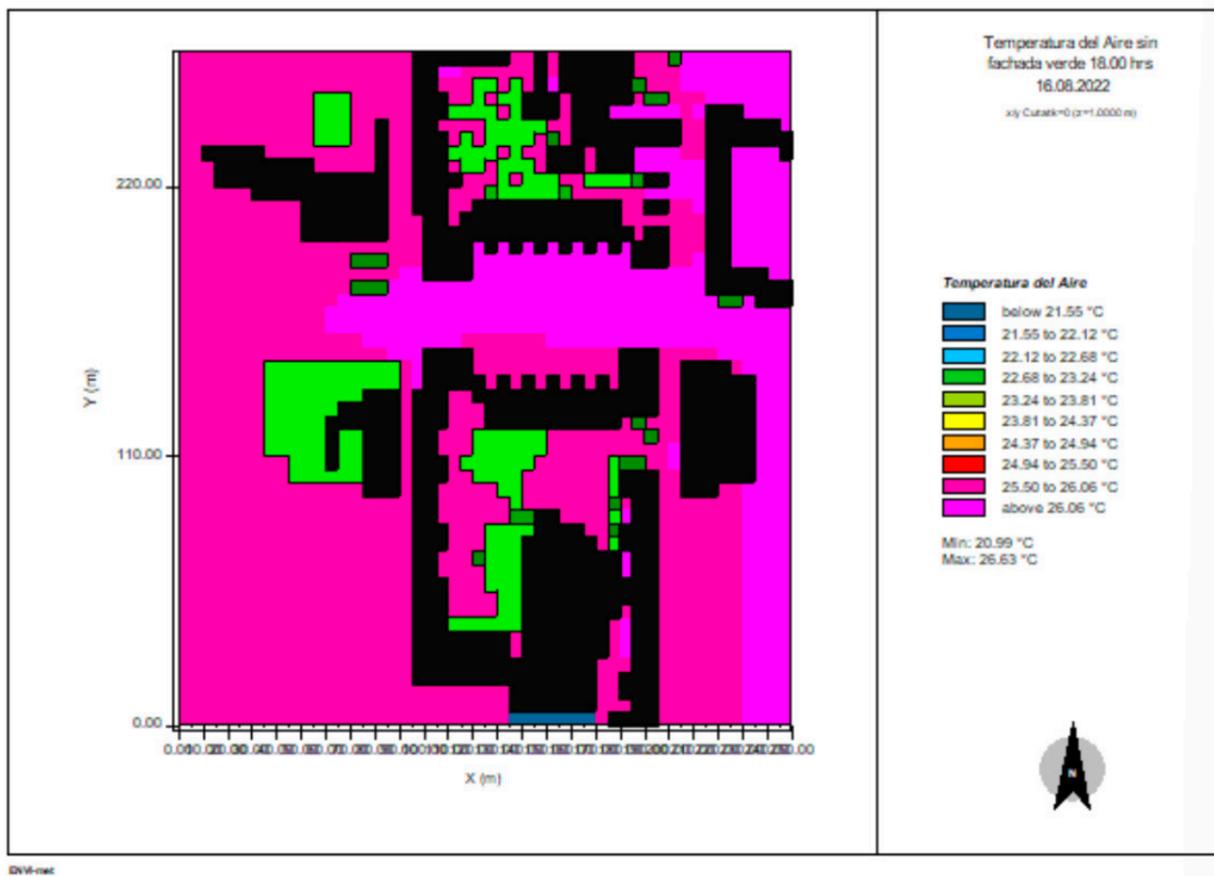
06:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 18,03 °C
T° máxima = 19,85 °C



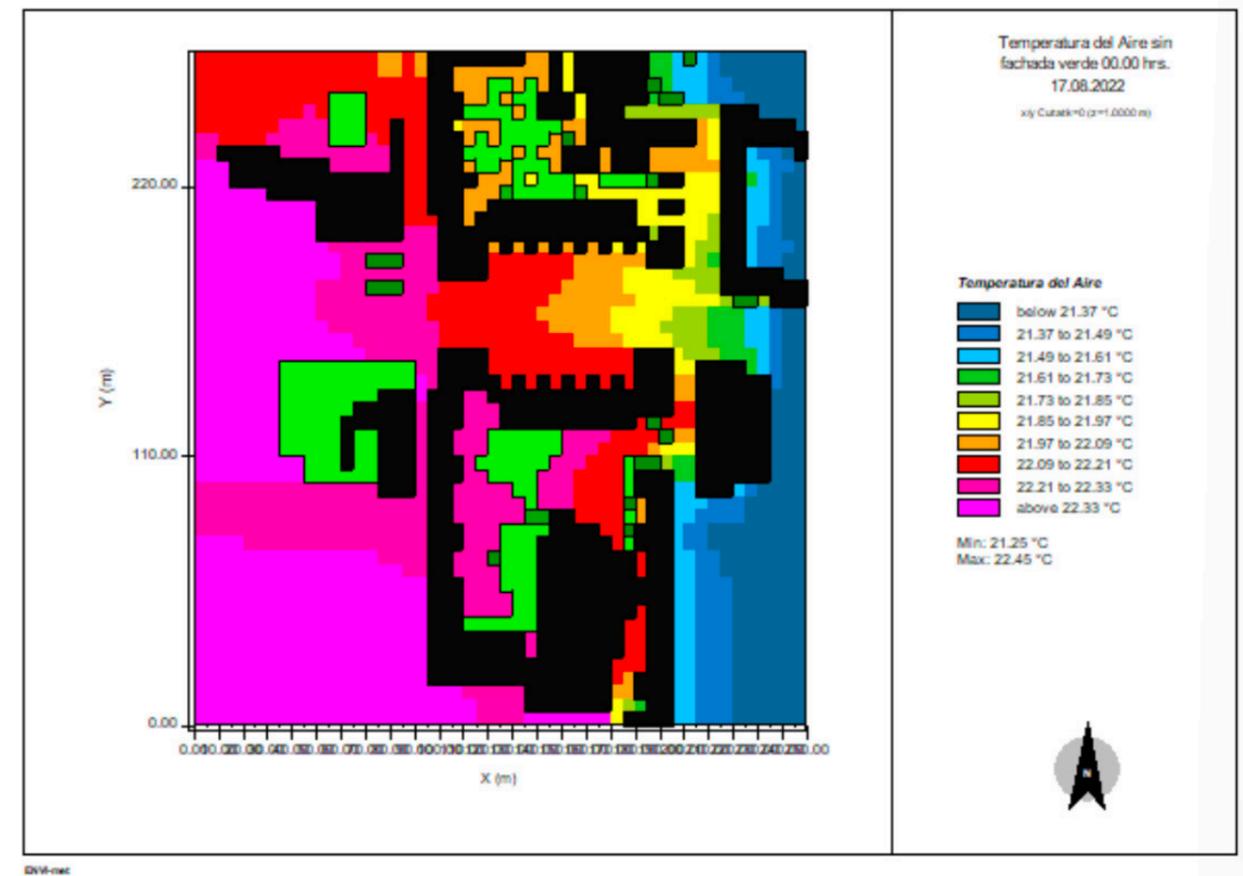
12:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 19,81 °C
T° máxima = 25,52 °C



18:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 20,59 °C
T° máxima = 26,63 °C



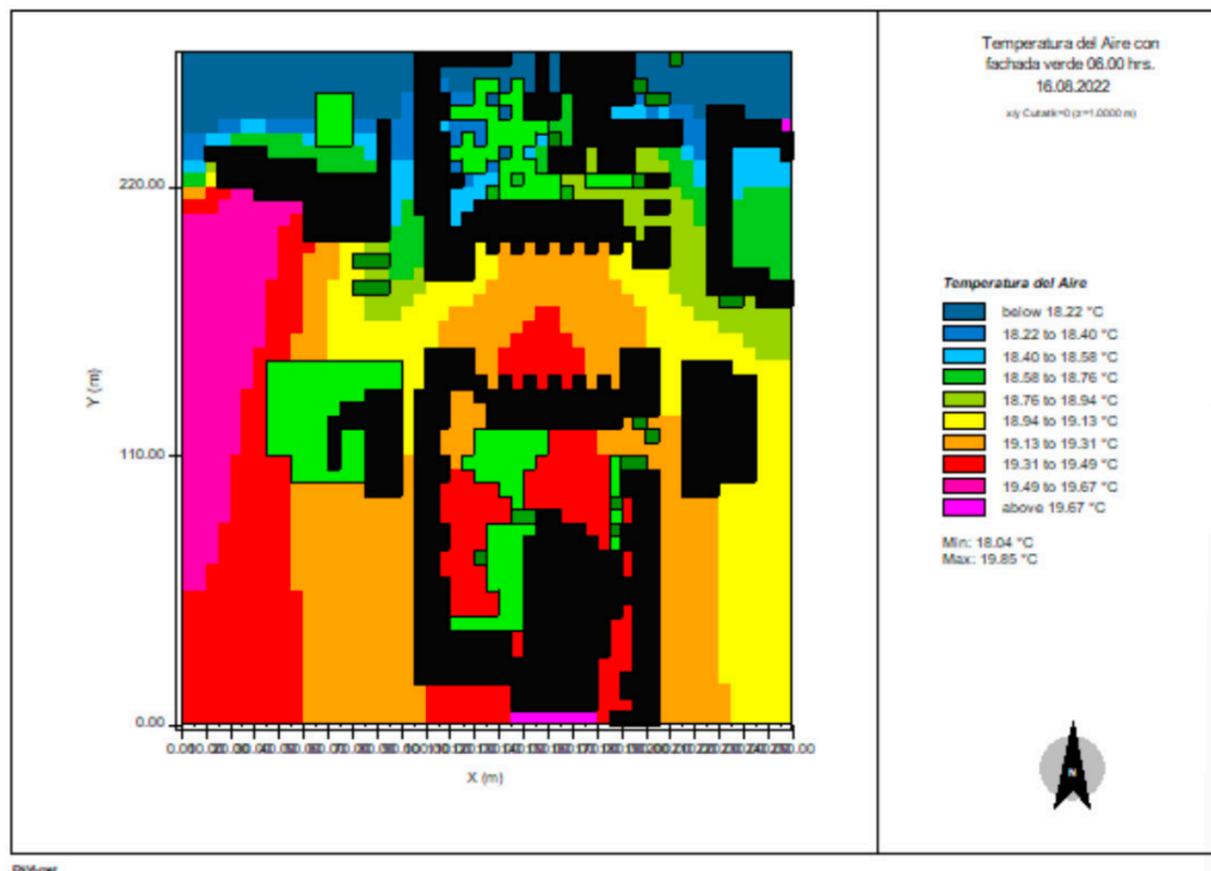
00:00 horas del 17 de Agosto de 2022

T° mínima = 21,25 °C
T° máxima = 22,45 °C

CON FACHADA VERDE DE DOBLE PIEL
IAF = 1,00 M2/M2

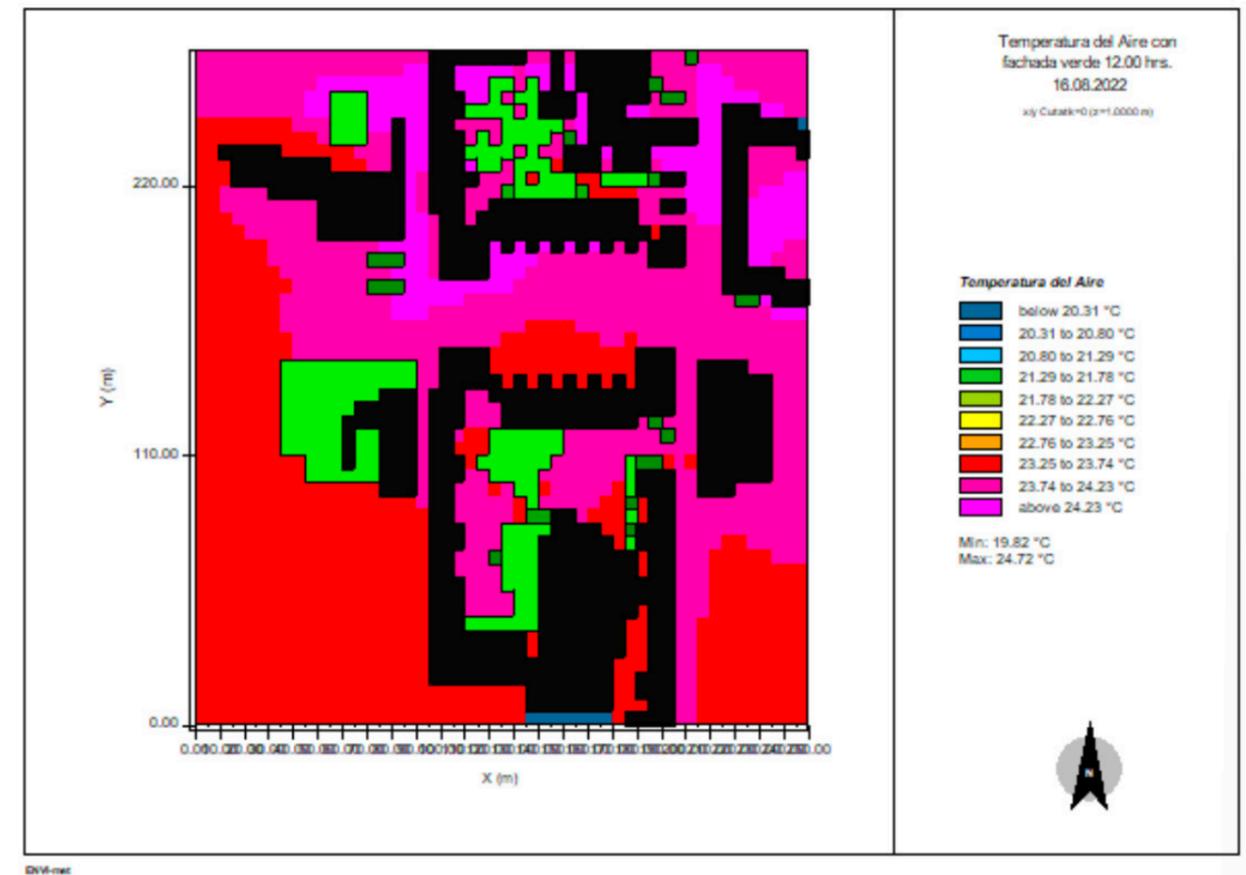
Figura 16: Temperatura del Aire con fachada verde IAF = 1,00 m2/m2

Fuente: Elaboración propia a través de Envi_MET



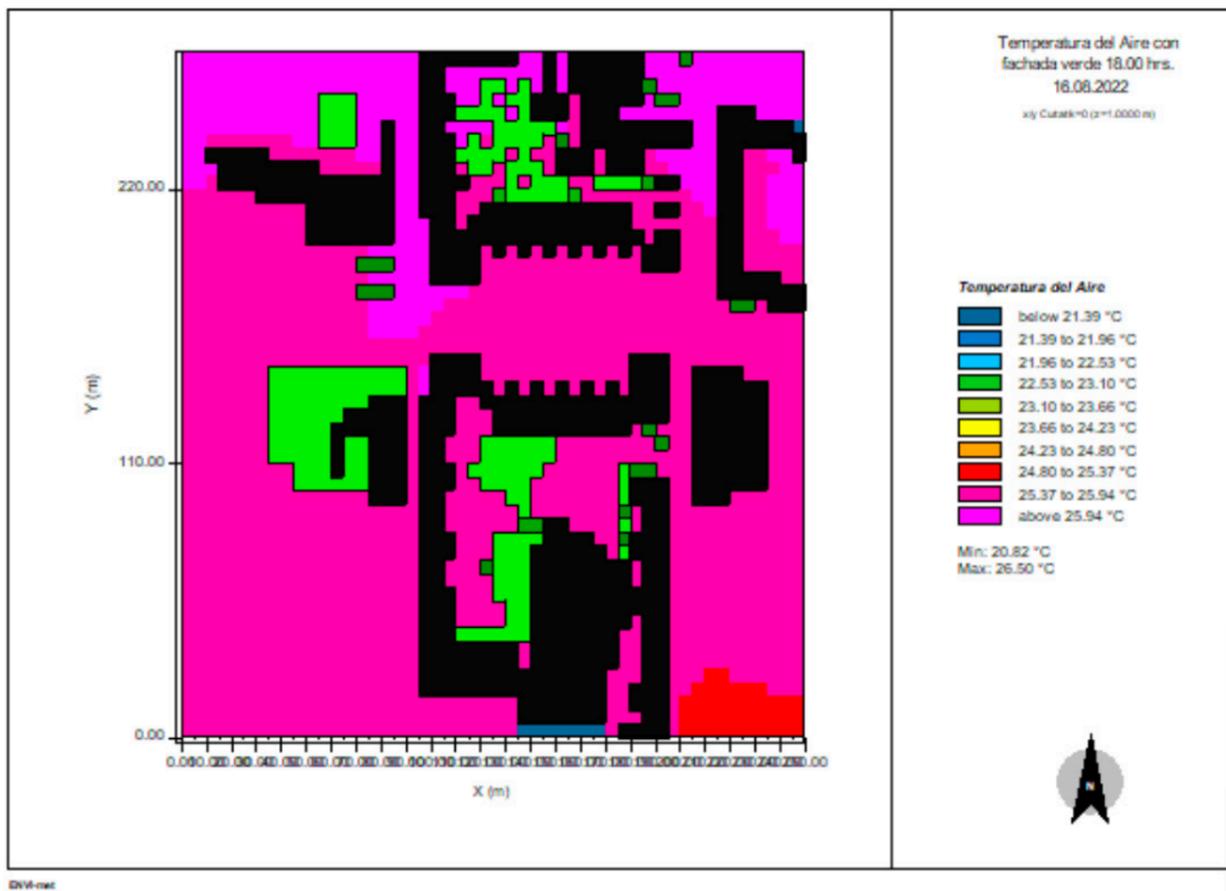
06:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 18,04 °C
T° máxima = 19,85 °C



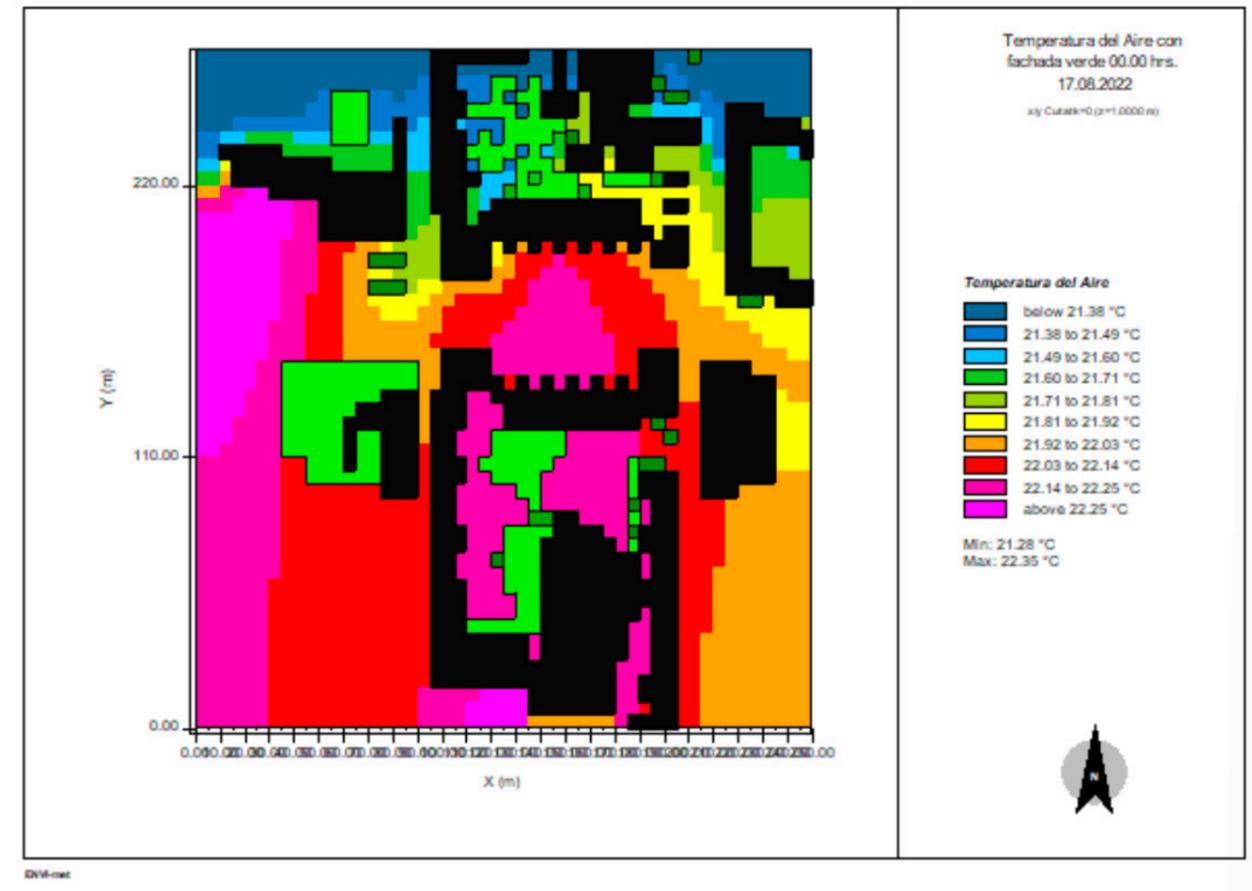
12:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 19,82 °C
T° máxima = 24,72 °C



18:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 20,82 °C
T° máxima = 26,50 °C



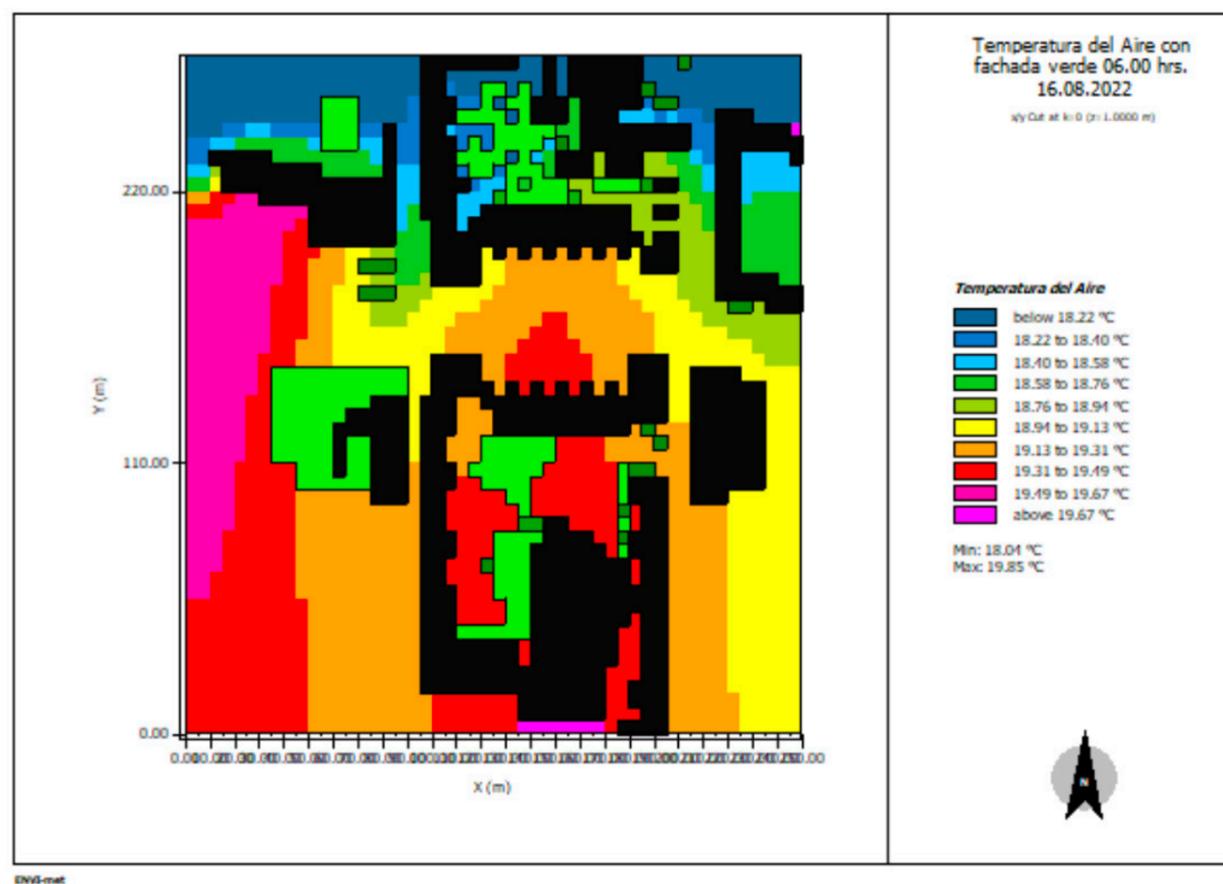
00:00 horas del 17 de Agosto de 2022

T° mínima = 21,28 °C
T° máxima = 22,35 °C

CON FACHADA VERDE DE DOBLE PIEL
IAF = 2,00 M2/M2

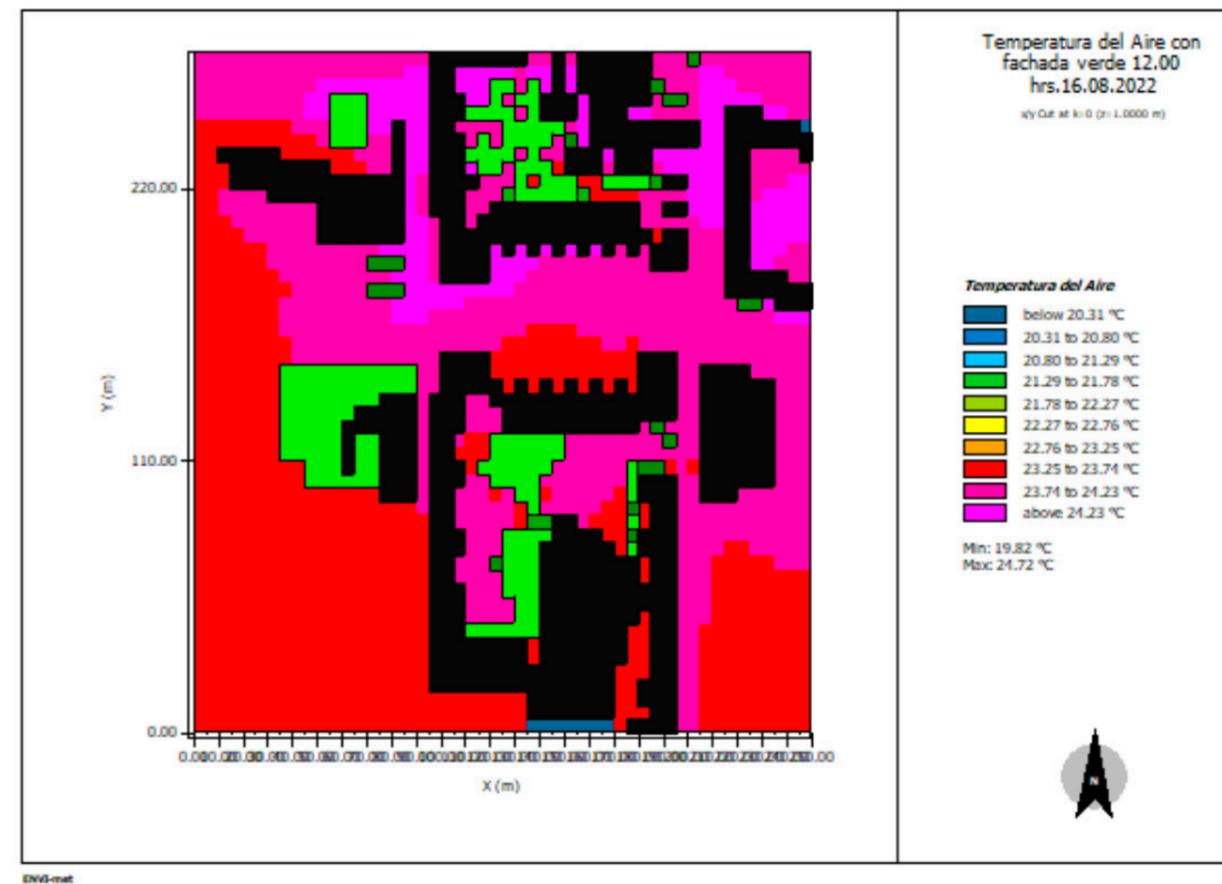
Figura 17: Temperatura del Aire con fachada verde IAF = 2,00 m2/m2

Fuente: Elaboración propia a través de Envi_MET



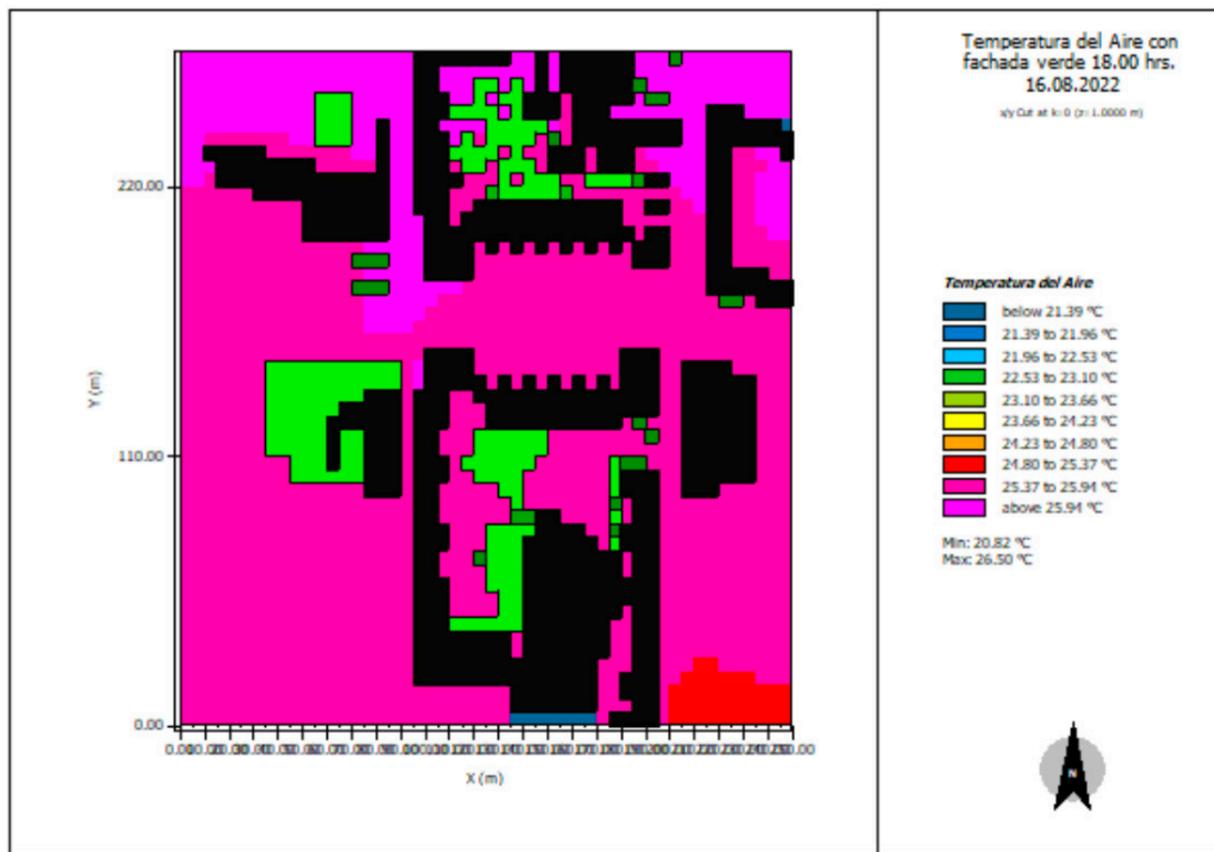
06:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 18,01 °C
T° máxima = 19,85 °C



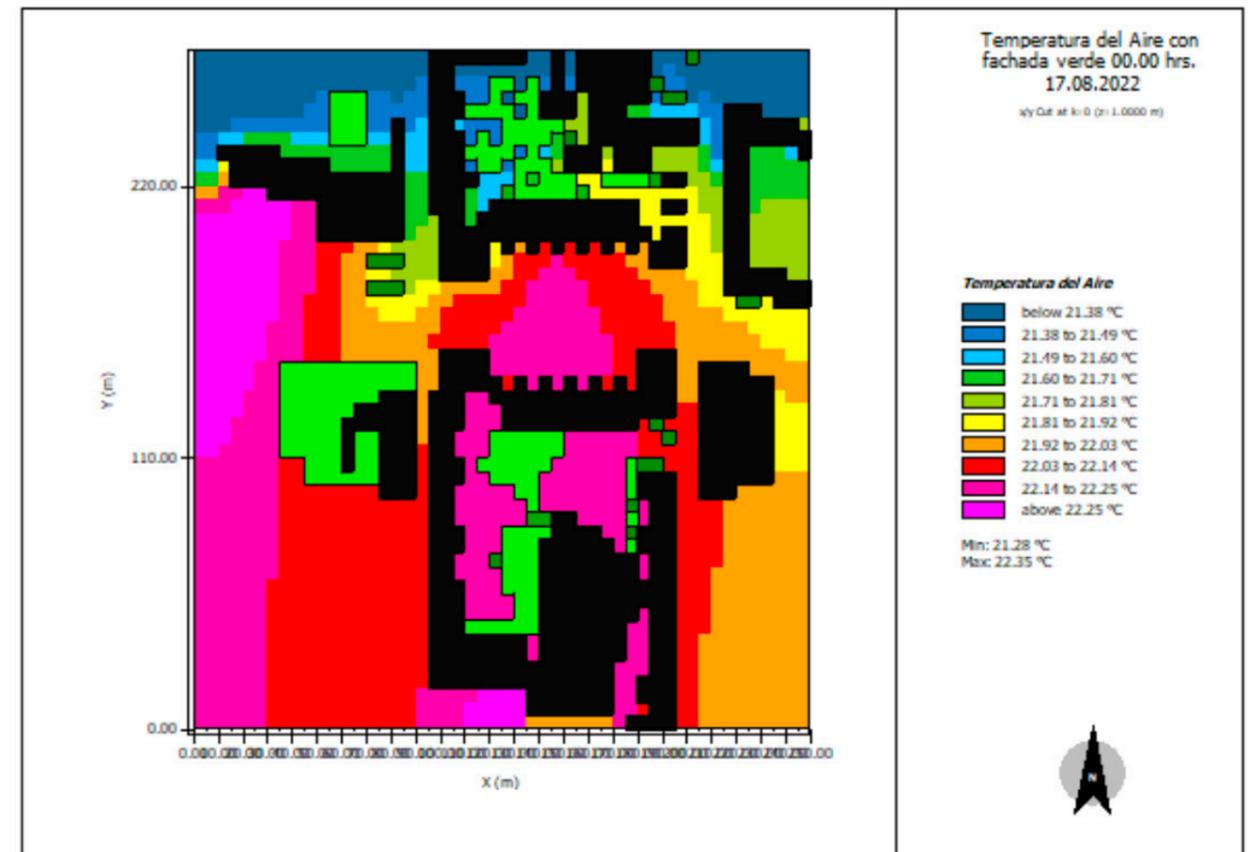
12:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 19,82 °C
T° máxima = 24,72 °C



18:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 20,82 °C
T° máxima = 26,50 °C



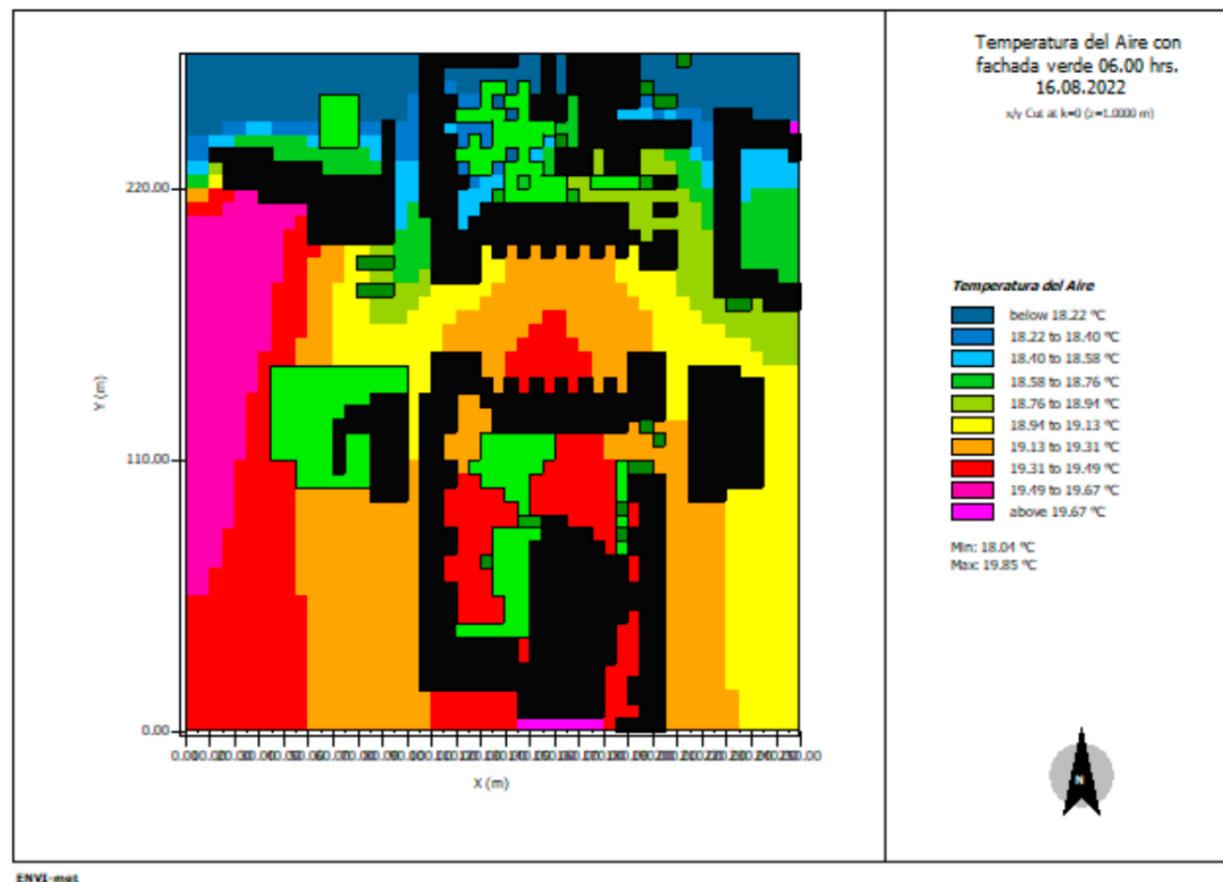
00:00 horas del 17 de Agosto de 2022

T° mínima = 21,28 °C
T° máxima = 22,35 °C

CON FACHADA VERDE DE DOBLE PIEL
IAF = 4,00 M2/M2

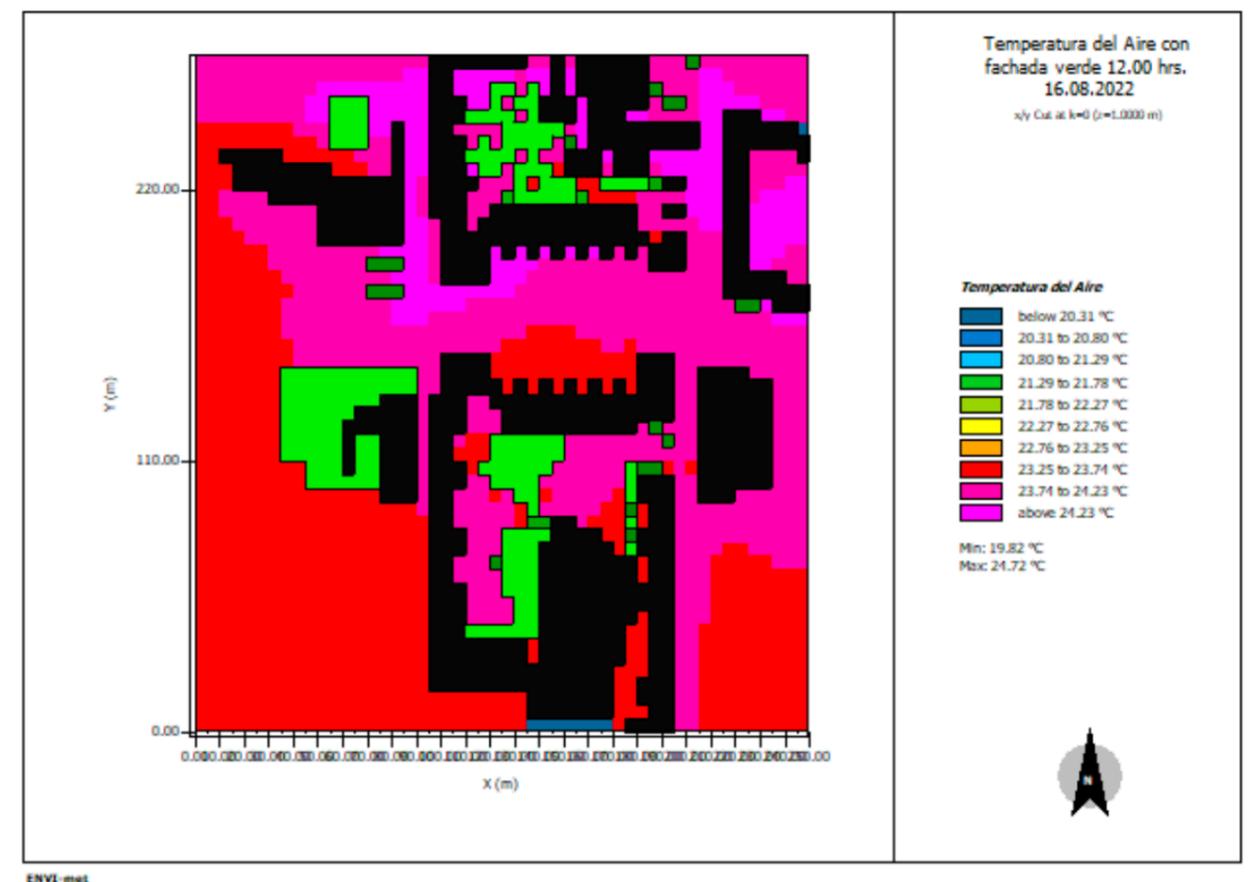
Figura 18: Temperatura del Aire con fachada verde IAF = 4,00 m2/m2

Fuente: Elaboración propia a través de Envi_MET



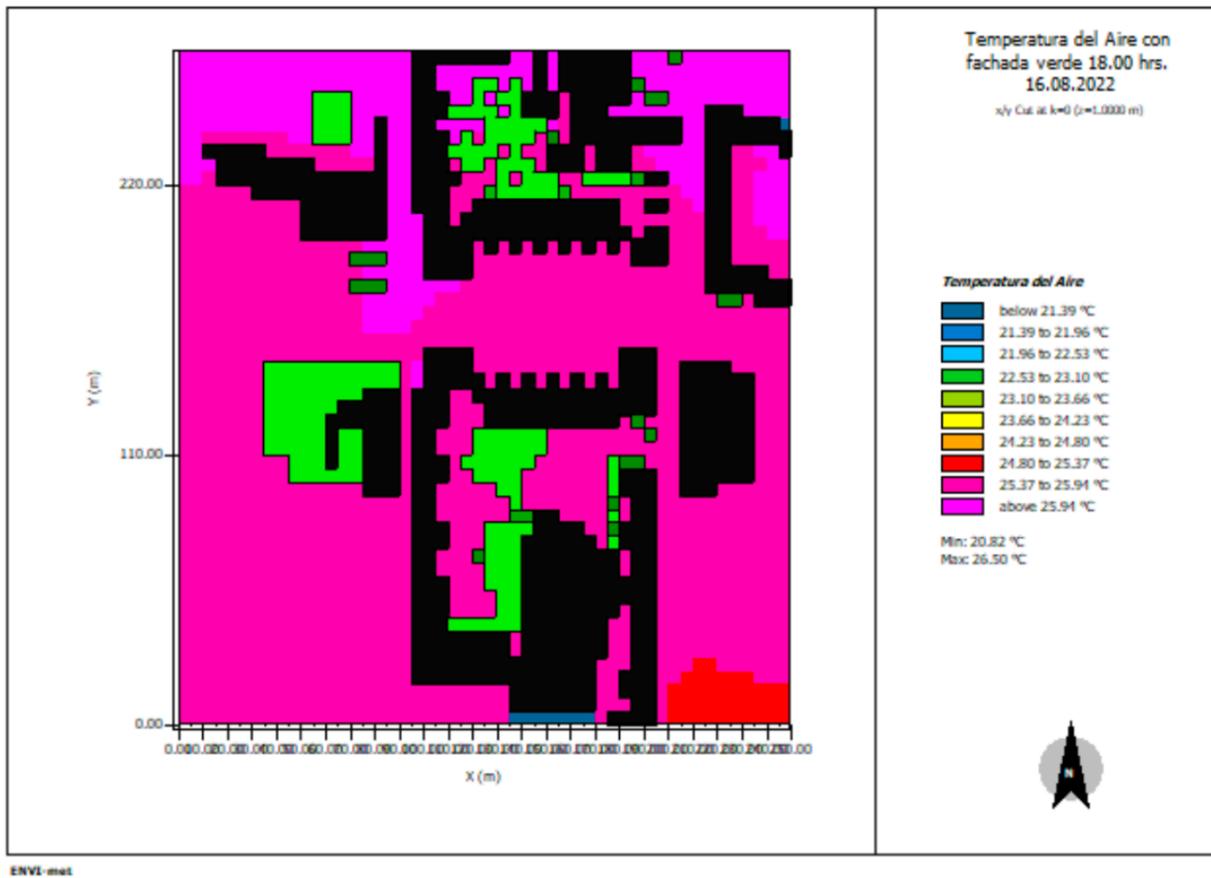
06:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 18,01 °C
T° máxima = 19,85 °C



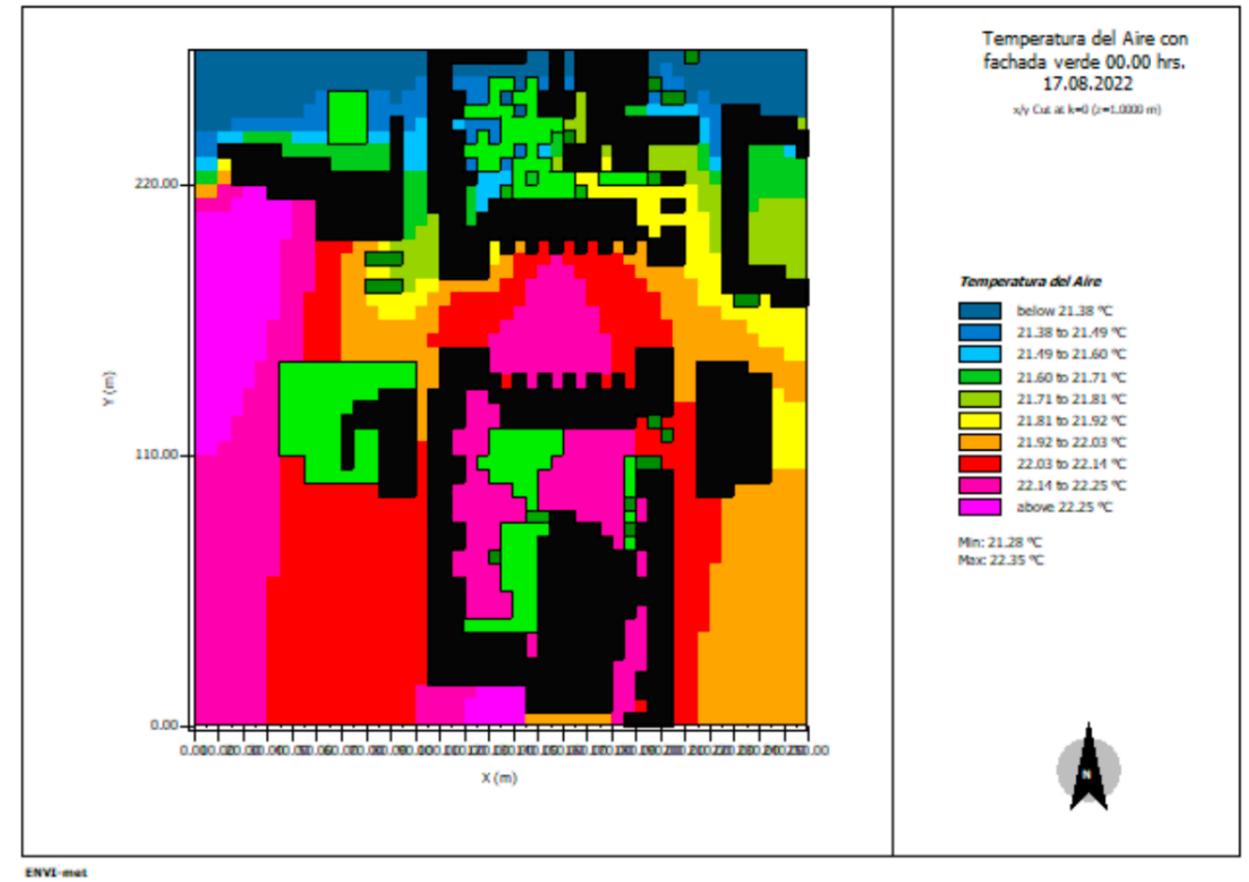
12:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 19,82 °C
T° máxima = 24,72 °C



18:00 horas del 16 de Agosto de 2022

T° mínima = 20,82 °C
T° máxima = 26,50 °C



00:00 horas del 17 de Agosto de 2022

T° mínima = 21,28 °C
T° máxima = 22,35 °C

Antes que nada se menciona una síntesis sobre las preguntas de investigación, estas eran fundamentalmente hallar el impacto térmico que tienen las fachadas de doble piel en los efectos de las islas de calor, esto en el entorno urbano como en el interior de un edificio residencial, discriminar sobre que índice de área foliar contribuye en mayor medida para la regulación de la temperatura y por último, estimar en cuanto se reduce el consumo energético del edificio estudiado en presencia de una fachada verde de doble piel.

Ahora bien, como podemos ver en los gráficos previamente presentados, existe una pequeña variación en la temperatura del aire de la isla de calor con la presencia o no de la fachada verde de doble piel. En el caso del edificio en su estado original, sin fachada verde, las temperatura alcanzan un máximo de 26,63 °C a las 18:00 horas, mientras que la mínima es de 18,03 °C a las 06:00 horas. Ahora bien, en las simulaciones con fachada verde de doble piel cuando se aplica un índice de área foliar de 1,00 m²/m² las temperaturas varían entre 26,50 °C a las 18:00 y 18,04 °C a las 06:00. Para el índice de área foliar de 2,00 m²/m² la temperatura máxima continúa siendo de 26,50 °C y la mínima 18,01 °C, ambas temperaturas a las mismas horas que las anteriores. Finalmente la fachada verde con índice de área foliar de 4,00 m²/m² van desde 18,01 °C a las 06:00 hasta los 26,50 °C a las 18:00 horas. En cuanto a las temperaturas intermedias, al igual que la máxima y la mínima registrada en la simulación, la única variación se ve entre la simulación sin fachada verde y las con fachada verde, ya que estas últimas dieron todas las mismas oscilaciones de temperaturas.

Otro punto importante de esta investigación, como bien se dice en la tercera pregunta, es el efecto en cuanto a consumo energético que causan estas temperaturas en el interior de la vivienda. Para medir el consumo energético del aire acondicionado es necesario conocer la capacidad que este va a tener, la cual es medida en unidades térmicas británicas (BTU) o en Joules (J), 1 BTU equivale aproximadamente a 1055 Joules, también para poder conocer el consumo energético es necesario saber que 1 kilowatt hora (kWh) equivale a 3412,14 BTU. La capacidad de un aire acondicionado se puede calcular en base a diversos factores “la orientación de la cantidad de ventanas, la cantidad de personas en el lugar, material de construcción, disposición del espacio acondicionado y el uso de los equipos que produzcan calor en un área determinada.” (Quispe y Arturo, 2020). Debido a todas las variables al interior de la vivienda que se requieren para obtener un valor exacto de la capacidad de un aire acondicionado, para el caso de este estudio se realizará un estimado en base a una única vivienda pensando que cada departamento del edificio a seleccionar cuenta con un aire acondicionado en la sala de estar utilizado de manera eficiente, por lo tanto se aproxima un aire acondicionado de 12.000 BTU que cubre 15 m² aproximadamente y mantiene una temperatura interior de 24 °C.

Por lo tanto, ya que 1 kWh es igual a 3412,14 BTU, por cada vivienda con un aire acondicionado de capacidad 12.000 BTU se utilizaría un consumo energético aproximado de 3,51 kWh, es decir, por una hora que el aire acondicionado esté en funcionamiento se consumen 3,51 kilowatt, todo esto en base a la situación actual del edificio, es decir, sin fachada verde de doble piel. En el caso de que el edificio contara con una fachada verde de doble piel con las condiciones establecidas para esta investigación -*Hedera helix* como especie vegetal y sustrato de arcilla y turba- el consumo energético seguiría siendo el mismo ya que, como se presenta en los gráficos, las temperaturas a contrarrestar no varían en gran medida.

DISCUSIÓN

El objetivo de esta investigación era evaluar la capacidad de regulación térmica de fachadas verdes de doble piel en edificios que se encontraran insertos en una isla de calor. En base a los datos obtenidos de las simulaciones llevadas a cabo, se estima que estos no son suficientes para validar o refutar la hipótesis, esto debido a que las temperaturas del aire si bien disminuyeron no fue de una manera relevante como para disminuir el uso de sistemas de enfriamiento activos dentro de las viviendas, traduciéndose únicamente en unas pocas décimas. Uno de los factores que limitó los resultados de la investigación fue el tipo de vegetación utilizada, la cual fue seleccionada debido a sus características y disponibilidad en la base de datos dentro del software utilizado. Para el caso de estudios futuros que traten los mismos temas, se sugiere utilizar diversidad tanto de especies vegetales como de combinaciones de sustratos, igualmente se plantea variar más el índice de área foliar, ya que como bien se explicó con anterioridad mientras mayor sea la concentración y densidad de vegetación menos radiación se refleja, es decir, menos albedo.

En relación a esto, se sugiere que otro factor que puede alterar la acción de la fachada verde de doble piel sobre la temperatura del aire en una isla de calor es la cantidad de vegetación circundante, ya que si esta es reducida la vegetación de la fachada verde puede no ser capaz de contrarrestar los efectos de la isla de calor por si sola.

En el trabajo de Berardi et al. (2020) se obtienen resultados que confirman el comportamiento positivo de la vegetación en cuanto a la regulación térmica del entorno urbano realizando simulaciones en el software Envi-MET, donde se detalla que el resultado de las simulaciones llevadas a cabo demostraron que el aumento del follaje de los árboles ayudaría a reducir la temperatura del aire entre 0,5 y 1,4 °C.

De igual manera para el caso de la reducción del consumo energético al interior de las viviendas insertas en islas de calor Pérez et al. (2022) demostraron que las fachadas verdes de doble piel ayudaron a reducir en 54% el consumo energético diario de una edificación en verano, no obstante, este estudio fue realizado bajo un clima con veranos secos y calientes, distinto al de Porto que es seco y agradable.

A pesar de no haber validado o refutado la hipótesis planteada, este estudio sigue significando una contribución ya que al igual que como mencionan Khan et al. (2022) en su propia investigación, actualmente hay pocos estudios sobre el impacto de la infraestructura verde realizados en ciudades con climas costeros templados.

VI. CONCLUSIONES

Las islas de calor urbano son algo que afecta a la mayoría de las ciudades, por lo que es necesario seguir buscando soluciones que se condigan con las condiciones medioambientales, climáticas, topográficas, sociales, económicas, etc., de cada una de estas ciudad.

En esta investigación se utilizaron simulaciones para poner a prueba los efectos de regulación térmica de las fachadas verdes de doble piel sobre los efectos de las islas de calor en el entorno urbano y al interior de un edificio residencial para contribuir a la reducción de consumo energético de los aires acondicionados del mismo. Se realizó una comparación de los resultados entregados por las simulaciones a través de los cuales se concluyó que si bien las fachadas verde de doble piel generan un efecto positivo en la reducción de la temperatura del aire, esta no llega a ser significativa para la reducción del consumo energético de elementos de enfriamiento activos.

Los resultados encontrados, con apoyo de otros estudios del tema y similares, demuestran que las fachadas verdes de doble piel pueden llegar a producir una regulación térmica de la temperatura del aire en una isla de calor en un clima templado marítimo y en consecuencia ayudar a reducir el consumo energético de las viviendas que se encuentren bajo los efectos de estas islas de calor urbanas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsaad, H., Hartmann, M., Hilbel, R., Voelker, C. (2022). The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Building and Environment*, 216, art. no. 109021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109021>
- ArchDaily. (2019). ¿Cómo funcionan las fachadas de doble piel?. [Figura 1]. Recuperado el 31 de Octubre de 2022 de <https://www.archdaily.cl/cl/922899/como-funcionan-las-fachadas-ventiladas>
- Arquitectura & Energía. Portal de eficiencia energética y sostenibilidad en arquitectura y edificación. (2015). Isla de calor urbana. [Figura 2]. Recuperado el 21 de Noviembre de 2022 de <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/isla-de-calor-urbana/>
- Berardi, U., Jandaghian, Z., Graham, J. (2020). Effects of greenery enhancements for the resilience to heat waves: A comparison of analysis performed through mesoscale (WRF) and microscale (Envi-met) modeling. *Science of the Total Environment*, 747, art. no. 141300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141300>
- Cheela, V.R.S., John, M., Biswas, W., Sarker, P. (2021). Combating Urban Heat Island Effect - A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. *Buildings*, 11(3), 93. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>
- Feng, J., Gao, K., Garshasbi, S., Karlessi, T., Pyrgou, A., Ranzi, G., Santamouris, M., Synnefa, A., Ulpiani, G. (2022). Urban Heat Island and Advanced Mitigation Technologies. *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)*, 3, 742-767. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00086-8>
- Groat, L., Wang, D. (2013). *Architectural Research Methods*. John Wiley & Sons
- Instituto Nacional de Estatística (s.f.) População residente (N.º) por Local de residência, Sexo e Grupo etário; Decenal - INE, Recenseamento da população e habitação - Censos 202. Recuperado el 14 de Septiembre de 2022 de https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_main
- Khan, A., Papazoglou, E. G., Cartalis, C., Philippopoulous, K., Vasilakapoulou, K., Santamouris, M. (2022). On the mitigation potential and urban climate impact of increased green infrastructures in a coastal mediterranean city. *Building and Environment*, 221, art. no. 109264. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109264>
- Liberalessa, T., Mutevuie, R., Oliveira, C., Matos, C., Manso, M. (2020). Users' Perceptions of Green Roofs and Green Walls: An Analysis of Youth Hostels in Lisbon, Portugal. *Sustainability*, 12(23), art. no. 10136. <https://doi.org/10.3390/su122310136>

Lopes, H., Remoaldo, P. C., Ribeiro, V., Martin-Vide, J. (2022). Análise do ambiente térmico urbano e áreas potencialmente expostas ao calor extremo no município do Porto (Portugal). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 31(2), 281-302. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.91309>

Lopez-Cabeza, V., Alzate-Gaviria, S., Diz-Mellado, E., Rivera-Gomez, C., Galan-Marin, C. (2022). Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions. *Sustainable cities and Society*, 81, art. no.103872. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103872>

Mapas Topográficos do Mundo (s.f). Mapas topográficos Portugal. Recuperado el 27 de Septiembre de 2022 de <https://pt-pt.topographic-map.com/place-w57/Portugal/>

Monteiro, A., Amorim, M., Matos, F. (9 a 11 de noviembre de 2017). As temperaturas de superfície no Porto: análise dos contextos bioclimáticos nos bairros sociais. XI Congresso Da Geografia Portuguesa, Facultad de Letras Universidade do Porto. Recuperado de: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/111474/2/241029.pdf>

Monteiro, A., Madureira, H. (2009). The shape and magnitude of Porto's heat island. 45th ISOCARP Congress 2009. Recuperado de: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/21397/2/72003.pdf>

Monteiro, A., Velho, S., Góis, J. (2012). A importância da fragmentação das paisagens urbanas na Grande Área Metropolitana do Porto para a modelização das ilhas de calor urbano – uma abordagem metodológica. *Revista da Faculdade de Letras – Geografia – Universidade do Porto*, 1(3), 123-159. Recuperado de: <https://ojs.letras.up.pt/index.php/geografia/article/view/15>

Oke, T.R. (1988). *Boundary Layer Climates*. Routledge.

Palme, M., Lobatob, A. & Carrasco, C. (2016). Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island effect in cities of latin-american pacific coast. *Procedia Engineering* 169, pp. 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.024>

Pérez, G., Coma, J., Chàfer, M., Cabeza, L. (2022). Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade. *Building and Environment*, 207, art. no. 108497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108497>

Pinheiro, A. P. (2020). Architectural Rehabilitation and Sustainability of Green Buildings in Historic Preservation. *HighTech and Innovation Journal*, 1(4), 172-178. <http://dx.doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-04-04>

Santamouris, M. (2020). *Energy and Climate in the Urban Build Environment*. Routledge.

Plano Director Municipal Regulamento 2020, Discussão Pública. Setembro 2020. Recuperado de: <https://geopdm.cm-porto.pt/dendrograma/pdm2021>

Quespe, P., Arturo, W. (2020). Aire acondicionado en edificaciones. [Examen Título Profesional, Universidad Nacional de Educación]. Repositorio Institucional. Recuperado de: <http://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/7357>

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>

Santos, F. (2017). *Uso De Vegetação na Envolvente Vertical dos Edifícios*. [Disertación de Título, Universidade do Porto]. Repositorio abierto UP. Recuperado de: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/107193/2/211423.pdf>

Seguel, V. (2018). Metodología de Evaluación para la Implementación de Fachada Verde Doble Piel en Edificios. [Memoria de Título, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. Recuperado de: <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/47060>

Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S.A., Khanmohammadi, M.A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181, art. no.106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>

Shen, L., Xiao, F., Chen, H., Wang, S. (2013). Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system. *Energy and Buildings*, 59, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.041>

Stazi, F., Mastrucci, A., di Perna, C. (2012). The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study. *Energy and Building*, 47, 217-229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.039>

Susca, T., Zanghirella, F., Colasuonno, L., Del Fatto, V. (2022). Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: A climate-informed systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy*, 159, art. no. 112100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112100>

Weather Spark (s.f.). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Oporto Portugal. Recuperado el 25 de Octubre de 2022 de <https://es.weatherspark.com/y/32397/Clima-promedio-en-Oporto-Portugal-durante-todo-el-año>

Wikipedia. La enciclopedia libre (s.f.). Distrito de Porto. [Figura 3]. Recuperado el 21 de Noviembre de 2022 de https://es.wikipedia.org/wiki/Distrito_de_Oporto

Yang, F., Yuan, F., Qian, F., Zhuang, Z., Yao, J. (2018). Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai. *Sustainable cities and Society*, 39, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.049>

