

1. Introducción

La Exposición Universal de Sevilla de 1992 (Expo'92) se celebró en la Isla de la Cartuja, Sevilla, entre el 20 de abril y el 12 de octubre de 1992. Fue un evento de categoría Universal reconocido por el Bureau International des Expositions (BIE), con el lema «La Era de los Descubrimientos», conmemorando el V Centenario del viaje de Colón, como inspira la Figura 1. El recinto expositivo abarcó 215 hectáreas e integró más de un centenar de pabellones, participando oficialmente 24 organismos internacionales y 108 países, además de las 17 comunidades autónomas españolas, varias empresas patrocinadoras y diversos pabellones temáticos organizados por la propia Expo'92. Durante los seis meses de duración se registraron cerca de 42 millones de visitas acumuladas (aproximadamente 18 millones de visitantes individuales). La organización contó con un presupuesto oficial de 1104 millones de euros, aunque las inversiones públicas totales vinculadas al evento (infraestructuras de transporte, mejoras urbanas, etc.) alcanzaron en conjunto unos 5600 millones de euros, reflejando la magnitud sin precedentes del proyecto en España.

Figura 1: Paseo por el Camino de los Descubrimientos de la Expo'92.



Propuesta de Pabellón de los Descubrimientos, 1988.
(Concurso internacional restringido de ideas)

El plan maestro de la Expo'92 ordenó el recinto en varias áreas espaciales diferenciadas (Álvarez Domínguez *et al.*, 2022), cuya versión inicial muestra la Figura 2. La Zona Internacional albergaba la mayoría de los pabellones nacionales de los países participantes. Al centro, el Lago de España (un estanque artificial de 16 Ha) estaba rodeado por los pabellones de las comunidades autónomas y dominado por el gran Pabellón de España. En el extremo sur, junto al río Guadalquivir, la Zona Sur incluía el acceso fluvial y el Pabellón de la Navegación. Por su parte, el histórico Monasterio de la Cartuja (rehabilitado para la muestra) formó un conjunto cultural con el Pabellón Real y jardines artísticos en su entorno. Estas zonas se articulaban alrededor de una vía central transversal, el Camino de los Descubrimientos, de la cual partían avenidas perpendiculares que estructuraban la circulación por todo el recinto.

Figura 2: Plan Director de la Expo'92.



Propuesta de Julio Cano Lasso, 1986

La planificación paisajística otorgó gran protagonismo a los espacios abiertos y verdes, como muestra la Figura 3, tanto por criterios estéticos como climáticos. Se trazaron cinco amplias avenidas arboladas en la Zona Internacional, equipadas con largas pérgolas y toldos ligeros para producir sombra, alineaciones de fuentes ornamentales, escenarios al aire libre para espectáculos, y numerosas obras de arte público integradas en el entorno. Más allá de los

pabellones, el recinto ofrecía parques y paseos sombreados que invitaban al esparcimiento. Un sistema interno de transporte con monorraíl, telecabinas, trenes ecológicos y barcos facilitaba la movilidad de los visitantes por estas áreas, mientras que varios puentes icónicos conectaban la isla con la ciudad. Incluso el mobiliario urbano (farolas, bancos, papeleras y señalética) fue diseñado ex profeso, contribuyendo a unificar visualmente la gran diversidad de arquitecturas de la Expo'92.

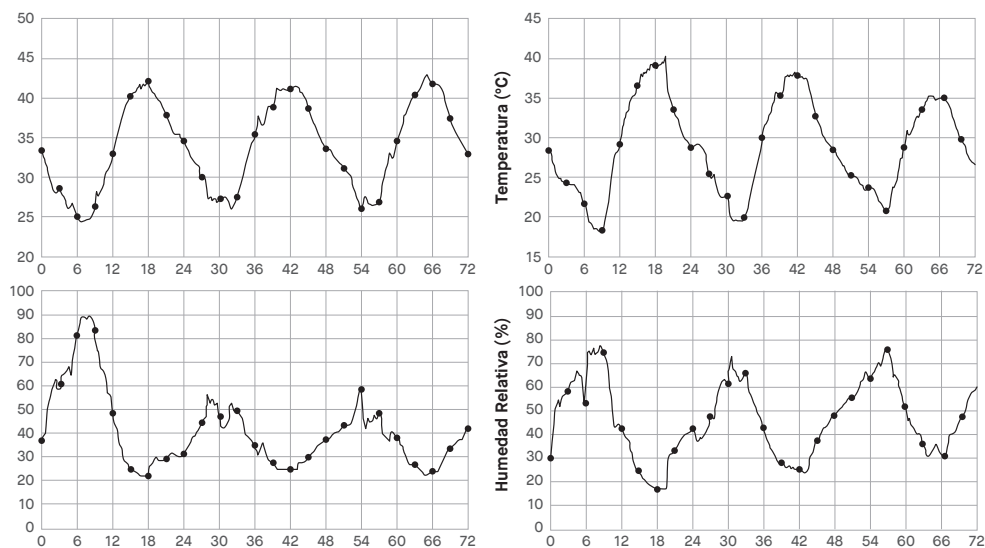
Figura 3: Vista aérea del recinto de la Expo'92.



La Expo'92 tuvo lugar durante la época más calurosa del año (finales de primavera y verano). En efecto, los meses de junio a septiembre son estadísticamente los de mayor rigor térmico en la región, como ejemplifica la Figura 4. El clima en Sevilla se caracteriza por temperaturas muy elevadas en verano: aproximadamente el 10% de las horas entre junio y septiembre superan los 38 °C. Las máximas absolutas históricas han alcanzado hasta 45 °C, uno de los valores más altos registrados en cualquier capital europea para la época.

La oscilación térmica diaria es amplia, con diferencias promedio de 18°C entre el día y la noche (llegando a 22–23 °C en jornadas extremas), lo que significa que tras un mediodía tórrido las madrugadas suelen ser relativamente frescas. La humedad relativa estival en Sevilla es moderada-seca, con 40 °C de temperatura ambiental típica a media tarde y una humedad relativa de apenas un 25–30% . Esta sequedad del aire favorece la efectividad del enfriamiento por evaporación (el termómetro de bulbo húmedo puede bajar teóricamente hasta ~ 24 °C en esas condiciones). El viento dominante en verano es la brisa del suroeste, de origen atlántico: durante el día suele intensificarse hasta unos 4 m/s de velocidad media a media tarde, mientras que al amanecer y en la noche prevalecen condiciones casi calmas. Bajo cielos despejados, la radiación solar alcanza valores muy altos (próximos al máximo teórico para la latitud de Sevilla en pleno verano), contribuyendo significativamente a la carga térmica que reciben las superficies expuestas, según datos obtenidos por los investigadores.

Figura 4: Temperatura y humedad exterior durante la Expo'92. Evolución por horas.



Izquierda: Día extremo (del 4 al 6 de agosto de 1992).

Derecha: Día promedio (del 4 al 6 de septiembre de 1992).

El recinto, emplazado entre dos brazos del río Guadalquivir (la dársena histórica al este y la Corta de la Cartuja al oeste), contaba con ciertos atenuantes microclimáticos naturales derivados de su entorno. La presencia de agua en sus bordes y del gran lago central (16 Ha) introducía un efecto termorregulador moderado, enfriando ligeramente el aire circundante por evaporación y brisas locales. Además, se plantaron miles de árboles y vegetación en parques y alineaciones que aportaban sombra adicional y transpiración refrescante. Por otra parte, se eliminaron focos de calor antropogénico (Montero Gutiérrez *et al.*, 2025a) dentro del recinto, restringiéndose casi totalmente el tráfico de vehículos de combustión, y prohibiéndose que los sistemas de los pabellones expulsaran directamente aire caliente al exterior. En su lugar, los equipos de refrigeración usaban intercambiadores con agua de río (en un circuito que tomaba agua por un brazo del Guadalquivir y la retornaba por el otro) para disipar el calor de condensación lejos del ambiente. El conjunto de estas medidas evitó un pronunciado efecto «isla de calor» urbano (Romero Rodríguez *et al.*, 2022, 2023) en la isla de la Cartuja, manteniendo las condiciones ambientales del recinto (Álvarez Domínguez *et al.*, 2022), aproximadamente en línea con las del Aeropuerto de Sevilla, sin sobrecalentamiento añadido. No obstante, incluso sin penalizaciones térmicas adicionales, el confort climático diurno en los espacios abiertos de la Expo'92 estaba lejos de estar garantizado. Las temperaturas estivales locales, a menudo superiores a 35–40 °C al sol, podían provocar estrés térmico severo a la multitud de visitantes si no se actuaba al respecto (Romero García *et al.*, 2025). Los análisis previos mostraban claramente que, durante las horas centrales del día, las condiciones espontáneas en el recinto no serían compatibles con un uso confortable de las plazas y avenidas sin algún tipo de mitigación climática. En respuesta, la organización declaró prioritaria la implementación de un proyecto integral de acondicionamiento climático de los espacios exteriores, con el fin de mejorar las condiciones térmicas del recinto durante la Expo'92.

Por otro lado, el proyecto estuvo fuertemente condicionado por el marco cultural y climático andaluz, del cual tomó inspiración. Sevilla, con herencia tanto romana como andalusí, posee una rica tradición de adaptación arquitectónica al calor estival. De hecho, antes de la Expo'92 prácticamente el único precedente histórico de climatización pasiva de espacios públicos eran los recursos vernaculares empleados por los árabes en sus patios y jardines. Las

técnicas esenciales resultaban notablemente similares a las que el equipo proyectó: confinamiento o resguardo del espacio exterior (muros o cerramientos que bloqueasen el viento caliente y creasen sombra), cubiertas vegetales o pérgolas con enredaderas que tamizasen la radiación solar, abundante presencia de agua en movimiento (fuentes, albercas y surtidores) para enfriar y humidificar ligeramente el aire, y uso de materiales de alta inercia o colores claros (pavimentos que absorbiesen poco calor y fachadas encaladas). Estas estrategias tradicionales, además del efecto psicológico positivo del agua y la vegetación en un entorno urbano, demostraban que era posible mitigar el calor extremo de forma pasiva. El diseño microclimático de la Expo'92 se planteó como una reinterpretación moderna de dichas soluciones: incorporar toldos inspirados en las carpas de fiestas locales, pérgolas y celosías recordando las verandas andaluzas, estanques, cascadas y pulverizadores de agua evocando los patios de los palacios árabes, todo ello adaptado a la escala masiva y al carácter temporal de la exposición, como sintetiza la Figura 5.

Asimismo, el proyecto hubo de respetar una serie de condicionantes funcionales, económicos y estéticos impuestos por el contexto de la Expo'92. En términos funcionales, las intervenciones no debían entorpecer el uso principal del recinto, como muestra la Figura 5: las estructuras de sombra no podían bloquear circulaciones ni vistas importantes, el aporte de agua no debía inundar ni causar resbalones en las vías, y cualquier sistema añadido debía ser seguro, de bajo mantenimiento y compatible con la logística del evento. Los criterios económicos también acotaron el alcance de las soluciones: se disponía de un presupuesto limitado dentro del conjunto de gastos, por lo que se privilegiaron medidas pasivas de costo razonable frente a opciones de climatización activa extensiva. Adicionalmente, las soluciones debían ser reversibles o reutilizables tras el evento, al ser instalaciones temporales en su mayoría, lo que limitó inversiones en infraestructuras permanentes costosas. Finalmente, desde el punto de vista estético y conceptual, el acondicionamiento climático debía integrarse armónicamente en el lenguaje arquitectónico vanguardista de la Expo'92. La imagen futurista y tecnológica de muchos pabellones no debía verse comprometida por elementos añadidos discordantes. Por el contrario, estos pasaron a formar parte del diseño escenográfico general. En general, las soluciones adoptadas representaron un compromiso entre las demandas urbanísticas/arquitectónicas y las necesidades de control

climático, respetando a la vez las restricciones funcionales y presupuestarias del proyecto. La colaboración constante entre ingenieros y arquitectos desde las fases conceptuales fue crucial para asegurar este equilibrio.

Figura 5: Integración del proyecto bioclimático en la Expo'92.



Pabellón de México desde la Avenida del Agua.

El enfoque para acondicionar térmicamente espacios exteriores difería de manera sustancial del de una climatización interior convencional, lo cual influyó en la metodología aplicada. En un edificio cerrado, el confort térmico se garantiza principalmente controlando la temperatura del aire interior (y en menor medida la humedad), aislándolo del ambiente exterior. De hecho, en proyectos arquitectónicos típicos, el confort aparece al final del proceso, al dimensionar los equipos de acondicionamiento necesarios para mantener una temperatura de consigna fija en las estancias. En cambio, en un espacio exterior el problema es mucho más complejo: interviene un número mayor de variables ambientales, con una variabilidad y combinaciones difíciles de controlar por completo. Con independencia del control de la temperatura del aire, la temperatura radiante de las superficies circundantes en exteriores

puede diferir ampliamente de la del aire: bajo el sol, un toldo metálico oscuro puede alcanzar ~ 60 °C, mientras que una cascada de agua cercana se mantiene a ~ 25 °C, coexistiendo en un mismo espacio abierto. Asimismo, el viento influye en la sensación térmica de forma variable (refrescando cuando son brisas moderadas, pero aportando calor cuando arrastran aire recalentado del exterior). La humedad, el tipo de suelo y hasta la densidad de personas alteran también el balance térmico.

En exteriores, por tanto, no existe la posibilidad de fijar y mantener uniformemente parámetros de confort como en un interior con climatización mecánica. El objetivo es más bien reducir al máximo las cargas de calor sobre el individuo: bloquear o filtrar la radiación solar excesiva, mitigar la absorción de calor en el entorno inmediato, fomentar corrientes de aire fresco y, si es posible, rebajar algunos grados la temperatura del aire mediante medios naturales como la evaporación. Todo esto debía lograrse desde el diseño urbanístico y arquitectónico mismo, antes que mediante máquinas de aire acondicionado que, al aire libre, serían ineficaces. Cabe destacar también una diferencia metodológica: mientras que en espacios interiores el confort térmico puede evaluarse a posteriori (una vez diseñado el edificio, se comprueba si la climatización alcanza la meta deseada), en espacios exteriores el confort debe considerarse desde el inicio del proceso de diseño. En el caso de la Expo'92, los criterios de confort bioclimático guiaron la planificación de las plazas y avenidas desde las primeras etapas de proyecto, condicionando decisiones de forma, materiales y organización espacial.

La multiplicidad de factores involucrados generaba, a su vez, mayores incertidumbres y decisiones de diseño complejas. Para afrontarlo de manera rigurosa, el equipo desarrolló un modelo cuantitativo de confort térmico exterior que permitiera estimar la influencia relativa de cada variable ambiental y de cada medida de mitigación propuesta. Este modelo integral de confort (basado en balances de energía en el cuerpo humano considerando radiación, convección y evaporación) sirvió como herramienta para diseñar eficientemente las intervenciones orientadas al acondicionamiento climático (Monge Palma *et al.*, 2025b). Mediante simulaciones paramétricas, se pudo identificar qué factores tenían mayor impacto (por ejemplo, se cuantificó que la sombra sobre las personas reducía más la carga térmica que intentar enfriar grandes volúmenes de aire) y así establecer criterios generales de diseño para los es-

pacios exteriores. En resumen, a diferencia de un interior donde el control climático es directo y tecnológico, en exteriores el proyecto se apoyó en un diseño climático integral: combinar elementos arquitectónicos, paisajísticos y tecnológicos para modular el microclima de forma natural y alcanzar condiciones de confort aceptables de manera sostenible, como muestra la Figura 6.

Figura 6: Elementos para el control climático de espacios abiertos en la Expo'92.



2. Objetivos

Comparando las exigencias del evento (recintos exteriores concurridos durante todo el día) con el clima estival de la ciudad de Sevilla, resultaba evidente la necesidad de un tratamiento microclimático que posibilitara el pleno uso funcional de los espacios abiertos. La habilidad de las plazas, calles y áreas al aire libre para cumplir su función, acoger cómodamente a cientos de miles de personas cada día (Romero García *et al.*, 2025), estaba directamente ligada a lograr unas condiciones térmicas aceptables pese al calor extremo. En este contexto, el objetivo general del proyecto consistió en controlar climáticamente los espacios abiertos, de forma que se consiguiese un entorno confortable para los visitantes durante su visita a la Expo'92. Por tanto, se buscaba proveer alivio climático suficiente (mediante sombra, refrigeración evaporativa y otras técnicas pasivas/activas) para que las actividades previstas al aire libre (colas para acceso a los pabellones, zonas de espera, espectáculos y paseos entre pabellones) pudieran desarrollarse con un nivel de confort razonable. Adicionalmente, se establecieron unos objetivos específicos técnico-científicos que guiaron el trabajo:

- Identificar, entender y evaluar los fenómenos fundamentales de transferencia de calor y masa en espacios abiertos responsables de las condiciones climáticas locales (radiación solar, convección, evaporación, efectos de inercia térmica, etc.).
- Desarrollar elementos y sistemas capaces de modificar dichas condiciones climáticas, es decir, prototipos de dispositivos o intervenciones que generasen enfriamiento o sombra de manera eficaz.
- Elaborar guías de diseño con criterios que permitieran a urbanistas, arquitectos y paisajistas incorporar consideraciones de confort térmico desde las primeras fases de diseño de los espacios abiertos (Palomo Amores *et al.*, 2025a).
- Desarrollar herramientas de cálculo (modelos y simulaciones) que posibilitaran optimizar el dimensionamiento de los diferentes elementos y sistemas propuestos antes de su construcción (Palomo Amores *et al.*, 2025b).

- Establecer una metodología de trabajo interdisciplinar que permitiera la interacción fluida con los proyectistas arquitectónicos y facilitara la toma de decisiones conjunta durante las distintas etapas del diseño.

Desde el punto de vista operativo, la propuesta de climatización distinguió diferentes tipos de espacios exteriores según su uso, para focalizar esfuerzos donde más se requería. Se clasificaron las áreas al aire libre en tres categorías: zonas de paso (ámbitos de circulación o tránsito peatonal), zonas de estancia (lugares de permanencia prolongada, como plazas, miradores, áreas de descanso) y zonas adyacentes (espacios colindantes a pabellones o de uso ocasional). Cada tipología implicaba distintos niveles de requerimiento de confort térmico y, por tanto, distintos criterios de intervención. En las zonas de paso se buscaba aliviar el calor sin entorpecer el flujo continuo de visitantes. En las zonas de estancia, donde la gente se detendría más tiempo, se plantearon las actuaciones más intensivas, mientras que en áreas adyacentes se toleraron condiciones más cercanas a las naturales. Siguiendo esta lógica, el proyecto no intentó climatizar integralmente todo el recinto exterior, algo inviable técnica y económicamente pero tampoco necesario en términos de confort. En su lugar, se priorizaron las zonas clave de alta densidad de visitantes, concentrando allí las soluciones más efectivas. Concretamente, se abordaron de forma exhaustiva las 5 avenidas principales y El Palenque, sede de espectáculos multitudinarios. Otras actuaciones más puntuales se aplicaron en espacios abiertos singulares (entradas, áreas de restaurantes al aire libre, etc.), mientras que extensiones poco concurridas permanecieron básicamente sin tratamiento especial. En suma, el criterio de intensidad fue proporcionar el máximo acondicionamiento climático allí donde el público más lo necesitaba, logrando un equilibrio entre confort y viabilidad práctica (Montero Gutiérrez *et al.*, 2024a).

3. Metodología

El desarrollo del proyecto de climatización de la Expo'92 se abordó de forma multidisciplinar y escalonada, abarcando fases de investigación básica, modelización computacional, experimentación piloto, diseño aplicado y verificación in situ, como resume la Figura 7.

Figura 7: Plan de trabajo del proyecto bioclimático en la Expo'92.

Actividades	1988	1989	1990	1991	1992
INVESTIGACIÓN					
- Modelización					
- Diseño de Experimentación					
- Experimentación					
- Validación					
- Análisis de Sensibilidad					
APLICACIÓN					
- Análisis de los diseños y Control Solar					
- Simulación y Prediseño de Sistemas					
- Proyectos de ingeniería					
EVALUACIÓN					
- Prueba general					
- Operación Real					

A continuación, se describe la metodología seguida en cada una de ellas:

1. Investigación preliminar (1988–1989): Dado el carácter pionero del encargo, al inicio no existían referentes directos ni guías establecidas sobre cómo climatizar un espacio abierto de tal magnitud. Por ello, los primeros esfuerzos se centraron en comprender los fundamentos teóricos del microclima urbano en climas cálidos. El equipo recopiló información meteorológica histórica de Sevilla (temperaturas extremas, distribuciones horario por horario, balances de radiación solar, etc.) y analizó estudios previos sobre confort exterior y arquitectura bioclimática. Se identificaron y cuantificaron los procesos físicos clave: radiación solar y sombreadamiento, intercambios convectivos entre aire y superficies, evaporación de agua y sus efectos refrigerantes, capacidad de enfriamiento nocturno del terreno por su inercia térmica, entre otros. Esta fase investigativa sentó las bases conceptuales, permitiendo formular hipótesis de diseño. La ausencia de realizaciones anteriores de similar escala obligó a que esta etapa tuviera un marcado énfasis científico, con consultas bibliográficas y cálculos teóricos exhaustivos.

2. Modelización y desarrollo de herramientas de simulación: Para poder predecir el comportamiento combinado de múltiples estrategias de enfriamiento pasivo, el equipo desarrolló modelos matemáticos de cada elemento y luego los integró en una herramienta computacional unificada. Esta plataforma de simulación, denominada Simulation of Passive and Active Systems (S3PAS), fue elaborada por el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla, con el apoyo del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). S3PAS permitía interconectar los submodelos individuales y evaluar su efecto conjunto en un espacio abierto determinado. En esencia, S3PAS modelaba el intercambio térmico y aeráulico entre el aire de la zona tratada (enfriada/sombreada) y los espacios adyacentes no tratados, calculando las variables climáticas resultantes con y sin intervención. El programa incorporó módulos para simular pérgolas (sombra y flujo de aire bajo ellas), láminas de agua y fuentes (evaporación y enfriamiento evaporativo), suelos y materiales (almacenamiento y liberación de calor), e incluso posibles sistemas activos de refuerzo. Esta herramienta de cálculo resultó crucial para dimensionar los distintos elementos y predecir el comportamiento global antes de la implementación real. Por ejemplo, gracias a S3PAS se pudo estimar cuántos metros cuadrados de toldos eran necesarios en cada avenida para reducir la temperatura radiante media a niveles confortables, o cuánta agua debían evaporar las fuentes por hora para lograr un descenso apreciable de la temperatura del aire. La disponibilidad de este modelo integrado dio rigor cuantitativo al diseño climático, reduciendo la dependencia en la intuición y permitiendo optimizar las soluciones en papel.
3. Experimentación y validación (1990–1991): Una vez desarrollados los modelos, se procedió a validar sus resultados mediante pruebas experimentales a diferentes escalas. Se construyeron y ensayaron prototipos de algunos sistemas propuestos antes de su instalación masiva en el recinto. Se instaló una torre de enfriamiento evaporativo experimental (torre de la Rotonda) para comprobar cuánto podía bajar la temperatura del aire al hacerlo pasar por una columna de relleno húmedo, ensayo con el cual se calibró el modelo de torres frías. También se instrumenta-

ron tramos piloto de pérgolas con vegetación y pulverizadores de agua para medir en campo la reducción de temperatura y el aumento de humedad que generaban, comparando esos datos con las predicciones de S3PAS, poniendo en práctica los límites operativos de los sistemas y sirviendo para ajustar los parámetros de diseño. En general, la etapa experimental proporcionó datos valiosos que retroalimentaron los modelos y dieron confianza en la viabilidad real de las estrategias de climatización antes de su despliegue definitivo.

4. Proceso de diseño e integración arquitectónica: En paralelo a las simulaciones y pruebas, se llevó a cabo el diseño detallado de las intervenciones microclimáticas sobre el plano del recinto, en continua interacción con los proyectistas arquitectónicos. Esta colaboración temprana garantizó que las soluciones propuestas fueran asumidas e incorporadas en los proyectos de urbanización de la Expo'92 en tiempo y forma (Álvarez Domínguez *et al.*, 2022). El proceso práctico de diseño siguió una secuencia iterativa de decisiones. Primero, se realizó un análisis global del diseño inicial del recinto para identificar la funcionalidad de las diferentes zonas y clasificarlas en zonas de paso, estancia y transiciones. Para cada zona prioritaria, se evaluaron las condiciones de confort requeridas en las horas pico de calor y se determinó el nivel de intervención necesario. Seguidamente, se analizaron las estructuras de sombra previstas originalmente (pórticos, lonas tensadas y vegetación proyectada) en cuanto a tamaño, altura, forma, material y color. Este paso buscó asegurar una sombra de buena calidad, con baja transmitancia solar para bloquear la mayor fracción de radiación posible y a la vez evitar que la propia estructura de sombra se recalentase en exceso y rerradiase calor hacia abajo. Con frecuencia fue posible mejorar el diseño inicial con pequeños cambios. En algunos casos, sin embargo, el análisis reveló la necesidad de un replanteamiento completo de la solución de cubierta para conseguir un comportamiento climático aceptable. Estas recomendaciones se hacían siempre en consenso con los arquitectos y urbanistas, buscando un compromiso entre la visión estética original y las mejoras climáticas propuestas. A continuación, para aquellas zonas críticas (en especial zonas de estancia) donde la sombra por sí sola no garantizaba el confort

en las horas más cálidas, se planificaron actuaciones complementarias con agua. El equipo evaluó la incorporación de elementos evaporativos cercanos a las áreas ocupadas, como la adición de láminas de agua poco profundas (estanques decorativos), cortinas o paredes de agua en un lateral expuesto al viento caliente, canales con circulación de agua, o grupos de fuentes atomizadoras distribuidas estratégicamente. Estas masas de agua funcionaron como «superficies frías» naturales: absorbiendo calor del aire al evaporarse y además reduciendo la temperatura superficial del entorno. Mediante las simulaciones se estimó cuánto enfriamiento aportaría cada recurso hídrico. Con esos datos, se definieron las dimensiones y caudales óptimos. Estas soluciones se integraron procurando que también embellecieran el espacio público y reforzaran la temática paisajística. Finalmente, si tras aplicar sombra y agua en una zona de estancia aún se preveía un nivel de confort insuficiente en las peores condiciones, se consideró la opción de enfriar directamente el aire del ambiente. Esta fue la medida más extrema y solo se adoptó en puntos muy específicos y concurridos. Consistió en implementar sistemas de enfriamiento evaporativo forzado, enfriando el aire mediante la evaporación activa de agua y distribuyendo ese aire fresco entre la gente. Para ello, se estudiaron varios métodos: desde nebulizadores de alta presión colocados en pérgolas (que expulsaban microgotas de agua al aire, enfriándolo) hasta torres de enfriamiento pasivo (estructuras verticales donde el aire caliente entraba por arriba, se humidificaba al caer por su interior agua pulverizada, y salía enfriado por la base). La elección dependió de las características de cada espacio y de las posibilidades de integrar dichos sistemas sin afectar la estética ni el flujo. Un aspecto crucial fue evaluar el grado de confinamiento de cada zona y si era posible mejorarlo. Solo en entornos algo confinados el aire enfriado sería aprovechable antes de diluirse con el aire exterior. Con estos condicionantes, se dimensionó la cantidad de aire frío a suministrar en cada caso bajo dos escenarios: en condiciones de calma (sin viento) y con el viento dominante presente. Se definieron también estrategias de control y horarios de funcionamiento para optimizar el uso de agua y energía. Cabe señalar que esta fase del diseño, introduciendo equipos activos de enfriamiento exterior, fue muy delicada, pues implicaba cos-

tes adicionales y una mayor complejidad operativa. Por ello se limitó a situaciones donde las otras medidas pasivas resultaban claramente insuficientes. Todo el proceso de diseño descrito supuso una interacción constante entre el equipo técnico de climatización y los autores de los proyectos arquitectónicos y urbanísticos. En la inmensa mayoría de los casos se logró consenso en las soluciones finales, que fueron incorporadas a los planos constructivos de la Expo'92. Las soluciones resultantes representaron compromisos cuidados: mantenían las intenciones urbanísticas y estéticas originales, a la vez que alcanzaban mejoras microclimáticas sustanciales, dentro de las restricciones funcionales y económicas impuestas. De esta manera, el proyecto de climatización quedó completamente integrado en el diseño general del recinto antes del inicio de las obras principales.

5. Montaje e implementación (1991–1992): Con el diseño terminado y validado, se procedió a la construcción e instalación de las soluciones en el propio recinto de la Expo'92 durante 1991 e inicios de 1992. Este paso involucró la fabricación de elementos a medida (pérgolas modulares, toldos especiales con materiales reflectantes, sistemas de bombeo y tuberías para fuentes y nebulizadores) y su montaje coordinado con el resto de obras. Se habilitaron infraestructuras de soporte, como depósitos de agua filtrada para alimentar los cientos de surtidores y redes de tuberías soterradas a lo largo de las avenidas. Asimismo, se implementaron sistemas de control centralizado para regular las bombas de agua y los nebulizadores según horarios y condiciones meteorológicas. Durante esta fase se debieron solventar retos prácticos, como garantizar la calidad del agua para evitar obstrucciones o malos olores, minimizar el consumo y desperdicio (recirculando el agua siempre que fue posible) y asegurar la fiabilidad de los equipos ante un uso intensivo diario por seis meses. Para la inauguración de la exposición en abril de 1992, el sistema de microclimatización estaba operativa en todos los puntos clave (Álvarez Domínguez *et al.*, 2022): las pérgolas proveían sombra sobre kilómetros de recorrido peatonal, docenas de fuentes y cascadas estaban en funcionamiento, y la emblemática Esfera Bioclimática y otros pulverizadores enfriaban el aire en las áreas de mayor concentración de visitantes.

6. Monitoreo y evaluación de resultados: Con el evento en marcha, se activó un completo programa de seguimiento para medir la efectividad real de las medidas implementadas y extraer conocimiento para a futuro. Se desplegó una red de más de 300 sensores conectados a un sistema central de adquisición de datos, que registraban en continuo las variables ambientales clave en diversas ubicaciones del recinto. Se midieron temperaturas del aire a distintas alturas en avenidas con y sin pérgola, temperaturas de superficie en suelos sombreados y soleados, humedades relativas cercanas a fuentes funcionando o apagadas, velocidades de aire en puntos con diferente grado de abrigo, e índices de radiación solar recibida. Adicionalmente, se realizaron encuestas y observaciones sobre la sensación térmica de los visitantes en varios momentos del día y lugares. Toda esta base de datos de alto detalle y calidad permitió conocer con rigor cómo se comportaron en condiciones reales las diversas aplicaciones de control climático desarrolladas. Tras la clausura de la Expo'92, con apoyo de las instituciones involucradas, el equipo llevó a cabo durante 1993–94 un análisis técnico exhaustivo de los datos recopilados. Los resultados sirvieron para validar las predicciones del modelo S3PAS, afinándolo donde fue necesario, y para evaluar la eficacia concreta de cada tipo de intervención. En general, se constató que las estrategias pasivas implementadas proporcionaron reducciones significativas de temperatura radiante y estrés térmico en las zonas intervenidas, cumpliendo los objetivos planteados. Asimismo, se identificaron las limitaciones. Las lecciones aprendidas se han aplicado en años posteriores al diseño climático de espacios públicos en climas cálidos y se consideran un aporte pionero en la bioclimatización urbana a gran escala. En última instancia, la experiencia de la Expo'92 demostró la viabilidad de combinar tradición y tecnología para hacer más habitables los espacios abiertos en verano, conocimiento que cobra aún mayor relevancia ante los desafíos del cambio climático en las ciudades del siglo XXI.

4. Herramienta de cálculo: Confort térmico

El acondicionamiento climático de espacios exteriores presenta características muy específicas respecto al acondicionamiento de espacios interiores (Palomo Amores *et al.*, 2025b). Al comparar ambos desde el punto de vista del confort térmico (Coccolo *et al.*, 2016), se observan diferencias significativas en varios aspectos fundamentales, como el número de variables que intervienen y la influencia relativa de cada una, el grado de manipulación posible o admisible de cada variable, y los niveles de confort requeridos en cada caso. Existe además una diferencia importante desde un punto de vista metodológico: mientras que en un espacio interior es posible garantizar el confort térmico actuando casi exclusivamente sobre las condiciones termo- higrométricas del aire ambiente, en espacios exteriores las situaciones son más variadas y el número de posibles intervenciones se multiplica. Esta multiplicidad de opciones genera problemas de decisión debido al desconocimiento inicial de la influencia relativa de los distintos factores que afectan al confort. Por lo tanto, se hizo necesario disponer de una herramienta de cálculo que, mediante la cuantificación de esas influencias relativas, permitiera diseñar de forma eficiente las distintas intervenciones orientadas al acondicionamiento climático de espacios exteriores (Palomo Amores *et al.*, 2025b). Dicha herramienta es el modelo de confort térmico, cuya utilidad primaria fue establecer criterios generales de acondicionamiento para espacios exteriores, a partir del orden de magnitud de los diversos factores que inciden sobre el confort térmico. El uso del modelo de confort se realizó en términos relativos, nunca en valores absolutos. El objetivo final no era determinar de manera aislada si una persona en un espacio abierto se sentía confortable o no en una situación dada, sino conocer, dentro de un conjunto de posibles soluciones, cuál presentaba un mayor nivel de confort relativo. Por ello, el modelo de confort se utilizó en las diferentes etapas del proceso de diseño de los espacios abiertos. En particular, fue aplicado para:

- Evaluación de una acción específica: cuantificar el efecto de una intervención concreta en el confort.
- Estudio comparativo de diferentes componentes: ayudar a elegir, por ejemplo, entre varias opciones de diseño (formas, materiales, dimensiones) comparando su impacto en el confort.

- Diseño detallado de espacios exteriores: apoyar la definición de parámetros de diseño mediante gráficas de isoconfort.
- Evaluación del comportamiento de espacios abiertos construidos: predecir o medir el nivel de confort obtenido en el espacio real y contrastarlo con los objetivos de diseño (Palomo Amores *et al.*, 2025a).

Un individuo se encuentra en situación de confort térmico cuando no es capaz de precisar si preferiría un ambiente más frío o más caliente. Por tanto, la sensación térmica es «neutra», sin necesidad de variación. Desde un punto de vista estrictamente energético, la condición fundamental para estar en confort térmico es que el balance de energía del individuo (resultante de todos los flujos de calor entre el cuerpo humano y el entorno) sea nulo. Si el ambiente exterior no produce un balance térmico nulo, entran en funcionamiento los mecanismos de termorregulación del organismo para compensar el exceso o déficit de calor. En una primera fase, estos mecanismos actúan para contrarrestar el desequilibrio y lograr un balance nulo, manteniendo la temperatura de los tejidos internos del cuerpo en un valor casi constante alrededor de 37 °C. Cuando dichos mecanismos no logran anular el desequilibrio térmico, el cuerpo entra en una fase de calentamiento o enfriamiento progresivo.

Durante la Expo'92, la climatología veraniega extrema de Sevilla llevó a los visitantes en espacios abiertos a operar en la zona de termorregulación contra el calor. En tales condiciones, el cuerpo humano segrega sudor y su evaporación constituye el flujo de calor que equilibra el balance térmico (Sánchez Ramos *et al.*, 2022), evitando que el organismo alcance una situación crítica de sobrecalentamiento. Sin embargo, a pesar de que el balance térmico pueda equilibrarse gracias a la sudoración, una transpiración excesiva genera malestar o disconfort, además del esfuerzo fisiológico que supone segregar sudor, provoca la incomodidad adicional de la humedad en la piel y la ropa. Para mitigar esta situación y evitar una sudoración excesiva, es preciso conocer de antemano sobre qué parámetros conviene actuar. El análisis del balance térmico del cuerpo humano permite identificar los factores más relevantes y, al mismo tiempo, proporciona criterios para intervenir sobre ellos de forma eficaz.

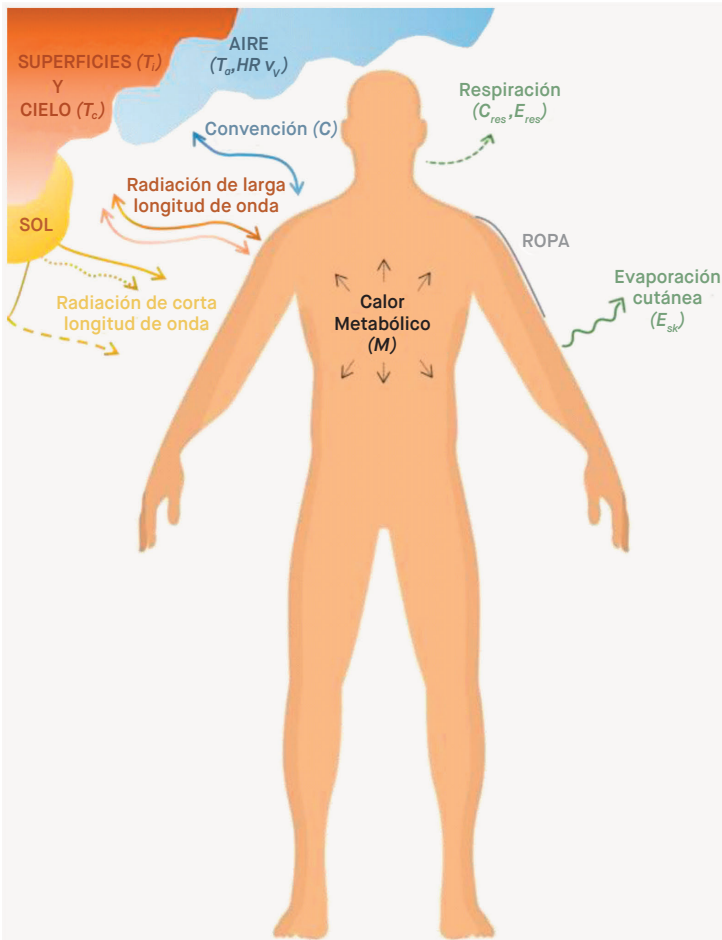
La descripción matemática del balance de energía en el cuerpo humano es una combinación de relaciones racionales y empíricas que aproximan el

comportamiento real del cuerpo (Enescu, 2019; Palomo Amores *et al.*, 2025a). Se emplean las teorías de transferencia de calor para describir los mecanismos de intercambio sensible y latente, y se utilizan expresiones empíricas para calcular coeficientes de intercambio y parámetros fisiológicos que son difíciles de estimar teóricamente. Aunque la generación y transferencia de calor no son uniformes en todo el organismo, para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería es suficiente considerar el cuerpo humano como un sólido uniforme (hipótesis adoptada en el modelo desarrollado). La energía metabólica total producida en el cuerpo (M) es la energía requerida para la actividad del individuo. Parte de esa energía metabólica se emplea en realizar trabajo mecánico (W). El resto, dado por la diferencia ($M-W$), constituye una generación interna de calor que debe ser evacuada al exterior por diversos mecanismos para garantizar un balance térmico nulo y así mantener constante la temperatura interna del organismo. Los mecanismos de disipación de calor del cuerpo humano hacia el entorno, como resume la Figura 8, son los siguientes:

- Convección (C): transferencia de calor debida a la diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo y el aire ambiente.
- Radiación de onda larga (ΔR_L): intercambio radiativo de gran longitud de onda entre el cuerpo y las superficies circundantes (radiación térmica infrarroja).
- Radiación de onda corta absorbida (ΔR_c): radiación solar de onda corta recibida por el individuo en un espacio abierto; siempre constituye una ganancia de calor para el organismo.
- Pérdidas respiratorias sensibles (C_{res}) y latentes (E_{res}): pérdidas de calor asociadas al aire respirado, debido a la diferencia de temperatura (sensible) y de humedad (latente) entre el aire inhalado y exhalado.
- Evaporación en la piel (E_{sk}): flujo de calor latente debido a la evaporación de agua a través de la piel. Consta siempre de un término difusivo constante (E_{dif}), debido a la transpiración insensible por la humedad permanente de la piel, más el término correspondiente a la evaporación del sudor segregado activamente (E_{rsw}) cuando el cuerpo activa la

sudoración como mecanismo de termorregulación contra el calor. Este último término (evaporación regulatoria del sudor) se calcula por cierre de balance, obteniendo en cada situación la cantidad de sudor que debe evaporarse para equilibrar el balance térmico.

Figura 8: Intercambios de calor y masa entre la persona y el entorno próximo.



La ecuación de balance térmico (Ecuación 1) que permite calcular la energía evacuada por sudoración regulatoria es:

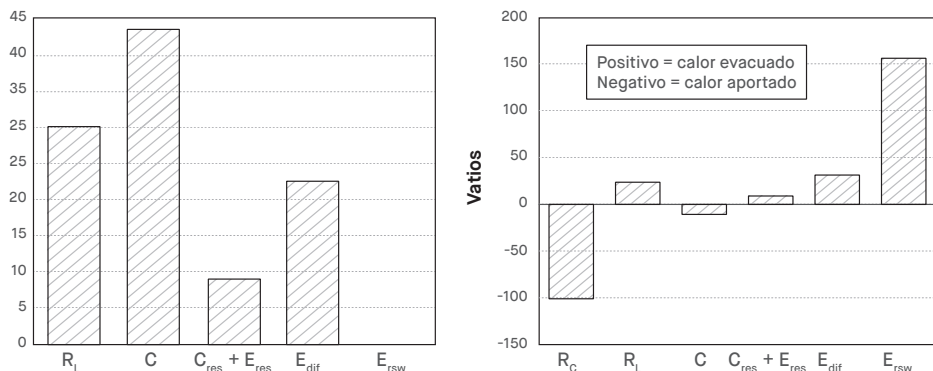
$$E_{rsw} = (M - W) - (C_{res} + E_{res}) - (C + \Delta R_L + E_{dif}) + \Delta R_c \quad (1)$$

Donde cada término se corresponde con los flujos definidos anteriormente. La energía E_{rs} calculada mediante esta ecuación, expresada en gramos de sudor evaporado por hora, constituye un índice del nivel de confort térmico para el individuo analizado: cuanto menor sea la necesidad de sudoración regulatoria, mayor el confort. Si bien una situación confortable se asocia con la ausencia total de sudoración regulatoria, en la práctica del diseño de diferentes espacios abiertos se puede relajar dicha condición, admitiendo (según la intensidad de acondicionamiento requerida) ciertos niveles bajos de sudoración.

En el caso de la Expo'92, se establecieron criterios de diseño que permitían cierta sudoración máxima admisible: para zonas de tránsito o paso se fijó una tasa de sudoración no mayor de aproximadamente 90 g/h (intensidad de acondicionamiento media), mientras que en zonas de estancia o descanso el límite se estableció por debajo de 60 g/h (intensidad de acondicionamiento alta). En ambos casos, se asumió que todo el sudor generado a ese ritmo se evaporaría completamente (no habría sudor goteando), de modo que la sensación térmica aún fuese aceptablemente confortable bajo esas condiciones. Otro índice útil para medir el nivel de confort es la temperatura de sensación. Este índice se relaciona con una situación equivalente en un espacio interior (Enescu, 2019; Sánchez Ramos *et al.*, 2022). Se define temperatura de sensación como la temperatura del aire de un recinto cerrado ficticio (con 50% de humedad relativa, aire en reposo y sin radiación solar) que provocaría en un ocupante el mismo nivel de sudoración que la situación real analizada en el exterior. Por tanto, la temperatura de sensación traslada la experiencia de confort exterior a una referencia conocida de confort interior. Aplicando el modelo de confort a situaciones representativas, se pusieron de manifiesto las diferencias fundamentales entre el confort térmico en exteriores e interiores. A modo de ilustración, se analizaron dos escenarios típicos de verano para un clima como el de Sevilla: uno era un espacio interior climatizado y otro, un espacio exterior al aire libre. En ambos escenarios se supuso un individuo estándar con actividad sedentaria y vistiendo ropa ligera de verano. En cada escenario, se realizó un balance térmico del cuerpo humano. De la comparativa de estos flujos de calor, se desprenden las diferencias clave que afectan al confort en cada caso, como muestra la Figura 9:

- Caso interior: Se observa que todos los flujos de calor actúan como mecanismos de evacuación del calor producido por el metabolismo ($M-W$). El flujo más importante es el convectivo, que disipa aproximadamente un 40% del calor total producido. La radiación de onda larga hacia las superficies circundantes también representa una pérdida significativa (casi un 30% del total). Por su parte, la evaporación insensible a través de la piel (E_{dif}) supone casi un 20%, mientras que las pérdidas respiratorias ($C_{\text{res}} + E_{\text{res}}$) aportan alrededor de un 10%. Las pérdidas por sudoración regulatoria (E_{rsw}), que cierran el balance térmico, resultan prácticamente nulas.
- Caso exterior: En el balance térmico correspondiente a un espacio exterior sin acondicionar, los flujos han cambiado radicalmente, tanto en magnitud como en sentido (ganancia o pérdida para el cuerpo) con respecto al caso interior. En este escenario, además del calor metabólico, el cuerpo recibe una ganancia adicional muy importante debida a la radiación solar de onda corta incidente (ΔR_c), que en verano puede ser del mismo orden de magnitud que el metabolismo basal del individuo. Otro cambio notable es que los intercambios convectivo y radiante de onda larga son relativamente pequeños y, debido a que la temperatura del aire y superficies cercanas está mucho más próxima a la temperatura de la piel, ambos flujos invierten su signo: en lugar de disipar calor, aportan calor al cuerpo (por lo que el aire caliente del entorno y las superficies recalentadas calientan al individuo). Los términos de evaporación insensible de la piel y de pérdidas respiratorias cambian poco en términos absolutos. Sin embargo, disminuyen como porcentaje del total, ya que la cantidad total de calor a disipar es mucho mayor. Además, el mecanismo de sudoración regulatoria debe evacuar una cantidad de energía muy grande para poder cerrar el balance, siendo indispensable para evitar el sobrecalentamiento.

Figura 9: Intercambios de calor y masa entre la persona y el entorno próximo.



Izquierda: Flujos de calor sobre el cuerpo en espacios interiores. Derecha: Flujos de calor en espacios exteriores.

Considerando únicamente los términos del balance térmico del cuerpo humano, el confort en espacios exteriores debe abordarse con un enfoque muy diferente al confort en espacios interiores. Entre los aspectos diferenciales más importantes conviene resaltar los siguientes:

- Influencia de la radiación solar sobre el ocupante: En espacios interiores, los intercambios radiantes (tanto de onda corta como de larga) tienen una intensidad mucho menor en comparación con otros flujos de calor. Por el contrario, en el acondicionamiento de espacios exteriores la carga radiante solar no sólo está siempre presente sino que a menudo representa el mayor porcentaje de las ganancias de calor totales. En consecuencia, el bloqueo efectivo de la radiación solar es la medida más eficaz para mejorar el confort en exteriores.
- Influencia del intercambio convectivo (temperatura del aire): En la climatización de espacios interiores, la técnica más usual para lograr condiciones de confort consiste en controlar las condiciones termo-higrométricas del aire del local. Esto supone implícitamente que la transferencia convectiva entre ocupante y aire es el capítulo más importante del balance térmico. Incluso cuando en un interior aparecen efectos radiantes significativos, esto se compensa aumentando la capacidad convectiva de enfriamiento (mejorando la ventilación o bajando aún más la temperatura del aire). Sin

embargo, en el tratamiento de espacios exteriores la fracción convectiva no es el factor determinante del confort. Por tanto, las técnicas orientadas a reducir la temperatura del aire ambiente deben considerarse sólo después de haber agotado otras acciones más influyentes (especialmente las relacionadas con la radiación).

- c) Influencia de la velocidad del aire: En las técnicas convencionales de climatización interior se evitan las corrientes de aire molestas y la presencia de zonas muertas no ventiladas. En un espacio abierto, en cambio, es tolerable y deseable, sobre todo en situaciones cálidas, la presencia de velocidades de aire bastante mayores que las admitidas en interiores (Ruda Sarria *et al.*, 2025). Un flujo de aire más intenso favorece la evaporación del sudor (haciendo más efectiva la sudoración como mecanismo de enfriamiento) y aumenta el intercambio convectivo piel-aire, mejorando la disipación de calor. Además, si en un espacio abierto se emplean técnicas para reducir la temperatura del aire, es necesario contar con algún tipo de control sobre las entradas de aire no deseadas (aire exterior más caliente que pueda infiltrarse). De ahí que dotar al espacio a acondicionar de cierto grado de confinamiento o protección sea esencial para conseguir una reducción efectiva de la temperatura del aire en su interior.

Además de lo anterior, la funcionalidad de los espacios abiertos (su uso previsto) y el tiempo medio de permanencia de los visitantes en ellos proporcionan un índice de la intensidad de acondicionamiento requerida para cada caso. En la Expo'92, estos factores indicaron que la intensidad de acondicionamiento necesaria en los espacios abiertos sería mucho menor que la habitual en un espacio cerrado. Asimismo, desde un punto de vista psicológico, se observó que el visitante estaba dispuesto a aceptar cualquier mejora en las condiciones de confort exterior con respecto a lo que su sentido común le haría esperar respecto del clima local (condiciones extremas ya experimentadas a la intemperie). En conjunto, teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se concluyó que lo realista en espacios abiertos era atemperar o dulcificar el rigor climático exterior, atenuando las condiciones extremas, en lugar de alcanzar un grado de confort equiparable al de espacios interiores climatizados.

Retomando una situación de referencia típica en espacios abiertos no acondicionados, considerando los flujos de calor que experimentaría un in-