



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Revisión Sistemática: Potencial de Enfriamiento de los Techos
Verdes en Zonas con Climas Secos

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA AMBIENTAL**

AUTOR:

Balvin Zúñiga, Ysabel Nickouly (ORCID: 0000-0001-5977-4252)

ASESOR:

Mg. Ugarte Alván, Carlos Alfredo (ORCID: 0000-0001-6017-1192)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

Con mucho amor a mis padres, a quienes les debo todo lo que soy y he logrado. Por ustedes, que han luchado tanto para darme lo mejor, ahora es mi turno de luchar.

Los amo.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para mis objetivos, y estar presente cuando las ganas de renunciar me invadían.

A mi madre, que con su fuerza, carácter y gran amor me ha enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos.

A mi padre, que siempre ha estado presente en mi vida apoyando mis decisiones y orientándome por el mejor camino.

A mis maestros y todas aquellas personas que me apoyaron en la realización de este proyecto.

Y, por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí. Me agradezco por creer en mí, por trabajar duro para cumplir lo que me propongo y por nunca renunciar. Quiero agradecerme porque sé que lo merezco, nadie más que yo misma se cuánto me ha costado lograrlo.

Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Índice de gráficos	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	14
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización.....	14
3.3. Escenario de estudio	14
3.4. Participantes	15
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	15
3.6. Procedimientos	15
3.7. Rigor científico	18
3.8. Método de análisis de datos	18
3.9. Aspectos éticos.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
V. CONCLUSIONES	34
VI. RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS.....	36
ANEXOS	44

Índice de tablas

Tabla 1. Características de los techos verdes según su clasificación.....	5
Tabla 2. Cuadro de antecedentes más relevantes.....	12
Tabla 3. Clasificación climática de estudios experimentales y de simulación	21
Tabla 4. Características de los climas secos – Clima B.....	21
Tabla 5. Especies vegetales analizadas para zonas climáticas secas	26
Tabla 6. Estudios que evalúan las características de los sustratos de un techo verde	30

Índice de figuras

Figura 1. Componentes de un techo verde y su similitud con el suelo natural	4
Figura 2. Proceso de evapotranspiración	7
Figura 3. Mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger para las zonas secas	10
Figura 4. Proceso de identificación, elegibilidad e inclusión de artículos	17
Figura 5. Especies vegetales con mejor desempeño térmico en un sistema de techo verde para zonas secas	29

Índice de gráficos

Gráfico 1. Parámetros que tienen influencia sobre el efecto de enfriamiento de los Techos verdes.....	20
--	----

Resumen

El crecimiento de la población urbana ha ocasionado el reemplazo de áreas con vegetación por superficies edificadas provocando el aumento del efecto de isla de calor urbana. Trayendo consigo reducciones del confort térmico, riesgos en la salud humana y mayor consumo energético. A nivel mundial, estos efectos dañinos se van intensificando con el pasar de los años, pero son especialmente perjudiciales en zonas climáticas secas. Esta revisión hace un análisis de estudios experimentales y matemáticos realizados desde el 2015 al 2022 sobre la influencia que tienen las características climáticas de las zonas secas en el efecto de enfriamiento de los techos verdes. Los resultados revelaron la carencia existente de investigaciones experimentales realizadas en condiciones climáticas secas. Se concluyó que la disponibilidad de agua en la capa sustrato es crucial para garantizar el enfriamiento por evapotranspiración, por lo que complementar con sistemas de riego debe ser considerado incluso en sistemas de techos verdes extensivos. El uso de sustratos con mayor capacidad de retención de agua y aislamiento térmico adecuado en conjunto con especies vegetales con alta y rápida cobertura, gran capacidad de resiembra, resistencia a altas temperaturas y estrés hídrico garantizarán la mejora del efecto de enfriamiento en estos sistemas ecológicos.

Palabras clave: Techo verde, potencial de enfriamiento, clima seco, reducción de temperatura, zona árida.

Abstract

Urban population growth has led to the replacement of vegetated areas with built-up areas, causing an increase in the urban heat island effect. This brings with it reductions in thermal comfort, risks to human health and increased energy consumption. Globally, these harmful effects are intensifying over the years, but they are especially detrimental in dry climatic zones. This review analyzes experimental and mathematical studies conducted from 2015 to 2022 on the influence of climatic characteristics of dry areas on the cooling effect of green roofs. The results revealed the existing lack of experimental research conducted under dry climatic conditions. It was concluded that the availability of water in the substrate layer is crucial to ensure cooling by evapotranspiration, so supplementing with irrigation systems should be considered even in extensive green roof systems. The use of substrates with higher water retention capacity and adequate thermal insulation together with plant species with high and fast coverage, high reseeding capacity, resistance to high temperatures and water stress will guarantee the improvement of the cooling effect in these ecological systems.

Keywords: green roof, cooling potential, dry climate, temperature reduction, arid zone.

I. INTRODUCCIÓN

La población urbana mundial ha crecido rápidamente desde el año 1950 habiendo aumentado, en el 2018, de 751 millones a 4.2 mil millones de personas (55% de la población mundial); United Nations (2019) prevé en sus proyecciones que para el año 2030 el mundo contará con 43 megaciudades ubicadas en su gran mayoría en regiones en vías de desarrollo, así como para el año 2050 la población urbana aumentará 2.500 millones de personas, teniendo el 68% de la población mundial viviendo en áreas urbanas.

Este crecimiento urbano acelerado en conjunto con la mala gestión urbanística que se viene manejando han resultado en impactos adversos ambientales (United Nations, 2019; Jamei et al., 2021). Lo que caracteriza a las ciudades urbanizadas actuales es la sustitución de áreas con vegetación por superficies impermeables de construcción modernos como el hormigón, el vidrio, la piedra, materiales bituminosos y el acero (Fleck et al., 2022), los cuales ocasionan una diferencia de temperatura entre el espacio circundante no urbano y el espacio urbano, es decir el denominado efecto de isla de calor urbano (ICU). Este fenómeno de ICU trae consigo un incremento considerable de la temperatura del aire debido a la reducida capacidad de regulación térmica que ofrecen las superficies edificadas (Jamei et al., 2021), dicho con otras palabras, la alteración de propiedades físicas y biofísicas termorreguladoras naturales como la reducción de la reflectividad de la radiación (albedo), disminución de la evapotranspiración de las plantas, aumento de la emisividad de radiación en las superficies, reducción de la velocidad del viento por presencia de edificaciones y el incremento de la contaminación del aire (Vinayak et al., 2022).

Este aumento de temperatura del aire de las zonas urbanas que provoca el ICU trae consigo problemas como la reducción del confort térmico de la población, riesgos en la salud humana, aumento de los peligros de la contaminación del aire y un mayor consumo energético (Soudoudi et al., 2018). La inversión energética que realizan los edificios de las ciudades representa más del 30% del consumo energético mundial, y corresponde principalmente al uso de sistemas de refrigeración, para mantener el confort térmico en las ciudades afectadas por el efecto de ICU (Andric, Kamal y Al-Ghamdi, 2020).

Las ICU sumado al cambio climático actual, ocasionan estrés en los ecosistemas urbanos y estas alteraciones son más graves en climas cálidos y secos, puesto que las temperaturas del aire durante el día son más altas y la exposición a la luz solar se da con mayor intensidad (Hami et al., 2019).

Jamei et al. (2021) indica que entre los métodos que han demostrado mayor efectividad para mitigar los efectos de las ICU se encuentra la implementación de infraestructura verde en las áreas urbanas, como lo son los techos verdes (TV). La incorporación de TV proporciona beneficios como el aumento de la biodiversidad, reducción de la contaminación del aire, reducción del flujo de aguas pluviales, ahorro energético en los edificios donde se implementa, la atenuación del ruido y la mejora del confort térmico por la disminución del efecto de ICU (Berardi, 2016; Mutani y Todeschi, 2020).

A pesar de que los TV representan una solución ecológica ante los efectos de las ICU, su potencial de enfriamiento varía dependiendo de las características climáticas de la zona en la que se implementa. Parámetros climáticos como la velocidad del viento, la humedad relativa y el nivel de radiación solar influyen en la evapotranspiración de las plantas y, por ende, en el efecto refrescante que poseen los TV (Alcazar, Olivieri y Neila, 2016). Las investigaciones prácticas y matemáticas realizadas para evaluar el potencial de enfriamiento de los TV se encuentran en su mayoría enfocadas en zonas con climas cálidos, húmedos y templados pero son escasas en zonas cuyos climas son secos (Jamei et al., 2021).

Bajo este contexto, la presente revisión plantea como problema general la siguiente interrogante: ¿De qué manera influyen las características climáticas secas en el potencial de enfriamiento de los TV?, así mismo, plantea los siguientes problemas específicos: ¿Cuáles son las características que definen una zona con clima seco?, ¿Qué especies poseen un mejor rendimiento vegetal en las zonas con climas secos? y ¿Cuáles son las características que deben poseer las capas que componen los TV en zonas con climas secos?.

Ahora bien, esta investigación se justifica bajo la perspectiva teórica, ya que pretende contribuir a la comunidad científica y futuros estudios prácticos nacionales e internacionales que busquen mitigar los efectos de ICU en zonas con climas secos por medio de los TV, pudiendo ser una fuente de consulta y apoyo en la lucha

contra el cambio climático. De esta manera se podrá conocer en mayor medida de qué forma influyen los aspectos climáticos secos en el proceso de enfriamiento de los TV y las características que este debe poseer para lograr un buen desempeño.

El objetivo general de la investigación es describir de qué manera influyen las características climáticas secas en el potencial de enfriamiento de los TV y, en base a esto, se formulan los siguientes objetivos específicos: definir lo que caracteriza a las zonas con climas secos; identificar las especies que poseen un mejor rendimiento vegetal bajo condiciones climáticas secas; y definir las características que deben poseer los componentes de los TV en zonas climáticas secas.

II. MARCO TEÓRICO

Los TV son sistemas artificiales diseñados para emular los ecosistemas del suelo natural, estos están compuestos de diversas capas artificiales (componentes multicapa) con las características adecuadas para permitir la adición y supervivencia de distintas especies de plantas. (Grullón – Penkova, Zimmerman y González, 2020).

Los componentes básicos de un TV constan de (Figura 1): la capa de vegetación (especies de plantas, árboles), sustrato (sostiene la vegetación y suministra nutrientes), capa filtro, capa drenaje (equilibrio entre el exceso y escasez del agua), barrera anti - raíces y membrana impermeable (Naranjo et al., 2020).

Los TV se clasifican principalmente en tres tipos (Naranjo et al., 2020; Banirazi Motlagh, Pons y Hosseini, 2021):

- a. Extensivo. Se implementa en lugares en donde el acceso peatonal es difícil.
- b. Intensivo. Los revestimientos pueden permitir el paso de peatones.
- c. Semi intensivo. Permite acceso parcial de peatones.

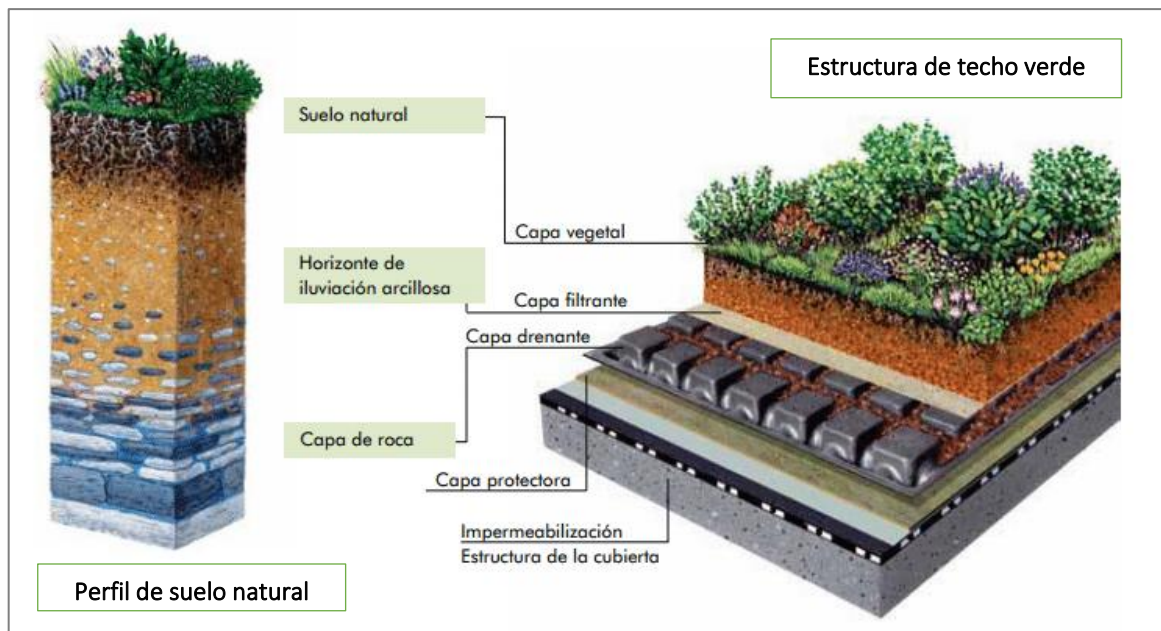


Figura 1. Componentes de un techo verde y su similitud con el suelo natural

Fuente: (Naranjo et al., 2020)

Esta clasificación tiene un rol fundamental para determinar el espesor de la capa de soporte para la vegetación (sustrato) al igual que la especie que irá en ella. Como se puede observar en la Tabla 1, los techos verdes extensivos (TVE), al poseer una capa de sustrato poco profunda y liviana, pueden ser instalados en remodelaciones de edificios sin necesidad de un soporte estructural (City of Toronto, 2010; Varela Montaña y Arango Cruz, 2013; Catalano et al., 2018), sin embargo, los TVE solo pueden usar una gama limitada de plantas. Los TVE requieren una mínima cantidad de riego y tienen un costo de mantenimiento bajo. Por otro lado, los techos verdes intensivos (TVI) pueden abarcar una variedad de plantas mucho mayor e incluso la adición de especies arbóreas ya que cuenta con un sustrato mucho más grueso que permite una alta capacidad de retención de agua. Es importante considerar que los TVI requieren un nivel alto de mantenimiento (riego, deshierbe y fertilización) y, a su vez, representan un aumento en las cargas del techo, por lo que requieren soporte estructural adicional. Los techos verdes semi intensivos (TVSI), se considera un sistema intermedio en términos de espesor de sustrato y variedad de plantas superior al de un TVE. (Banirazi Motlagh, Pons y Hosseini, 2021).

Tabla 1. Características de los techos verdes según su clasificación

Tipo de techo verde	Espesor de sustrato	Peso	Uso
Extensivo	5 a 15 cm	60 a 140 kg/m ²	Para plantas con necesidades bajas de humedad
Intensivo	Mayor a 15 cm	250 a 400 kg/m ²	Gran variedad de plantas y especies de árboles
Semi intensivo	10 a 30 cm	60 a 140 kg/m ²	Mediana variedad de plantas.

Fuente: (Naranjo et al., 2020)

En lo que respecta al desempeño térmico de los techos verdes (DTTV), la literatura señala que se han desarrollado distintos modelos matemáticos y teóricos con el propósito de reconocer los principales parámetros que influyen sobre este. El estudio experimental desarrollado por Zheng et al. (2022) indica que los factores principales que afectan en el DTTV en condiciones de sequía son: las plantas (tolerancia a escasos recursos y densidad de la especie), sustrato (profundidad -

espesor y baja conductividad térmica) y la disponibilidad de agua en el medio de cultivo.

Es importante mencionar que se han definido 3 parámetros principales que tienen efecto sobre el rendimiento térmico de los TV:

- *El aislamiento térmico*, este parámetro es determinado por el espesor del sustrato o el medio de crecimiento. Permpituck y Namprakai (2012), en su estudio de modelado experimental investigaron el efecto refrescante de diversos espesores de suelo, en donde se muestran reducciones significativas de la transferencia de calor de 59% (984 W/m²) y 96% (2337 W/m²) cuando la profundidad de sustrato es de 10 y 20 cm respectivamente, en comparación con un techo común. Otro estudio realizado por Zhang et al. (2021), evaluó la relación entre la profundidad del sustrato y la supervivencia de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico, indicando que el sustrato debe poseer una profundidad mínima de 15 cm para garantizar el crecimiento de un mayor número de especies que permiten una mayor cobertura vegetal y por ende, un aumento de su potencial de enfriamiento. Esto se explica porque el área cubierta por vegetación al interceptar los rayos ultravioletas refleja el 27%, las plantas y el sustrato absorben el 60% y el 13% restante se transmite al sustrato (Barriuso y Urbano, 2021).
- *La evapotranspiración*, es otro parámetro importante que está relacionado con el efecto de enfriamiento, este proceso humedece el aire del ambiente externo, reduce la temperatura de la superficie del techo y mitiga el fenómeno de isla de calor urbano (Cascone et al., 2019). En los últimos años, la comunidad de investigadores de TV ha mostrado un interés creciente por el proceso de evapotranspiración, debido al impacto que posee sobre la transferencia de calor y masa. La combinación del agua transpirada por las plantas durante su crecimiento o retenida en el tejido vegetal (transpiración) sumado a la humedad evaporada de la superficie del suelo y vegetación (evaporación), es lo que conforman este fenómeno (Cascone et al., 2019). El calor se disipa por evapotranspiración cuando la humedad del aire aumenta por la liberación de agua a través de las hojas de las plantas existentes (Jamei et al., 2021).

En un TV, el efecto de enfriamiento depende del contenido de agua del sustrato (humedad), este determina la disponibilidad de agua para llevar a cabo el proceso de evapotranspiración. El contenido volumétrico de agua en el suelo tiene relación con el ciclo hidrológico del techo verde. Esto se debe a que el techo verde obtiene agua de la lluvia y el riego, y la pierde a través de la evapotranspiración, el drenaje y la escorrentía superficial (Cascone et al., 2019).

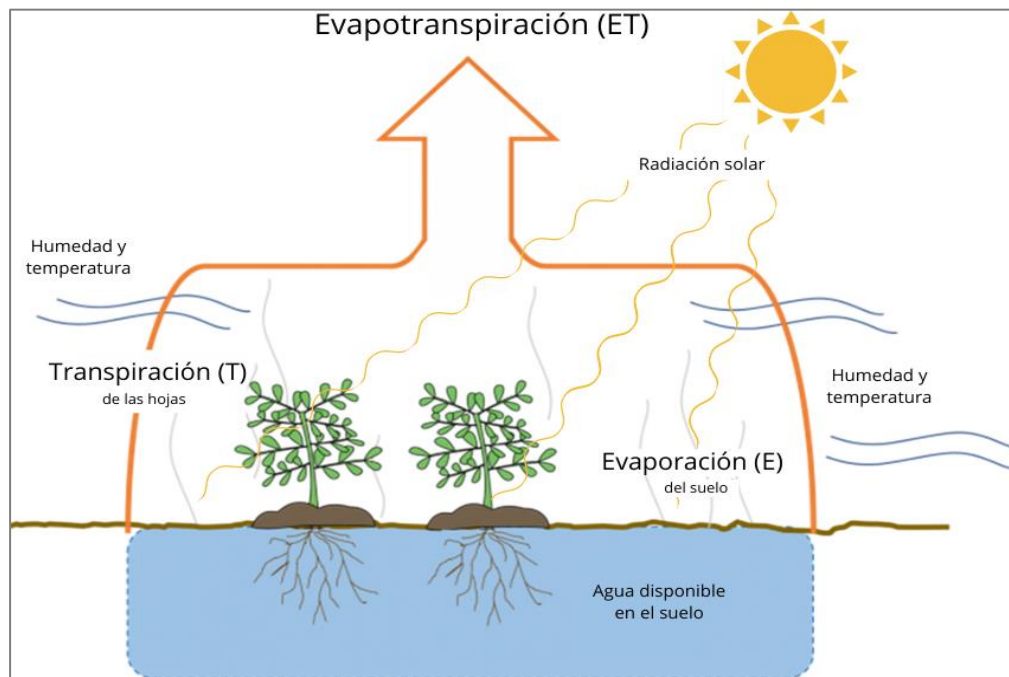


Figura 2. Proceso de evapotranspiración
Fuente: Adaptado de Cascone et al. (2019)

Los autores Tan et al. (2017) encontraron que, durante su investigación en suelo de jardín común y sustratos constituidos principalmente de perlita, el contenido volumétrico de agua exhibe una conexión positiva en las tasas de evapotranspiración. De hecho, al disminuir el contenido volumétrico de agua en el suelo se restringió la tasa de evapotranspiración de la planta. Esto sucede debido a que las plantas dejan de transpirar para conservar el agua ante situaciones de escasez.

Bevilacqua et al. (2015) en su estudio de comportamiento térmico observaron que la mejora del efecto de enfriamiento al incrementar la cobertura vegetal del 10% al 80% fue despreciable debido a que la capa de sustrato en donde se

encontraba establecida carecía de humedad disminuyendo el proceso de evapotranspiración y, a su vez, imposibilitando la activación del efecto de enfriamiento que posee.

Se han realizado estudios experimentales para examinar los rangos de flujo de calor entre los TV con los techos verdes desnudos comunes. El estudio de comparación experimental realizado por Zheng et al. (2022) mostró que en el espacio interior del edificio la transferencia de calor se redujo en un 81% para el TV en estado normal, 69% para un techo con sustrato seco y 40% para un techo con plantas marchitas y sustrato seco en comparación con un techo desnudo, demostrando así la importancia de un medio de cultivo húmedo para el rendimiento vegetal y su estrecha relación con el enfriamiento por evapotranspiración de las plantas.

Agregando a lo anterior, el tipo de techo verde influye en gran medida en la pérdida de calor por evaporación. Factores secundarios como: la radiación solar, la velocidad del viento, humedad de los sustratos, grado de sombra del dosel (área foliar y densidad) gobiernan el enfriamiento por evapotranspiración (Cascone et al., 2019). Silva, Gomes y Silva, (2016) evidencian en su comparación entre techos extensivos, semi intensivos e intensivos que la evapotranspiración es mayor en los techos intensivos puesto que poseen mayor profundidad en el sustrato y especies de plantas más altas.

- El último parámetro es el efecto sombreado, el cual se mide mediante el *índice de área foliar (IAF)*. Este efecto protege a la superficie del suelo del calentamiento por radiación solar mediante la creación de sombras y promueve la evapotranspiración para así contribuir al efecto de enfriamiento.

La investigación realizada por Zhang, Zhan y Lan (2018), en donde determinó los tipos de vegetación y diseño desde una perspectiva espacial en un área residencial para lograr un ambiente confortable durante las épocas de verano e invierno, observó la distribución de árboles redujo en 2,13°C en el confort térmico promedio residencial a nivel de peatones. Los investigadores recalcan que las especies con copas más anchas y un IAF más grande deben priorizarse para un aumento del confort térmico al aire libre.

En lo que atañe al calentamiento urbano, es bien sabido que está presente en todas las ciudades, independientemente del tamaño o tipo de clima existente, y que sus impactos pueden ser significativos en términos de salud humana, degradación ambiental y consumo de energía. La intensidad de una ICU puede variar debido a las condiciones espaciales que tenga como: la trama urbana, los usos del suelo, la emisividad de los materiales, la impermeabilidad, la baja aerodinámica, la altura de los edificios o la densidad de población, etc.

Teniendo en cuenta que la mitad de la población mundial vive rodeada de infraestructuras grises y que el porcentaje seguirá aumentando en las próximas décadas, es fundamental identificar factores espacio-temporales que contribuyan a mitigar el efecto de la ICU (Gonzalez-Trevizo et al., 2021). Muchas investigaciones han realizado simulaciones y experimentos demostrando las bondades que prestan los sistemas de TV como una técnica de mitigación del ICU sostenible, principalmente por su capacidad pasiva de limitar la ganancia de calor en épocas de verano (Fachinello Krebs y Johansson, 2021). Pongamos por caso la investigación realizada por Berardi (2016), que demostró la reducción de un 2.9% de la demanda energética total de un edificio en temporadas de calefacción con la implementación de un techo verde. Otra investigación realizada por Barmparetos et al.(2018) comparó los resultados entre un techo con cubierta verde y un techo convencional en una escuela primaria de Atenas, obteniendo una reducción de la temperatura del aire de 2.8°C para el aula bajo el techo verde respecto al aula bajo el techo de hormigón en la época de verano.

Finalmente, haciendo mención del actual desafío mundial que se vive por la gestión sostenible del agua y, sumado a los cambios climáticos bruscos ocasionados por la contaminación ambiental provoca que la disponibilidad de recursos hídricos destinados a las áreas verdes urbanas se vean limitados drásticamente (Azeñas et al., 2018). Este escenario es aún más crítico para zonas del planeta cuyos climas son áridos, semi áridos y mediterráneos.

En este contexto, se menciona que el rendimiento de un sistema de techo verde va a depender en gran medida de la disponibilidad de recursos y las condiciones ambientales en donde se encuentren (Grullón – Penkova, Zimmerman y González, 2020), así como el uso de especies de plantas con tolerancia a la sequía, a las

variaciones de temperatura y a la velocidad del viento (Robbiati et al., 2022). La literatura sugiere que un techo verde con esas condiciones climáticas hostiles debe contemplar combinar especies de diferentes niveles de grupos taxonómicos y funcionales para mejorar su resiliencia, el servicio ecosistémico y la sostenibilidad (Tran et al., 2019).

Grullón – Penkova, Zimmerman y González (2020), en su análisis descriptivo sobre especies vegetales aptas para su incorporación en diseños de TV en condiciones climáticas tropicales indican que la combinación de especies nativas y no nativas de la zona como: *Bidens alba* , *Tulbaghia violacea* , *Nephrolepis multiflora*, *Arachis hypogaea* , *Momordica charantia* , *Asclepias curassavica* , *Alopecurus pratensis* , *Paspalum paniculatum* , *Euphorbia graminea* , *Cymbopogon ambiguus* y *Kalanchoes x houghtonii* mostraron buena adaptabilidad al ambiente de TV tropicales. Los autores recomiendan evaluar las especies para el diseño de techo verde a partir de sus capacidades para adaptarse a las condiciones locales donde se quiere implementar.

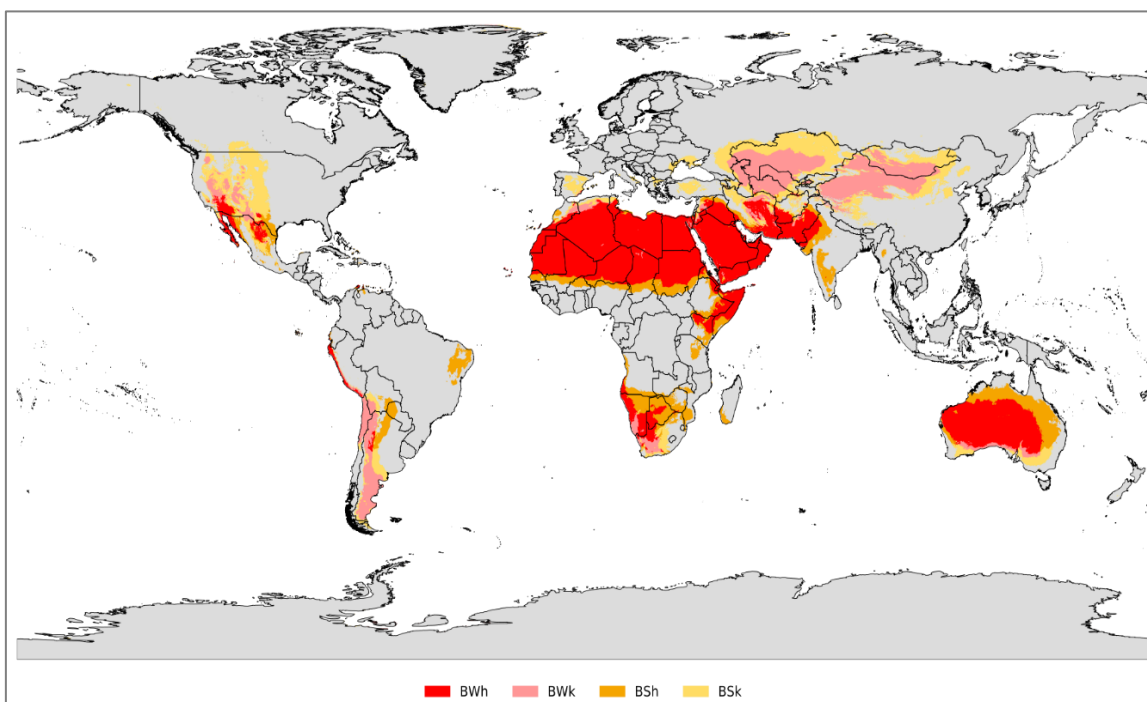


Figura 3. Mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger para las zonas secas
Fuente: (Beck et al., 2018)

Por otro lado, en lo que respecta al clima, se hace frecuente mención de la maximización del potencial de enfriamiento en los techos verdes cuando las

condiciones climáticas son cálidas y secas (Barriuso y Urbano, 2021). Pero, sin embargo, los estudios experimentales y matemáticos realizados para evaluar los efectos de los techos verdes son más frecuentes en zona de clasificación climática del grupo C – templado y más limitados con aquellos realizados en climas del grupo B – secos.

Curiosamente, según lo indicado por Peel, Finlayson y McMahon (2007), a nivel mundial en la clasificación climática Köppen-Geiger, el tipo de clima por superficie terrestre dominante es el grupo B árido con 30,2%, seguido del grupo D frío con 24,6%, el grupo A tropical con 19%, el grupo C templado con 13,4% y el grupo E polar con 12,8% y, la clasificación climática individual más frecuente por área terrestre es BWh (árido cálido) con un 14,2%, seguido de Aw (tropical de sabana) con un 11,5%; ver Figura 3.

Se muestra en la Tabla 2, los antecedentes más relevantes sobre los parámetros que tienen influencia en el potencial de enfriamiento de los TV.

Tabla 2. Cuadro de antecedentes más relevantes

Autor y año	Título	Lugar	Tipo de estudio	Parámetro	Köppen*	Objetivo
(Permpituck y Namprakai, 2012)	The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand	Phitsanulok, Tailandia	Modelado	Aislamiento térmico	(Aw) Sabana	Determinar los efectos de los jardines con césped en la azotea en la energía anual requerida para la refrigeración y el uso eléctrico anual en un modelo experimental e investigar el efecto de diferentes espesores de suelo.
(Zhang et al., 2021)	Is sustainable extensive green roof realizable without irrigation in a temperate monsoonal climate? A case study in Beijing	Beijing, China	Modelado - Experimental	Aislamiento térmico	(Dfa) Continental de verano cálido	Explorar la posibilidad de techos verdes sostenibles en Beijing sin riego y evaluar los efectos de la profundidad del sustrato en el rendimiento de especies de plantas seleccionadas para la condición de estrés.
(Tan et al., 2017)	Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance	Singapur, Malasia	Experimental	Evapotranspiración, humedad	(Af) selva tropical	Evaluar los efectos del sustrato en crecimiento y la capa de retención de agua en el rendimiento térmico de un sistema de techo verde modular.
(Bevilacqua et al., 2015)	Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs	Lleida, España	Experimental	Evapotranspiración, humedad	(Cfa) Clima subtropical húmedo	Analizar la influencia de la cubierta vegetal en el comportamiento térmico de una cubierta verde extensiva de 2000 m ² ubicada en un edificio de oficinas en la ciudad de Lleida.
(Zheng et al., 2022)	An experimental study on the thermal and energy performance of self-sustaining green roofs under severe drought conditions in summer	Chongqing, China	Experimental	Flujo de calor, humedad	(Cfa) Clima subtropical húmedo	Obtener información sobre la evolución temporal del rendimiento térmico de los techos verdes de edificios autosostenibles durante una condición de sequía.

(Silva, Gomes y Silva, 2016)	Green roofs energy performance in Mediterranean climate	Lisboa, Portugal	Modelado	Evapotranspiración, profundidad de sustrato	(Csa) subtropical húmedo	Contribuir a la evaluación del desempeño energético de los edificios de techos verdes en las condiciones climáticas portuguesas.
(Zhang, Zhan y Lan, 2018)	Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters	Wuhan, China	Modelado	índice de área foliar, evapotranspiración, profundidad de suelo	(Cfa) Clima subtropical húmedo	Determinar los tipos de vegetación y el diseño desde una perspectiva espacial en un área residencial necesaria para lograr un ambiente confortable en un ambiente cálido y frío.
(Fachinello Krebs y Johansson, 2021)	Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil– A study coupling outdoor and indoor thermal simulations	Porto Alegre, Brasil	Modelado	Evapotranspiración, capacidad térmica, humedad	(Cfa) subtropical húmedo	Comparar el confort térmico interior para dos tipos diferentes de techos bajo diferentes microclimas en verano e invierno.
(Berardi, 2016)	The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits	Toronto, Canada	Modelado	índice de área foliar, evapotranspiración, profundidad de suelo, temperatura del aire	(Dfb) clima continental húmedo y cálido	Investigar los efectos de la modernización de un techo verde en el microclima y el consumo de energía del edificio principal de la Universidad Ryerson en Toronto
(Barmpareos et al., 2018)	Indoor Air Quality and Thermal Conditions in a Primary School with a Green Roof System	Atenas, Grecia	Experimental	Temperatura del aire, secuestro de carbono	(Csa) subtropical húmedo	Presentar los resultados de una campaña experimental que tuvo lugar en una escuela primaria griega cercana al centro de Atenas con un techo verde instalado
(Robbiati et al., 2022)	Vegetative and thermal performance of an extensive vegetated roof located in the urban heat island of a semiarid region	Córdoba, Argentina	Experimental	Evapotranspiración, flujo de calor, humedad, rendimiento vegetal	(Cwa) subtropical con invierno seco, (Bsh) estepario cálido	Cuantificar la reducción térmica y evaluar el desempeño de tratamientos de microcosmos con vegetación durante 15 meses con diferentes combinaciones de composición de especies y formas de crecimiento.

*Clasificación climática de Köppen – Geiger actualizado (2006)

Fuente: Elaboración propia

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación:

La presente investigación es de tipo básica, que según Tamayo y Tamayo, (2004), se apoya en una base teórica y su objetivo principal es desarrollar teorías a través de principios y generalizaciones. Su propósito es el estudio de un problema destinado al progreso o sencillamente a la búsqueda del conocimiento.

3.1.2. Diseño de investigación:

El diseño de la investigación es de teoría fundamentada emergente, que según lo descrito por Hernández Sampieri, Fernandez Collado y Baptista Lucio (2014), este diseño efectúa la codificación abierta y a partir de ella surgen las categorías, las cuales producen teoría al conectarse entre sí. Es el investigador quien explica las teorías y la relación que existe entre las categorías, así mismo, el investigador debe proporcionar detalles suficientes para permitir que el lector que revise el estudio pueda observar en el reporte de resultados, la inducción de las relaciones entre las categorías y el desarrollo de conceptos.

3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización

Esta revisión sistemática efectuó la categorización apriorística, es decir, fueron constituidas un total de 03 categorías y 07 subcategorías antes del proceso de recopilación de la información (Cabrera, 2005). En el Anexo 1 se presenta la matriz de categorización apriorística de la investigación realizada.

3.3. Escenario de estudio

La presente revisión se encuentra situada en todos los entornos y motivos por los que se ejecutaron las investigaciones consultadas. Motivos basados en estudiar y evaluar las características y aspectos que intervienen en el potencial de enfriamiento de los TV como técnica de mitigación ante el cambio climático. Considerando estudios experimentales y matemáticos (modelados)

en lugares con distintas zonas climáticas, haciendo un énfasis especial en aquellos con climas secos.

3.4. Participantes

Para el desarrollo de esta revisión se recolectó información de las siguientes bases de datos: Science direct, Scopus, Scielo y Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

Así mismo, las revistas electrónicas indexadas consultadas fueron: Atmosphere, Building, Building and Environment, Coating, Ecological Engineering, Energies, Energy and Buildings, Energy Reports, Engenharia Agrícola, Environmental Evidence, Heliyon, Journal of Cleaner Production, Journal of Environmental Management, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Planning Malaysia, Renewable Energy, Revista Ingeniería de Construcción, Revista Ingeniería de Construcción online, Science of the Total Environment, Sustainability, Sustainable Cities and Society, Urban Climate, Urban Forestry & Urban Greening.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Esta revisión utilizó como técnica de recolección de datos el análisis documental, con el fin de representar y detallar los diferentes artículos científicos sistemáticamente para así simplificar la información recuperada.

El instrumento utilizado en la investigación es la ficha de análisis de datos (Anexo 2), el cual facilitó el proceso de extracción de información relevante para el estudio.

3.6. Procedimientos

El procedimiento realizado para esta revisión consistió en la búsqueda de palabras clave como: "green roof", "urban heat island effect", "green cover", "evaporative cooling", "thermal comfort", "surface temperatura", "plant cover", "thermal behaviour", "passive cooling", "extreme weather", "energy saving", "green roof benefits", "green roof definition", "thermal performance", "urban vegetation", "green and cool roofs", "green facades", "heat mitigation", "cooling

potential”, “climate change adaptation”, “mitigation strategies”, “passive system”, entre otros; y se continuo con la aplicación de los siguientes criterios:

Criterios de inclusión:

- Se consideró que el artículo se encuentre en el idioma inglés de preferencia, sin embargo, también se incluyó algunos en español.
- Contar con acceso abierto al documento
- Fueron seleccionados los artículos entre los años 2015 al 2022.
- Se consideró artículos referidos al tema “potencial de enfriamiento de los techos verdes”.

Criterios de exclusión:

- No se considerados los documentos duplicados
- Se excluyeron aquellos que diferían en el tema.
- Solo se consideraron los artículos cuya revista científica cumplía con la clasificación de cuartil Q1, Q2, Q3 o Q4. Para esto se utilizó Scimago Journal & Country Rank.
- No se consideró aquellos documentos cuyo resumen no fuera relevante.

Se incluyeron revisiones sistemáticas para el soporte en cuanto a los conceptos relacionados al tema. Así mismo, como la investigación explora el potencial de enfriamiento de TV se incluyeron artículos relacionados con los parámetros que hagan referencia a su desempeño térmico y aspectos que puedan influir en este. De la misma manera, se hizo especial énfasis en aquellos estudios que se enfocaron en lugares con zonas climáticas secas, sin embargo, esto no fue un criterio de exclusión.

En la Figura 4 se muestra el procedimiento de identificación, elegibilidad e inclusión de los artículos científicos que se realizó para la presente revisión sistemática.

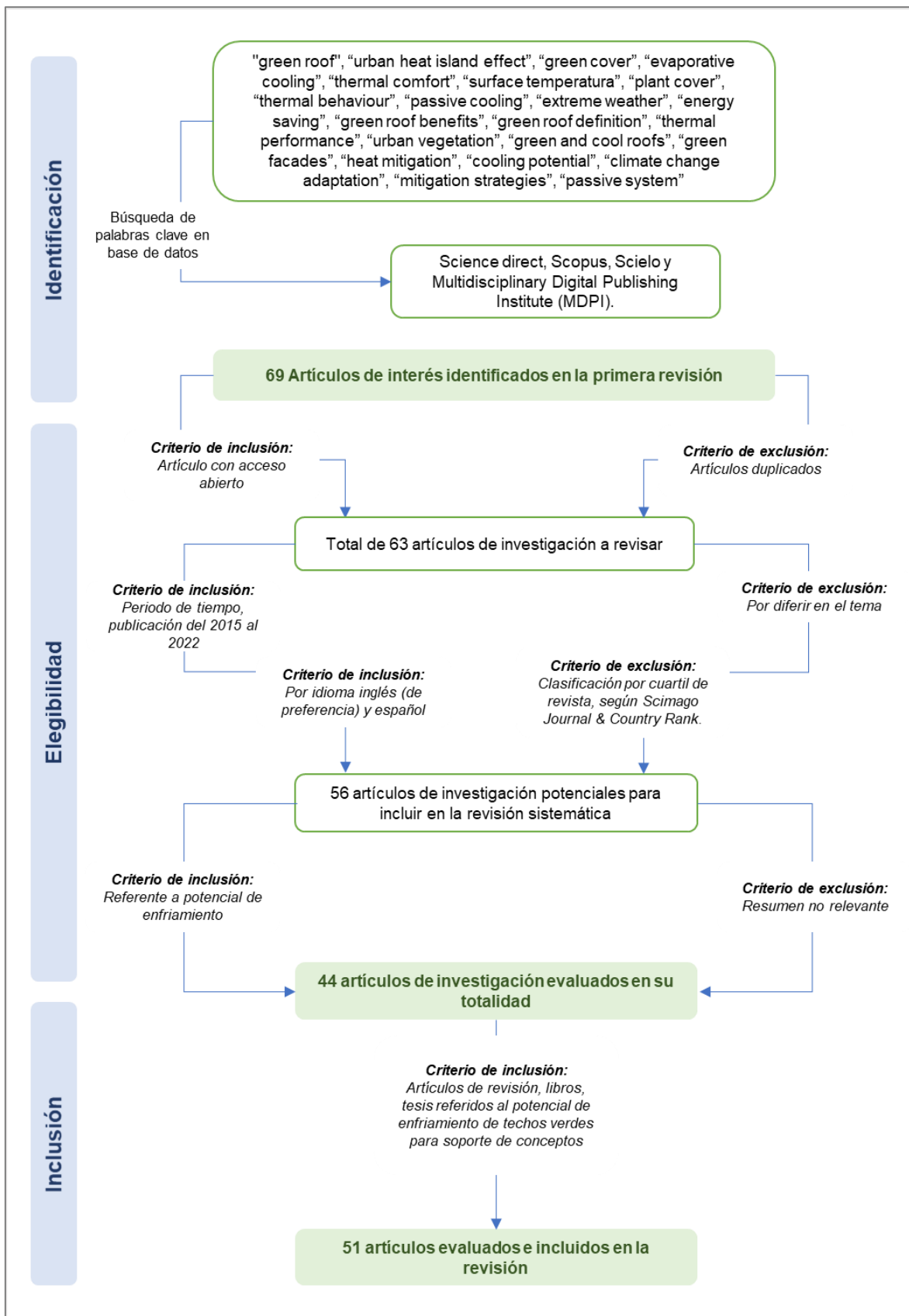


Figura 4. Proceso de identificación, elegibilidad e inclusión de artículos
Fuente: Elaboración propia

3.7. Rigor científico

La presente revisión cuenta con la validez y confiabilidad de la investigación cualitativa puesto que cumple con cada uno de los siguientes criterios fundamentales (Alcaraz Moreno et al., 2012):

La dependencia: este criterio se cumple ya que la revisión realizada es la recopilación de información variada proveniente de casos experimentales y matemáticos ubicados en distintas partes del mundo pero que coinciden en el tema sobre el potencial de enfriamiento de los techos verdes (Salgado Lévano, 2007).

La credibilidad: la información recolectada para el desarrollo de esta revisión se obtiene de fuentes reconocidas, confiables y calificadas, permitiendo que se consigan datos válidos y verídicos que, al mismo tiempo, guardan relación directa con el tema común estudiado por esta revisión (Salgado Lévano, 2007); dando así, el cumplimiento de este criterio.

La auditabilidad: se da cumplimiento a este criterio debido a que, esta revisión le da continuidad a la ruta de conocimientos al recopilar las recomendaciones y aportes de otros autores sobre un tema específico esperando llegar a conclusiones novedosas. De la misma manera, esta revisión cumple con la correcta aplicación del instrumento de recolección de datos ya que respeta la autoría y bibliografía de las investigaciones (Alcaraz Moreno et al., 2012).

La transferibilidad: la revisión cumple con este criterio al realizar una explicación detallada del contexto de la investigación, los participantes involucrados, las técnicas estudiadas, los procedimientos realizados y el método de análisis aplicado, de forma que brinda la información suficiente para permitir su trasplante a otros contextos diferentes, es decir, ser una fuente de información para estudios posteriores (Alcaraz Moreno et al., 2012).

3.8. Método de análisis de datos

La metodología para el análisis de información de la presente revisión se realizó utilizando el método de categorización (grupos de categorías), las cuales, en conjunto, tienen relación directa con el objeto de estudio.

La categorización fue: a) Condición climática – clima seco, el cual conceptualiza las características que posee este clima, subcategorizado por su tipología y parámetros climáticos; b) Rendimiento de la vegetación, que identifica las especies de plantas resilientes en climas secos, subcategorizado por su demanda de recursos y extensión de cobertura vegetal, ambos para garantizar la su supervivencia y efecto de enfriamiento; c) Componentes del techo verde – diseño, que define las características de diseño basado en el clima donde será instalado y los requerimientos de las plantas que serán utilizadas, subcategorizado por la cobertura vegetal (tipo de techo verde), el material aislante (características del sustrato) y el sistema de riego.

3.9. Aspectos éticos

El desarrollo de esta investigación cumple con los valores y principios establecidos en el “Código de Ética en Investigación” de la Universidad César Vallejo, aprobado mediante la Resolución de Consejo Universitario N°0262-2020/UCV, puesto que pone en conocimiento las fuentes bibliográficas citadas, teniendo en consideración la norma internacional ISO 690, de manera que se respete los derechos de autor e intelectuales.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La capacidad de los TV para brindar beneficios térmicos esta influenciada por 1) los parámetros climáticos de la zona en donde se encuentra instalado un TV, 2) las características propias de la especie vegetal y 3) los parámetros del sustrato (Tan et al., 2017; Cascone et al., 2019). En el Gráfico 1, se observa de manera resumida los parámetros de los que depende el efecto de enfriamiento de un TV.



Gráfico 1. Parámetros que tienen influencia sobre el efecto de enfriamiento de los Techos verdes

Fuente: Elaboración propia

4.1. Condiciones climáticas – zona seca

Para esta investigación se ha tomado en cuenta el sistema de clasificación climática de Köppen – Geiger para todos los artículos revisados (ver Tabla 3), por ser un sistema frecuentemente empleado y, al mismo tiempo, la referencia más apropiada para la comparación de los resultados de investigación sobre infraestructuras verdes (Cascone et al., 2019; Hami et al., 2019; Gonzalez-Trevizo et al., 2021).

Tabla 3. Clasificación climática de estudios experimentales y de simulación

Autores	Ubicación		Clima indicado por el autor	Köppen – Geiger
	Provincia	País		
(Refahi y Talkhabi, 2015)	Hormozgan	Irán	Clima muy cálido – seco	Bwh
	Isfahán		Clima cálido – seco	Bwk
	Azerbaiyán Oriental		Clima mixto – seco	Bsk
(Moghbel y Erfanian Salim, 2017)	Teherán	Irán	-	Bsk
(Cáceres et al., 2018)	Córdoba	Argentina	Semiárido cálido	Bsh
(Ziogou et al., 2018)	Lamaca	Chipre	Clima intermedio y cálido	Bsh
	Limassol		Clima caluroso	Csa
	Nicosia		Clima frío	Bsh
	Paphos		Clima intermedio y cálido	Csa
(Melo dos Santos et al., 2019)	Pernambuco	Brasil	Clima semiárido	Bsh
(Schindler et al., 2019)	Jerusalén	Israel	Clima mediterráneo	Bsh
(Peñalvo-López et al., 2020)	Valencia	España	Clima mediterráneo	Bsk
(Lynn y Lynn, 2020)	Tel-Aviv	Israel	Clima húmedo costero	Csa
	Jerusalén		Clima seco	Bsh
(Robbiati et al., 2022)	Córdoba	Argentina	Semiárido cálido	Bsh
(Rabbani y Kazemi, 2022)	Mashhad	Irán	Semiárido frío	Bsk

Fuente: Elaboración propia

Los climas secos poseen una precipitación anual escasa, se considera que la precipitación y la humedad son menores que la evaporación y transpiración de cada año (Chazarra Bernabé et al., 2018) (ver Tabla 4).

Tabla 4. Características de los climas secos – Clima B

Grupo	Clasificación		Características		Colores mapa Köppen-Geiger			
			Temperatura	Precipitaciones	Rojo	Verde	Azul	Color
Clima B - Seco (árido y semiárido)	BWh	Árido cálido	La temperatura media anual está por encima de los 18 °C.	Las lluvias medias anuales están entre un 0 % y un 50 % del valor del umbral mencionado.	255	0	0	
	BWk	Árido frío	La temperatura media anual está por debajo de los 18 °C.	Las lluvias medias anuales están entre un 0 % y un 50 % del valor del umbral mencionado.	255	150	150	
	BSh	Semiárido cálido	La temperatura	Las lluvias medias anuales están entre un 50 % y un 100	245	165	0	

		media anual está por encima de los 18 °C.	% del valor del umbral calculado para un clima seco. Alrededor de 500 mm anuales.			
BSk	Semiárido frío o estepario	La temperatura media anual está por debajo de los 18 °C.	Las lluvias medias anuales están entre un 50 % y un 100 % del valor del umbral calculado para un clima seco. Alrededor de 500 mm anuales.	255	220	100

Fuente: (Peel, Finlayson y McMahon, 2007)

Köppen los diferencia entre dos subtipos de clima, Bw (desierto) y Bs (estepa) dependiendo de si la precipitación anual alcanza o no la mitad del umbral establecido para los climas secos. Al mismo tiempo, diferencia entre las temperaturas frías (letra k) y cálidas (letra h) dependiendo de si la temperatura media anual sea inferior o superior a los 18°C respectivamente (Chazarra Bernabé et al., 2018).

$$\uparrow ET_{\text{alta tasa de evapotranspiración}} = \uparrow \text{Aumento efecto de enfriamiento TV} \quad (1)$$

*Elevadas tasas de evapotranspiración se traducen en un aumento en el efecto de enfriamiento de los TV.

Ahora bien, con respecto al potencial de enfriamiento de los TV, los parámetros climáticos en las zonas secas afectan directamente al proceso de evapotranspiración (ET), el cual es el interventor principal en el enfriamiento de los TV (1) (Cascone et al., 2019). Esto se debe porque a través de este proceso la planta humedece el aire del ambiente externo por medio de la transpiración vegetal y la evaporación del agua que se encuentra en el sustrato (Tan et al., 2017).

$$\uparrow RS_{\text{radiación solar}} + \downarrow HR_{\text{humedad relativa}} = \uparrow \text{transpiración plantas} \quad (2)$$

*Cuando la radiación solar es alta pero la humedad relativa del ambiente es baja, transpiración de las plantas aumenta, humedeciendo el aire sobre la capa vegetal (Cascone et al., 2019).

Estos parámetros del clima son: la radiación solar (RS), la velocidad del viento (VV), la temperatura del aire (T), la humedad relativa (HR) y las condiciones del cielo (nubosidad, soleado, etc.) (Cascone et al., 2019).

Moghbel y Erfanian Salim (2017), analizaron el efecto de enfriamiento de un TVE en el microclima interior y exterior de un edificio bajo las condiciones climáticas semiáridas (Bsk) de Teherán, en donde observaron que la T exterior promedio máxima, a 1 m de la superficie, fue de 40.4°C para el techo bituminoso control y de 30.2°C para el TVE. La HR exterior promedio máxima fue de 55.26% para el techo bituminoso control y de 59.56% para el TVE. En este estudio se puede apreciar el efecto de enfriamiento de la ET, puesto que los porcentajes de HR en el TV son superiores en comparación al techo bituminoso, pero al mismo tiempo la T sobre el TV es 10.2°C inferior que el techo control, esto nos indica que la humedad existente sobre el TV es provocada por la transpiración de las plantas durante un día soleado de verano.

$$\uparrow T_{\text{temperatura aire alta}} + \downarrow HR_{\text{humedad relativa baja}} = \uparrow ET_{\text{mejora evapotranspiración}} \quad (3)$$

**Cuando la temperatura del aire es alta pero la humedad relativa del ambiente es baja, la evapotranspiración mejora y se deriva en el enfriamiento del ambiente (Cascone et al., 2019).*

$$\uparrow RS_{\text{radiación solar alta}} + \uparrow P_{\text{lluvias}} = \uparrow HR_{\text{Humedad relativa alta}} \quad (4)$$

**Cuando la radiación solar es alta y existe presencia de precipitación (lluvias), la humedad relativa del ambiente aumenta, lo que disminuye el efecto de evapotranspiración (Cascone et al., 2019).*

Si bien es cierto que la RS tiene una fuerte influencia en el proceso de ET y, por ende, en la T (Cascone et al., 2019), un estudio realizado en Brasil indicó que la T exterior depende también de otros eventos climáticos como la P y la HR, puesto que durante el análisis de los valores de RS se percataron que hubieron días donde la RS máxima coincidía con las T exteriores y otros días donde los valores máximos de RS se dieron en fechas totalmente diferentes a los máximos de T. El estudio tuvo los valores máximos en las fechas del 22/08/2015 con $(RS = 4175 \frac{Kj}{m^2})$ y el 26/08/2015 con $(T = 29^{\circ}C)$ (Melo dos Santos et al., 2019).

En el artículo de investigación realizado por Lynn y Lynn (2020), se analizaron los impactos potenciales de los techos frescos y techos verdes para reducir las altas temperaturas de verano, los resultados indicaron que las temperaturas urbanas a 2 metros de la superficie fueron más sensibles a la variación del albedo en los techos fríos (albedo de 0.2, 0.5 y 0.8) que a la HS en los techos verdes (suelo seco: 0.066, estresado: 0.206, intermedio:0.268, a capacidad de campo:0.329 y saturado con riego:0.439), teniendo como resultado que las diferencias de temperaturas en los techos frescos fueron de 20°C aproximadamente en comparación con las temperaturas de los TV de entre 10 a 15°C. Los autores explican que en los TV los flujos superficiales son sensibles a los cambios en la HS al estar por debajo de la capacidad de campo, es decir que solo se podrá obtener un efecto de enfriamiento máximo por parte de la vegetación si se mantiene el sustrato bien regado (con porcentajes altos de HS, por encima de la capacidad de campo).

$$\begin{aligned} \uparrow_{\text{nubosidad alta}} = \uparrow_{\text{mayor reflejo y absorción de radiación solar}} = \\ \uparrow ET_{\text{mayor evapotranspiración}} \end{aligned} \quad (5)$$

**Para días cuando existe presencia de nubes (nublados), el reflejo de la radiación solar que ofrecen las nubes aumenta, esto a su vez permite una mayor evapotranspiración por menores cantidades de radiación solar que llegan a la superficie (Cascone et al., 2019)*

$$\begin{aligned} \uparrow T_{\text{temperatura del aire alta}} + \uparrow HR_{\text{humedad relativa alta}} = \\ \downarrow ET_{\text{reducción de evapotranspiración}} \end{aligned} \quad (6)$$

**Cuando las temperaturas del aire son altas y la humedad relativa del ambiente también es alta, tenemos bajas tasas de evapotranspiración, lo que impide/reduce el efecto de enfriamiento (Cascone et al., 2019)*

$$\uparrow VV_{\text{velocidad del viento alta}} \Rightarrow +ET_{\text{mejora la evapotranspiración}} \quad (7)$$

**La VV moviliza el vapor de agua del suelo y del follaje hacia la atmósfera permitiendo el aumento de la ET, esto debido a que reemplaza el aire húmedo HR por aire seco (Cascone et al., 2019)*

Otros estudios sugirieron que las ciudades con climas secos son más sensibles a los esfuerzos de mitigación proporcionados por los TV en comparación con las ciudades de climas húmedos (Barriuso y Urbano, 2021). Sin embargo, los autores Lynn y Lynn (2020) tuvieron un hallazgo contradictorio, pues descubrieron que la ciudad de clima húmedo de Tel Aviv (Csa) redujo en mayor cantidad las temperaturas del aire a comparación de la ciudad de clima seco de Jerusalén (Bsh). Los autores atribuyen estos resultados a la presencia de la inversión nocturna con humedad decreciente que hubo en las zonas de Jerusalén al momento de la investigación, esto influyó en el efecto de enfriamiento de los techos verdes instalados. De esta manera podemos concluir que, los parámetros climatológicos de las zonas secas también pueden verse afectados con este tipo de fenómenos, y, por ende, alterar su efecto de enfriamiento, aun si teóricamente el clima es favorable para maximizarlo.

$$\begin{aligned} \downarrow T_{bajas\ temperaturas} \Rightarrow \uparrow HR_{aumenta\ la\ humedad\ relativa} \Rightarrow \\ \downarrow ET_{reduce\ la\ evapotranspiración} \end{aligned} \quad (8)$$

**Durante las horas nocturnas la T disminuye y permite el aumento de humedad en el aire, esto a su vez limita el proceso de evapotranspiración, por lo que se obtiene un ligero aumento de la temperatura (Cascone et al., 2019)*

4.2. Rendimiento de la vegetación

En las regiones áridas y semiáridas los factores ambientales son extremos con grandes variaciones de temperaturas y escasas precipitaciones. Características en las especies vegetales como la tolerancia a la sequía, tolerancia a las altas temperaturas y la capacidad de supervivencia en sustratos con periodos alternos de saturación/escasez de agua son deseables al momento de su elección al diseñar un sistema de TV. Así mismo, otros atributos importantes que garantizan la perpetuación de la especie en el tiempo de la capa vegetada de los TV son la capacidad de establecimiento en condiciones climáticas extremas, capacidad de resiembra y rebrote y una rápida y alta cobertura del suelo (Robbiati et al., 2022); esto es en lo que respecta a la supervivencia de la especie vegetal a emplear.

En cuanto al desempeño térmico refiere, un albedo elevado, la evapotranspiración y la sombra de las plantas o IAF dan como resultado el enfriamiento del techo, por lo que aquellas especies que maximicen estas características proporcionarán un mayor efecto de enfriamiento (Schindler et al., 2019).

A través de la evapotranspiración las plantas se enfrían mediante el ambiente creando una corriente de aire fresco, aumentando la humedad relativa y absorbiendo energía térmica del sol (Hami et al., 2019). Considerando que diferentes tipos de plantas tienen diferentes tasas de evapotranspiración, cada elemento de la vegetación llega a tener un potencial de enfriamiento diferente y particular (Zhang, Zhan y Lan, 2018).

Aquellas especies que pueden mantener una mayor cobertura en verano y reducir la humedad del sustrato con mayor lentitud durante primavera pueden ser la mejor opción para los TV que se utilizan por sus beneficios térmicos en regiones con veranos secos y calurosos (Schindler et al., 2019).

Tabla 5. Especies vegetales analizadas para zonas climáticas secas

Autor	Especie analizada	Familia	Forma de crecimiento
(Cáceres et al., 2018)	Sedum Acre	Crasuláceas	Herbácea rastrera
	Glandularia x híbrida	Verbenáceas	Herbácea rastrera
	Phyla nodiflora (L.) Greene	Verbenáceas	Herbácea rastrera
	Eustachys retusa (Lag.) Kunth	Poáceas	Graminoides
	Melica macra Nees.	Poáceas	Graminoides
	Grindelia cabreræ Ariza cabreræ.	Asteráceas	Hierbas verticales
	Hysterionica jasionoides Willd.	Asteráceas	Hierbas verticales
	Scoparia montevidensis Spreng.	Scrophulariaceae	Herbácea rastrera
	Bulbostylis sp.	Ciperáceas	Graminoides
	Justicia squarrosa Griseb.	Acanthaceae	Hierbas verticales
	Senecio sp.	Asteráceas	Hierbas verticales
	Heliotropium curassavicum L.	Boragináceas	Herbácea rastrera
	Sisyrinchium sp.	Iridiáceas	Graminoides
	Nama undulatum Kunth.	Boragináceas	Herbácea rastrera
	Adesmia sp.	Fabáceas	Herbácea rastrera
(Schindler et al., 2019)	Schizachyrium condensatum	Poáceas	Graminoides
	Sedum sediforme (Jacq.) Pau	Crasuláceas	-
	Cichorium endivia L	Asteráceas	-
	Ranunculus scandicinus	Ranunculáceas	-
	Lomelosia prolifera (L.)	Dipsacáceas	-
	Glebionis coronarium (L.) NN Tzvel.	Asteráceas	-

(Robbiati et al., 2022)	Capsella bursa - pastoris (L.)	Crucíferas	Hierbas verticales
	Echium judaeum Lacaita	Boragináceas	-
	Trifolium purpureum Loisel.	Papilionáceas	-
	Trifolium palaestinum Boiss.	Papilionáceas	-
	Sinapis alba L.	Crucíferas	Hierbas verticales
	Reseda alba L.	Resedáceas	Hierbas verticales
	Eustachys distichophylla	Poáceas	Graminoides
	Nassella tenuissima	Poáceas	Graminoides
	Phyla nodiflora	Verbenáceas	Herbácea rastrera
	Glandularia x híbrida	Verbenáceas	Herbácea rastrera
	Grindelia cabreræ	Asteráceas	Hierbas verticales
	Sedum spp.	Crasuláceas	Herbácea rastrera
	(Rabbani y Kazemi, 2022)	Aptenia cordifolia	Aizoaceae
	Carpobrotus edulis	Aizoaceae	Rastrera

Fuente: Elaboración propia

En el estudio realizado por Schindler et al. (2019), los autores demostraron que la especie *Sedum sediforme* (especie nativa de Israel) cultivada de manera independiente es ligeramente más eficiente en su rol de enfriamiento a comparación del cultivo de *Sedum sediforme* + plantas anuales (que representan la vegetación natural del área estudiada) para climas Bsh – semi áridos calurosos, esto se debe a que logró una mayor cobertura vegetal, una HR considerable y TS 1.5 ± 0.3 °C más bajas que los demás tratamientos analizados. Sin embargo, los autores resaltan que sería provechoso evaluar el desempeño de otras especies capaces de mantener una cubierta vegetal durante las épocas de verano o la posibilidad de introducir riego con el fin de lograr una mayor biodiversidad en la implementación de TV para las zonas urbanas de Israel.

Cáceres et al. (2018) presentaron una variedad de especies con propiedades adaptadas según los objetivos que se quieran lograr al momento de seleccionar la capa vegetal de un TVE, en el caso de querer lograr una cobertura vegetal rápida y sostenible en el tiempo, en orden de crecimiento los autores recomiendan el uso de *Sedum acre*, *Phyla nodiflora*, *Glandularia x hybrid*, *Eustachys retusa*, *Grindelia cabreræ*, *Melica macra* y *Bulbostylis sp.* Para el caso de priorizar la capacidad de resiembra de las especies (techo

autorregulado) sugieren el uso de *Glandularia x hybrid*, *Eustachys retusa*, *Grindelia cabreræ*, *Melica macra* y *Bulbostylis sp.* Si la implementación del TVE es principalmente estética y, por ende, se busque especies con periodos de floración largos el uso de *Grindelia cabreræ* (adecuada para temperaturas bajas), *Phyla nodiflora*, *Glandularia x hybrid*, *Scoparia montevidensis*, *Heliotropium curassavicum* (principalmente en primavera) son ideales. Los autores indican que para las condiciones climáticas de una región semiárida se destacan las especies *Phyla nodiflora*, *Grindelia cabreræ*, *Eustachys retusa*, *Glandularia x hybrid* y *Aptenia cordifolia* puesto que presentan mayores coberturas, altas tasas de supervivencia y estado óptimo de salud por todo el año.

Si bien la literatura indica que las especies que pertenecen al género *Sedum* son las más utilizadas por excelencia a nivel mundial debido a su capacidad de adaptabilidad bajo condiciones de estrés hídrico (Cáceres et al., 2018) los hallazgos presentados por Robbiati et al. (2022) sostienen un punto de vista diferente, en su estudio para evaluar el comportamiento vegetativo y térmico de un TVE ubicado en una ICU de una región semiárida, observaron que los *Sedum* pueden poseer un crecimiento lento naturalmente y solo una cobertura de 71% después de 15 meses en comparación con la combinación de *plantas nativas + Sedum*, que es capaz de lograr una cobertura con mayor velocidad. El tratamiento TA (combinación de *Eustachys. distichophylla + Sedum*) presentó el mejor desempeño en cobertura y capacidad de resiembra. Los autores resaltan que la exclusión competitiva al momento de acoplar especies filogenéticamente relacionadas o con patrones de crecimiento comparables debe ser un aspecto primordial por considerar ya que puede representar un obstáculo que afecte potencialmente el rendimiento térmico de un TV. Así mismo, para mejorar a corto y largo plazo el rendimiento de la vegetación en el TVE, recomiendan el uso de ensamblajes de especies nativas con plantas heterogéneas, en especial el uso de pastos con *Eustachys distichophylla* en combinación con formas diferentes de crecimiento.

El estudio realizado por Rabbani y Kazemi (2022) evaluó el comportamiento de dos especies de plantas *Carpobrotus edulis* y *Aptenia cordifolia* bajo

condiciones climáticas semiáridas en sustratos con materiales superabsorbentes. Los autores concluyeron que *Aptenia cordifolia* es una especie más eficiente en el uso del agua, teniendo mayor índice de crecimiento y cobertura del suelo.

En la **Figura 5** se puede observar las especies que, según la revisión en esta investigación, presentan características idóneas para obtener un desempeño térmico y supervivencia en los sistemas de TV para zonas climáticas secas.



Figura 5. Especies vegetales con mejor desempeño térmico en un sistema de techo verde para zonas secas
Fuente: Elaboración propia

4.3. Componentes del techo verde – diseño

Para la comprensión de esta sección, se analizaron los papeles que cumplen el sustrato de crecimiento y los tipos de planta para mejorar el rendimiento

térmico de un TV. En la Tabla 6 se presentan las investigaciones experimentales que evaluaron las características de los sustratos en el rendimiento térmico de los TV.

Los sistemas de los TV no tienen un estándar y su diseño es variable según la elección de materiales, la composición y profundidad del sustrato de cultivo/crecimiento y la composición de la planta del TV. Estas características que determinan el diseño de los TV influyen en gran medida en su potencial de enfriamiento (Tan et al., 2017).

Tabla 6. Estudios que evalúan las características de los sustratos de un techo verde

Autores	Título	Tipo de estudio	Köppen – Geiger	Composición de sustrato empleado
(Tan et al., 2017)	Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance	Experimental	Af	Tierra superior: Suelo natural y materia orgánica K-soil: Perlita y materia orgánica
(Cáceres et al., 2018)	Assessing native germplasm for extensive green roof systems of semiarid regions	Experimental	Bsh	Tierra de desecho de construcción, perlita, cáscara de maní y compost equino
(Brunetti, Porti y Piro, 2018)	Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate	Modelo de simulación	-	-
(Schindler et al., 2019)	Cooling effect of Sedum sediforme and annual plants on green roofs in a Mediterranean climate	Experimental	Bsh	70 % de perlita, 10 % toba, 10% compost y 10% turba
(Robbiati et al., 2022)	Vegetative and thermal performance of an extensive vegetated roof located in the urban heat island of a semiarid region	Experimental	Bsh	Suelo nativo con 2,2% de materia orgánica, cáscara de maní, perlita y compost equino
(Rabbani y Kazemi, 2022)	Water need and water use efficiency of two plant species in soil-containing and soilless substrates under green roof conditions	Experimental	Bsk	Tierra, Leca, perlita, piedra pómez mineral, hojarasca y bentonita

Fuente: Elaboración propia

No obstante, al diseñar un TV, se debe tener en cuenta el clima local y si la necesidad de un efecto de enfriamiento de un TV es mayor en los horarios diurnos o nocturnos (Knight et al., 2021). Para el fondo climático de estudio en esta revisión, la disponibilidad suficiente de agua en el sustrato es un factor

crucial para garantizar la supervivencia de las especies vegetales y permitir mantener las tasas máximas de evapotranspiración (Stache et al., 2021), traduciéndose en un mayor efecto de enfriamiento en las zonas de climas secos.

Los sistemas de TV no son sostenibles sin un riego complementario y en especial para las regiones con clima árido y semiárido por la escasez característica de la zona, a pesar de ello, en la actualidad los TVE son instalados sin considerar un sistema de riego debido a las cualidades que poseen las plantas utilizadas en su cobertura (ejm. *Sedum*) (Rabbani y Kazemi, 2022).

En la investigación realizada por Tan et al. (2017) se evaluó, en tres fases: a) fase de riego, b) fase retención de riego y c) reanudación de riego, el impacto de las características de retención de agua y suelo en el rendimiento de los TV mediante tres combinaciones de tratamientos (KA, KB y KC), variando la presencia o ausencia de una capa de retención de agua (capacidad de 5 cm) y el tipo de sustrato (sustrato artificial K-soil y suelo normal - superior, profundidad de 35 cm). Los autores observaron que la humedad del suelo para KC fue la más alta en todas las fases, manteniendo altas tasas de ET ($4 - 6 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) incluso durante la fase de sequía en comparación con KA y KB, que disminuyeron gradualmente su ET (de $6 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a $2 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) al entrar en periodo de estrés hídrico. Los autores sugieren que el uso de K-soil (suelo y perlita) puede permitir un sustrato más profundo y representan menos carga estructural para los edificios, ya que las macetas con K-soil pesaban 10 kg menos que las macetas con sustrato con suelo superior. A pesar de que el estudio se realiza en una zona climática Af (ecuatorial, cálidos y lluvioso), los resultados sirven como referencia para considerar el K-soil como un potencial material en el sustrato de zonas climáticas secas, principalmente por sus características porosas que lo hacen más ligero y, por ende, constituir medios de crecimiento más profundos sin representar grandes pesos sobre la estructura del edificio en donde se instale.

Brunetti, Porti y Piro (2018), con el fin de ofrecer una descripción precisa y completa del transporte acoplado de agua – calor – vapor en un techo verde

sin vegetación (TVSV) a escala de campo, evaluaron la idoneidad del modelo mecanicista unidimensional HYDRUS-1D. La calibración abarcó el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (OEP) y el método combinado de estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada y análisis de sensibilidad global (ASG – GLUE), en la estación cálida estos se aprovecharon para examinar la eficiencia de enfriamiento de un sistema combinado de reutilización de aguas pluviales y TVSV. La optimización de un régimen de riego de un TVSV de 8 cm de profundidad condujo a una reducción de 4°C de la temperatura promedio del fondo del suelo. Con esto, los autores concluyen que a mayor profundidad de los sustratos la reducción y el retardo térmico aumentan, y que es posible diseñar el riego que provoque el enfriamiento evaporativo y convectivo del TVSV.

De esta manera confirman que existe una relación entre la HS y profundidad del sustrato con el efecto de enfriamiento de los techos verdes. Así mismo, en la investigación realizada por Schindler et al. (2019) se evidencia el efecto directo que posee la HS en la evapotranspiración. Durante la investigación, a finales de la época de invierno – primavera en el tratamiento de *Sedum sediforme* + plantas anuales se presentó una reducción de la cobertura por parte de las plantas anuales ante los cambios estacionales, lo que provocó el aumento de la evaporación de agua del sustrato por acción de la RS directa en la superficie descubierta, reduciendo el porcentaje de la HS que resultó en el aumento de la temperatura del sustrato.

En los sistemas de TVE, la poca profundidad que caracteriza a sus sustratos ocasiona una rápida pérdida de agua y esto, altera la capacidad de enfriamiento que posee el sistema. Con el fin de prevenir estos efectos y aumentar la capacidad de agua que poseen los sustratos, la adición de modificadores de suelo que absorben agua es una alternativa viable. Los superabsorbentes son sustancias capaces de absorber hasta 20 veces su peso el agua que proviene de lluvias y riego, evitando su pérdida y colocándola a disposición de la planta en condiciones de suelo seco. Estas características protegen a las plantas principalmente en condiciones de escasez de agua y estrés por sequía (Rabbani y Kazemi, 2022).

En la ciudad de Mashhad de clima Bsk – semiárido frío los investigadores Rabbani y Kazemi (2022) estudiaron los efectos de diferentes tipos de sustrato con o sin suelo y con o sin modificadores de suelo que absorben agua, mostrando que los sustratos que contenían bentonita y suelo eran más adecuados para el desarrollo de las plantas en sistemas de TVE a comparación de sustratos sin suelo que no permitían su crecimiento óptimo. Los autores concluyeron que el sustrato que contiene suelo y bentonita en conjunto con la especie *Aptenia cordifolia* tiene potencial para crear sistemas de TV que sean sostenibles en climas semiáridos, puesto que presentan mejor cobertura vegetal y una eficiencia máxima en el uso y consumo del agua.

V. CONCLUSIONES

En base al análisis de la revisión sistemática, se presentan las siguientes conclusiones:

- Las zonas climáticas secas están definidas en 4 tipo de climas Bwh (árido cálido), Bwk (árido frío), Bsh (semiárido cálido) y Bsk (semiárido frío); estas zonas se caracterizan principalmente por tener precipitaciones escasas, temperaturas ambientales altas y humedad relativa baja. Estas condiciones climáticas favorecen el potencial que tiene un techo verde para enfriar un ambiente, pero únicamente si se garantiza que el sustrato de crecimiento para las plantas este abastecido con suficiente agua para permitir el proceso de evapotranspiración.
- Las especies de plantas identificadas que poseen un mejor rendimiento vegetal bajo condiciones secas son *Sedum sediforme*, *Phyla nodiflora*, *Grindelia cabrerae*, *Eustachys retusa*, *Glandularia x hybrid* y *Eustachys distichophylla*, esto debido a que lograron obtener reducciones de temperatura considerables y presentaron características como estado óptimo de salud, resistencia a altas temperaturas y escasez hídrico, alta cobertura vegetal y capacidad de resiembra, que garantizan su supervivencia en un sistema de techo verde a lo largo del tiempo.
- En especial para lugares con climas secos, los componentes que serán decisivos para la sostenibilidad de los sistemas de techos verdes son el sustrato y la capa vegetal utilizada. Los sustratos deben cumplir con características como una alta capacidad de retención de humedad, pesos estructurales bajos (sustratos ligeros) y un aislamiento térmico adecuado. Se ha podido ver que sustratos artificiales como el K-soil (perlita y materia orgánica) y sustratos con adiciones de superabsorbentes como la bentonita (suelo, arcilla expandida ligera, perlita, piedra pómez mineral, hojarasca y bentonita) poseen características de interés en el uso de los techos verdes para este tipo de climas.

VI. RECOMENDACIONES

Según el análisis de la presente investigación, se recomienda lo siguiente:

- Profundizar en el análisis experimental o matemático del rendimiento térmico de los techos verdes en las áreas con climas secos – áridos y semiáridos, la revisión realizada apunta un gran potencial de aprovechamiento para esta tecnología con respecto a su reducción de las temperaturas exteriores e interiores.
- Sería de gran interés evaluar experimentalmente el desempeño de las plantas *Sedum sediforme*, *Phyla nodiflora*, *Grindelia cabrerae*, *Eustachys retusa*, *Glandularia x hybrid* y *Eustachys distichophylla* en combinación con los sustratos artificiales K-soil (perlita y materia orgánica) o sustratos superabsorbentes como la bentonita bajo condiciones climáticas.
- Analizar el desempeño térmico que tienen los techos verdes de climas secos en ciudades con diferentes densidades (presencia de edificios), esto debido a su posible influencia en el sistema ecológico.

REFERENCIAS

- ALCARAZ MORENO, N., NOREÑA, A.L., REBOLLEDO MALPICA, D. y ROJAS, J.G., 2012. Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa. *Aquichán* [en línea], vol. 12, no. 3, pp. 263-274. ISSN 16575997. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/aqui/v12n3/v12n3a06.pdf>.
- ALCAZAR, S.S., OLIVIERI, F. y NEILA, J., 2016. Green roofs: Experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean–continental climates. *Urban Climate*, vol. 17, pp. 304-317. ISSN 2212-0955. DOI 10.1016/J.UCLIM.2016.02.004.
- ANDRIC, I., KAMAL, A. y AL-GHAMDI, S.G., 2020. Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: Case study of Qatar. *Energy Reports* [en línea], vol. 6, pp. 2476-2489. ISSN 23524847. DOI 10.1016/j.egyr.2020.09.006. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.006>.
- AZEÑAS, V., JANNER, I., MEDRANO, H. y GULÍAS, J., 2018. Performance evaluation of five Mediterranean species to optimize ecosystem services of green roofs under water-limited conditions. *Journal of Environmental Management*, vol. 212, pp. 236-247. ISSN 10958630. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2018.02.021.
- BANIRAZI MOTLAGH, S.H., PONS, O. y HOSSEINI, S.M.A., 2021. Sustainability model to assess the suitability of green roof alternatives for urban air pollution reduction applied in Tehran. *Building and Environment* [en línea], vol. 194, no. 107683. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2021.107683. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107683>.
- BARMPARESOS, N., ASSIMAKOPOULOS, M.N., ASSIMAKOPOULOS, V.D., LOUMOS, N., SOTIRIOU, M.A. y KOUKOUNTZIS, A., 2018. Indoor air quality and thermal conditions in a primary school with a green roof system. *Atmosphere* [en línea], vol. 9, no. 2, pp. 1-14. ISSN 20734433. DOI 10.3390/atmos9020075. Disponible en: www.mdpi.com/journal/atmosphere.
- BARRIUSO, F. y URBANO, B., 2021. Green Roofs and Walls Design Intended to

- Mitigate Climate Change in Urban Areas across All Continents. *Sustainability* [en línea], vol. 13, no. 4, pp. 2245. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su13042245. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2245>.
- BECK, H.E., ZIMMERMANN, N.E., MCVICAR, T.R., VERGOPOLAN, N., BERG, A. y WOOD, E.F., 2018. Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, vol. 5, no. 180214, pp. 01-12. ISSN 20524463. DOI 10.1038/sdata.2018.214.
- BERARDI, U., 2016. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, vol. 121, pp. 217-229. ISSN 0378-7788. DOI 10.1016/J.ENBUILD.2016.03.021.
- BEVILACQUA, P., COMA, J., PÉREZ, G., CHOCARRO, C., JUÁREZ, A., SOLÉ, C., DE SIMONE, M. y CABEZA, L.F., 2015. Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment* [en línea], vol. 92, pp. 305-316. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.04.026. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.026>.
- BRUNETTI, G., PORTI, M. y PIRO, P., 2018. Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate. *Applied Energy* [en línea], vol. 221, pp. 204-219. [Consulta: 31 marzo 2022]. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2018.03.190. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918305373>.
- CABRERA, F.C., 2005. Categorización y triangulación como procesos de validación del conocimiento en investigación cualitativa. *Theoria*, vol. 14, no. 1, pp. 61-71.
- CÁCERES, N., IMHOF, L., SUÁREZ, M., HICK, E. y GALETTO, L., 2018. Assessing native germplasm for extensive green roof systems of semiarid regions. *Ornamental Horticulture* [en línea], vol. 24, no. 4, pp. 466-476. [Consulta: 22 marzo 2022]. ISSN 2447-536X. DOI 10.14295/oh.v24i4.1225. Disponible en: <https://ornamentalhorticulture.emnuvens.com.br/rbho/article/view/1225>.
- CASCONE, S., COMA, J., GAGLIANO, A. y PÉREZ, G., 2019. The

- evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment* [en línea], vol. 147, pp. 337-355. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2018.10.024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>.
- CATALANO, C., LAUDICINA, V.A., BADALUCCO, L. y GUARINO, R., 2018. Some European green roof norms and guidelines through the lens of biodiversity: Do ecoregions and plant traits also matter? *Ecological Engineering*, vol. 115, pp. 15-26. ISSN 0925-8574. DOI 10.1016/J.ECOLENG.2018.01.006.
- CHAZARRA BERNABÉ, A., FLÓREZ GARCÍA, E., PERAZA SÁNCHEZ, B., TOHÁ REBULL, T., LORENZO MARIÑO, B., CRIADO PINTO, E., MORENO GARCÍA, J.V., ROMERO FRESNEDA, R. y BOTEY FULLAT, R., 2018. *Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016)* [en línea]. Madrid: Agencia Estatal de Meteorología. [Consulta: 20 marzo 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/014-18-004-2>.
- CITY OF TORONTO, 2010. City of Toronto Green Roof Bylaw. [en línea]. [Consulta: 18 marzo 2022]. Disponible en: <https://www.toronto.ca/city-government/planning-development/official-plan-guidelines/green-roofs/green-roof-bylaw/>.
- FACHINELLO KREBS, L. y JOHANSSON, E., 2021. Influence of microclimate on the effect of green roofs in Southern Brazil – A study coupling outdoor and indoor thermal simulations. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 241, pp. 1-15. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2021.110963. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110963>.
- FLECK, R., GILL, R.L., SAADEH, S., PETTIT, T., WOOSTER, E., TORPY, F. y IRGA, P., 2022. Urban green roofs to manage rooftop microclimates: A case study from Sydney, Australia. *Building and Environment*, vol. 209, no. 108673, pp. 1-11. ISSN 03601323. DOI 10.1016/J.BUILDENV.2021.108673.
- GONZALEZ-TREVIZO, M.E., MARTINEZ-TORRES, K.E., ARMENDARIZ-LOPEZ, J.F., SANTAMOURIS, M., BOJORQUEZ-MORALES, G. y LUNA-LEON, A., 2021. Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 246, pp.

01-22. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2021.111051. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111051>.

GRULLÓN – PENKOVA, I.F., ZIMMERMAN, J.K. y GONZÁLEZ, G., 2020. Green roofs in the tropics: design considerations and vegetation dynamics. *Heliyon*, vol. 6, no. 8, pp. 1-8. ISSN 24058440. DOI 10.1016/j.heliyon.2020.e04712.

HAMI, A., ABDI, B., ZAREHAGHI, D. y MAULAN, S. Bin, 2019. Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society* [en línea], vol. 49, pp. 1-11. ISSN 22106707. DOI 10.1016/j.scs.2019.101634. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101634>.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, R., FERNANDEZ COLLADO, C. y BAPTISTA LUCIO, M. del P., 2014. *Metodología de la investigación - sexta edición*. Sexta. México: Mc. Graw Hill Education. ISBN 9781456223960.

JAMEI, E., CHAU, H.W., SEYEDMAHMOUDIAN, M. y STOJCEVSKI, A., 2021. *Review on the cooling potential of green roofs in different climates*. 15 octubre 2021. S.I.: Elsevier B.V.

KNIGHT, T., PRICE, S., BOWLER, D., HOOKWAY, A., KING, S., KONNO, K. y RICHTER, R.L., 2021. *How effective is 'greening' of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the 'urban heat island effect'? An updated systematic review* [en línea]. 2021. S.I.: s.n. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00226-y>.

LYNN, B.H. y LYNN, I.M., 2020. The impact of cool and green roofs on summertime temperatures in the cities of Jerusalem and Tel Aviv. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 743, pp. 01 al 18. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.140568. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140568>.

MELO DOS SANTOS, S., FERREIRA SILVA, J.F., CHAVES DOS SANTOS, G., TORRES DE MACEDO, P.M. y GAVAZZA, S., 2019. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 219, pp. 639-648. ISSN

09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.01.068. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.068>.

MOGHBEL, M. y ERFANIAN SALIM, R., 2017. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate* [en línea], vol. 20, pp. 46-58. ISSN 22120955. DOI 10.1016/j.uclim.2017.02.012. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.0122212-0955>.

MUTANI, G. y TODESCHI, V., 2020. The effects of green roofs on outdoor thermal comfort, urban heat island mitigation and energy savings. *Atmosphere*, vol. 11, no. 2, pp. 2-32. ISSN 20734433. DOI 10.3390/ATMOS11020123.

NARANJO, A., COLONIA, A., MESA, J., MAURY, H. y MAURY-RAMÍREZ, A., 2020. State-of-the-art green roofs: Technical performance and certifications for sustainable construction. *Coatings* [en línea], vol. 10, no. 1. ISSN 20796412. DOI 10.3390/coatings10010069. Disponible en:
www.mdpi.com/journal/coatings.

PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L. y MCMAHON, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* [en línea], vol. 11, no. 5, pp. 1633-1644. [Consulta: 3 marzo 2022]. ISSN 1607-7938. DOI 10.5194/hess-11-1633-2007. Disponible en:
www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/.

PEÑALVO-LÓPEZ, E., CÁRCEL-CARRASCO, J., ALFONSO-SOLAR, D., VALENCIA-SALAZAR, I. y HURTADO-PÉREZ, E., 2020. Study of the Improvement on Energy Efficiency for a Building in the Mediterranean Area by the Installation of a Green Roof System. *Energies 2020, Vol. 13, Page 1246* [en línea], vol. 13, no. 5, pp. 1-14. [Consulta: 2 febrero 2022]. ISSN 19961073. DOI 10.3390/EN13051246. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1246/htm>.

PERMPITUCK, S. y NAMPRAKAI, P., 2012. The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. *Renewable Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 98-103. ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/J.RENENE.2011.09.023.

- RABBANI, M. y KAZEMI, F., 2022. Water need and water use efficiency of two plant species in soil-containing and soilless substrates under green roof conditions. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 302, pp. 113950. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2021.113950. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721020120>.
- REFAHI, A.H. y TALKHABI, H., 2015. Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy* [en línea], vol. 80, pp. 595-603. ISSN 18790682. DOI 10.1016/j.renene.2015.02.030. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.030>.
- ROBBIATI, F.O., CÁCERES, N., HICK, E.C., SUAREZ, M., SOTO, S., BAREA, G., MATOFF, E., GALETTO, L. y IMHOF, L., 2022. Vegetative and thermal performance of an extensive vegetated roof located in the urban heat island of a semiarid region. *Building and Environment* [en línea], vol. 212, no. 108791, pp. 1-11. DOI 10.1016/j.buildenv.2022.108791. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108791>.
- SALGADO LÉVANO, A.C., 2007. Investigación cualitativa: Diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit. Revista de Psicología* [en línea], vol. 13, pp. 71-78. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=68601309>.
- SCHINDLER, B.Y., BLAUSTEIN, L., VASL, A., KADAS, G.J. y SEIFAN, M., 2019. Cooling effect of Sedum sediforme and annual plants on green roofs in a Mediterranean climate. *Urban Forestry and Urban Greening*, vol. 38, pp. 392-396. ISSN 16108167. DOI 10.1016/j.ufug.2019.01.020.
- SILVA, C.M., GOMES, M.G. y SILVA, M., 2016. Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 116, pp. 318-325. [Consulta: 27 febrero 2022]. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.01.012. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721034781#bb0075>.
- SODOUDI, S., ZHANG, H., CHI, X., MÜLLER, F. y LI, H., 2018. The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort.

- Urban Forestry & Urban Greening* [en línea], vol. 34, pp. 85-96. [Consulta: 17 marzo 2022]. ISSN 16188667. DOI 10.1016/j.ufug.2018.06.002. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866717303722>.
- STACHE, E., SCHILPEROORT, B., OTTELÉ, M. y JONKERS, H., 2021. Comparative analysis in thermal behaviour of common urban building materials and vegetation and consequences for urban heat island effect. *Building and Environment* [en línea], vol. 246, pp. 01-22. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2021.108489. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108489>.
- TAMAYO Y TAMAYO, M., 2004. *El proceso de la investigación científica* [en línea]. 4. México: Limusa. ISBN 9681858727. Disponible en: https://books.google.com.cu/books?id=BhymmEqkkJwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
- TAN, C.L., TAN, P.Y., WONG, N.H., TAKASUNA, H., KUDO, T., TAKEMASA, Y., LIM, C.V.J. y CHUA, H.X.V., 2017. Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 152, pp. 830-842. [Consulta: 27 febrero 2022]. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.01.011. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881730035X#:~:text=Results show that surface temperatures,mulch layer throughout the day>.
- TRAN, S., LUNDHOLM, J.T., STANIEC, M., ROBINSON, C.E., SMART, C.C., VOOGT, J.A. y O'CARROLL, D.M., 2019. Plant survival and growth on extensive green roofs: A distributed experiment in three climate regions. *Ecological Engineering* [en línea], vol. 127, pp. 494-503. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2018.09.027. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.027>.
- UNITED NATIONS, D. of E. and S.A., 2019. World Urbanization Prospects 2018 Highlights. [en línea]. New York: [Consulta: 15 febrero 2022]. Disponible en: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>.
- VARELA MONTAÑA, J.A. y ARANGO CRUZ, J.P., 2013. *Tirra, Techos verdes para Bogotá*. S.l.: Universidad Autónoma de Colombia.

- VINAYAK, B., LEE, H.S., GEDAM, S. y LATHA, R., 2022. Impacts of future urbanization on urban microclimate and thermal comfort over the Mumbai metropolitan region, India. *Sustainable Cities and Society* [en línea], vol. 79, pp. 01-18. [Consulta: 16 febrero 2022]. ISSN 22106707. DOI 10.1016/J.SCS.2022.103703. Disponible en: https://www.scopus.com/record/display.uri?origin=citedby&eid=2-s2.0-85123210381&noHighlight=false&relpos=0&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1.
- ZHANG, H., LU, S., FAN, X., WU, Jian, JIANG, Y., REN, L., WU, Juying y ZHAO, H., 2021. Is sustainable extensive green roof realizable without irrigation in a temperate monsoonal climate? A case study in Beijing. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 753, no. 9, pp. 01-07. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.142067. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142067>.
- ZHANG, L., ZHAN, Q. y LAN, Y., 2018. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment* [en línea], vol. 130, pp. 27-39. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2017.12.014. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.014>.
- ZHENG, X., YANG, Z., YANG, J., TANG, M. y FENG, C., 2022. An experimental study on the thermal and energy performance of self-sustaining green roofs under severe drought conditions in summer. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 261, no. 111953, pp. 01-14. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2022.111953. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111953>.
- ZIOGOU, I., MICHPOPOULOS, A., VOULGARI, V. y ZACHARIADIS, T., 2018. Implementation of green roof technology in residential buildings and neighborhoods of Cyprus. *Sustainable Cities and Society*, vol. 40, pp. 233-243. ISSN 22106707. DOI 10.1016/j.scs.2018.04.007.


ANEXOS

Anexo 1. Matriz de categorización apriorística

Ámbito temático	Problema general	Problemas específicos	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías	Subcategorías		
Revisión sistemática: Potencial de enfriamiento de los techos verdes en zonas con climas secos	¿De qué manera influyen las características climáticas secas en el potencial de enfriamiento de los techos verdes?	¿Cuáles son las características que definen una zona con clima seco?	Describir de qué manera influyen las características climáticas secas en el potencial de enfriamiento de los techos verdes.	Definir lo que caracteriza a las zonas con climas secos.	Condición climática – clima seco	• Tipos de climas secos		
		¿Qué especies poseen un mejor rendimiento vegetal en las zonas con climas secos?		Identificar las especies que poseen un mejor rendimiento vegetal bajo condiciones climáticas secas.		Rendimiento de la vegetación	• Disponibilidad de recursos	• Demanda de recursos
		¿Cuáles son las características que deben poseer las capas que componen los techos verdes en zonas con climas secos?		Definir las características que deben poseer los componentes de los techos verdes en zonas con climas secos		Componentes del techo verde – diseño	• Cobertura vegetal	• Material Aislante

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Instrumento de recolección de datos

	FICHA DE ANÁLISIS DE DATOS		
TÍTULO:			
Revista:	Año de publicación:	Lugar de publicación:	
Metodología:		DOI:	
Autor(es):			
Palabras claves:			
Elementos climáticos:		Clasificación climática (köppen):	
Especie vegetal:		Demanda de recursos:	
Tipo de reproducción:		Densidad:	
Tipo de techo:		Riego:	
Sustrato usado:		Espesor de sustrato:	
Resultados:			

Fuente: Elaboración propia