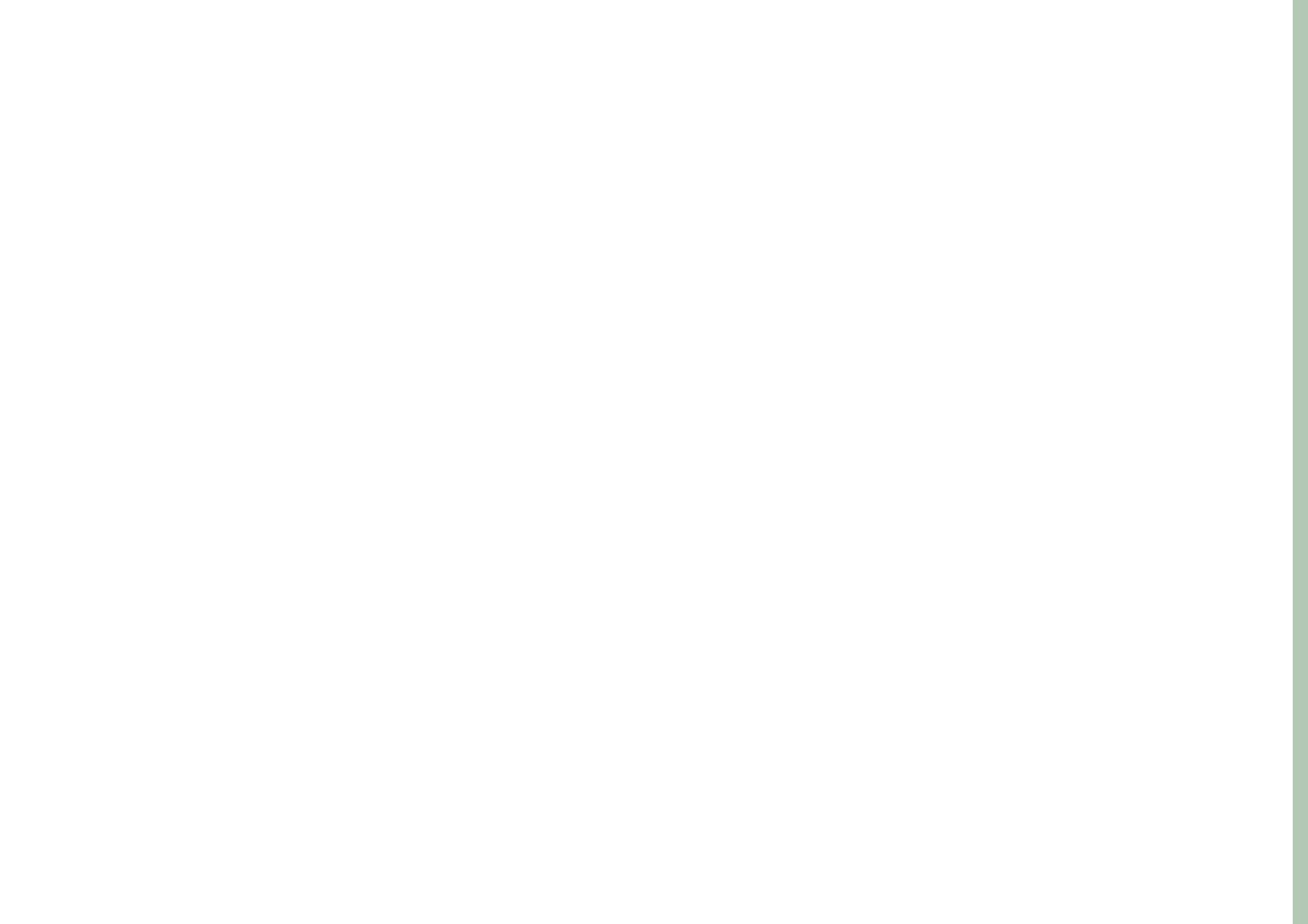


The cover features a central yellow rectangular box containing the title. The background is a collage of architectural photographs of modern buildings with balconies and large windows, interspersed with large green geometric shapes, including a large triangle on the left and a white square with a green border at the bottom left. At the top, there are two solid squares, one green and one black. At the bottom, there are horizontal bands of green and brown.

Manual para la selección y el uso de soluciones sostenibles de acondicionamiento pasivo. Es un documento que debe animar a la reflexión sobre los problemas que tiene actualmente el planeta debido al cambio climático y la superpoblación.



*“Dedicado a todos aquellos que dedican su vida a
cambiar el futuro y la vida de las personas.”*



MANUAL SOBRE DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE EDIFICIOS

LIFE ReNaturalNZEB

Manual sobre diseño bioclimático de edificios

Autores:

Fco. Javier Neila González

Coordinación:

Servicio de Arquitectura, Calidad y Eficiencia Energética

Fernando Babiano Gómez

Ana Belén Durán Serrano

Esther Gamero Ceballos-Zuñiga

Colaboradores:

Mónica Ruiz-Roso Luna. Arquitecta del Proyecto **Life ReNaturalNZEB**

Álvaro Rodríguez Martín. Diseño gráfico y Maquetación

Edita:

Consejería de Movilidad, Transporte y Vivienda

Avenida de las Comunidades, s/n

06800 Mérida

Mérida, marzo 2023

ISBN: 978-84-0951359-8

Depósito Legal: BA-00116-2023



El presente documento puede ser descargado gratuitamente en las siguientes URL's

SCAN ME



PDF



Saluda

Este manual sobre **arquitectura bioclimática** pretende ser una fuente más de conocimiento para crear espacios saludables tanto para las personas como para el medio ambiente a través de la **reducción del gasto energético y la huella de carbono**. Para ello, la arquitectura bioclimática centra su base de actuación en el diseño de edificaciones que tengan en cuenta las condiciones climáticas locales y recursos disponibles utilizando materiales naturales y energías renovables. Se trata, por tanto, de una **arquitectura que se adapta física y climáticamente al espacio en que se encuentra** para disminuir la huella ambiental.

Para conseguir que las edificaciones sean más sostenibles es preciso realizar cambios importantes que tengan en cuenta los materiales de construcción, la apuesta por **sistemas energéticos más eficientes** e incluso el impulso en la **rehabilitación de edificios**, priorizando las viviendas existentes frente a nuevas construcciones, evitando el impacto ambiental y de sostenibilidad asociado a la obra nueva. **La arquitectura bioclimática promueve que las construcciones respeten el medio ambiente** pero no hay que olvidar que contribuye a la protección del planeta, a la reducción de consumos, la optimización del ciclo de vida de los edificios y, sobretodo, a **mejorar la calidad de vida y la salud de las personas**.

La publicación se enmarca dentro del Proyecto **Life ReNatural NZEB** que ha ensayado y promovido el uso de materiales naturales, próximos y reciclados en tecnologías y soluciones constructivas para alcanzar **edificios de consumo de energía casi nulo con baja huella de carbono**, en España y Portugal. Acompañado de una inversión lo menos costosa posible, se trata de conseguir un consumo energético casi nulo, con una inversión casi nula para la ciudadanía; consiguiendo, en paralelo, abordar la lucha contra la pobreza energética en la edificación.

Avanzar en el **diseño bioclimático** de edificios es ahondar en la **apuesta de la Junta de Extremadura por luchar contra la pobreza energética y el cambio climático** trabajando en la sostenibilidad de todo el proceso edificatorio. El objetivo no es otro que nuestros pueblos y ciudades sean lugares más saludables y sostenibles, y, en definitiva, más habitables.

This manual on **bioclimatic architecture** aims to be a source of knowledge to create healthy spaces for people and the environment, **reducing energy expenditure and carbon footprint**. For this, bioclimatic architecture focuses on the design of buildings that consider local climatic conditions and available resources, using natural materials and renewable energy. Therefore, it is an **architecture physically and climatically adapted to the space in which it is located** to reduce the environmental footprint.

In order to make buildings more sustainable, it is necessary to make important changes that take into account construction materials, **more efficient energy systems** and even the **rehabilitation of buildings**, prioritising existing constructions over new constructions, avoiding the environmental and sustainability impact associated with the new constructions. **Bioclimatic architecture promotes buildings that respect the environment**, but also contributes to protecting the planet, reducing consumption, optimizing the life cycle of buildings and, above all, **improving the quality of life and the health of people**.

The publication is part of the **LIFE ReNatural NZEB** Project, which has tested and promoted the use of natural, nearby and recycled materials in construction technologies and solutions to achieve **nearly zero energy buildings with low carbon footprint**, in Spain and Portugal. With the most economical investment possible, the aim is to achieve almost zero energy consumption, with almost zero investment for citizens. In parallel, it is also possible to address the fight against energy poverty in buildings.

Progress in the **bioclimatic design** of buildings is to deepen the **commitment of Junta de Extremadura to fight against energy poverty and climate change**, working on the sustainability of the entire building process. The goal is to make our towns and cities healthier and more sustainable.

Leire Iglesias Santiago
Consejera de Movilidad, Transporte y Vivienda



Bioclimático se define como aquello relacionado con el clima y los organismos vivos, y dicho de un edificio: que trata de aprovechar las condiciones medioambientales en beneficio de los usuarios.

El consumo de los recursos limitados se ha introducido hace relativamente poco tiempo unido al concepto de sostenibilidad, el cual aparece ya necesariamente ligado al concepto bioclimático.

Es ya nuestra obligación manifiesta, la sostenibilidad dentro de nuestro completo proceso edificatorio: reduciendo nuestra huella de carbono, desde el diseño y planificación, hasta el completo ciclo de vida de nuestras edificaciones. El sector de la construcción representa un 39% del dióxido de carbono emitido a la atmósfera, representando además un 30% de los residuos sólidos y un 20% de la contaminación de las aguas, por ello la consecución de los Objetivos de descarbonización en el Marco 2030 de reducción de los gases de efecto invernadero en un 55% en comparación con 1.990, debe de ser nuestro mayor compromiso desde el ámbito de la Calidad en el proceso de la edificación.

La Dirección General de Arquitectura y Calidad de la Edificación quiere con este manual, recordar técnicas ya conocidas, ayudándose de nuevas herramientas que faciliten su correcta implantación, así como introducir nuevas opciones que el desarrollo de las técnicas y sistemas constructivos, han podido introducir.

Bioclimatic is defined as that related to the climate and living organisms, and referred to a building: that tries to take advantage of environmental conditions for the benefit of users.

The consumption of limited resources has recently been linked to the concept of sustainability, which is necessarily linked to the bioclimatic concept.

It is already our obligation, sustainability within our entire building process: reducing our carbon footprint, from the design and planning phase, to the complete life cycle of our buildings.

The construction sector represents 39% of the carbon dioxide emitted into the atmosphere, also representing 30% of solid waste and 20% of water pollution. For this reason, the achievement of the decarbonization objectives in the 2030 framework of reducing greenhouse gases by 55% compared to 1990, must be our greatest commitment from the field of quality in the building process. With this manual, the General Directorate of Architecture and Building Quality wants to recover already known techniques, aided by new tools that facilitate their correct implementation, as well as introduce new options that the development of construction techniques and systems have allowed.

Alfonso Gómez Goñi
El Director General de Arquitectura y Calidad de la Edificación





Introducción

Con el objetivo de disminuir el consumo energético y el impacto medioambiental del sector de la construcción en Europa, se apuesta cada día más por acciones basadas en los conceptos de sostenibilidad y economía verde y circular. En el proyecto LIFE “**Recycled and Natural Materials and Products to develop nearly zero energy buildings with low carbon footprint**” (ReNaturalNZEB), con la contribución del Programa Life de la Unión Europea, se están ensayando y promoviendo nuevas soluciones constructivas para alcanzar **edificios de consumo de energía casi nulo con baja huella de carbono, empleando materiales de carácter tradicional y natural en España y Portugal.**

Este manual está destinado a técnicos del sector de la construcción y a usuarios de los edificios. Pretende reflexionar sobre el concepto, la historia, la importancia y el alcance del diseño bioclimático de los edificios. Partiendo de la introducción a la bioclimática y la sostenibilidad, el manual realiza un recorrido por los climas y microclimas de Extremadura, aborda el efecto isla de calor, destaca la importancia de la salud y bienestar en el edificio, repasa cómo la arquitectura ha resuelto a lo largo del tiempo su acondicionamiento y la sostenibilidad hasta llegar al edificio de energía cero o casi cero, y realiza un revisión detallada de las estrategias arquitectónicas de acondicionamiento pasivo.

Introduction

With the aim of reducing energy consumption and the environmental impact of the construction sector in Europe, actions based on the concepts of sustainability and green and circular economy are increasingly committed. In the LIFE project “**Recycled and Natural Materials and Products to develop nearly zero energy buildings with low carbon footprint**” (ReNaturalNZEB), with the contribution of the Life Program of the European Union, new construction solutions are being tested and promoted to achieve consumption **buildings of almost zero energy with a low carbon footprint, using traditional and natural materials in Spain and Portugal.**

This manual is aimed at technicians in the construction sector and building users. Its main objective is to reflect on the concept, history, importance and scope of the bioclimatic design of buildings. On the basis of the introduction to bioclimatic and sustainability, the manual analyzes the climates and microclimates of Extremadura, highlights the importance of health and well-being in the building, reviews how architecture has solved its conditioning and sustainability over time until get to the zero or near-zero energy building, and performs a detailed review of passive conditioning architectural strategies.



Punto de partida del diseño bioclimático de edificios

Bioclimática y sostenibilidad	13
¿La arquitectura puede ser sostenible?	14
Agotamiento de recursos energéticos y materiales debido a la construcción	14
Los climas de Extremadura	17
Los microclimas zonales	18
Los climas y los climogramas	23
Las islas de calor urbano	26
Salud y bienestar en el edificio bioclimático	32
Temperaturas y humedades	34
Calidad de aire y ventilación	39
¿Cómo ha resuelto la arquitectura a lo largo del tiempo su acondicionamiento y la sostenibilidad?	41
El acondicionamiento pasivo primigenio	41
La arquitectura vernácula bioclimática	41
El edificio de energía cero o casi cero	52
La energía del acondicionamiento	52
La energía de los materiales	52
Resto de consumos de energía vinculados al edificio	53



Revisión de las estrategias arquitectónicas de acondicionamiento pasivo

Aprovechamiento sostenible de recursos energéticos	57
Captación, producción, distribución y acumulación de energía	57
Fuentes de energías renovables aprovechables	58
Los huecos acristalados	59
Distribución y orientación óptimas de los huecos	59
El efecto invernadero y calentamiento solar	62
El sobrecalentamiento	70
Elementos semitransparentes	70
Cubiertas y fachadas	70
Cargas internas	72
Medidas contra el calentamiento	72
Protección solar	73
Envolvertes vegetales	76

La ventilación como estrategia de eliminación del sobrecalentamiento	79
Estrategias de ventilación: diferencia de presión entre huecos	80
Dispositivos de ventilación natural: chimeneas térmicas y solares	84
Actuaciones contra la sensación de calor sin enfriamiento	85
Control de la humedad	85
Movimiento de aire	86
Superficies frías	87
Estrategias de enfriamiento	88
El enfriamiento evaporativo	88
El enfriamiento radiante	89
Enfriamiento conductivo	90
El enfriamiento convectivo	92



Estabilidad térmica y acumulación de energía renovable

Sistemas de acumulación de energía	94
Sistemas térmicos: sensibles y latentes	94
Otros sistemas de almacenamiento: químicos, eléctricos, cinéticos	94
Almacenamiento en forma de calor sensible	95
Masa, masa térmica, inercia térmica	95
La masa térmica del edificio	97
Inercia térmica efectiva	98

Almacenamiento en forma latente	100
Sustancias adecuadas	101
Sistemas arquitectónicos	101
Características de los materiales	102
Materiales sostenibles de baja energía embebida	102
Materiales más adecuados para el almacenamiento de energía	102
La difusividad y la efusividad térmicas	103
Desfase y amortiguación de la onda térmica por radiación	105
Conclusiones	107
Agradecimientos	108
Bibliografía y referencias I	109
Bibliografía y referencias II	110
Bibliografía y referencias III	110





Punto de partida del diseño bioclimático de edificios



Bioclimática y sostenibilidad

Introducirse en los territorios de la **bioclimática** y de la **sostenibilidad** abre caminos insospechados, complejos y llenos de matices que tenemos la obligación de explorar, a pesar de su transversalidad y de las contradicciones que se producen en ocasiones.

El uso mediático abusivo del término sostenibilidad está creando confusión entre los que lo oyen o leen. Se aplica a todo y en cualquier contexto. Esto ha provocado que muchas personas rechacen o ninguneen el concepto, más por ese abuso que por su contenido, que probablemente ignoran.

Sin embargo, el concepto de sostenibilidad medioambiental, ya que la hay económica y social, es muy sencillo. **La sostenibilidad es un concepto biológico que se refiere al equilibrio entre una especie y los recursos de su entorno inmediato.** Si no se mantiene ese equilibrio, como tantas veces ha ocurrido en la naturaleza, la especie desaparece. Es decir, la sostenibilidad se refiere al consumo de recursos y, por tanto, evitar su agotamiento es nuestra responsabilidad. El ser humano, como especie, también debe mantener ese equilibrio y, como especie inteligente, tiene capacidad para hacerlo, de no ser así desapareceremos como lo han hecho tantas otras especies irracionales o grupos humanos, aparentemente racionales.

Al término **bioclimático** le pasa algo parecido. También parte de una definición muy sencilla, bioclimático **es la relación entre la vida y el clima**, y ha sido algo propio y natural en el mundo animal y vegetal, donde las especies propias del lugar siempre han respondido al clima propio de esa zona. En nuestro clima mediterráneo abunda el olivo, los cereales o las vides, mientras que en otras partes del mundo lo que se cultiva es maíz, mijo o arroz de forma generalizada. Igual se podría decir de las especies animales salvajes o criadas. La arquitectura bioclimática es, por tanto, la visión desde la arquitectura de esa relación entre la vida y el clima y ha sido algo innato en la propia arquitectura, ya que es la esencia de las primeras construcciones del hombre: la arquitectura vernácula, la arquitectura tradicional, que proporcionaban espacios habitables, vivibles, teniendo en cuenta las características positivas y negativas del clima.



Hoy en día hablamos de **arquitectura bioclimática** en un sentido más amplio, no solamente teniendo en cuenta el clima, sino con una visión más cercana a la sostenibilidad, es decir, teniendo en cuenta no solamente los recursos necesarios para el acondicionamiento sino los recursos del agua y los materiales.



¿La arquitectura puede ser sostenible?

Como actualmente el concepto de arquitectura bioclimática se combina con las ideas de la sostenibilidad, podría denominarse arquitectura bioclimática sostenible o arquitectura sostenible simplemente. Si bien, siempre será posible diseñar arquitectura bioclimática según el concepto original analizando el clima actual o el que nos vaya dejando el cambio climático, los nuevos aspectos vinculados a los consumos de recursos ponen en entredicho el resultado. Nos gustaría que la arquitectura fuera sostenible, pero es difícil que desde la arquitectura no solamente contengamos ese agotamiento de energía, agua o materiales, sino que podemos intervenir positivamente generando nuevos recursos.

Agotamiento de recursos energéticos y materiales debido a la construcción

En el ámbito de la construcción, ¿cuáles son los recursos que debe gestionar la arquitectura?:

- Los materiales, con los que construimos los edificios, que son materialidad.

- La energía con la que los acondicionamos y los hacemos funcionales.
- El agua que consumimos en ellos.

Todo ello analizando el **ciclo de vida (ACV)** completo del recurso, materia, energía o agua, desde que es materia prima hasta su transformación en un centro de reciclaje o su descanso final en un vertedero.



Excavadora de minería

La inmensa mayoría de los materiales que usamos en construcción (cerámica, hormigón, vidrios, metales, plásticos, etc.) se agotan, por tanto, no son en sí mismos sostenibles. **El único material constructivo que no se agota es la madera**, ya que forma parte del ciclo natural de la fotosíntesis y la biodegradación del producto, que se transforma

en nutriente. Para convertir en sostenible a la construcción hay que contemplar la reutilización de los materiales, el uso de materiales reciclados y la prescripción de materiales que tras su demolición puedan ser reciclados. La industrialización, generando pocos residuos, y, sobre todo, la rehabilitación, grado máximo de la reutilización de los materiales, son las dos vías óptimas que nos encaminan hacia la construcción sostenible y bioclimática.

La energía convencional, que es **de origen fósil, se agota**, y a un ritmo muy superior al de las materias primas constructivas. Por tanto, la primera medida es reducir la dependencia energética con el correcto diseño formal del edificio que permita captaciones pasivas de energía (calor o frío), incrementando los espesores del aislamiento, empleando ventanas de mayor calidad, eliminando los puentes térmicos, empleando recuperadores de calor o sistemas de pretratamiento en el sistema de ventilación, etc.; ahí tendríamos la imagen más clara de la arquitectura bioclimática.

El resto del consumo, que debería ser nulo o muy reducido, como dice la **Directiva Europea relativa a la eficiencia energética de los edificios** (REDEX, s.f), **debe venir**

de fuentes renovables o residuales. Es decir, la biomasa, la energía solar térmica y fotovoltaica, la energía mini-eólica, la energía mini-hidráulica, la micro-cogeneración, la energía geotérmica o la energía aerotérmica. No obstante, hoy en día el mayor problema que tenemos en el uso de energía convencional no es tanto su agotamiento, sino la contaminación que genera su empleo y, por tanto, el efecto directo en el cambio climático, que es mucho más rápido y letal que el propio agotamiento de esa energía fósil.





Salar de Atacama, Francesco Mocellin, CC BY-SA 3.0

El agua no se agota, pero **el agua dulce está concentrada mayoritariamente en los casquetes polares**, el 77,6%, y el resto distribuido de una forma muy desigual sobre la Tierra. Por tratarse de un recurso que no se agota, sino que sólo se transforma, podríamos considerar que ya es intrínsecamente sostenible, pero el problema es que la población de la Tierra crece sin cesar, por lo que la cuota por persona disminuye como si disminuyera el recurso. En ese sentido tenemos igualmente la obligación de gestionarlo sosteniblemente, haciendo que nuestros electrodomésticos o grifería gasten menos, recogiendo agua de lluvia y tratando las aguas grises para su reutilización.

El cambio climático está modificando la línea de la desertización a zonas donde abundaba el agua, alterando por completo el ecosistema original y destruyendo los recursos de los seres vivos.

Las zonas de hielos permanentes o temporales se irán reduciendo. Sobre las superficies blancas del hielo la radiación solar se refleja, volviendo hacia la bóveda celeste. De ese modo la cantidad de radiación solar absorbida por la Tierra se controla y se evita el aumento de temperatura. En el momento en el que se reduzcan esas superficies habrá más cantidad de energía solar en la Tierra, incrementando y acelerando el cambio climático.

Lago helado Mývatn, Hansueli Krapf, CC BY-SA 3.0



LA SOSTENIBILIDAD ES GESTIONAR
CORRECTAMENTE LOS RECURSOS DE LOS QUE
DISPONEMOS, EVITANDO QUE SE AGOTEN.
SI NO, A MEDIO O A LARGO PLAZO, AUNQUE
SUENE DRAMÁTICO, DESAPARECEREMOS
COMO ESPECIE.

Sin embargo, el aprovechamiento sostenible de los recursos que da la naturaleza estuvo siempre presente en el comportamiento, tanto de los seres humanos, como de los animales. Desde las actitudes más elementales, como la recogida de alimentos o la búsqueda de protección, hasta las formas más evolucionadas de empleo de los materiales autóctonos para la construcción o de las energías naturales, tales como el viento para la navegación, los cursos de agua para los molinos, etc. De entre éstas, las actividades constructivas simples dieron lugar, gracias a la experiencia transmitida de generación en generación, a lo que, partiendo de la arquitectura popular, llegaría a ser la arquitectura popular evolucionada o arquitectura bioclimática.



Los climas de Extremadura

El planeta Tierra en el que vivimos disfruta de un conjunto riquísimo de condiciones ambientales que generan una biodiversidad admirable, pero que habitualmente no valoramos adecuadamente. Esa diversidad ambiental la hemos organizado en lo que llamamos climas y microclimas, consecuencia de la disparidad de factores que nos aporta el planeta.

Por ejemplo, la latitud, que determina la inclinación de los rayos solares que se van a recibir o los efectos de los grandes movimientos de masas de aire según la circulación general de la atmósfera. También la continentalidad o la proximidad al mar u otras grandes masas de agua, que fija la oscilación de temperatura entre el día y la noche. La orografía que influye en los movimientos de las grandes masas nubosas que dan lugar al régimen de lluvias. O la altitud que determina la capacidad de un lugar de enfriamiento por reirradiación.

Pero también otros grandes factores como la temperatura del mar de proximidad, función de la radiación solar y las corrientes marinas, y, por supuesto, la naturaleza del terreno: grandes praderas, bosques, junglas, desiertos, tundras o estepas, que con la presencia de más o menos vegetación regula el efecto de la radiación recibida y, por tanto, de las temperaturas.

Todo esto se combina con la precisa composición de gases atmosféricos, que provocan el controlado efecto invernadero, que mantiene suficiente cantidad de energía solar en forma de calor como para mantener una temperatura en la Tierra compatible con la vida animal y vegetal que disfrutamos.

¿El resultado? que sobre la Tierra haya una gran variedad de climas y una infinidad de microclimas, algunos inhóspitos, otros amigables.

El clima de Extremadura es, como en toda la península, clima mediterráneo. No obstante, **es un clima mediterráneo continentalizado** con alguna influencia oceánica, ya que el mar está a 120 km nada más, lo que suaviza alguno de los aspectos de la continentalidad. La continentalidad es una característica muy favorable desde el punto de vista del diseño bioclimático, ya que se caracteriza por diferencias de temperaturas día-noche elevadas, que pueden llegar a ser de hasta 26 °C; es un recurso muy apreciable y aprovechable en el diseño bioclimático.

La influencia del océano Atlántico, como ocurre con todas las grandes masas de agua, modera las temperaturas invernales dejándolas en general por encima de los 6 °C de media en enero, incluso por encima de los 8 °C. Esas temperaturas suaves, unidas al rango de latitudes en las que se encuentra Extremadura, que conlleva una radiación solar recibida en invierno elevada, generan unas condiciones en la que es posible el acondicionamiento higrotérmico plenamente pasivo.

El anticiclón de las Azores da lugar a veranos secos y calurosos, con primaveras y otoños cortos y muy variables. Los inviernos, además de moderadamente fríos, son secos, con menos de 700 mm de precipitaciones anuales, incluso estando muchas zonas de la región por debajo de los 400 mm. Aunque la borrasca del Atlántico puede provocar momentos lluviosos, esa escasez de agua debe tenerse en cuenta en el diseño bioclimático de los edificios.



Desiertos, junglas tropicales, capas de hielos y tundras

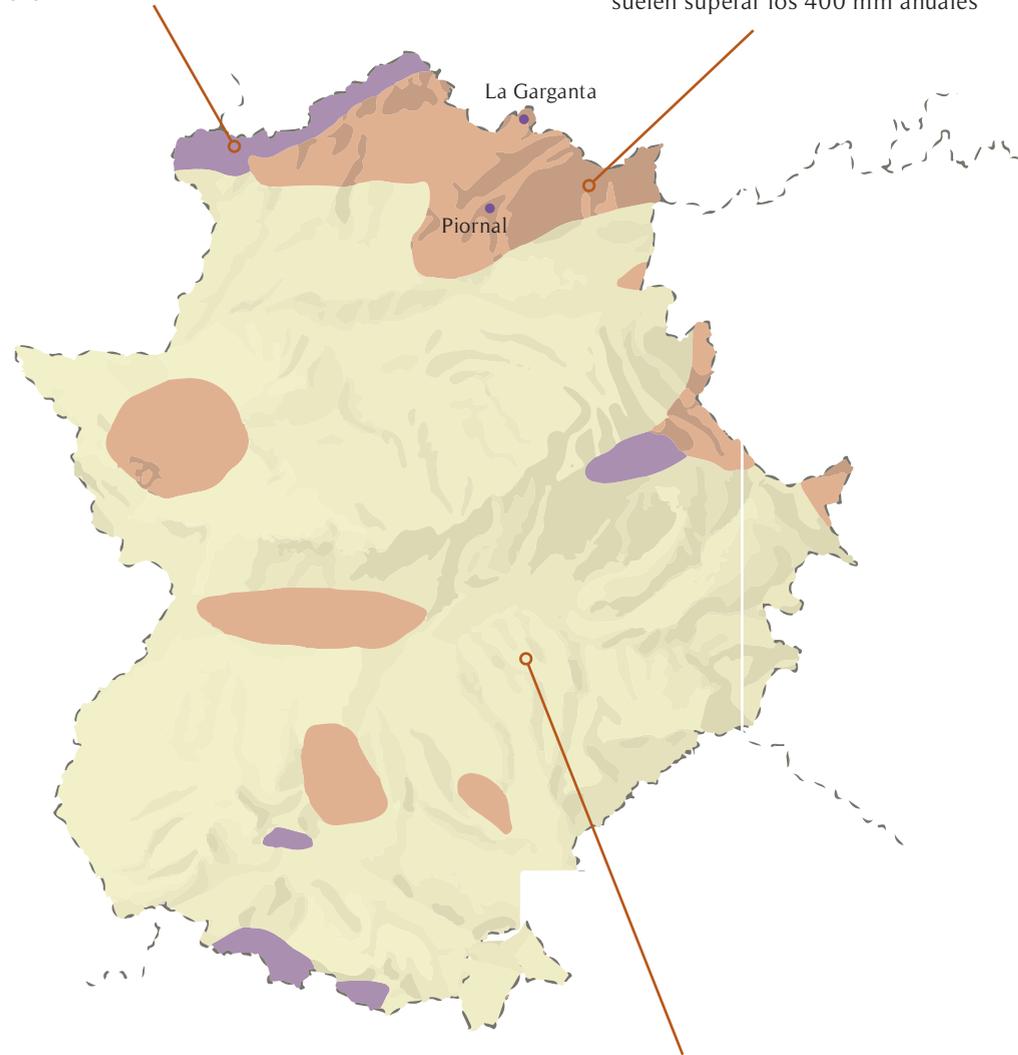


Clima mediterráneo (Csb)

Los veranos son suaves y los inviernos fríos (las temperaturas no alcanzan los 5°C). Las precipitaciones pueden superar los 800 mm anuales en algunas zonas de las sierras del sur, los 1000 mm en Las Villuercas y los 2000 mm en la Sierra Central. En las cumbres de mayor altitud se obtienen precipitaciones en forma de nieve

Clima frío semiárido (BSK)

Grandes contrastes entre invierno y verano, y escasez de precipitaciones. Veranos calurosos, máximas que superan los 27°C, e inviernos fríos, con abundantes heladas y nieblas persistentes. Precipitaciones que no suelen superar los 400 mm anuales



Clima mediterráneo (Csa)

Temperaturas suaves en invierno (entre 10°C y 15°C) y bastante elevadas durante el verano (hasta 25°C). Precipitaciones en otoño y primavera con valores situados en torno a los 800 mm anuales

Microclimas zonales extremeños

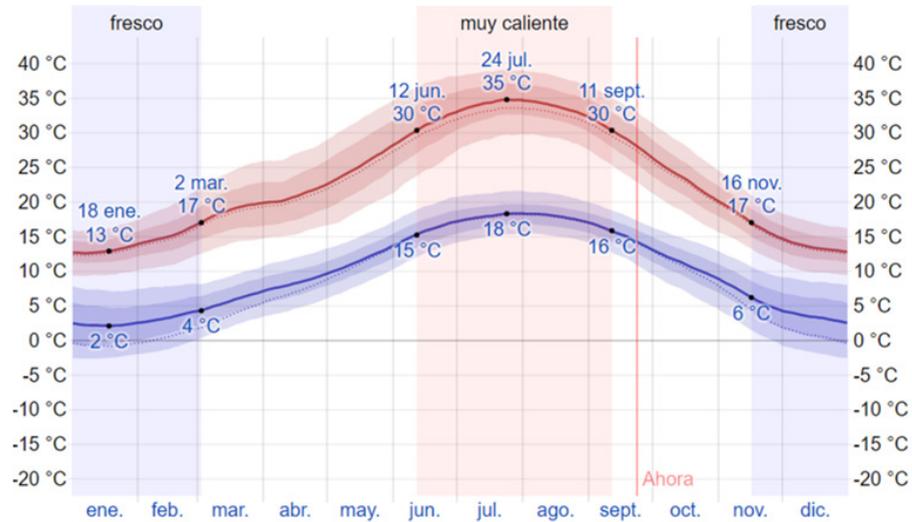
Los microclimas zonales

Para poder realizar un diseño bioclimático correcto, la información sobre el clima del lugar es esencial. Hay localidades muy bien documentadas, mientras que a otras muchas le faltan datos, lo que es un problema enorme, difícil de resolver. Por otro lado, en algunas situaciones el problema está en la calidad de las series climáticas. Hay datos elaborados a partir de periodos amplios, pero antiguos, lo que supone que no han recogido las tendencias y escenarios del cambio climático. En otros muchos casos la ubicación de los observatorios no tiene en cuenta los efectos de la Isla de Calor Urbana (ICU), que en un clima continental y en una ciudad grande puede provocar diferencias entre barrios que oscilen entre 5 y 10°C. Las localidades pequeñas suelen disponer de una información más limitada lo que obliga a completarla, en ocasiones de fuentes diferentes. Una vez recogida la información más próxima al lugar y no con datos genéricos, es decir, con datos microclimáticos, se deberán elaborar los climogramas de bienestar que permitirán tomar las primeras decisiones de diseño bioclimático.

En la Comunidad Autónoma de Extremadura se pueden distinguir tres climas o microclimas según la **clasificación de Köpen-Geiger**, el **clima mediterráneo (Csa)**, en la zona que incluye las poblaciones de Cáceres, Plasencia, Almendralejo, Zafra y Montijo, el **clima frío y semiárido (BSK)**, que incluiría la zona de Navalmoral de la Mata, Villanueva de la Vera, Madrigal de la Vera, Almaraz y Valdecaballeros, y finalmente el **clima mediterráneo** de veranos frescos (**Csb**), que incorporaría a Piornal y La Garganta. Pero esa clasificación no aporta datos suficientemente precisos para el diseño bioclimático, por lo que hay que buscar datos complementarios y elaborar los que puedan faltar de forma analítica.

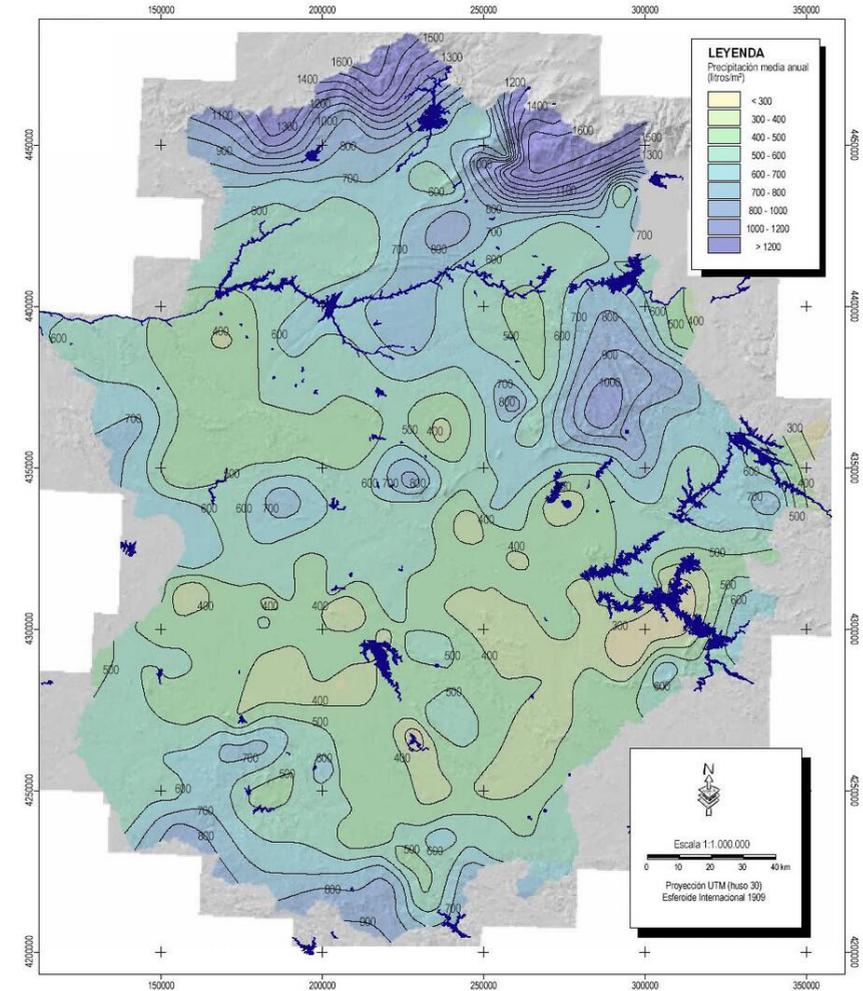


A modo de ejemplo, Miajadas (Cáceres) parece encajar en el clima Csa, que es un clima mediterráneo de inviernos templados, veranos secos y cálidos, en la que la mayor parte de las lluvias caen en invierno o en las estaciones intermedias de primavera y otoño. La vegetación natural de este clima es la del bosque mediterráneo. En concreto, en Miajadas los veranos son muy cálidos, secos y mayormente despejados, mientras que los inviernos son fríos con el cielo parcialmente nublado. Durante el transcurso del año la temperatura generalmente oscila entre los 2 °C del invierno a los 35 °C del verano, y raramente baja por debajo de los -3 °C o sube por encima de los 39 °C. La temporada calurosa dura unos 3 meses, de mediados de julio a mediados de septiembre. La temporada fría dura algo más 3 meses y medio, de mediados de noviembre a principios de marzo.



Temperatura máxima y mínima promedio en Miajadas

Precipitación media anual (litros/m²)



Precipitación media en Extremadura (litros/m²), <https://www.gifex.com>

Los datos de los que se dispone en poblaciones pequeñas, en este caso datos de temperaturas máximas y mínimas y humedades relativas, son de periodos cortos y recientes. Para Miajadas hay series completas de 2020 y parciales de 2021, que no son válidos. En estos casos hay que utilizarlos con precaución y compararlos con los de otras localidades. No obstante, estas series cortas pero recientes, recogen de algún modo las previsiones del cambio climático para los próximos años.



En Extremadura hay una red climática muy amplia para obtener información de cara a los regadíos (REDEX, s.f.), pero no es suficientemente completa en lo relativo a los datos que puedan ser utilizados para la arquitectura o el urbanismo. De hecho, los datos de los que se dispone son relativamente recientes, de los últimos años, por lo que no es posible crear un modelo de Año Tipo Climático con una serie prolongada.

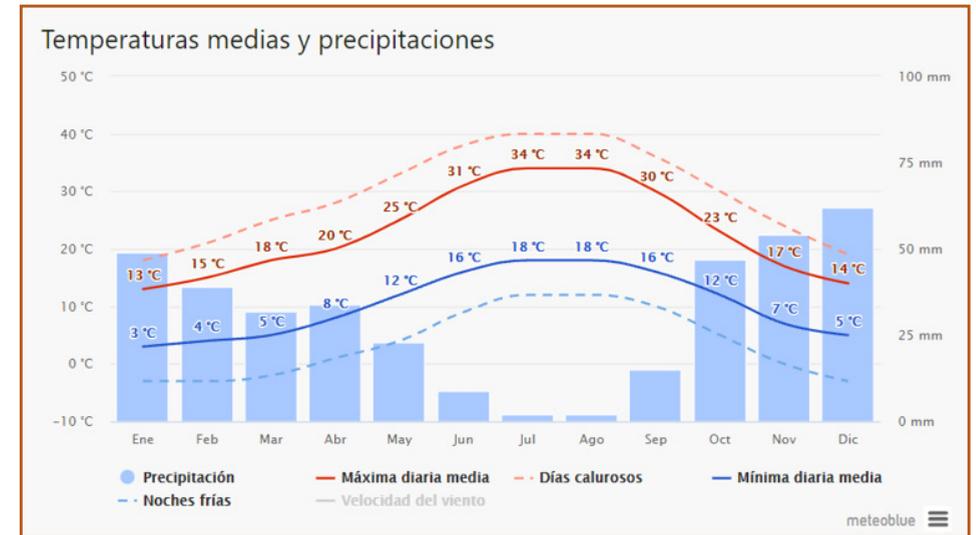
En ocasiones faltan algunos datos básicos, como los datos de humedad relativa de Miajadas por lo que la información hay que obtenerla de poblaciones cercanas donde haya observatorios que recojan esos datos, como Cáceres o Badajoz.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	7.8	12.0	3.7	54	79	6.7	0.3	0.0	4.1	5.0	8.2	156
Febrero	9.3	14.0	4.7	48	73	6.5	0.1	0.3	2.3	2.3	6.5	175
Marzo	12.2	17.7	6.7	36	63	5.0	0.1	0.7	0.6	0.7	8.2	232
Abril	13.8	19.3	8.3	52	60	7.2	0.0	1.1	0.1	0.0	6.3	247
Mayo	17.6	23.7	11.5	50	55	6.5	0.0	3.1	0.3	0.0	6.0	297
Junio	22.9	29.9	16.0	20	44	2.6	0.0	1.6	0.0	0.0	10.8	336
Julio	26.2	33.7	18.8	6	37	0.7	0.0	0.8	0.0	0.0	19.6	379
Agosto	26.0	33.2	18.7	7	39	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	16.3	348
Septiembre	22.4	28.8	16.0	30	49	3.5	0.0	1.7	0.0	0.0	10.1	261
Octubre	17.0	22.0	11.9	77	65	7.5	0.0	1.2	0.4	0.0	6.9	205
Noviembre	11.7	15.9	7.5	89	76	8.1	0.0	0.4	2.0	0.5	6.8	158
Diciembre	8.7	12.5	4.9	77	80	8.4	0.1	0.3	4.8	3.0	7.1	129
Año	16.3	21.9	10.7	551	60	64.2	-	12.2	15.0	11.6	114.1	2922

Datos climáticos básicos de la ciudad de Cáceres.

En ocasiones, si las condiciones geográficas son similares, pueden utilizarse los datos climáticos de otra población de la que haya series prolongadas.

Cuando hay falta de datos, también pueden emplearse los valores que aportan, elaborados o medidos, algunas páginas web de referencia (www.meteoblue.com, s.f.).



Temperaturas y precipitaciones, <https://www.meteoblue.com>

“NUESTROS HIJOS NO TENDRÁN TIEMPO PARA DISCUTIR EL CAMBIO CLIMÁTICO. ESTARÁN OCUPADOS LIDIANDO CON SUS EFECTOS”

Barack Obama

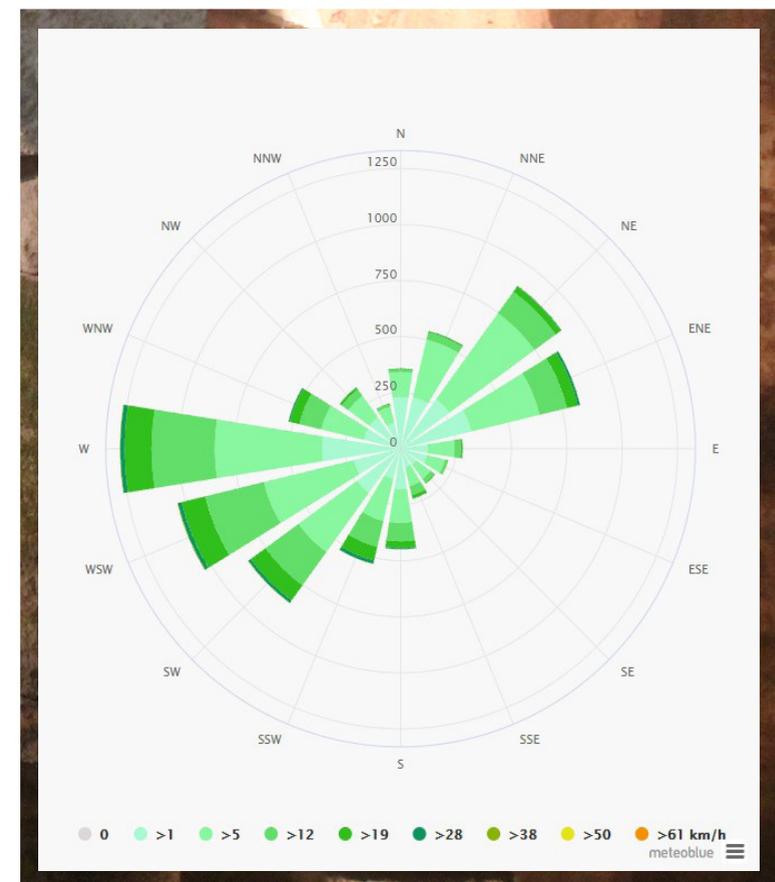


Los datos de precipitaciones, más allá de sus necesidades para temas agrícolas, son necesarios para el diseño de envolventes vegetales y de la capacidad de los aljibes que las mantengan regadas. Ésta es una información relativamente fácil de encontrar dada la sencillez de los equipos de medida, lo que ha propiciado su obtención desde hace mucho tiempo.



Datos de precipitación de Miajadas

Los vientos, se deben tener en cuenta para el trazado de la ciudad, para ventilar correctamente las calles y para asegurar que haya diferencias de presión entre las caras del edificio que faciliten la ventilación natural.



La dirección de vientos predominante en Miajadas es ENE-NE a W-SW, donde se dan las máximas velocidades



Los climas y los climogramas

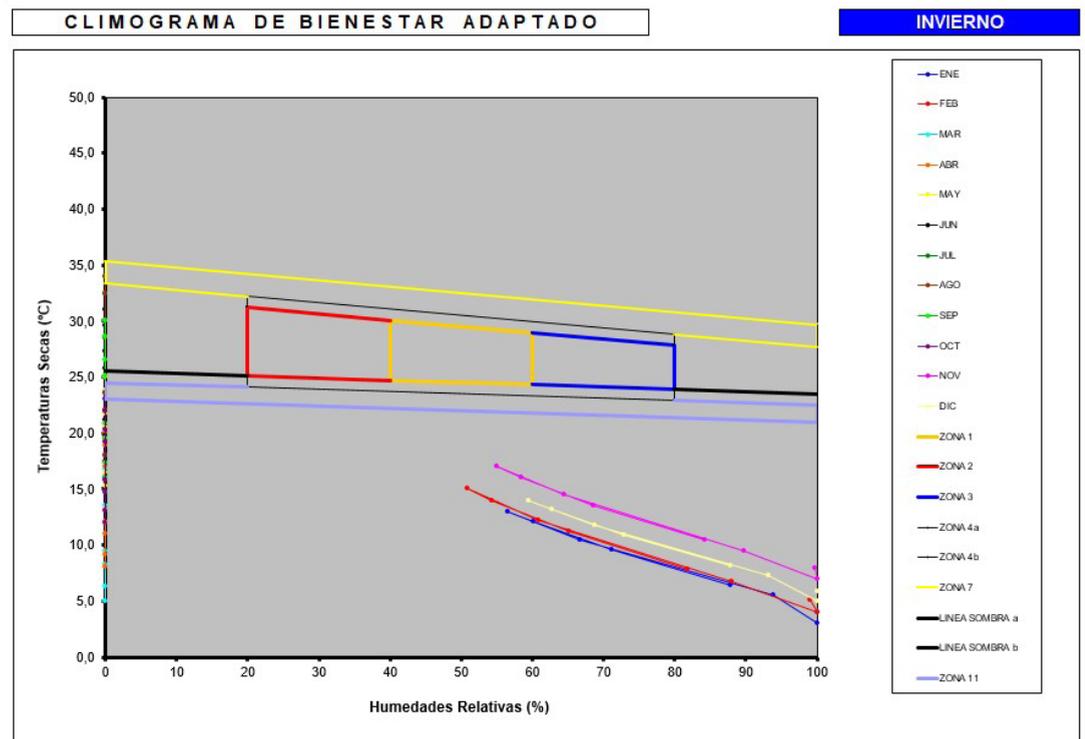
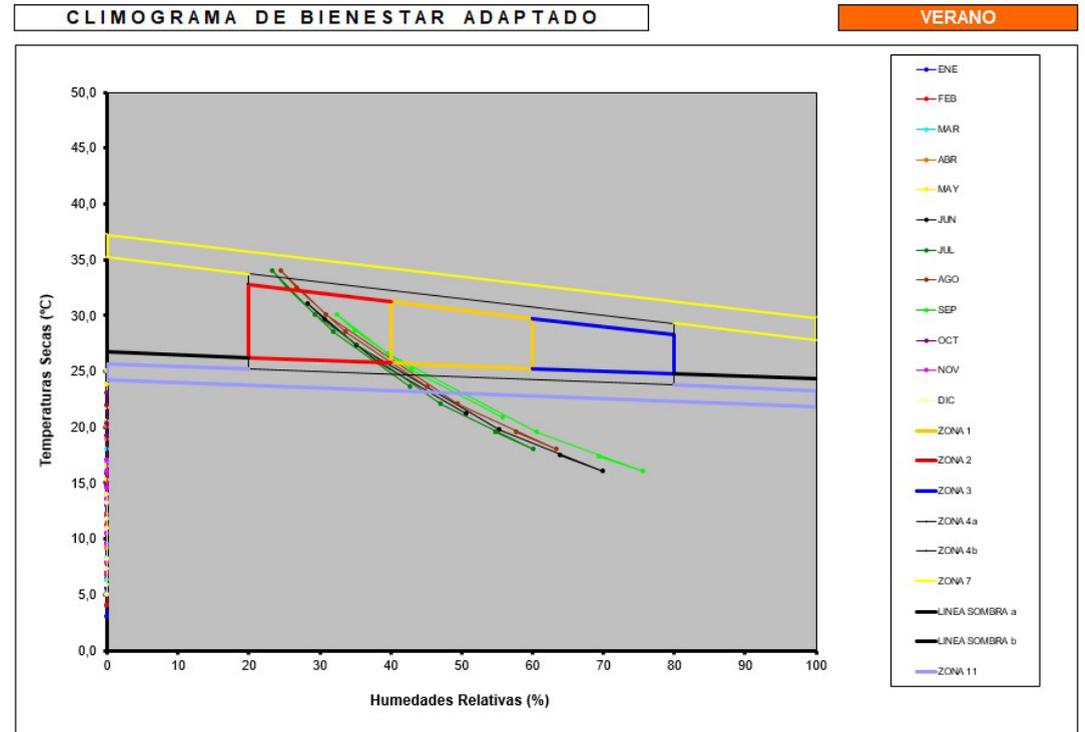
Con la información climática se pueden elaborar informes y sacar conclusiones sobre cuáles son las actuaciones bioclimáticas más adecuadas, pero también se pueden construir modelos que ayuden a tomar con más claridad las primeras decisiones de diseño. Uno de ellos es el Climograma de Bienestar.

El **Climograma de Bienestar** es una herramienta gráfica en la que se superponen áreas de bienestar higrotérmico con datos del clima local. Algunos de estos climogramas permiten elaborar las áreas personalizándolas para la localidad concreta, ya que las condiciones de bienestar higrotérmico no son fijas, sino que varían con la época del año, los factores ambientales como la ropa, la actividad y la calidad de la edificación, y son diferentes según la adaptación genética a las condiciones del clima local, es decir, varían según la altitud y la latitud fundamentalmente.

Según el tipo de climograma, estas herramientas indican los periodos de sombra de los huecos, días y horas, la necesidad y tipo de ventilación, igualmente según el momento del año, la necesidad de masa térmica, tipo de sistema de calentamiento o enfriamiento, etc.

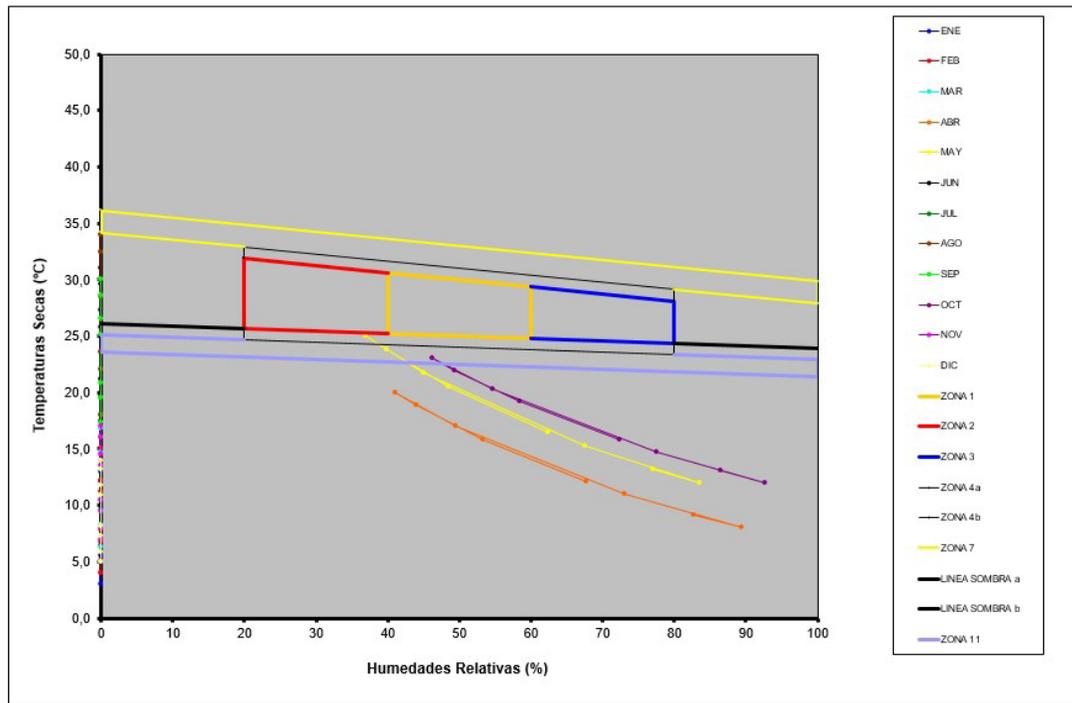
Siguiendo con el ejemplo de Miajadas y empleando el **Climograma de Bienestar Adaptado CBA** (Javier Neila), se han elaborado los gráficos para las cuatro estaciones del año y un gráfico combinado anual llamado **gráfico de isopletas**.

Climogramas de bienestar de Miajadas por estaciones. Gráficos estacionales obtenidos del CBA para Miajadas donde se aprecia la posición de los meses de cada periodo en relación con área de bienestar



CLIMOGRAMA DE BIENESTAR ADAPTADO

PRIM-OTOÑO



De los resultados de su aplicación se puede comprobar que los veranos son cálidos y secos, con temperaturas que pueden alcanzar los 34 °C, superando las zonas de bienestar, lo que implicaría no solamente incorporar sombreado sino también estrategias de ventilación natural. Las humedades relativas durante las horas centrales del día son bajas, están por debajo del 40% lo que también permitiría, a la vez que sería recomendable, utilizar estrategias de enfriamiento evaporativo o simplemente incorporar vegetación en el entorno de las edificaciones. Las temperaturas nocturnas de sus meses cálidos caen bastantes, como es propio de los climas continentalizados, como es el de Miajadas, bajando incluso hasta los 16 °C, lo que proporciona una temperatura media del día muy interesante en torno a los 23 o 24 °C, que se pueden mantener en el interior de los edificios durante todo el día si se dispone de suficiente masa (masa térmica). Los meses de invierno son fríos, aunque no extremadamente fríos, con clara necesidad de aportar calor, a ser posible en forma de radiación solar. Los meses de primavera y otoño mantienen temperaturas diurnas próximas a las del confort mientras que por la noche la temperatura puede bajar, aunque no de una forma extrema. Es interesante también en estos meses contemplar estrategias de captación solar (Higueras *et al*, 2021).

GRÁFICO DE ISOPLETAS CON TEMPERATURAS

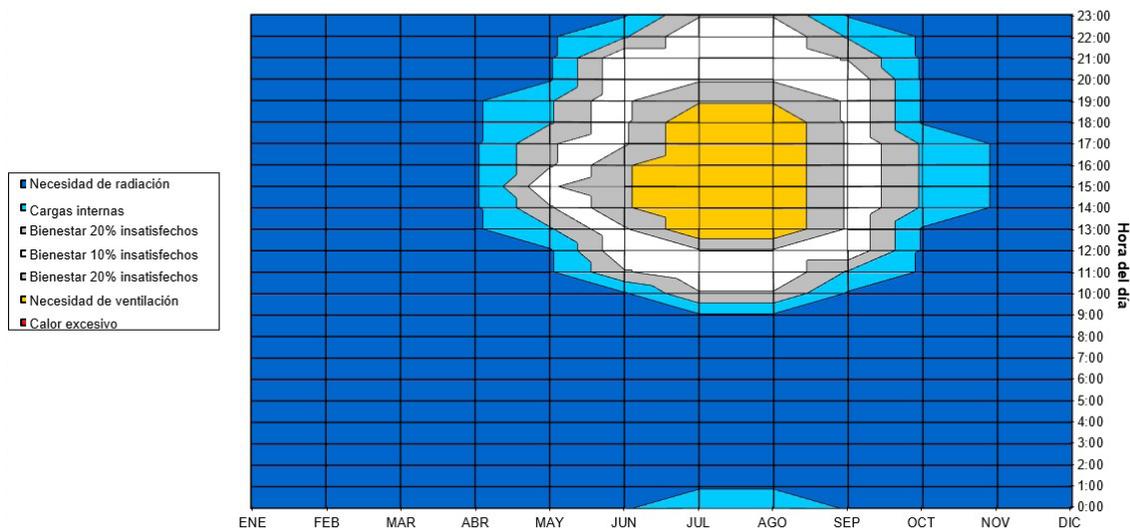


Gráfico de isopletas de Miajadas obtenido con el CBA

La zona central a partir del color blanco es el periodo del año en el que los huecos deben estar sombreados, la zona amarilla central es el periodo del año en el que el bienestar higrotérmico se puede alcanzar con ventilación natural, la zona azul clara corresponde a los momentos del año en el que las cargas internas pueden aportar el calor suficiente para alcanzar el confort en invierno y, finalmente, la zona azul oscura representa el periodo del año en el que es necesario diseñar los huecos para que capten radiación solar.



El Climograma de Bienestar también permite la cuantificación de determinados aspectos de estas estrategias, como el sombreado. Hace ver que los huecos deberían estar sombreados desde principio de mayo hasta finales de septiembre en unos rangos horarios comprendidos entre las 10:00 h de la mañana en los meses más cálidos de julio y agosto o las 14:00 h de la tarde en los meses menos cálidos como mayo o septiembre, hasta el anochecer. Igualmente, la incorporación de ventilación natural debería establecerse en las horas centrales del día, entre las 12:30 y las 17:00 horas, desde mediados de junio a finales de agosto. El periodo de infracalentamiento y, por tanto, con necesidades de calor es amplio, como ocurre en toda la Península Ibérica y debería resolverse inicialmente con captación de radiación solar. En los meses calurosos de junio a septiembre las noches son frescas por lo que sería recomendable

que los sistemas de ventilación se plantearan para facilitar la ventilación nocturna, ya que así se aseguraría que a lo largo del día no fueran necesarias estrategias de refrigeración mecánicas. Tanto en la captación solar durante los meses fríos como la ventilación nocturna exigen de almacenamiento de esa energía en la masa térmica del edificio. Por tanto, es igualmente importante fomentar el diseño de los cerramientos incluyendo elementos de masa que se puedan aprovechar, como siempre ha ocurrido en la arquitectura tradicional. Eso implicaría que el aislamiento térmico que exige el Código Técnico de la Edificación se colocara por la cara exterior del cerramiento dejando el elemento masivo de protección estructural colocado por la cara interior para que actúe como elemento de almacenamiento de energía. De igual modo se podían utilizar otro tipo de estrategias como el empleo de materiales de cambio de estado.

Como **conclusión** de la obtención de datos climáticos y del uso del climograma se puede decir que **la ciudad y los edificios se deben diseñar para que haya una buena captación solar** durante gran parte del año, es decir correctamente orientados fundamentalmente hacia el sur. Se debe **diseñar un sistema de protección solar** que no deje entrar la radiación solar durante las horas indicadas en la tabla, pero que no ponga en riesgo el soleamiento durante el resto del año. También hay que entender que la protección solar se debe extender a fachadas y cubierta con un **buen aislamiento térmico**, tal vez con cámaras de aire ventiladas y con colores claros de acabado. La **ventilación natural** es necesaria para evitar sobrecalentamiento dentro del edificio durante algunas horas del día de algunos meses. De igual manera la **ventilación nocturna** es recomendable para que no sean necesarios los sistemas de refrigeración. Como estas estrategias son temporales, los huecos deben tener la capacidad de abrirse y cerrarse para asegurar la ventilación en los momentos precisos. Todo esto debe acompañarse de **masa térmica, por lo que el aislamiento debería colocarse por el exterior dejando la masa del cerramiento hacia adentro.**

ESTRATEGIA	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE
Sombreamiento con un PPI <10%	14:00-16:00	11:00-21:30	10:00-23:00	10:00-23:00	11:30-21:00
Sombreamiento con un PPI <20%	13:00-18:00	11:30-22:00	9:30-23:30	9:30-23:30	11:00-22:00
Ventilación natural		Desde mediados de junio	12:30-19:00	12:30-19:00	Hasta principios de septiembre

PPI: Porcentaje de Personas Insatisfechas

Tabla con periodos de sombra y ventilación, CBA



Las islas de calor urbano (Sánchez-Guevara *et al*, 2020)

Como se ha comentado, los climas de la Tierra son muy variados y aportan una gran riqueza medioambiental combinada con una gran biodiversidad, hasta que el hombre lo alteró. Pero no fueron la presencia del coche o el advenimiento de la era industrial o la producción descontrolada de gases de efecto invernadero los que provocaron la alteración, fue la conversión del hombre de recolector a cultivador con el desarrollo de la agricultura. Es cierto que **si el hombre no hubiera aprendido a cultivar la tierra no habrían aparecido las civilizaciones tal y como las conocemos**, y seguiríamos siendo homínidos primitivos, pero ahí comenzó el daño.

El **peaje** que hubo que pagar para alcanzar nuestra civilizada posición actual fue la **quema de bosques y la destrucción de prados y llanuras para convertirlos en tierras de cultivo**. La vegetación viva previa, los árboles y la yerba del campo, absorbían la radiación solar sin provocar un incremento de temperatura, como ocurre con las superficies inorgánicas. Las plantas regulan su temperatura y la mantienen estable en el entorno de la temperatura ambiente, con un margen de más menos dos grados centígrados. Lo consiguen transformando parte de la energía absorbida en biomasa gracias a la fotosíntesis y eliminando otra parte por evapotranspiración. Por ese motivo los entornos con vegetación son frescos en verano, porque no se sobrecalientan. Sin embargo, cuando la superficie que recibe la radiación solar es inorgánica, la tierra desnuda, la roca o la arena, la absorción de calor se convierte en un aumento automático de temperatura. Los hombres, al cambiar un bosque o un prado por tierra desnuda, provocamos esa modificación del clima que tiene que ver con el último factor que da lugar a los climas y microclimas, la naturaleza del terreno.

Al convertirnos en cultivadores dejamos de ser buscadores itinerantes de recursos para convertirnos en sedentarios para cuidar nuestro ganado y nuestros cultivos. Y para ello necesitamos de nuevo quemar bosques y convertirlos primero en aldeas y luego en pueblos y ciudades.



LAS CIUDADES ESTÁN MAYORITARIAMENTE CONFIGURADAS POR MATERIALES INORGÁNICOS, ACERAS, CALZADAS Y EDIFICIOS, CON MUY POCA PRESENCIA DE SUPERFICIES VEGETALES; MUY LEJOS DEL CAMPO O DEL BOSQUE QUE FUERON PRIMITIVAMENTE

De ese modo, toda la radiación solar calienta esas superficies, que a su vez calientan el aire que las circunda. Cuando esas superficies quieren eliminar el calor captado, como emiten radiación en el infrarrojo y los gases contaminantes de las ciudades son capaces de absorberlos, no se logra disipar correctamente la energía excedente, quedando en el ámbito urbano casi toda la radiación absorbida. Ese simple motivo ya supondría que las ciudades representarían puntos más calientes que su entorno natural donde no se da ese efecto. Pero a eso hay que añadir el calor antropogénico, el producto de la actividad humana, los vehículos y los equipos de acondicionamiento. Los equipos, aparatos o vehículos que consumen cualquier tipo de energía, la reciben de fuera de la ciudad para finalmente convertirla en calor; así se incorpora a la ciudad calor que no es exclusivamente solar. Pero también la propia energía generada por los humanos, resultado de la transformación de los alimentos que consumimos, y que también vienen de fuera de la ciudad, en calor; los habitantes de la ciudad de Madrid generamos instantáneamente de media unos 637 GW solamente con nuestro calor corporal. Todo en su conjunto convierte a las ciudades en islas de calor rodeadas por un mar de naturaleza donde el clima predomina sobre la alteración.

Ejemplos de calor antropogénico

Aunque el calor antropogénico no es tan significativo como el solar, la masiva ocupación de algunas ciudades del mundo, y un uso también descontrolado de vehículos de motor, puede empezar a tener una influencia importante en las islas de calor.



¿Pero ese incremento de temperatura es el mismo en cualquier punto de la ciudad? Evidentemente, no. **Las zonas periurbanas se benefician del frescor del entorno natural** hacia el que disipan fácilmente el calor. En las zonas interiores de la ciudad tampoco es lo mismo estar cerca de un parque o de un río que en una zona densamente ocupada y edificada. Por eso, **la isla de calor urbana se desarrolla con temperaturas diferentes**, que dependen de la capacidad de ventilación de las calles, de la presencia de agua o vegetación, de la intensidad del tráfico, de la morfología urbana y de los acabados de suelos y edificios. Por tanto, es variable en el espacio.



Pero también lo es en el tiempo. Las superficies tienen inercias diferentes en función de su color y de los materiales que las componen. Por eso algunas absorben más rápidamente la radiación mientras que otras, que lo hacen más lentamente; algunas cederán el calor más rápido y otras lo harán más despacio. El gradiente de temperaturas que se produce es también cambiante en el tiempo en esa Isla de Calor Urbana (ICU), término utilizado por primera vez por el británico Mailey en 1958. Es un fenómeno dinámico.

El agua de lluvia podría disipar parte de ese calor por evaporación, pero el agua no se almacena en las ciudades, ni en su suelo ni en su subsuelo, sino que se deriva velozmente hacia el alcantarillado. Un suelo vegetal o terroso empapado reduciría la temperatura de la ciudad.

Ninguna ciudad del mundo se libra de este fenómeno, pero algunas lo sufren más que otras, y aunque el cambio climático que padecemos influye sobre toda la superficie de la Tierra, afectará más duramente a las ciudades que al resto de la superficie del globo.

Se han venido realizando estudios de la Isla de Calor Urbana en muchas ciudades, desde hace mucho tiempo. De la ciudad de

Madrid los primeros estudios son de la década de los ochenta y fueron publicados en 1991. Los realizaron un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid (Díaz *et al*, 1991). En esa publicación ya se analizaba el fenómeno. Previamente, en 1818 Howard escribía que la temperatura de Londres, cubierta por el smog, era durante la noche 2,2 °C mayor que en el campo, pero que durante el día era algo inferior. Este efecto se produce en todas las ciudades debido a la contaminación que reduce la entrada de la radiación solar, hasta en un 30%. En el caso del Londres de aquella época la capa contaminante era densísima.



Smog Londres 2014, Alan Myers CC BY-SA 2.0



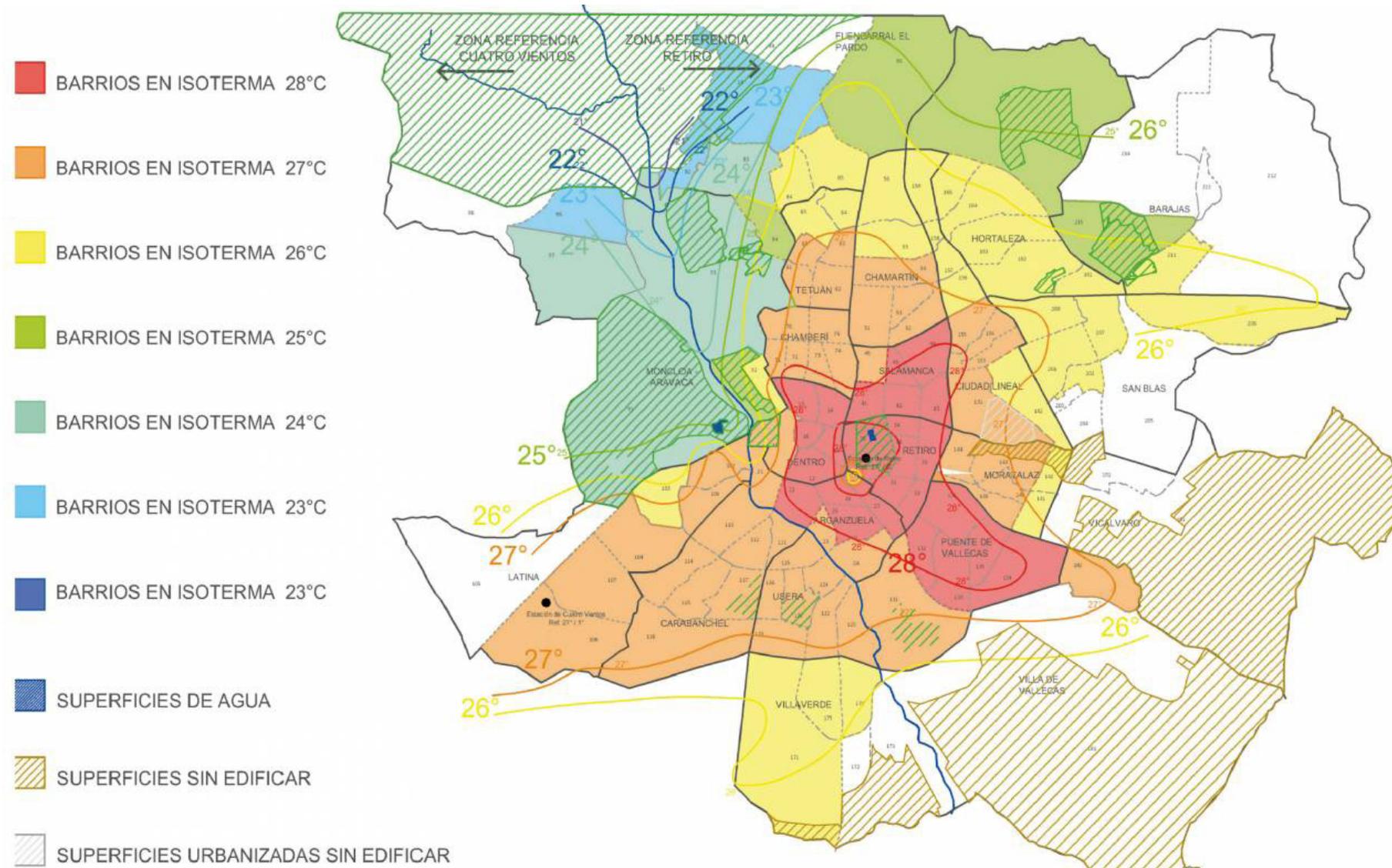
Atasco en Taipei, Syced, CC 0

La diferencia media habitual entre el campo y la ciudad puede ser de unos pocos grados, 2 o 3 °C nada más, pero en condiciones puntuales pueden superarse los 10 °C. Las temperaturas ambientales más elevadas lógicamente se alcanzan durante las horas diurnas de los días despejados, cuando la radiación incide directamente, pero los efectos de la isla de calor, cuando se dan las máximas diferencias con el entorno climático natural y entre barrios, se producen por las noches, dos o tres horas después del anochecer, cuando las superficies calientes empiezan a ceder el calor absorbido. Será tanto mayor cuanto más despejado haya estado el cielo durante el día y menos viento sople, lo que disiparía el calor acumulado. Por el contrario, los días cubiertos, o incluso lluviosos, los efectos son mínimos.

Las primeras mediciones dinámicas, con vehículos que transportaban equipos de medida se hicieron posiblemente en 1927, en Viena, y poco después en Karlsruhe. Eran recorridos simultáneos realizados con varios vehículos, para cubrir la mayor parte de la superficie de la ciudad posible; se llaman transectos, que según el DLE es “un muestreo caracterizado por la toma de datos en determinados recorridos prefijados”. Desde ese momento es el procedimiento que se ha utilizado en los estudios en las ciudades más importantes del mundo.



La **isla de calor** está llena de micro-islas, no sólo en Madrid sino en casi todas las ciudades. En uno de los recorridos invernales del estudio de 1988 aparecían islas con unas diferencias de temperaturas de 5,5 °C, entre -3,5 °C en la periferia y 2 °C en el interior de la zona. Eso muestra la singularidad puntual, de una parte de un barrio, un conjunto de calles o una zona de la ciudad, que, por sus edificios, pavimentos y acabados, marcan diferencias con su entorno inmediato. En el caso de **Madrid**, la forma de la isla de calor de las noches de verano cambiaba de forma con relación a la de invierno, se hacía más lobulada, y aunque no cambiaban los puntos críticos, se modificaba su forma y tamaño.



Influencia de la isla de calor de Madrid según barrios, UPM, <https://www.agenciasinc.es>



Hoy en día, y en relación con la ciudad de la que se hizo el estudio, Madrid ha crecido en sus asentamientos y, por tanto, en su población, ha aumentado el tráfico y ha aumentado el uso de equipos de climatización. Por todo se imponía la realización de un nuevo estudio. Gracias a la financiación del proyecto **MODIFICA** (Modelo predictivo del comportamiento energético de edificios de viviendas bajo condiciones de isla de calor urbana) por parte del **Ministerio de Economía y Competitividad, el grupo ABIO (Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible de la Universidad Politécnica de Madrid)** pudo realizar entre 2014 y 2017 un nuevo **estudio del clima urbano de Madrid** desarrollando un nuevo conjunto de mapas dinámicos de la ICU, para el que se empleó una tecnología más actualizada y eficiente. El resultado ha sido un modelo predictivo del comportamiento térmico y energético de edificios de viviendas bajo las condiciones de la isla de calor urbana para aplicarlo en la selección de medidas de rehabilitación y a las evaluaciones reales de demanda y consumo energético de los edificios. Todo gracias a un conjunto de isotermas diferente a las obtenidas décadas antes, pero donde se siguen apreciando los mismos puntos críticos, a los que se han añadido otros nuevos. ¿Es realmente problemática la Isla de Calor Urbana? Se podría pensar que en verano sí lo es ya que las temperaturas son mayores que las que corresponderían al clima del lugar, pero que en invierno suponen una mejora que reducirá las necesidades y consumos de energía para la calefacción. Es cierto, pero los problemas que acarrearán las islas de calor urbanas no se limitan al mayor o menor consumo de energía. Uno de los problemas que producen, ya sea en verano o en invierno, es la alteración de las bases climáticas necesarias para los cálculos y la toma de decisiones con respecto a los edificios. Si el dato climático real que influirá en el comportamiento de un edificio es 4, 5 o 6 °C superior al que da la Agencia Estatal de Meteorología para esa ciudad, los resultados serán claramente incorrectos. Pero ni siquiera serían válidas esas bases de datos si se utilizan para comparar el comportamiento entre edificios situados en zonas diferentes de la ciudad porque, aunque estén en la misma ciudad los microclimas y las micro-islas, fruto de la ICU, pueden diferir también en varios grados entre ellas. Por ello se impone crear unas bases de datos dinámicas y variables según las zonas de la ciudad de Madrid.

Las diferencias de 10 o 12 °C que se pueden dar en verano en la misma ciudad convierten, en esos momentos, a esos barrios en ciudades diferentes, incluso se podría pensar que, en países diferentes, a los que habría que aplicar criterios de diseño bioclimático, es decir de eficiencia energética, diferentes.

SI SE DESCONOCE ESTA INFORMACIÓN,
LAS TOMAS DE DECISIONES SERÁN
INCORRECTAS Y NOS DESVIARÁN DEL
CAMINO DEL EDIFICIO DE ENERGÍA CERO.
POR TANTO, ¿SIRVEN LOS LIMITADOS DATOS
QUE APORTAN LAS ACTUALES BASES DE
DATOS CLIMÁTICAS PARA HACER LOS
CÁLCULOS ENERGÉTICOS DE LOS EDIFICIOS
NECESARIOS PARA PROPONER UNA
REHABILITACIÓN ENERGÉTICA, SELECCIONAR
EL ESPESOR DE UN AISLANTE O EL TAMAÑO
DE UNA PROTECCIÓN SOLAR?

LA RESPUESTA ES NO





¿Tienen solución los problemas generados por las Islas de Calor Urbano?, ¿se pueden eliminar las diferencias de temperaturas con el campo y entre barrios? Realmente no, pero se pueden y **se deben minimizar con estrategias de diseño bioclimático**. Lógicamente si el problema proviene de la falta de vegetación la solución debe estar en la renaturación urbana. **Incorporar vegetación en las fachadas de los edificios y, sobre todo, en las cubiertas**, reduce la temperatura de la ciudad; su uso masivo podría reducir la temperatura urbana en 2 o 3 grados. Pero también se pueden incorporar nuevas superficies verdes aumentando el tamaño de los parques urbanos, los grandes y los medianos, e introduciendo nuevos jardines, ya sean públicos o privados. Otras soluciones provienen del sombreado de suelos y fachadas, de nuevo con elementos vegetales, el arbolado urbano. Si no es posible el sombreado, el uso de acabados claros y reflectantes reducirá la absorción de las superficies; aquí el gran enemigo es el asfalto de las calzadas, que debería reducirse. La otra solución es incorporar humedad a los suelos y a las cubiertas. Una cubierta ecológica, almacena agua y la va evaporando para evitar el estrés de las plantas que provocaría el sobrecalentamiento. Usar suelos permeables que almacenen agua en lugar de canalizarla hacia el alcantarillado también cumpliría con esa función.



Salud y bienestar en el edificio bioclimático (Higueras *et al*, 2022)

El objetivo del diseño bioclimático es alcanzar el confort higrotérmico usando básicamente recursos renovables dentro de un ambiente saludable. ¿Es lo mismo confort que salud?, no, son dos conceptos que se mezclan con facilidad, sin duda se relacionan, pero no hay que confundir. No cabe duda de que confort sin salud no tiene ningún sentido, pero sólo salud, sin acompañarla de condiciones de bienestar tampoco.

¿Cómo definimos el confort?, el confort o bienestar higrotérmico es la sensación subjetiva fundamentada “en la ausencia de malestar térmico, cuando los mecanismos fisiológicos termorreguladores no tienen que intervenir”. Básicamente sería la situación del cuerpo en la que no hay que hacer un esfuerzo fisiológico, ni psicológico, ni social para adaptarse a un ambiente determinado. Pero es cierto que, en ocasiones, ese esfuerzo parece tener recompensa y nos hace sentir psicológicamente bien; por ejemplo, temperaturas elevadas cuando estamos en la playa de vacaciones o frías cuando esquiamos un fin de semana. En ambos casos nos sentimos estupendamente, sería la previsibilidad subjetiva, lo que hace muy complicado delimitar unas condiciones concretas de confort. Por ello, se podría decir que **el bienestar es el resultado de la interpretación que hace el cerebro de factores extrínsecos (la temperatura, la humedad, el ruido, etc.) e intrínsecos (estado de salud, hambre, sed, cansancio, estrés, etc.) al individuo, somáticos y psicosomáticos.**

En relación con los **factores extrínsecos**, los órganos receptores de los que disponemos se ven estimulados en determinadas situaciones, produciéndose una excitación, una transmisión de la señal hasta el cerebro, una imagen del fenómeno y una respuesta. Esos estímulos provocarán en los individuos que ocupan un espacio, reacciones placenteras o molestas en el organismo, de tal modo que podremos calificar al ambiente o al factor ambiental del que se recibe el estímulo, como confortable o como no confortable, según el número de personas que coincidan en la apreciación, es decir, de la estadística.

Pero **la sensación de bienestar o de incomfortabilidad** que se aprecia en un espacio no **es la consecuencia** de esos estímulos aislados, sino **de la combinación compleja de todos ellos y de su acción simultánea**. Resulta difícil que, en un ambiente, podamos sentirnos claramente bien por efecto de la temperatura, pero al tiempo mal por la humedad, molestos acústicamente, con una luminosidad inaceptable y con olores placenteros; las sensaciones terminan por influirse y alterarse las unas sobre las otras. El cerebro, que es finalmente el órgano que convierte los estímulos en sensaciones reconocibles, integra todas ellas dando una respuesta única, resultante de la combinación más o menos detectable de cada una de ellas.



Por otra parte, centrándonos concretamente en el **bienestar higrotérmico**, ¿por qué sentimos confort, frío o calor?: todo tiene que ver con un balance de energía. El hombre obtiene su energía de las calorías que le proporcionan los alimentos, que se convierten en otros elementos más simples, como grasas o hidratos de carbono. Esos componentes, cuando los necesitamos, se transforman finalmente en la energía mecánica necesaria para mover nuestros músculos. El rendimiento de la transformación de la energía en trabajo mecánico es muy bajo, solamente del 5% en un individuo estándar, por lo que la energía alimenticia que no se convierte en trabajo se convierte en calor, siendo finalmente ésta la manifestación más apreciable de la transformación. Dado que somos animales de sangre caliente, una parte de este calor residual sirve para mantener la temperatura corporal interna próxima a los 36,5 °C. Pero el cuerpo tiene que disipar el exceso de energía generada, que es mucha, hacia el ambiente exterior. **El bienestar higrotérmico se establece cuando el cuerpo pierde ese calor residual al ritmo adecuado: una mayor velocidad implica sensación de frío y una menor velocidad, sensación de calor.** A esa velocidad adecuada y perfecta se equilibran todos los intercambios energéticos que se originan en el hombre.

“EN EL SIGLO XXI, PENSAR EN LA RELACIÓN ENTRE EL SER HUMANO Y LA NATURALEZA VA SIENDO UN TEMA CRUCIAL”

Toyo Ito



El ritmo al que pierde calor el organismo se denomina velocidad o actividad del metabolismo (M) y oscila entre unos 70 W, el metabolismo basal, y 400 o 500 W de forma puntual al hacer deporte (Neila, 2012). Es decir, la velocidad de producción y disipación de energía metabólica en forma de calor hacia el ambiente exterior es variable. Dependerá fundamentalmente del trabajo que se vaya a realizar que, a su vez, está vinculado al oxígeno que se consumirá con la actividad y que actuará de comburente en la transformación energética. Dado que el ritmo de consumo de oxígeno no es constante, sino variable en función de la actividad, ésta será el parámetro de cuantificación que se suele emplear.

Para personalizar la actividad metabólica se creó una magnitud denominada **met**, que corresponde a una dispersión de 50 kcal/h por metro cuadrado de superficie corporal (58,2 W/m²). Aplicado a una superficie corporal de un individuo estándar se puede redondear esta cifra en 100 W cada met (Neila, 2012).

La situación de menor ritmo de transferencia de calor de origen metabólico que se establece entre el organismo y el entorno es el denominado metabolismo basal, y varía según la edad y el sexo; para un individuo adulto de complejión

normal tiene un valor estándar de 44 W/m² de superficie corporal (79 W) en hombres y de 41 W/m² de superficie corporal (65 W) en mujeres; corresponde a un estado de reposo absoluto. La superficie corporal de un hombre adulto se considera de 1,8 m² y 1,6 m² en una mujer adulta.

Pero si todo quedara así sería relativamente fácil, pero hay más aspectos que complican el tema. Uno de ellos son las diferencias biológicas entre los seres humanos; nuestras apetencias y gustos son diferentes, a veces, muy diferentes. Por ello el bienestar se debe tratar estadísticamente, de tal manera que cuando hay suficientes personas que consideran un ambiente adecuado hay que admitirlo así, y, por el contrario, si muchos se quejan hay que considerarlo igualmente inadecuado. Se suele aceptar como límite una cifra entre el 10 y el 20% de personas insatisfechas (PPI) como máximo para dar por buenas las condiciones de un espacio. ¿Y por qué no un cero por ciento?, porque esa situación no se va a dar nunca en un colectivo suficientemente amplio, en el que habrá al menos un 5% de insatisfechos, son los frioleros y los calurosos.



Temperaturas y humedades

Un segundo aspecto importante que nos complica es la adaptación del cuerpo a las condiciones que nos rodean. El cuerpo humano tiende a adaptarse a las condiciones ambientales, higrotérmicas, lumínicas, acústicas y de composición química del aire, haciendo los ajustes fisiológicos precisos para alcanzar el confort en cualquier situación. Abrimos o cerramos la pupila según la luz, interiorizamos los ruidos hasta no notarlos y saturamos la pituitaria con las partículas olfativas. En relación con el ambiente higrotérmico, se abren o se cierran, total o parcialmente, los poros por los que exudamos, y realizamos procesos de vasodilatación y vasoconstricción para controlar los intercambios de energía del cuerpo con el ambiente. Lógicamente todo tiene un límite, pero estos procesos hacen que nos encontremos bien en muchas situaciones diferentes del día y del año, con condiciones claramente distintas.

¿Eso quiere decir que no podemos fijar unos valores o unos rangos concretos de temperatura y humedad para todo el año?, por supuesto que no. En cada momento del año nuestro cuerpo busca un equilibrio entre el esfuerzo a realizar y las condiciones exteriores, por lo que los rangos de temperaturas varían día a día en función del tiempo atmosférico exterior; es el bienestar adaptativo. En efecto, el bienestar adaptativo se basa en la aceptación genética a las condiciones de nuestro entorno vital, esto es, en la

capacidad que tiene el cuerpo humano para adaptarse permanentemente a las condiciones cambiantes del ambiente que le rodean mediante fenómenos vasculares, y en el empleo de recursos externos como la ventilación y el arropamiento. Por eso, dado que las condiciones externas son cambiantes, las condiciones de bienestar también deben serlo. Esto implica que se trata de un procedimiento dinámico frente a los procedimientos estáticos clásicos que fijan una temperatura de bienestar para cada época del año. Lógicamente la adaptación no se produce instantáneamente, sino que se produce lentamente; así se consigue una adaptación adecuada a las condiciones medias de la atmósfera y no a las momentáneas.





Existen varios modelos de bienestar adaptativo y varias expresiones para calcular la **temperatura interior de bienestar higrotérmico fluctuante**. Éstas son dos de ellas (Sánchez-Guevara, 2017):

ASHRAE Standard 55-2013

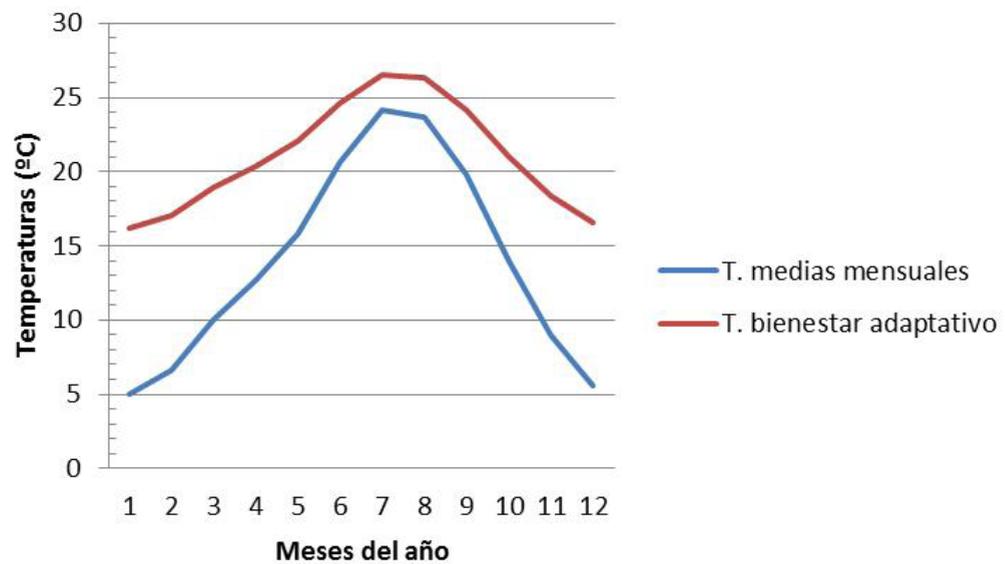
$$T_{\text{bienestar adaptativo}} = 0,31 \times T_{\text{me}} + 17,8$$

UNE-EN 15251:2008

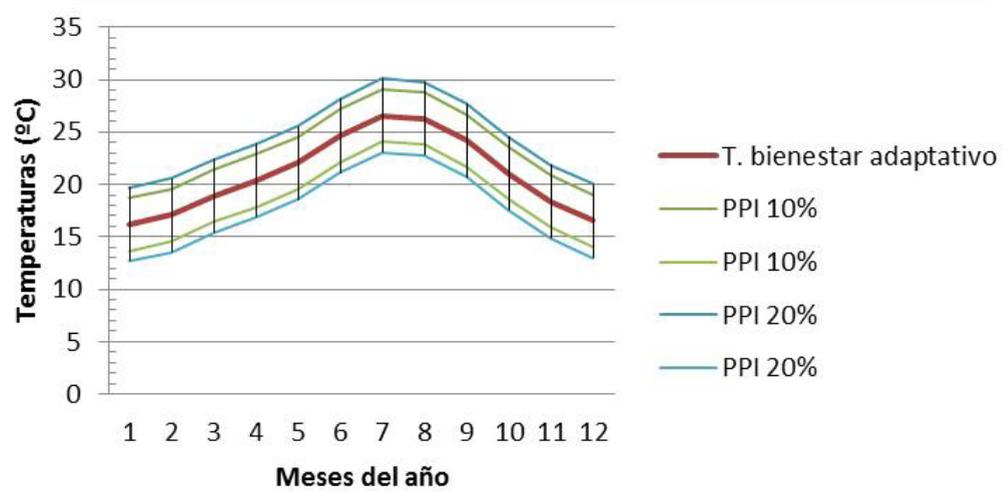
$$T_{\text{bienestar adaptativo}} = 0,33 \times T_{\text{md(p)}} + 18,8$$

$$T_{\text{md(p)}} = (T_{\text{md-1}} + 0,8 \cdot T_{\text{md-2}} + 0,7 \cdot T_{\text{md-3}} + 0,6 \cdot T_{\text{md-4}} + 0,5 \cdot T_{\text{md-5}} + 0,3 \cdot T_{\text{md-6}} + 0,2 \cdot T_{\text{md-7}}) / 3,8$$

Temperaturas de bienestar adaptativas según el modelo adaptativo para Madrid, comparadas con las temperaturas exteriores



Temperaturas de bienestar según el modelo adaptativo para Madrid dentro de las áreas generadas por los Porcentajes de Personas Insatisfechas (PPI) del 10 y del 20%



Otro aspecto a tener en cuenta es lo que podemos llamar la adaptación genética. Los procesos de adaptación mencionados antes van cambiando, pero hay situaciones donde esa adaptación ha quedado fija; es la adaptación al clima en el que vivimos y han vivido nuestros ancestros. Los que viven en climas fríos están adaptados al frío y prefieren temperaturas de confort más bajas que las que prefieren los que viven en climas calurosos y están adaptados al calor. La diferencia de temperatura de confort entre un sueco que viva en Estocolmo y un marroquí de Rabat es de 2,6 °C; lógicamente el marroquí prefiere una temperatura más alta. Incluso dentro de la península se perciben esas diferencias, aunque en menor grado; entre el norte de España y el sur de Extremadura la diferencia de

confort puede estar en torno a un grado centígrado.

El último gran aspecto que se debe incorporar para definir las condiciones de bienestar es el arropamiento del individuo, ya que la disipación de calor está muy influida por la vestimenta: un individuo con ropa pesada sentirá mayor sensación de calor que otro que ocupa el mismo ambiente con ropa ligera al ofrecer mayor resistencia térmica a esa difusión. Valorar el ropaje de una manera numérica para incluirlo en una concepción global del confort resulta relativamente sencillo. La vestimenta se mide con coeficientes de transmisión y resistencia térmicas. La unidad que se ideó para ser aplicada al arropamiento es el clo (clothing). Un clo equivale a una resistencia térmica de 0,15 m²·K/W; hay tablas donde se encuentran las valoraciones correspondientes a cada prenda en particular. La valoración de un atuendo completo se puede obtener sobre la base de estas cifras de dos modos distintos. Según la expresión de **McCullough y Jones** (1984):

$$R_{\text{ropa}} = 0,835 \cdot \sum R_{\text{prenda}} + 0,161$$

Según la expresión de **Olesen** (1985):

$$R_{\text{ropa}} = \sum R_{\text{prenda}}$$

Teniendo en cuenta que generalmente se trabaja con grupos de personas no uniformadas y con ropaje no homogéneo, el arropamiento puede resultar difícil o engorroso de precisar, y muchas veces resulta conveniente agrupar sus valores en niveles más simples (Neila, 2012):

		Medio	Rango
Nivel 0	Desnudos	(0 clo)	(0...0,3 clo)
Nivel 1	Ropa ligera	(0,5 clo)	(0,3...0,7 clo)
Nivel 2	Ropa media	(1,0 clo)	(0,7...1,3 clo)
Nivel 3	Ropa pesada	(1,5 clo)	(más de 1,3 clo)

Niveles de arropamiento

Como se ha visto, debemos perder constantemente el calor excedente producido por el organismo hasta dejarlo en una cantidad exacta, salirnos de esa cantidad provoca sensación de frío o calor, y si se superan ampliamente esas cantidades riesgos para la vida. **¿Pero cómo perdemos ese calor?** Pues lo hacemos empleando muchos procedimientos, algunos en forma de calor latente (la **evapotranspiración, la respiración y la difusión de vapor por los poros**) y otros en forma de calor sensible (**convección hacia el aire y**

radiación hacia los paramentos o la bóveda celeste). Los intercambios de calor latente en un ambiente interior acondicionado, considerando nula la evapotranspiración, pueden llegar a ser el 30% del total, mientras que, en un ambiente exterior, incluyendo la evapotranspiración puede estar entre el 80 y el 100% (Neila, 2012).

En la eliminación de calor sensible, la diferencia de temperaturas entre el aire y la piel o la ropa (la piel suele estar entre 32 y 35 °C), es el factor fundamental. La **convección** hacia el aire que nos rodea es el procedimiento fundamental de pérdida de calor que usa el cuerpo, pero cuando es el aire el que está más caliente, el cuerpo no puede perder calor por convección; en esa situación el cuerpo gana calor. En olas de calor el cuerpo sólo puede perder calor por evapotranspiración ya que las temperaturas son superiores a las de la piel o la ropa, provocando problemas de deshidratación, lipotimias o golpes de calor. Como se ha visto, la Isla de Calor Urbana añade un efecto adicional al del clima caluroso del verano, incrementando la temperatura nocturna ocasionalmente hasta en 10 °C, lo que dificulta el descanso saludable.



Evaporación

Intercambio de calor por evaporación del sudor

Convección

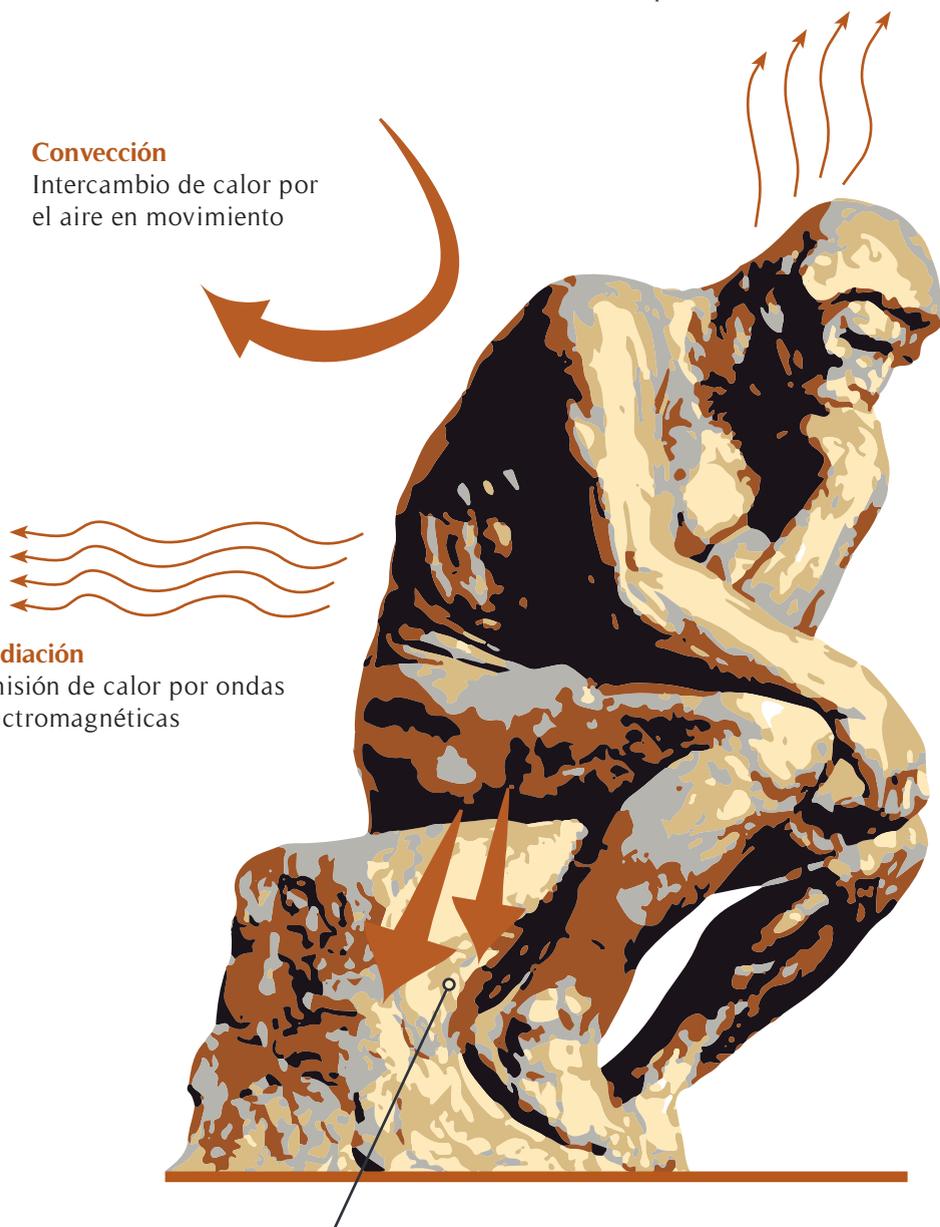
Intercambio de calor por el aire en movimiento

Radiación

Emisión de calor por ondas electromagnéticas

Conducción

Intercambio de calor por contacto



Hay muchos factores ambientales de carácter bioclimático que influyen favorable o desfavorablemente en esos intercambios, muchas veces, está en su control. Por ejemplo, al **aumentar la velocidad del aire** aumenta la cantidad de aire que se pone por segundo en contacto con el cuerpo y, por tanto, se **incrementan los intercambios convectivos**. Si el aire está más frío que el cuerpo, que será la situación más habitual, se incrementará la disipación de calor; si fuera al contrario, se incrementarían las ganancias, lo que siempre representa una situación de incomfortabilidad.

La humedad también influye de una manera notable. **El aire seco es perfectamente aislante**, lo que dificulta los intercambios de calor entre el cuerpo y el aire; por ese motivo se pueden aguantar temperaturas muy elevadas dentro de una sauna, donde el proceso sería de ganancia de calor, porque su aire está prácticamente seco. Al incorporar humedad al aire se vuelve tanto más conductivo cuanto más humedad reciba. Eso provoca que los intercambios se incrementen y se perciban como más calientes los ambientes cálidos y húmedos que los cálidos y secos. Igualmente, en condiciones de invierno se perciben como más fríos los que además son húmedos. Pero sobre todo influye en la evapotranspiración, ya que en ambientes muy húmedos no se puede evaporar el sudor generado. En ambos casos, los ambientes secos resultan más confortables, se perciben como menos calientes en verano y menos fríos en invierno, y en verano facilitan la evaporación del sudor, que habremos producido si era necesario perder más calor.

Los intercambios por **radiación** dependen de la temperatura de los paramentos en un ambiente interior, y de la bóveda celeste, el sol, el suelo y las paredes próximas, en un ambiente exterior; la temperatura de la piel y de la ropa, y, por tanto, de la resistencia de los elementos interpuestos entre el aire y la energía interna, como ropa, grasa y tejido muscular, y de la superficie de intercambio. En este caso, los dos cuerpos enfrentados van a perder calor en función de su capacidad radiante, que depende de su temperatura y de su emisividad, que salvo excepciones es muy parecida para todos los cuerpos. Al producirse un intercambio entre dos superficies enfrentadas, la más caliente será la que se enfríe, al perder más de lo que recibe. En un ambiente interior su comportamiento es similar al que ofrece la convección, ya que la temperatura de los paramentos es muy similar a la del aire; en cambio, en ambientes exteriores, su comportamiento es completamente independiente ya que el Sol siempre aportará calor por radiación, la bóveda celeste siempre enfriará por radiación, y los paramentos tendrán temperaturas diferentes a la del aire en función de que hayan estado más o menos irradiados por el sol.



Ya que el bienestar es el resultado de esa interacción compleja de parámetros y circunstancias, como decía Ortega y Gasset (“yo soy yo y mis circunstancias”), su valoración debe realizarse, en lo posible, combinando toda esa información. Aunque en lo relativo al bienestar higrotérmico los parámetros fundamentales son la temperatura y el contenido de humedad, se deben combinar con otros factores para crear índices de bienestar higrotérmico, que se usarán según las necesidades específicas. Son muchos y se organizan por categorías.

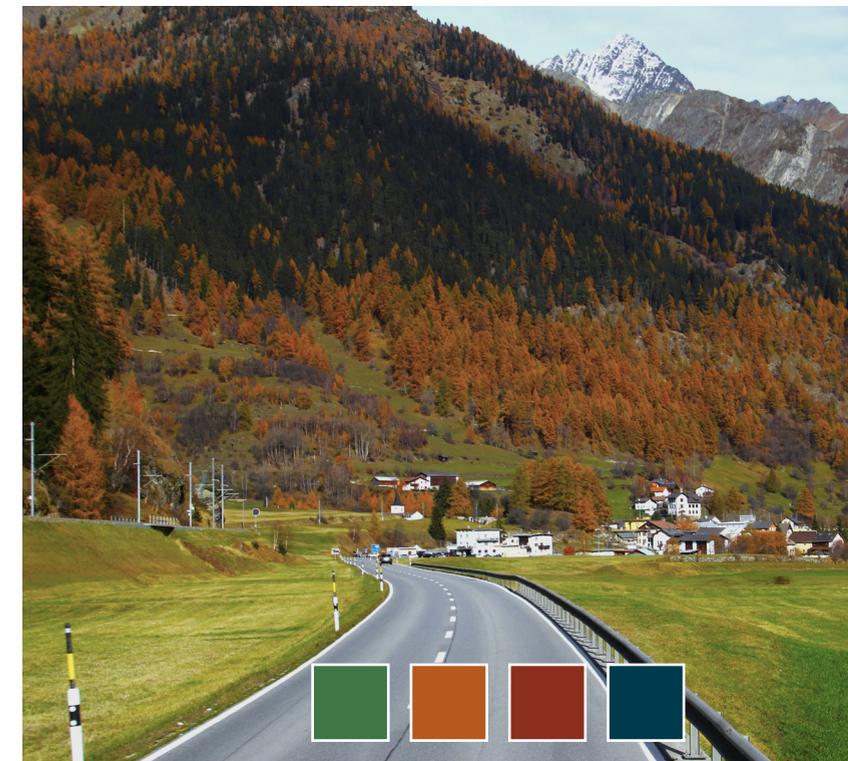
Una de las categorías de indicadores de bienestar es la de los Índices Empíricos; es la que contiene algunos de los más importantes dado su carácter experimental. De entre ellos destacan la Temperatura Efectiva, que tiene en cuenta la sensación producida por el efecto combinado de temperatura, humedad y movimiento del aire. Otro de los índices empíricos que merece destacar es el Voto Medio Previsto (VMP), que da una calificación a la sensación provocada por un número muy elevado de variables, tanto personales como del ambiente. Parte de su interés es la escala de sensaciones con la que se valoran los resultados obtenidos, que es la denominada **escala de Fanger**. En esta escala se aprecia como la valoración de los ambientes se basa en el porcentaje de personas que consideran insatisfecha esa situación (PPI).

+3	Calor (mayoritariamente insatisfechos).
+2	Cálido (75% de insatisfechos).
+1	Ligeramente cálido (25% de insatisfechos).
0	Neutro-confort (5% de insatisfechos).
-1	Ligeramente fresco (25% de insatisfechos).
-2	Fresco (75% de insatisfechos).
-3	Frío (mayoritariamente insatisfechos).

Escala de Fanger



Ejemplos de diferentes climas



Para determinadas actividades donde es previsible una exudación elevada, se emplean los **índices de estrés térmico**. Uno de ellos es el **Índice de Fatiga Térmica**, que indica la relación entre la pérdida de calor por evapotranspiración en una cierta situación y la máxima pérdida posible por el mismo mecanismo. El Índice de Humedad de la Piel es similar al anterior, pero relaciona cantidades de sudor producidas y no el calor eliminado por ellas. Otro de ellos es el **índice THTG Temperatura Húmeda-Temperatura de Globo**. Este índice se puede evaluar con cierta facilidad analíticamente para su empleo como método exploratorio. El índice THTG combina la medida de dos índices derivados, la temperatura húmeda natural (θ_{hn}), que es la temperatura obtenida con un termómetro húmedo ventilado de forma natural, es decir, con la velocidad del aire natural del ambiente, y la temperatura de globo (θ_g), que es la temperatura obtenida con un termómetro de globo, que es un sensor de temperatura situado en el centro de un globo de 150 mm de diámetro y una emisividad media de 0,95 (negro mate).

En relación con el ritmo al que se altera la temperatura interior de una habitación, la variación periódica de la temperatura del local, los sistemas de acondicionamiento bioclimáticos, si bien pueden contar con la inercia térmica para controlar los golpes térmicos provocados por la radiación solar o el frío nocturno, tienen el riesgo de crear fluctuaciones de temperatura a lo largo del día demasiado rápidas (independientemente de que se mantenga en todo momento dentro del rango del bienestar). La velocidad máxima aceptable para que el organismo tenga tiempo para una nueva adaptación es de 0,5 °C/h. Este aspecto se resuelve con gran facilidad con equipos mecánicos y sistemas de regulación y control, ¿pero es posible resolverlo desde un punto de vista pasivo?, sí, es más complejo y debe conseguirse mediante la masa térmica del edificio.

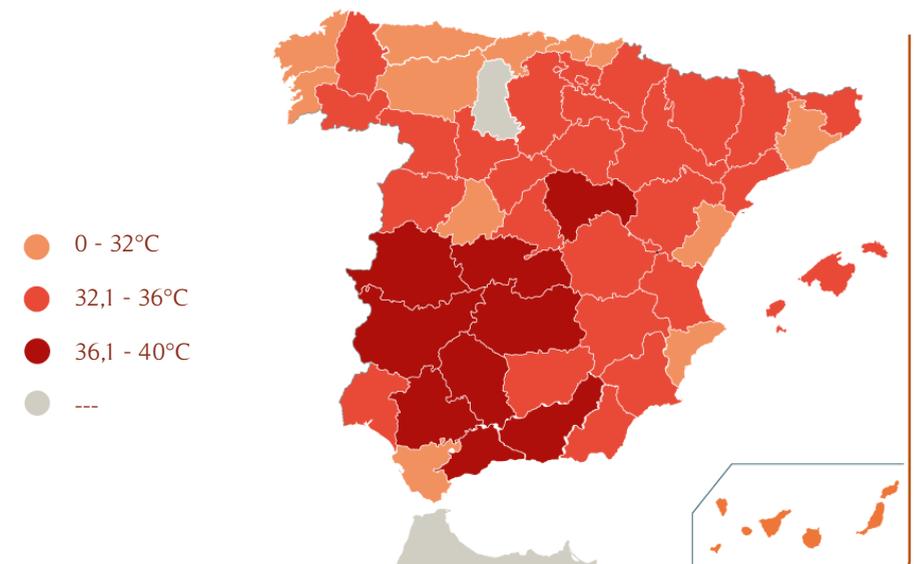
Ensayo de temperatura del globo, <https://slideplayer.es>

Calidad de aire y ventilación

Más allá de estos rangos de bienestar, tan variables, y de los porcentajes de personas que se encuentren mal, a partir de ciertas temperaturas, se entra en riesgo de hipotermia o hipertermia.

¿Cuándo aparece ese riesgo?, cuando las condiciones exteriores no permiten que el cuerpo pierda calor de una forma adecuada, es probable que aumente la temperatura interna. Para evitarlo, el organismo dilata las venas superficiales y deriva hacia ellas más cantidad de sangre, para que este aumento de superficie de intercambio compense la reducción del salto térmico. Si la temperatura del ambiente sigue aumentando, en un primer momento se producirá la fatiga propia de una pérdida continuada de fluidos, para posteriormente, cuando la evaporación del sudor resulte insuficiente, aumentar la temperatura interna, provocando incomfortabilidad, malestar y, en un caso extremo, si se superan durante un cierto tiempo los 41 °C, la muerte.

La temperatura de riesgo exterior es variable según la localidad y de nuevo depende de la capacidad adaptativa del ser humano a cada situación particular pudiéndose encontrar claras diferencias entre las áreas frías y las cálidas.



Mapa con las temperaturas de umbral de disparo de mortalidad por causas orgánicas en España, período 2000-2009 (Díaz *et al*, 2015)



En la situación contraria, al bajar la temperatura del ambiente cesa la producción de sudor, se contraen las venas superficiales y se reduce la temperatura de la piel para disminuir las pérdidas por convección y radiación. Si esto no es suficiente, el organismo tiende a generar calor mediante una actividad física involuntaria (la tiritona), intentando evitar que descienda la temperatura interna, produciéndose la muerte al mantenerse por debajo de los 28 °C.

Pero incluso ante estas temperaturas sus valores pueden ser variables debido a los procesos de adaptación genética. De los casos de estudio más interesantes está el de los escandinavos, que se protegen del riesgo de congelación en situaciones de máximo frío con una concentración de azúcar en sangre más elevada que el resto de los europeos, que actúa como anticongelante. Para ello tienen una cierta insulino-dependencia que les provoca diabetes, entre el 40 y el 50% de la población, frente a menos del 20% del resto de europeos (Neila, 2020).

Por todo ello hay que considerar conjuntamente los conceptos del bienestar con los de la salud. Quizá el caso más claro es el de los gases letales, como el monóxido de carbono o el radón, que no huelen, y por tanto que no nos producen incomodidad pero que son peligrosos para la salud. Por ello, la ventilación se convierte en una herramienta fundamental en el diseño bioclimático, tanto por asegurar unos niveles de gases contaminantes por debajo de los umbrales de riesgo, como por su capacidad de facilitar las pérdidas de calor del cuerpo humano y, por tanto, obtener el confort higrotérmico.

LAS ADAPTACIONES
GENÉTICAS INFLUYEN
EN LA PERCEPCIÓN
Y AGUANTE DE LAS
TEMPERATURAS. LA
CONCENTRACIÓN
DE AZÚCAR EN
SANGRE DE LOS
ESCANDINAVOS HACE
QUE SOPORTEN LAS
BAJAS TEMPERATURAS
DE SU CLIMA



¿Cómo ha resuelto la arquitectura a lo largo del tiempo su acondicionamiento y la sostenibilidad?

La arquitectura tradicional ha sido siempre respetuosa con el medio ambiente, es decir, **sostenible**, y en muchos casos capaz de aprovechar los recursos del clima donde se ubicaba para acondicionarse. Por eso se puede decir que la primera arquitectura bioclimática que se edificó fue seguramente una humilde cabaña. ¿Qué necesitó?, reflexión para entender el problema, inteligencia para ver los recursos que había disponibles, materiales y energéticos, y capacidad para aplicarlos en un diseño de vivienda.

El acondicionamiento pasivo primigenio

¿Qué era necesario?, calor para sobrevivir en los momentos fríos del invierno y frescor para soportar los tórridos veranos. A esas ideas tan básicas tuvieron que añadir el diseño de una envolvente protectora de los momentos térmicamente extremos del año y habilidad para la conservación de la energía que eran capaces de captar o producir. En ese diseño fue fundamental la configuración de una **envolvente adecuada** a cada caso, con los **materiales locales**, que aislara o almacenara energía: la tierra, la madera, la piedra y la cerámica, como materiales básicos, pero también la turba, el pasto, la nieve helada, la sal, la paja, etc. (Neila, 2014). Los resultados no eran necesariamente perfectos,

sobre todo si los vemos con nuestras exigencias actuales, pero en la mayoría de ellos se resolvió acertadamente el problema de la habitabilidad mínima.

La arquitectura vernácula bioclimática

A modo de ejemplos se pueden ver dos modelos tradicionales situados en climas del sur de Europa, uno en Italia y otro en España, concretamente en Extremadura.

El primero de ellos es el **trullo** (Neila, 2022), que es una antigua tipología de viviendas propias de la **Apulia**, realizada con mampostería de piedra colocada en seco, es decir sin argamasa, rematada por una gran cubierta cónica, sin duda su elemento más emblemático. Se

encuentra sobre todo en el Valle de Itria, en la comarca de la Murgia, de hecho, por si había alguna duda, a estas tierras se les denomina la **“Murgia de los trulli”**. Hay *trulli*, plural en italiano de trullo, en varios pueblos de la Murgia, no sólo en Alberobello, que es donde más abundan; también se pueden ver en Locorotondo, en Martina Franca, en Ostuni, en Cisternino y en todos los caminos que conectaban estas poblaciones.

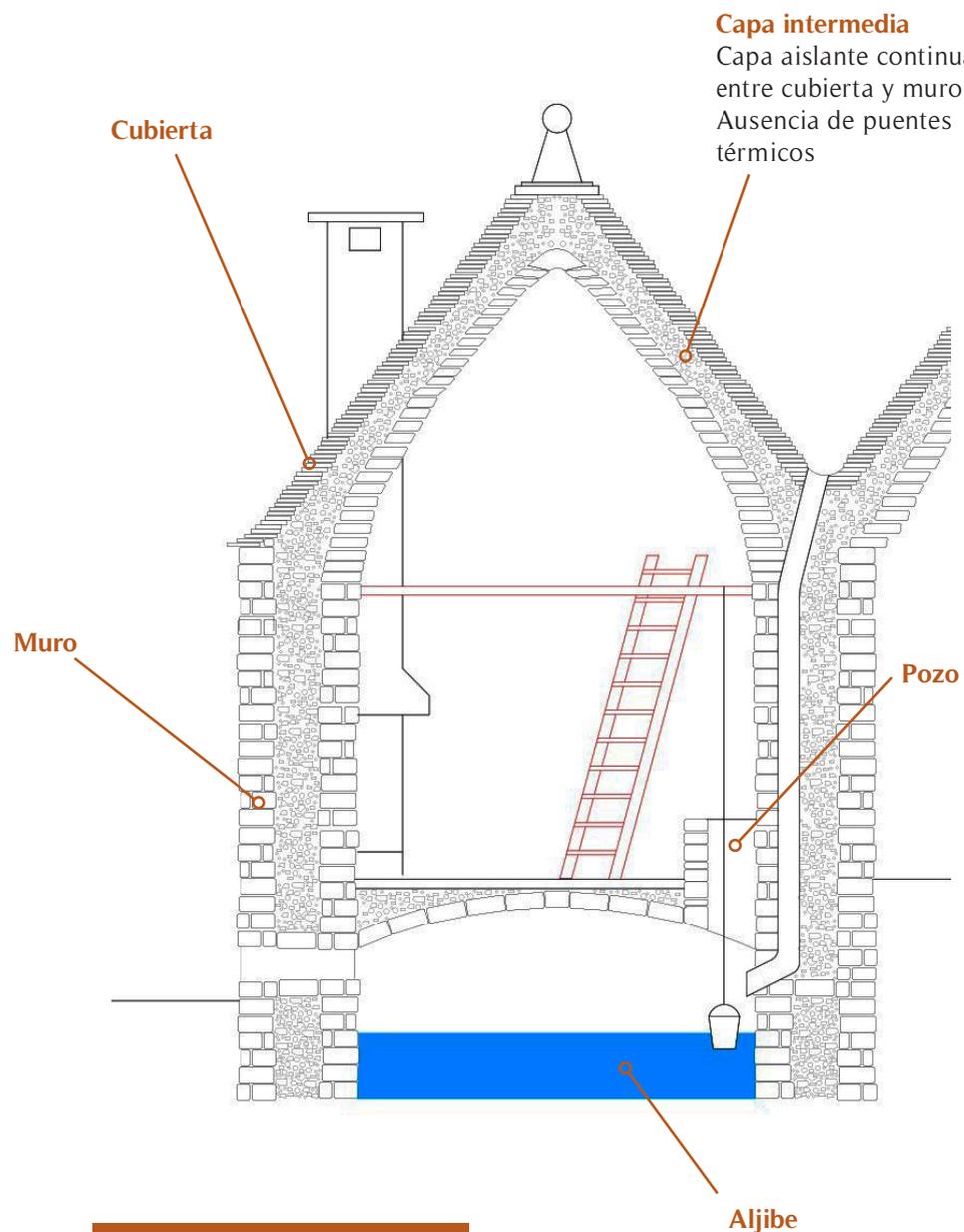


Imagen de trullo en Alberobello

La tipología original del trullo es muy básica y parte de un montón inestable de piedras colocadas en seco, formando hiladas circulares hasta terminar en una clave; son las construcciones trulliformes. Con el paso del tiempo la tipología original fue mejorando. La primera mejora que aportaron a la construcción del trullo fue lógicamente su estabilidad

estructural, pero no se quedaron ahí y enseguida se produjeron mejoras de las condiciones interiores de habitabilidad. Siguiendo con las mejoras constructivas, con el paso del tiempo fueron logrando habilidades en la ejecución de la obra que les permitía hacer muros algo más delgados, no los muros con anillos en forma de contrafuertes de los primeros refugios trulliformes, y con cubiertas más esbeltas que transmitían la carga de forma más vertical al muro. De ese modo el espacio que quedaba entre las dos hojas de sillares se podía rellenar de simples cascotes o lascas de piedra ligeros que aportaban más cantidad de aire y, por tanto, un pequeño aislamiento adicional; el aislamiento térmico lo aporta el aire en calma, y los cascotes y otros restos de piedras dejan aire entre medias. Las hojas de piedra pueden tener unos 40-80 cm cada una y la capa intermedia mucho más pequeña que en los refugios trulliformes, de sólo 10-50 cm; haciendo una somera interpretación de los materiales y en base a los notables espesores que tienen estas construcciones su transmitancia térmica podría ir de 0,2 a 0,5 W/m²·K, valores más que buenos.





Sección de un trullo clásico

Esa configuración de tres capas también se repite en la cubierta, con una hoja interior estructural construida con la técnica tradicional cónica autoportante del trullo, a continuación un relleno de cascote con aire en su interior, y finalmente la parte externa, la cobertura con lajas de piedra para evitar la entrada de agua, con lajas de piedra impermeable denominadas *chiancarelle*; de nuevo, en la cubierta la transmitancia térmica mejoraba claramente. De la cubierta, lo primero que se erige apoyado en el muro es el huso interior de piedras, que se va levantando poco a poco.

Las lajas de *chiancarelle* de los anillos más bajos son más grandes que el resto y se apoyan directamente en los muros periféricos creando un pequeño voladizo; son de unos 40 cm de profundas por 5-7 cm de canto. A partir de esa primera hilada las *chiancarelle* van disminuyendo de tamaño hasta llegar a las del remate superior, donde serán de unos 25-30 cm. Según se van levantando las hiladas se va incorporando en relleno interior de modo que las piedras apoyan en las inferiores y en ese relleno. El relleno comienza siendo de 50-60 cm en las zonas más anchas de la cubierta, las del arranque, donde se separan más la hoja interior de la exterior y termina siendo de 20-30 cm cerca del ápice. Se colocan con una ligera inclinación del 3% para que deslice el agua de lluvia.



Imagen de las lajas de chiancarelle de una cubierta

El maestro trullero colocaba una primera piedra en la esquina, llamada *peduccio*, de unos 30-40 cm, apoyada en el muro y volando hacia el interior. A ambos lados se colocaban otras dos más pequeñas sujetándola. Sobre la primera hilada se iban colocando otras hiladas sucesivas sobresaliendo de la anterior ligeramente, hasta que se lograba la forma circular del cono; se necesitaba de 1 m de altura más o menos. Los 2 m restantes se hacían de una forma más convencional.



Foto de un cono por el interior donde se ve la transición entre el cuadrado y el círculo



Las piedras inferiores del arranque de las hiladas circulares tienen unos 25-30 cm de altas, para luego ir disminuyendo según se acercan a las hiladas más altas. El ángulo de corte iba variando según ascendían las hiladas al igual que su tamaño, las más bajas se cortan con 80°, en la zona central con un ángulo de unos 60° y las más altas con 45°; los restos pétreos de los cortes se usan para el relleno. Las piedras más próximas al arranque que conforman la bóveda se apoyan unos 7/8 de su tamaño en la inferior y dejan en vuelo 1/8 parte, mientras que las que se encuentran cerca de la cumbrera apoyan 5/6 partes de la pieza y vuelan 1/6 parte.

Esta configuración de la envolvente, tanto en muros como en cubierta, **aporta masa térmica** para mantener fresco el interior durante el verano y aislamiento térmico para evitar las pérdidas de calor durante el invierno.

Aunque a lo largo del siglo XVII la zona disponía de agua en abundancia, tanto superficial como en acuíferos, gracias a las precipitaciones de agua y nieve, está datado que en 1663 hubo una nevada que alcanzó los 8 m de altura, en los últimos siglos se produjo un cambio en el clima con lluvias más irregulares, propias

del Mediterráneo, que la convirtió en una región seca convirtiendo al agua es un gran problema; en esas condiciones la recogida de las aguas de lluvia se convirtió en una necesidad perentoria.

Tras una recogida comunitaria en un aljibe comunal, con el paso del tiempo, los residentes aprendieron

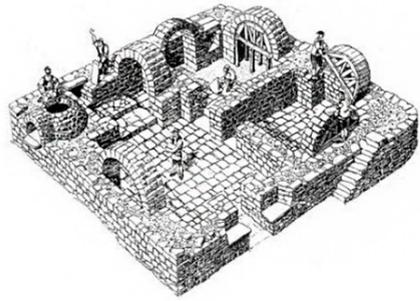
a construir sus propios aljibes para uso personal bajo las casas; hacían un sótano extrayendo la piedra con la que luego iban a construir el trullo que convertirían en el aljibe. Por eso actualmente se pueden ver *trulli* con aljibe y *trulli* sin aljibe dependiendo de la época en la que fueron construidos. Este aljibe no solamente era importante

para almacenar el agua que necesitaran, sino que se convirtió en una espectacular estrategia bioclimática. El aljibe se cierra con una bóveda de cañón sencilla y sobre ella se comienza la vivienda.

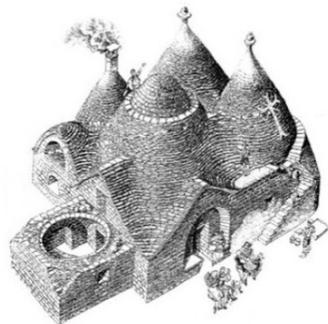
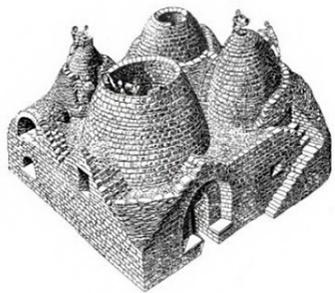
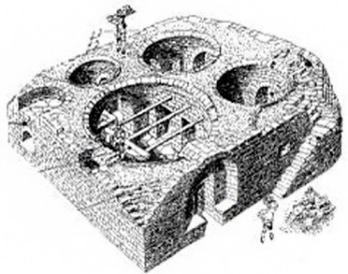


Imagen de los desagües vertiendo hacia la calle





Desde el interior hay un acceso a los aljibes en forma de boca de pozo para el suministro de agua, pero también tienen un hueco al exterior a través de una rejilla o un ventanuco. ¿Para qué servía?, no habría servido de mucho si no dispusieran además de una chimenea. Esta chimenea, gracias a la altura de su remate por encima de la cubierta genera una baja presión que produce un tiro de succión del aire que está en el aljibe en contacto con el agua a través de la boca del pozo. Esa sutil succión se produce gracias a que existe la entrada de aire exterior a través de los huecos en la fachada, que al estar más bajo aún tiene una presión mayor; podemos estar hablando de una diferencia de altura de 6-8 m.; la diferencia de presión puede ser de un 1 hPa. Estos huecos se pueden hacer gracias a la pendiente de las calles, a que el suelo del trullo se eleva con respecto a la acera o gracias a cualquier otro tipo de solución. Los tres huecos son fundamentales: el exterior, el del pozo y el de la chimenea.



Al pasar el aire exterior por el aljibe y en contacto con el agua se produce una evaporación y una disminución de su temperatura de tal forma que el aire que penetra y ventila es un aire más frío que el exterior, es decir aire acondicionado. Para evaporar 1 g de agua hacen falta 2424 J y con esa energía se puede bajar la temperatura de 1 m³ de aire en unos 3 °C. Es evidente que la presencia del agua del aljibe y el diseño de este sistema de ventilación se convierte en una estrategia activa de refrigeración muy eficiente.



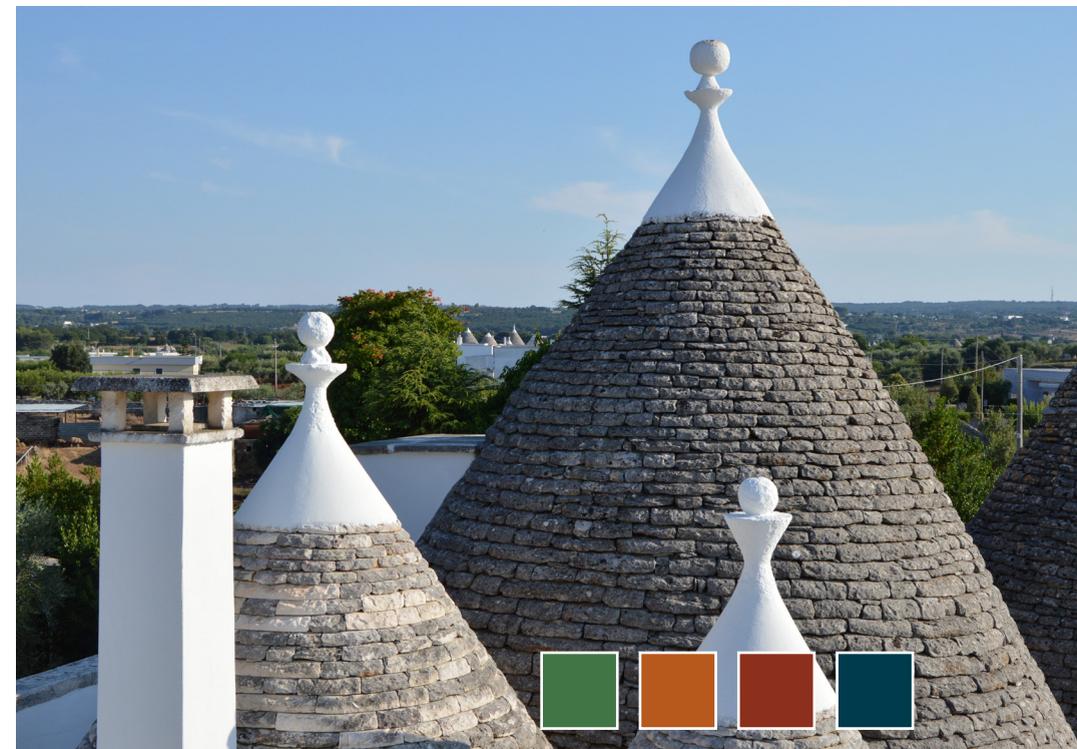
Imagen de un pozo



Rejilla de ventilación del aljibe situada en el muro exterior

La chimenea es fundamental y aparece en la cubierta de todos los *trulli*. Los que tenían aljibe las usaban no sólo para la salida de humos sino para la ventilación/refrigeración conectadas con el aljibe. En el trullo en el que vivía estaba conectada a una estufa de biomasa que sustituía al antiguo hogar abierto.

Chimeneas de trullos



Funcionamiento de un *trulli* (Condiciones estivales-julio)

Almacenamiento de energía en la entreplanta

La entreplanta retiene el poco calor que pueda entrar por la cubierta. Si bien durante el día el aire que entra es caliente, aunque luego se enfríe con el agua, durante la noche es básicamente frío de tal modo que la hoja interior de piedra almacena ese frescor y hace que la vivienda permanezca constantemente acondicionada

5 Succión de aire interno por la chimenea

La temperatura superior de la chimenea succiona por efecto Venturi el aire interior, obligando la entrada de volumen de aire por las rejillas de ventilación manteniendo así el sistema en funcionamiento

1 Entrada de aire exterior

Por las rejillas de ventilación
Temperatura exterior 17-30 °C

2 Paso por el aljibe

Temperatura del suelo a:

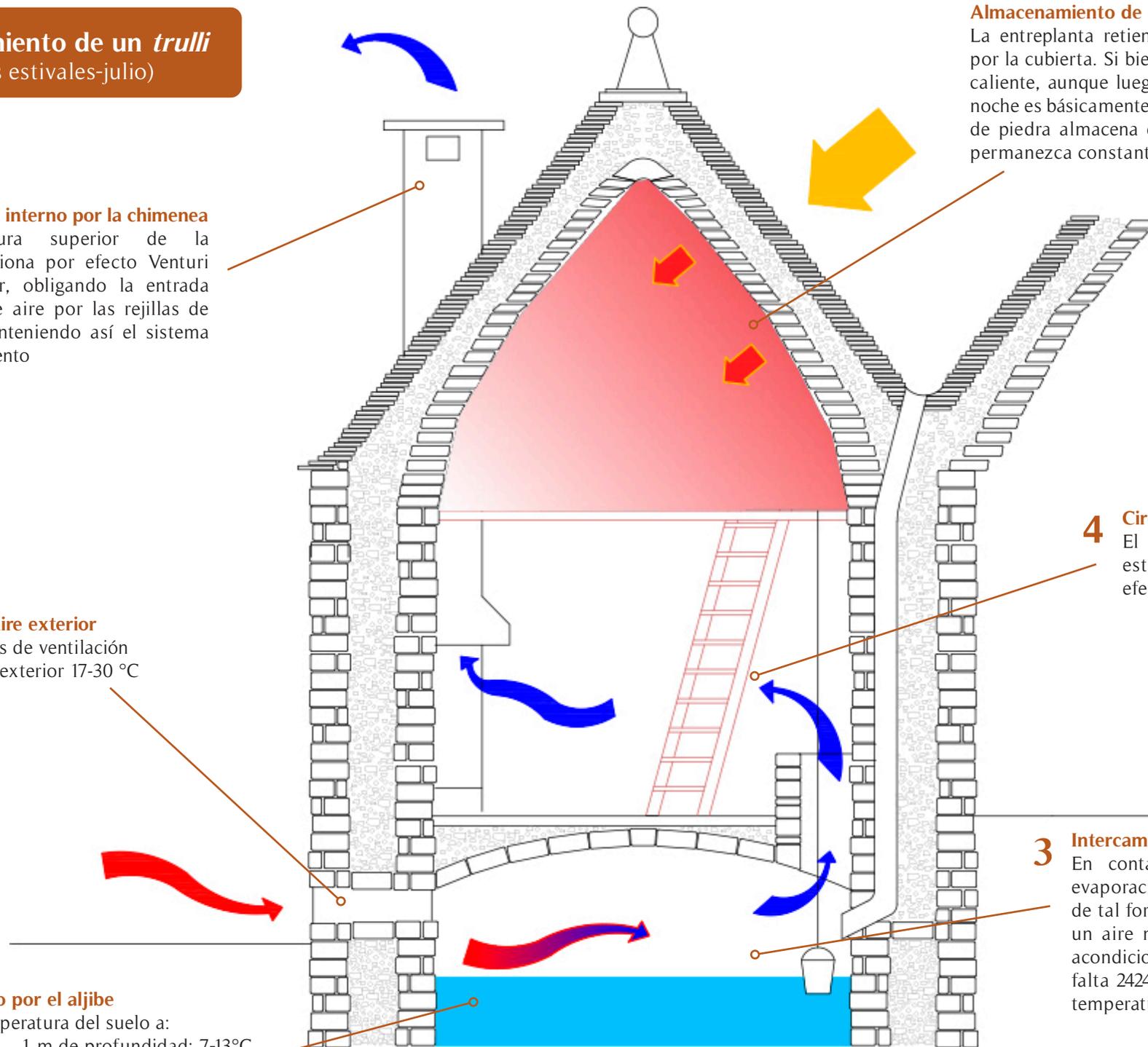
- 1 m de profundidad: 7-13°C
- 2 m de profundidad 10-13°C

4 Circulación interna de corrientes

El aire refrescado entra en la estancia superior succionado por el efecto Venturi de la chimenea

3 Intercambio de calor en el aljibe

En contacto con el agua se produce una evaporación y una disminución de su temperatura de tal forma que el aire que penetra y ventila es un aire más frío que el exterior, es decir aire acondicionado. Para evaporar 1 g de agua hacen falta 2424 J y con esa energía se puede bajar la temperatura de 1 m³ de aire en unos 3 °C



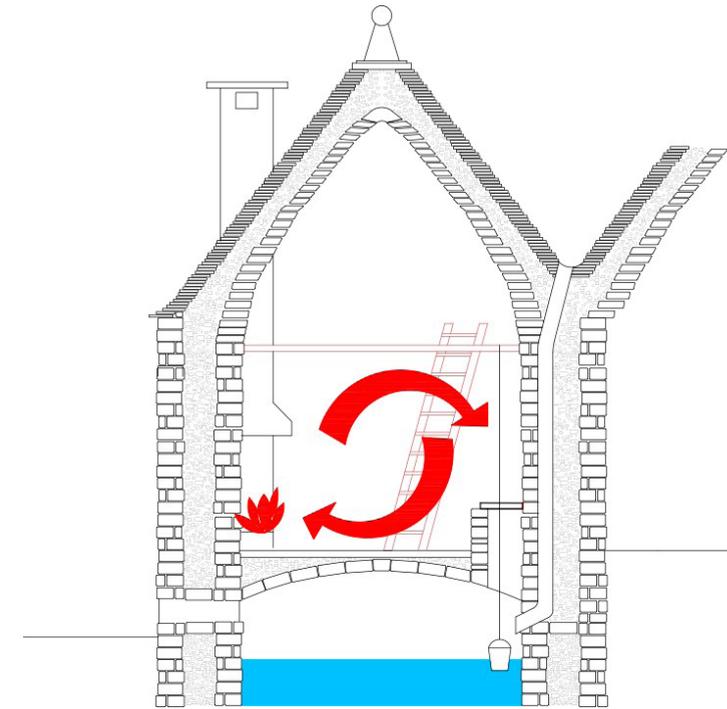
Hay otro detalle importante en la configuración interior del **trullo**, que además **mejora la habitabilidad interior**. El reducido espacio con el que cuentan les obliga a buscar zonas de almacenaje adicionales. Teniendo en cuenta la altura interior del trullo y el volumen desaprovechado bajo la cubierta, se crea una entreplanta a la que se accede mediante una escalera; estas escaleras son una imagen muy representativa del funcionamiento de los *trulli*.



Zona de acceso a la zona superior de un *trulli*



¿Qué otra función cumplen estos espacios?, pues doble. En invierno el volumen superior queda cerrado y separado de la zona habitable inferior. Teniendo en cuenta que el calentamiento del trullo se hace usando la chimenea, cuanto más pequeño sea el volumen de aire a calentar menor será el consumo de combustible, por ese motivo al reducir el volumen interior resulta más eficiente la calefacción. En verano, aunque la estructura exterior de la cubierta, con esa capa aislante creada entre las dos hojas de piedra con los cascotes, aísla, parte del calor que habrá transmitido el sol a la piedra indudablemente va a llegar a la hoja interior y al espacio habitable. En este caso, la zona expuesta a la radiación, que es la parte más alta de la cubierta es la que corresponde a la entreplanta de tal manera que el calor queda acumulado ahí y, dado que el aire caliente es más ligero que el aire frío, no se mezcla con el aire acondicionado por el aljibe bajo la entreplanta.



Esquemas con el funcionamiento del trullo en invierno

Entreplanta reduciendo el espacio a calentar y la entrada de aire por las rejillas de ventilación tapadas.

“LA ARQUITECTURA APROPIADA NO SOLO BUSCA LA SUSTENTABILIDAD ECOLOGICA, SINO TAMBIEN ECONOMICA Y CULTURAL”

Alvar Aalto



El otro modelo de arquitectura tradicional/bioclimática se encuentra en España, en concreto en el valle del Jerte. Es una tipología más básica, con algunas carencias, pero interesante para ver el contraste con la anterior; la arquitectura vernácula no siempre ha alcanzado cotas elevadas de eficiencia.

Dentro de ese modelo (Neila, 2020) hay **dos tipologías** de edificios de viviendas: **la casa serrana y la casa de entramado**. La de entramado se da en el fondo de los valles, donde las temperaturas son más suaves. Se puede ver en Hervás, pero también se repite en los pueblos de Cabezuela, Jerte, Tornavacas o Navaconcejo, en el valle del Jerte. En estos pueblos la estructura lineal de la población, ya que siguen la ribera del río, condiciona la posición de las calles y da lugar a unas casas muy profundas.

La casa serrana

Aparece en los pueblos a mayor altura, en zonas frías. Realmente sólo hay uno en esta zona de los valles, Piornal, pero la tipología también baja por la ladera hasta otros pueblos. Su característica principal es la fachada de piedra frente a la de entramado de madera y adobes; es muy abundante en toda España, sobre todo en la zona este del Sistema Central. Es más cerrada, por el frío, y de planta más cuadrada para hacerla más compacta. En Piornal se pueden encontrar casas serranas.

A media ladera están los pueblos de Rebollar o Casas del Castañar, dónde, al cambiar el clima a más extremo se mezclan construcciones de entramado y casas serranas. Como no siguen al río, la estructura urbana no es lineal y las manzanas son más cuadradas, lo que influye también en la forma de la planta de las viviendas. En el valle del Jerte los pueblos donde se pueden ver más casas de entramado son Cabezuela, Jerte, Tornavacas, Rebollar o Casas del Castañar.





La casa de entramados de madera

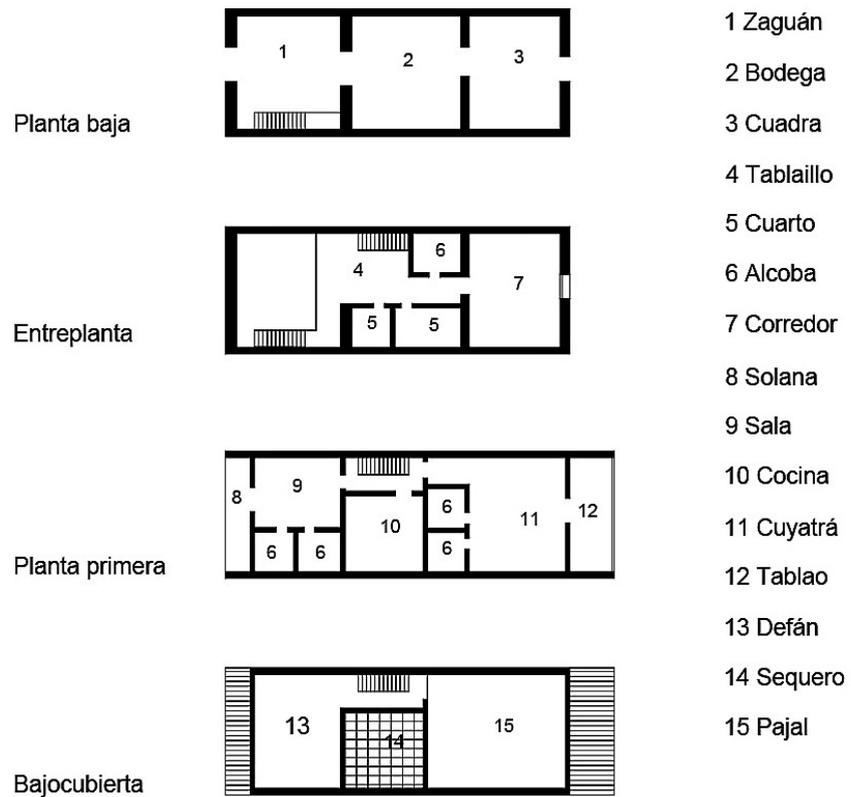
La construcción más característica de los valles de Ambroz y del Jerte es la casa de entramado de madera y adobes. En Hervás se pueden ver muchas con la fachada no revestida, lo que permite observar el detalle de su construcción. Ese entramado de madera de castaño está en la planta superior que vuela sobre la baja, generalmente hecha de piedra. No está claro si el origen está en las construcciones de los judíos medievales pero es cierto que se pueden ver en la judería.



Fachada recubierta con teja cerámica en posición vertical, casi siempre la canal

El entramado con el adobe al aire resulta un tanto endeble frente a la lluvia o la nieve. Por eso lo protegían con un revoco de cal o con teja árabe colocada verticalmente; esas tejas tienen que estar clavadas porque no se podrían sujetar sólo con un mortero. Este sistema es clásico de la zona norte de Cáceres.





Plantas de la casa de entramado típica de los valles

La vivienda tipo de entramado puede tener una o dos plantas, con un desván y tal vez con una planta intermedia. La planta baja es la del acceso a través de un zaguán. El **zaguán** es un gran vestíbulo cubierto que da entrada al resto de dependencias; su nombre proviene del árabe *istawuan*. Su pavimento es de canto rodado, el mismo empleado en la calle; se denomina *enrollau* y sirve para mostrar la transición entre lo público y lo privado. Desde el zaguán se puede subir al siguiente nivel o pasar a la bodega y a la cuadra, donde se albergaban los animales, bajo el mismo techo que los humanos. El suelo es de paja para que se puedan recoger bien los excrementos de los animales y utilizar la mezcla para el abonado de los frutales. La ventilación es reducida, lo que facilita la conservación del calor producido por la actividad metabólica del ganado. La ley de Kleiber permite calcular el calor emitido por esos animales en función de su masa: $3,4 \times m^{0,75}$; una vaca

genera 450 W de calor y un cerdo 180 W, cantidades todas ellas muy apreciable y dignas de aprovechar para el calentamiento del edificio. En la bodega, como es lógico se guarda el vino en grandes tinajas de barro, con una temperatura siempre fresca y poca luz para su mejor conservación.

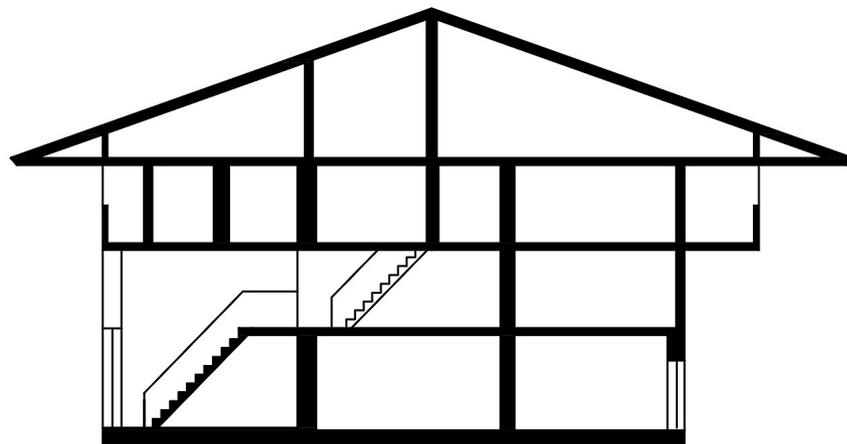
La entreplanta aparece cuando el edificio tiene suficiente altura como para poder intercalarla. En la entreplanta se encuentra el tablaillo o sobrado. Dependiendo del tamaño de la casa puede ser un simple pasillo o una zona amplia volcada sobre el zaguán. Desde él se accede a algunas alcobas y cuartos para distintos usos. La alcoba es el dormitorio, sin ventilación ni luz natural, algo que nos parece hoy en día inaceptable, pero eran las habitaciones menos frías de la casa, donde todo era helador. Al fondo el corredor, que no es otra cosa que el dormitorio principal, éste sí, con ventanas al exterior (Montalbán, 2015).



Desde este nivel se llega a la **primera planta**, donde se realiza **la vida en la casa**. A la calle da un balcón protegido, la solana, como en Cantabria, donde se secan algunos productos hortícolas, como el maíz. Dando a la solana, la sala de estar principal de la casa. En medio de la planta la cocina, para distribuir el calor a todo el edificio, rodeada de alcobas, que también quieren aprovechar ese calor. Al fondo la *cuyatrá* y el tablar. La *cuyatrá* es una habitación de servicio de la cocina, donde se friega, se cose, se lava, y se realizan todas las tareas domésticas que no caben en la cocina, es el equivalente a un lavadero o un *office*; era la habitación preferida del ama de casa, donde reina sin que se la moleste. El *tablarillo* es una salida trasera de esta zona de servicio, generalmente conectada

con la cuadra mediante una escalera de mano.

En el **bajocubierta**, que es el espacio que queda bajo los faldones de la cubierta, aparece el *defán*, que es el espacio que da a la parte frontal de la casa, y donde se almacenaban cereales. Luego aparece el *sequeu*, justo encima de la cocina para aprovechar su calor y el del humo que lo atraviesa por la chimenea como secadero de castañas, maíz o calabazas. Y finalmente el pajar, al otro extremo, donde se almacena la paja y el heno que servirá de alimento a los animales. En conjunto una estructura compleja llena de espacios especializados para cumplir con todas las necesidades del edificio, buscando en cada caso los lugares más apropiados para ello.



Sección de una casa de entramado larga

El sistema constructivo utilizado es muy básico y frecuente en muchos edificios de otras regiones, claramente diferente al de los *trulli*, aunque el clima no difiera en exceso.

¿POR QUÉ ESAS DIFERENCIAS?,
POR LOS MATERIALES LOCALES, EL
USO DEL EDIFICIO, EL AGUA Y LAS
CIRCUNSTANCIAS HISTÓRICAS Y EL POSO
CULTURAL DE LA ZONA, ÁRABE EN UN
CASO, NORMANDO EN EL OTRO.

En el muro exterior generalmente se diferencia la parte inferior, la de la planta baja, del resto. **La parte inferior es de mampostería** de piedra para evitar la subida de agua por capilaridad desde el terreno o desde la acera cuando se inunda o anega con agua de lluvia, y para soportar el peso del resto de la fachada. **La parte superior es de entramado**, es decir, una estructura portante de maderos formando una trama de piezas horizontales, verticales e inclinadas, estas últimas para arriostrar la pared. Entre medias, el relleno, que originalmente era de adobes de barro. El conjunto es térmicamente débil debido a sus materiales y a los exigüos 15 cm de espesor; la transmitancia térmica de estos muros es de 1,7-1,8 W/m²·K en la zona de mampostería y 1,9-2,0 W/m²·K en la zona de entramado, frente a lo que hoy exigiríamos para este clima, que sería más bien del orden de 0,30 W/m²·K. Éste siempre fue el punto débil de estas construcciones, sin embargo, en verano funcionan mejor, ya que en conjunto tiene suficiente masa como para hacer estable la temperatura durante todo el día.

El valor de la transmitancia térmica de la cubierta es aún mayor, con vigas estructurales de madera de castaño sobre la que se coloca una base de tablas de madera para rematarlas finalmente con teja; supera los 3,5 W/m²·K. Pero **el mayor problema es la falta de hermeticidad** de esa solución constructiva y sus grandes exfiltraciones, con las que se va el calor. Sin embargo, en verano es su punto fuerte, ya que esa potente ventilación evita el sobrecalentamiento del bajocubierta.



Como consecuencia, en invierno las temperaturas que se alcanzan en el interior son muy bajas. Pueden ir desde 5 hasta los 13 °C como máximo. Sin fuentes de calor significativas, sólo el calor animal y el fuego de la cocina, con una envolvente sin aislar y con una gran falta de hermeticidad, en el aire queda muy poca energía. A pesar de que ese rango es muy bajo para nuestros estándares de bienestar, hay que considerarlo como un logro si nos fijamos en que las temperaturas exteriores pueden bajar de cero.

¿Pero esto es algo habitual en la arquitectura popular del mundo?, sí, no preocuparse de las condiciones frías del invierno porque siempre se pueden resolver con un buen arropamiento o una buena chimenea; en el interior de estas casas extremeñas de entramado la resistencia térmica de la ropa que se usa es superior a lo que usamos habitualmente, es un 10...30% mayor. De hecho, desde que el hombre aprendió a controlar el fuego no se puede decir que hayamos pasado frío dentro de las casas.

Pero **la casa de entramado está mucho mejor pensada** para aguantar el calor del verano. De hecho, las temperaturas interiores, dependiendo de la planta y la habitación, fluctúan entre 19-25 °C.

Aunque en el bajocubierta pueden llegar a alcanzarse ocasionalmente los 30 o 31 °C, como consecuencia del calentamiento solar del débil tejado, el edificio gracias a su masa térmica se encarga de absorber los excesos de calor. Sobre todo lo hacen el suelo, que es su gran sumidero de energía, y el muro de la planta baja que es de mampostería de granito y un espesor notable; la masa térmica de ese muro es de cerca de 1800 kJ/K·m². Pero también hay algo de masa en los tabiques, los forjados y los muros de entramado. Aunque normalmente la masa está en los cerramientos, en este caso sus escasos 15 cm de adobe relleno al estructura de maderas de castaño no aporta una gran inercia térmica, sólo unos 200 kJ/K·m², nueve veces menos que el muro de la planta baja de piedra. Cuanto más alta sea la masa térmica más energía se necesita para aumentar un grado su temperatura; así que si es muy elevada casi no se incrementará su temperatura por mucha energía que entre desde el exterior. Si el edificio no hubiera sido capaz de controlar esos flujos de calor la habitabilidad se habría visto muy condicionada en verano.

"SI LA NATURALEZA HUBIERA SIDO CONFORTABLE, EL HOMBRE NUNCA HABRÍA INVENTADO LA ARQUITECTURA"

Oscar Wilde



El edificio de energía cero o casi cero

El concepto de edificios de energía cero o casi cero es muy ambiguo, y hoy en día hay muchas apreciaciones diferentes sobre a qué nos referimos cuando hablamos de este tipo de edificios. ¿Se refiere a edificios que no gastan energía en el acondicionamiento, como los edificios pasivos, se refiere a los que tienen también en cuenta la energía eléctrica o tal vez la energía embebida de los materiales con que se han fabricado? En la actualidad la **Directiva de la Unión Europea (NZEB)** hace referencia sólo a la energía del acondicionamiento y la del agua caliente sanitaria, pero parece evidente que el objetivo final de un diseño bioclimático, si tenemos en cuenta el cambio climático y el agotamiento de recursos, debería incorporar cualquier concepto de energía vinculado al edificio, a su construcción o a su uso.

ES EVIDENTE QUE EL EDIFICIO DEL FUTURO TIENE QUE SER UN EDIFICIO QUE NO CONSUMA ENERGÍA, O AL MENOS QUE LA ENERGÍA QUE CONSUMA LA PRODUZCA ÉL MISMO, SIN CONTAMINAR

La energía del acondicionamiento

Quizá el control del consumo de energía para el acondicionamiento térmico sea el apartado más conocido y más trabajado, en parte porque es el que está limitado y controlado por las normativas nacionales e internacionales. El bienestar, la salud y la habitabilidad interior son fundamentales y, por tanto, están ligadas a la energía dedicada al acondicionamiento higrotérmico. No obstante, su cuantía energética puede no ser la más significativa dentro del edificio; hay otros consumos energéticos que hay que tener igualmente en cuenta e integrar dentro de un edificio bioclimático.

En los conceptos de arquitectura pasiva y solar el uso de climogramas de bienestar y otras herramientas,

están claramente dirigidas al acondicionamiento higrotérmico. Se podría decir que es fácil de alcanzar el adjetivo de energía cero para el acondicionamiento en climatologías suaves como las que corresponden a los países del área mediterránea. No obstante, para alcanzar estos objetivos es precisa una capacitación profunda, un conocimiento correcto del clima del lugar, del diseño arquitectónico, de los materiales y del propio bienestar. La mayor parte de este manual se dedica justamente al acondicionamiento pasivo y, por tanto, a llevar a cero la energía necesaria para ello.

La energía de los materiales

Uno de los aspectos más significativos a la hora de seleccionar los materiales sostenibles es el **análisis de la energía que han necesitado en todo su ciclo de vida**, tanto la extracción, el transporte, la manufacturación, como en su eliminación o transformación en una central de reciclado. A todo ello estaría vinculado, no solamente al agotamiento de recursos energéticos, sino también la contaminación generada por ese uso de la energía cuando no es limpia ni renovable. Por ello deben

elegirse materiales con poca energía embebida en todo ese proceso, categoría en la que se encuentran los materiales poco elaborados ya sean pétreos o vegetales, y aquellos cuya obtención desde la materia prima no conlleva un gasto energético importante. Como ejemplo más negativo tenemos el aluminio virgen cuyo proceso de transformación desde la bauxita es enormemente costoso desde el punto de vista de la energía. Para ser justos en esta evaluación, no basta con tener en cuenta la energía empleada, sino también la producida o ahorrada en su ciclo de vida; es el caso de un panel fotovoltaico o térmico, que producen energía, o un aislante térmico que la ahorra.



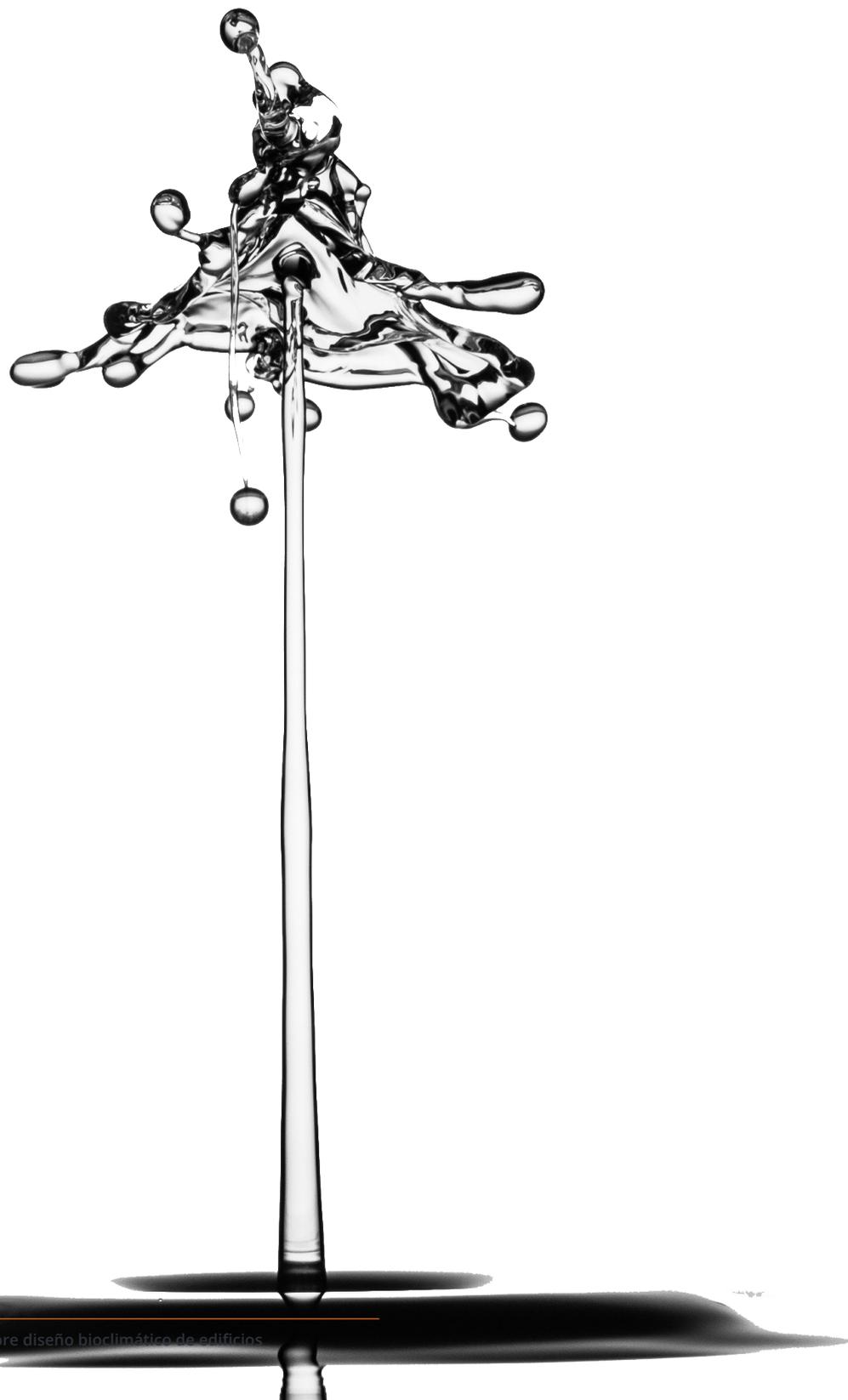
Resto de consumos de energía vinculados al edificio

Como se ha comentado en este manual, el edificio de energía cero será aquel que tenga en cuenta todos los consumos de energía vinculados al proceso constructivo y de uso. Es fácil considerar aquella energía que se contabiliza y se paga directamente por el usuario, como el **gas para la calefacción o el agua caliente sanitaria o la electricidad para el uso de electrodomésticos, el alumbrado interior o la vitrocerámica**. En estos casos, cuando la energía se utiliza para varios usos no es sencillo para el consumidor conocer el porcentaje que corresponde a cada uno de ellos, por ejemplo, la parte de gas que va a la calefacción o la parte que va al agua caliente sanitaria, la electricidad que se usa para hacer funcionar la vitrocerámica para cocinar, de la que se usa para el alumbrado o la que se usa para los electrodomésticos; si se desconocen estos valores es difícil que podamos reducirlos de una forma coherente.

Si se tomara como medida la energía que necesita para acondicionarse térmicamente un edificio muy bien aislado que cumpliera el estándar Passivhaus, la energía que consume una familia de cuatro miembros para preparar el agua caliente sanitaria a una temperatura de consumo de unos 45 °C al año es de unos 720 kWh, lo que representa sólo un 12% de la de acondicionamiento. Es una cifra pequeña que además es fácil de cubrir con los sistemas tradicionales de colectores solares, con bombas de calor o con recuperadores térmicos.

Sin embargo, el consumo de energía eléctrica en una vivienda puede suponer un 150% de la energía necesaria para acondicionarlo higrotérmicamente, por tanto, ese consumo es más importante. Sin embargo, en este caso caben opciones para resolverlo y debe tenerse en cuenta la posible producción directa de energía eléctrica en el edificio, ya sea con una instalación micro-eólica o un sistema fotovoltaico, como ya obliga nuestra normativa. Según los datos de consumos aportados por **IDAE** (IDAE, s.f.), harán falta entre 30 y 40 m² de paneles fotovoltaicos por vivienda, bien orientados e inclinados, para cubrir sus necesidades.





EL AGUA ES HOY EN DÍA EL RECURSO CON MÁS RIESGO DE LOS QUE NECESITA LA HUMANIDAD, NO PORQUE SE VAYA A AGOTAR SINO PORQUE NO SOMOS CAPACES DE PRODUCIRLA

Pero hay otros consumos de energía menos evidentes que también hay que valorar, como puede ser el uso de energía vinculado al agua potable que consumimos, que en este caso puede ser sólo un 30% de la necesaria para el acondicionamiento higrotérmico. El agua es hoy en día el recurso con más riesgo de los que necesita la humanidad, no porque se vaya a agotar sino porque no somos capaces de producirla, mientras la población sobre la Tierra crece de una manera continuada y el acceso al agua dulce es cada vez más desigual; cada vez nos tocará menos. Por ese motivo hay que darle una doble importancia, material y energética.

Otro consumo de energía es el que estaría relacionado con las basuras (RSU) que se generan, no solamente por su recogida y tratamiento posterior, sino por el propio hecho de que se ha necesitado energía para la fabricación de recipientes, envoltorios y demás restos. Por ese motivo el diseño de un edificio bioclimático debe contemplar correctamente sistemas que faciliten la separación de las basuras para que su tratamiento posterior reduzca el uso de materia nueva. La incineración controlada de esos residuos puede ser una fuente alternativa de energía a contemplar.



¿Por qué no tenemos en cuenta también la **energía del transporte** que utilizan los ocupantes del edificio?; es algo que parece lógico contemplar ya que su ubicación tiene mucha trascendencia. Nos podemos encontrar con que en una vivienda donde haya dos vehículos su gasto energético (gasolina o gasóleo) pueda equivaler al doble de lo que se necesita para acondicionarla. Dos coches haciendo 20 km diarios consumen al año 45300 MJ de energía. Eso nos debe llevar a pensar en alternativas como la del coche eléctrico, que se puede cargar con la energía eléctrica producida por el propio edificio; esos mismos recorridos con coches eléctricos, dada su mayor eficiencia, consumen sólo 7884 MJ al año, un 17,4% de lo que consumen los coches de gasolina (Neila, 2019). También hay que plantearse el transporte activo con bicicleta u otros medios si la ciudad se adapta correctamente al empleo de estos medios y el edificio aporta sitios adecuados para su estacionamiento.

Por último, aunque no menos importante es la energía que se usa para hacer funcionar una de las máquinas más importantes que hay dentro del edificio, el ser humano, es decir la **energía de los alimentos**. Los alimentos aportan la energía que necesitamos para desplazarnos y realizar actividades, y, por tanto, todo lo que represente la energía del cultivo de hortalizas o frutas, o de la cría de animales y, sobre todo, la de su transporte, se debería considerar. **Esa energía alimenticia en una vivienda equivale al 70% de la energía necesaria para el acondicionamiento**, por tanto, es muy significativa. Si tuviéramos en cuenta la energía que se gasta en el desplazamiento y el transporte de esos alimentos

nos daríamos cuenta de que estamos gastando más energía en llevarlos a nuestra mesa que la que nos aportan, por eso los edificios y las ciudades deberán empezar a pensar en convertirse en productores de proximidad de algunos alimentos, como lo fueron en la antigüedad. No entenderíamos que la energía que gastásemos en transportar gas a nuestra casa fuera superior a la que produce el propio gas. Diríamos: ¡utilicemos directamente esa energía en lugar de gastarla en el transporte, que es más razonable!; lo mismo pasa con los alimentos, que en muchos casos necesitan más energía para su transporte que la que aportan. El diseño del edificio bioclimático también debería contemplar esa posibilidad.

En el apartado anterior se contemplaba la energía de los materiales. Se trata del apartado indudablemente más crítico a la hora del consumo de energía, y con consideraciones más arquitectónicas. Si tuviéramos solamente en cuenta el proceso de fabricación de los materiales, es decir, sin contemplar el traslado a la fábrica y la propia extracción, la energía necesaria para fabricar los materiales que vamos a usar en la construcción de un edificio pueden equivaler a 100 años de consumo de energía para el acondicionamiento, por tanto, éste es el punto más importante a la hora de considerar si el edificio es realmente de energía cero. Las posibilidades actuales para resolver

este problema son pequeñas, pero debemos ir acostumbrándonos a utilizar materiales reciclados, materiales de baja energía embebida o materiales reutilizados.

Situado en el puerto de Copenhague. Es una planta de cogeneración que utiliza los residuos urbanos de la ciudad como combustible. Es capaz de alcanzar una potencia de producción de electricidad de 63 MW y de 247 MW de calor para calefacción urbana.



Edificio Amager Bake





Revisión de las estrategias arquitectónicas de acondicionamiento pasivo





Aprovechamiento sostenible de recursos energéticos

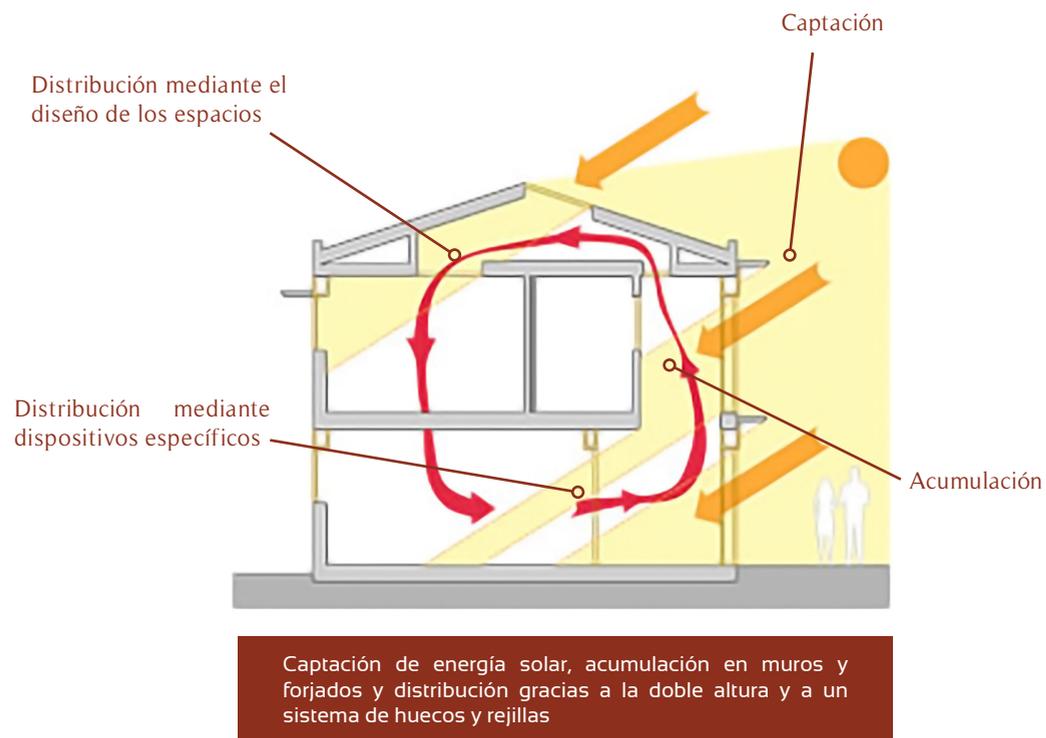
Como se ha indicado en este manual, el objetivo del diseño de arquitectura bioclimática es **“alcanzar el confort en un ambiente saludable empleando básicamente fuentes renovables”**. Para ello, no solamente es necesario implementar en el diseño estrategias bioclimáticas, sino que previamente debe analizarse el tipo de energía más adecuada para usar en cada caso.

Captación, producción, distribución y acumulación de energía

El diseño bioclimático, tanto el popular y tradicional, como el actual evolucionado, se asienta sobre tres/cuatro patas: **la captación y/o producción de la energía, su almacenamiento y su distribución**. La captación, combinada con la producción, siempre serán necesarias. La captación es el punto de partida lógico: captar los recursos que deja la naturaleza a nuestra disposición, el sol, el viento, el agua, la tierra, el cielo. La producción deberá emplearse cuando la captación no es suficiente y se trate de un recurso renovable

que se va a transformar, como la biomasa en calor al quemarla o el agua en frío al evaporarla. La distribución y reparto de la energía captada o producida por todas las habitaciones del edificio es igualmente fundamental; no puede haber espacios confortables y otros que no lo sean. Pero el almacenamiento sólo hará falta cuando la energía gestionada sea irregular en el tiempo, por ejemplo, la energía solar, el enfriamiento nocturno o la energía eólica, que sólo se pueden aprovechar en determinados momentos del día. La biomasa, el enfriamiento evaporativo, la energía geotérmica, etc. no precisan de almacenamiento energético porque podemos usarlos cuando nos convenga, si previamente los hemos acopiado en forma de combustible o agua, o por el simple hecho de estar en la tierra de forma casi inagotable.





Por su parte, la distribución de la energía es un concepto plenamente arquitectónico, ya que para disfrutar de la energía captada en todos los espacios hace falta una correcta distribución de los mismos que les permita recibir directamente la energía. Cuando no es posible, habrá que analizar el diseño de los espacios y sus interconexiones; en ocasiones se pueda recurrir a dispositivos mecánicos que ayuden a la distribución de la energía entre fachadas. Si falla la distribución, sencillamente tendremos locales acondicionados y locales no acondicionados.

Fuentes de energías renovables aprovechables

Las fuentes de **energía renovables** aprovechables **dependen del lugar concreto**. En algunos sitios será la radiación solar, en otros la ventilación nocturna, en otros la reirradiación hacia la bóveda celeste, en otros casos la energía que se pueda sacar de una fuente de agua, de determinado tipo de biomasa animal (una explotación ganadera)

o vegetal (restos de cultivos o podas), etc. Hay que saber ver y buscar en el entorno para entender que se puede aprovechar.



Alberobello, Puglia, Italia

De igual modo **los materiales** que se van a aprovechar para la construcción también **deberían estar vinculados al lugar**, como la tierra adecuada para hacer tapiales o adobes, o algún material aislante, como sería en el caso de Extremadura el corcho. En otras partes del mundo el aislamiento se ha obtenido del pasto, como en las casas noruegas, de la turba como las construcciones islandesas, del picón volcánico como en las casas cueva de Santorini, el relleno con piedra como en las *trulli* de Alberobello, etc. (Neila, 2017)

Extremadura es rica en todos estos recursos naturales materiales y energéticos, y simplemente hay que

saber encontrar los más adecuados en cada caso.



Santorini, Grecia, Gerald Friedich



Los huecos acristalados

Probablemente **el punto más importante de un edificio bioclimático sean sus huecos**. Los intercambios de aire y energía que se producen a través de ellos son en gran medida los responsables del balance térmico final, del comportamiento higrotérmico del edificio y de sus condiciones de bienestar y habitabilidad. Su diseño, orientación, tamaño, proporción, materiales, etc. son parte fundamental del diseño bioclimático.

Hoy en día disponemos de vidrios y carpinterías de gran calidad adecuadas para cada uso. ¿Pero se deben usar por igual en todas las fachadas? No, no parece razonable el empleo del mismo tipo de ventana en todas las orientaciones. En las orientaciones captadoras se deben usar vidrios claros que no interfieran en la captación, sin embargo, en orientaciones donde no es posible captar ración solar en verano es preferible usar vidrios aislantes con tratamiento bajo emisivos. También hay que considerar los vidrios fotovoltaicos, que actúan como protección solar al tiempo que generan energía. Lo importante es elegir el adecuado para cada caso.

Distribución y orientación óptimas de los huecos

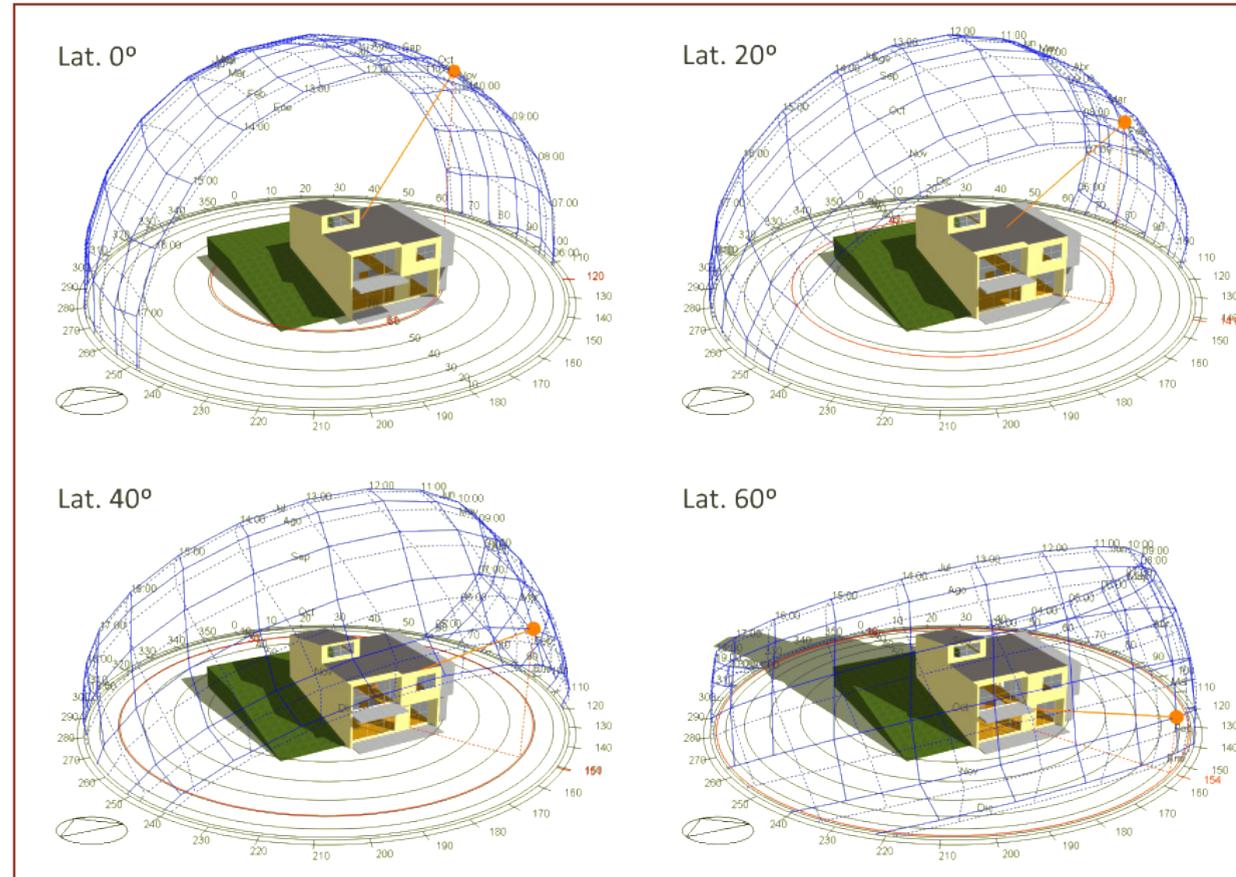
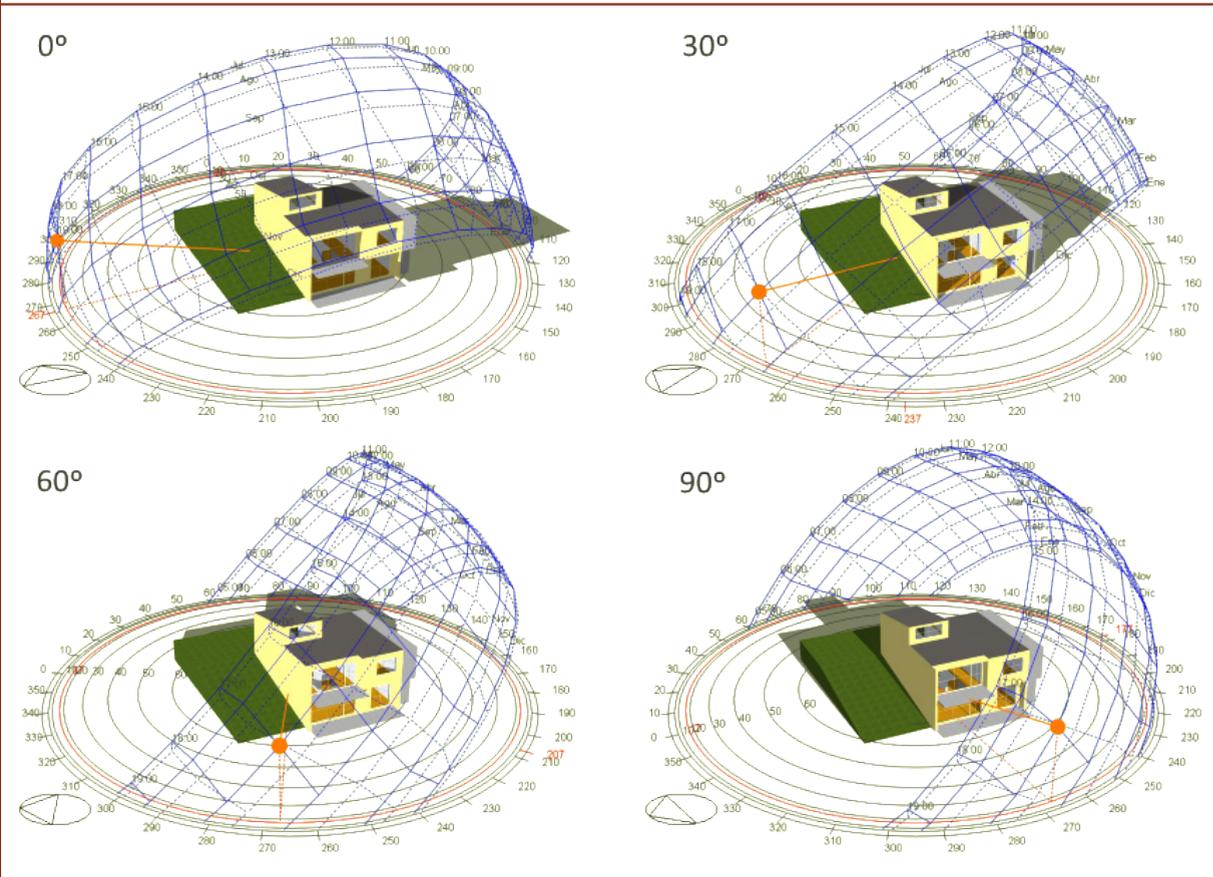
En un gran número de climas es posible y necesario **aprovechar la radiación solar** durante los momentos fríos del año, captándola a través de los huecos acristalados. Pero también, en general, durante el verano hay que evitar que penetre al edificio provocando sobrecalentamiento. Existen diversos procedimientos para regular la radiación que incide sobre un cerramiento y sus huecos; pueden ser elementos arquitectónicos del propio edificio, tales como los apantallamientos fijos o móviles, o externos a él, como la vegetación de hoja caduca. Pero la mayor efectividad de cualquier solución dependerá de la acertada orientación de los huecos.

Aceptando como premisa inicial que existe una necesidad de acristalamiento determinada, no cabe duda de que, a efectos energéticos, hay una distribución óptima de esas ventanas en las distintas fachadas del edificio. La función de los huecos acristalados es múltiple: **sirven para captar radiación solar**, pero también para **ventilar, permitir la conexión visual con el exterior e iluminar**. En relación con este último aspecto, la función captadora entra en oposición con la iluminadora. Para captar calor debemos dejar pasar la mayor cantidad de radiación directa posible. Sin embargo, la radiación directa puede producir deslumbramiento, tanto por el exceso de luminancia en la ventana, como por su reflexión en las superficies interiores del local. Si la función que debe predominar es la de iluminar (bibliotecas, aulas, etc.), los huecos deben estar orientados a norte, o tener un tratamiento obstructivo que convierta la radiación directa en difusa antes de que llegue a las superficies reflectantes. Otra solución es emplear materiales de acabado con una baja reflectancia (menor de 04), para evitar que se comporten como superficies espejadas; es fundamental que el suelo no tenga un coeficiente de reflexión elevado; de este modo se puede recibir gran cantidad de radiación solar y al mismo tiempo evitar el deslumbramiento.

El problema radicaré en la definición del óptimo energético y funcional, ya que no se puede diseñar para condiciones de luz, para condiciones de ventilación, para condiciones térmicas de invierno y de verano independientemente, ya que las soluciones adecuadas para un caso pueden ser inadecuadas en otros.



Importancia de la orientación de un edificio



Recorridos aparentes del sol para un edificio con diferentes orientaciones, <https://www.seiscubos.com>

Tomados para un edificio ubicado en latitud 40° norte (Madrid), en el mes de septiembre y a las 17:00 horas. En el primer caso el edificio se orienta al norte, mientras que en los siguientes gira 30° , 60° y 90° respecto al norte.

Recorridos aparentes del sol para un edificio de la misma orientación y diferentes latitudes, <https://www.seiscubos.com>

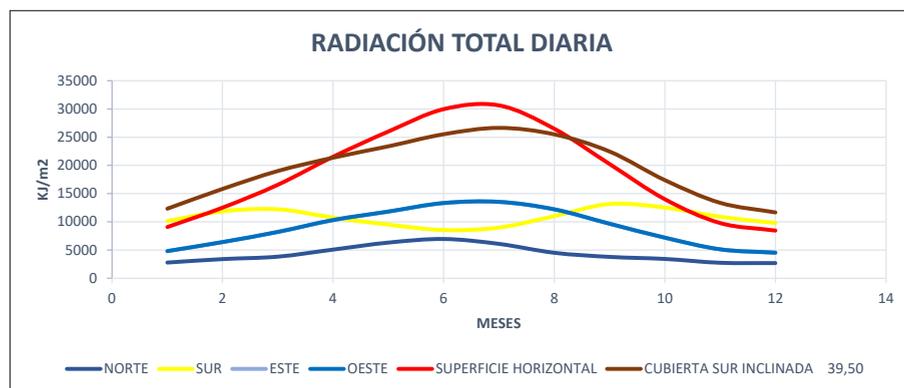
Tomados para un edificio orientado hacia el norte, a las 10:00 horas de la mañana en el mes de septiembre. Los diferentes grados de latitud indican el ángulo del sol para latitudes 0° (ecuador), 20° (trópico), 40° (franja mediterránea) y 60° (franja nórdica).



Desde el punto de vista térmico el estudio para las latitudes medias del hemisferio norte de la distribución anual de la irradiancia a través de vidrios con distintas orientaciones permite determinar que la orientación sur es la más favorable para el acristalamiento, ya que es la única en la que se obtienen mayores ganancias en invierno que en verano, lo que supone el óptimo energético que inicialmente había que definir. Tratamiento aparte merecen las orientaciones este y oeste, ya que son las más desfavorables. En ellas se obtienen siempre los mayores valores en verano y mínimos en invierno, únicamente superados con valores inferiores en las orientaciones que dan total o parcialmente al norte.

RADIACIÓN TOTAL MENSUAL

(KJ/m ²)	NORTE	SUR	ESTE	OESTE	SUPERFICIE HORIZONTAL	CUBIERTA SUR INCLINADA 39,50
ENE	2795	10135	4802	4802	9082	12315
FEB	3404	11866	6408	6408	12525	15824
MAR	3834	12217	8209	8209	16579	19001
ABR	5079	10750	10317	10317	21547	21362
MAY	6315	9500	11824	11824	26020	23375
JUN	6944	8531	13338	13338	29981	25518
JUL	6083	8976	13543	13543	30644	26645
AGO	4515	11002	12219	12219	26504	25497
SEP	3792	13168	9663	9663	20252	22456
OCT	3430	12525	7188	7188	14011	17380
NOV	2757	10892	5119	5119	9790	13358
DIC	2700	9793	4517	4517	8456	11653



Radiación solar total captada en Cáceres en cuatro orientaciones y dos cubiertas, una plana y otra inclinada orientada a sur

La fachada norte ha sido siempre demonizada en los ámbitos bioclimáticos; debían minimizarse o, incluso, eliminarse los huecos de las fachadas con esa orientación. El motivo de esta valoración tan extrema y negativa posiblemente sea doble. Por un lado, el hecho evidente de que quienes han desarrollado todas esas teorías han sido investigadores de países fríos, que no es el caso extremeño. El hueco acristalado siempre se encuentra en equilibrio entre la energía que pudiera captar y la que pierde; en el hemisferio septentrional, el hueco a norte nunca capta energía, solamente pierde, por lo que su balance es claramente negativo. El segundo motivo es posiblemente tecnológico. Los huecos tradicionalmente han sido puntos térmicamente débiles, mal resueltos debido a los materiales constructivos disponibles: vidrios malos y carpinterías malas, por lo que, si no captaban energía debían reducirse a la mínima expresión funcional. Sin embargo, esta visión

debe cambiar si lo vemos desde la óptica del clima cálido, como es el español de latitudes medias, y desde la evolución tecnológica de los materiales constructivos. En un clima caluroso hay que diferenciar las necesidades del verano de las del invierno. Si bien en invierno a través de este hueco no se capta nada de energía solar, en verano, las habitaciones con huecos a norte son las más confortables y frescas del edificio al no recibir tampoco casi nada de calor. En un clima frío del norte, esto no se consideraría un valor positivo al tener unos veranos moderados en los que la orientación de los huecos no es determinante. Por tanto, ya que no capta energía en ningún momento del año, de lo que se trata es que no pierda tampoco mucho en invierno. Esto nos lleva a la segunda transformación, la tecnológica. Hoy en día disponemos de huecos acristalados, **vidrios** y carpinterías, con un valor de **transmitancia térmica** que, en algunos casos, es **menor de lo que lo era en los**

Cómo se puede ver, las orientaciones donde hay máxima captación en invierno son las dos cubiertas y la orientación sur, por el contrario, las peores son las orientadas al norte al este y al oeste. Sin embargo, en condiciones de verano las dos cubiertas son las que tienen la máxima captación. En verano, las dos que dan el mínimo son la norte y la sur. Como se ve, la orientación prácticamente óptima, coincidente en invierno y en verano, es la sur.



paños opacos hace poco tiempo. Es decir, no hay ningún problema por hacer grandes huecos a norte si los resolvemos con calidad tecnológica: una o dos cámaras, gas en su interior y tratamientos bajo-emisivos en sus lunas, pudiendo llegar a valores menores de 0,8 W/m·K. Pero hay más valores en los huecos orientados a norte. En todos los casos, la luz; la luz desde la fachada norte es difusa, la ideal para cualquier tarea visual. El segundo, para los **climas cálidos**; en estos climas la **ventilación** es imprescindible para reducir la demanda de refrigeración o para alcanzar el bienestar en verano. La ventilación perfecta es la que se establece desde la fachada más fresca hacia la más cálida; es decir, de norte a sur. Por tanto, en este caso los huecos cumplirán una función de ventilación notable.

Los auténticos malos huecos en nuestro clima son los orientados a oeste, donde no se producen captaciones en invierno y es enormemente difícil protegerlos en verano sin alterar otras funcionalidades del hueco, como la luz, la visión o la ventilación.

HAY QUE OLVIDARSE DEL
ESTEREOTIPO DEL HUECO A
NORTE Y VALORARLO COMO UN
POSIBLE VALOR POSITIVO EN
LOS CLIMAS CÁLIDOS

El efecto invernadero y calentamiento solar

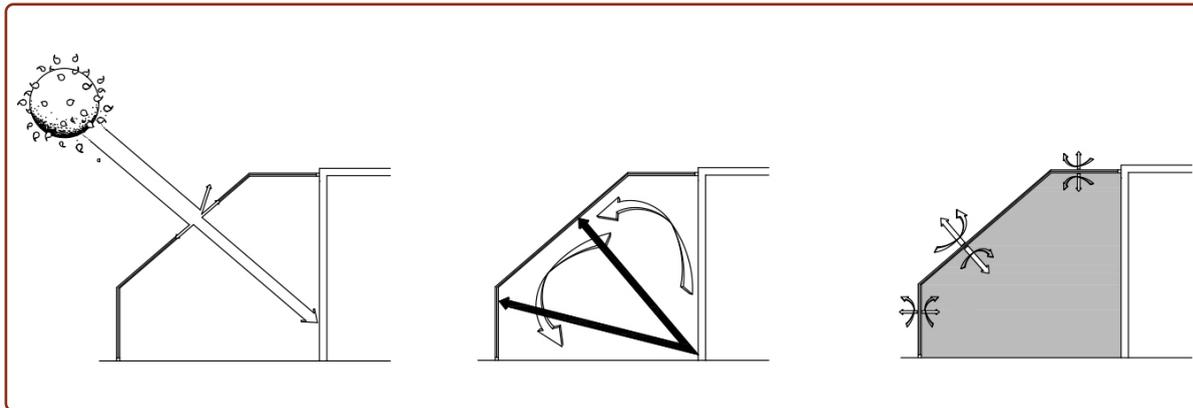
Los **sistemas pasivos** de captación solar **aprovechan el efecto invernadero**. El fenómeno se basa en que la longitud de onda de la radiación solar que llega a la Tierra se encuentra comprendida, en su mayor parte, entre 300 y 3500 nm. Los vidrios son permeables a la radiación de onda corta, es decir, longitudes de onda menores de 2500 nm, lo que supone la mayor parte de la radiación solar, dado que sólo supera este valor el 3%.

Pero no toda la radiación solar de onda corta que incide sobre un vidrio lo atraviesa, ya que parte se refleja y parte se absorbe por el material. El porcentaje de radiación reflejada es función del ángulo de incidencia y de su transparencia (factor solar, g_{\perp}); en término general se puede suponer que en un vidrio sencillo es sólo un 7% del total incidente. Por su parte, la energía absorbida por el vidrio, después de calentarlo, es cedida tanto al ambiente exterior como al interior, por radiación y convección. Su cuantía, en una gran simplificación, puede evaluarse en un 10% hacia el exterior y un 5% hacia el interior; el mayor porcentaje de energía que se trasmite de este modo hacia el exterior se debe a la mayor diferencia de temperatura entre el vidrio y los objetos exteriores, y del

mayor coeficiente de transmisión por convección. El resto de la radiación penetra calentando los cuerpos contra los que incide, paredes, suelo, plantas, muebles, etc., aunque no directamente el aire. Sin embargo, el aire termina calentándose por convección al ponerse en contacto con los objetos previamente calentados por radiación. Todos estos cuerpos calientes, independientemente de ceder calor por convección, emiten energía por radiación con una longitud de onda de unos 11000 nm, longitud para la que el vidrio es completamente opaco. De este modo el vidrio se convierte en una trampa de calor que permite la entrada de energía, pero no su salida, logrando que se caliente constantemente el ambiente interior; este efecto se aprecia claramente en una galería cerrada y acristalada o en el interior de un coche expuesto al sol.



A pesar de ello, es indudable, que se pierde calor. En primer lugar, la radiación de onda larga emitida desde el interior, al incidir sobre el vidrio, aunque no logre atravesarlo, lo calienta, y, en segundo lugar, se calienta igualmente por convección en contacto con el aire interior, dando la posibilidad a esta energía de perderse por convección o por la propia irradiación del vidrio caliente hacia el exterior, acabando por equilibrar la temperatura interior con el balance de energía hacia el exterior sin poder conservar más energía. La mejor forma de aprovechar la mayor parte de la energía que ha penetrado el vidrio es no permitir que el aire del invernadero se caliente excesivamente, lo que llevaría a grandes pérdidas por transmisión. El sistema para evitarlo es evacuar el aire caliente rápidamente hacia la habitación contigua sustituyéndolo con aire frío de esa misma habitación. Otro procedimiento complementario o alternativo es su acumulación rápida en algún sólido, paredes, suelos o techos del invernadero, para evitar que sea el aire el que se caliente excesivamente.



Efecto invernadero en un edificio

Captación de radiación solar y almacenamiento en las paredes del interior del invernadero; transformación en aire caliente y emisión radiante en el infrarrojo de las paredes; pérdidas de calor del invernadero hacia el exterior por transmisión de calor a través de los vidrios.

La **captación de la energía solar** se puede realizar empleando **dispositivos mecánicos** específicamente diseñados para ese fin (colectores solares) o mediante **sistemas pasivos**. Generalmente se denominan sistemas de acondicionamiento pasivos a aquellos que son parte constituyente del edificio, ya sea como elementos constructivos básicos (muros, ventanas, cubiertas, etc.) o como elementos básicos modificados en su función (invernaderos, galerías, chimeneas, sótanos, etc.). De este modo, la edificación se convierte, de una forma natural, en el sistema de captación, control, regulación, acumulación y distribución de la energía que necesitan sus ocupantes para vivir, sin generar sobrecostos en su construcción.



Galería en un edificio



En condiciones de **invierno**, la fuente de energía térmica renovable por excelencia es la **radiación solar**, aunque también se puede contar con la energía geotérmica, la aerotérmica, ambas mediante bombas de calor, y con la combustión de la biomasa.

Una posible clasificación de las estrategias pasivas de captación de la energía solar se basa en la forma en la que se realiza: directa, si la energía penetra en el edificio en el mismo momento en el que incide sobre su envoltura exterior, o retardada, si entre el momento en el que se recibe la energía y en el que llega al interior media un período prolongado de tiempo, como consecuencia de una acumulación previa. En realidad no existe ningún sistema que sea totalmente directo, ni totalmente retardado, sino que la clasificación se basa en el predominio de uno de los dos mecanismos sobre el otro. Estos mecanismos, unidos a las formas de captación y a la posibilidad o no del control de la convección, dan lugar a la siguiente clasificación:

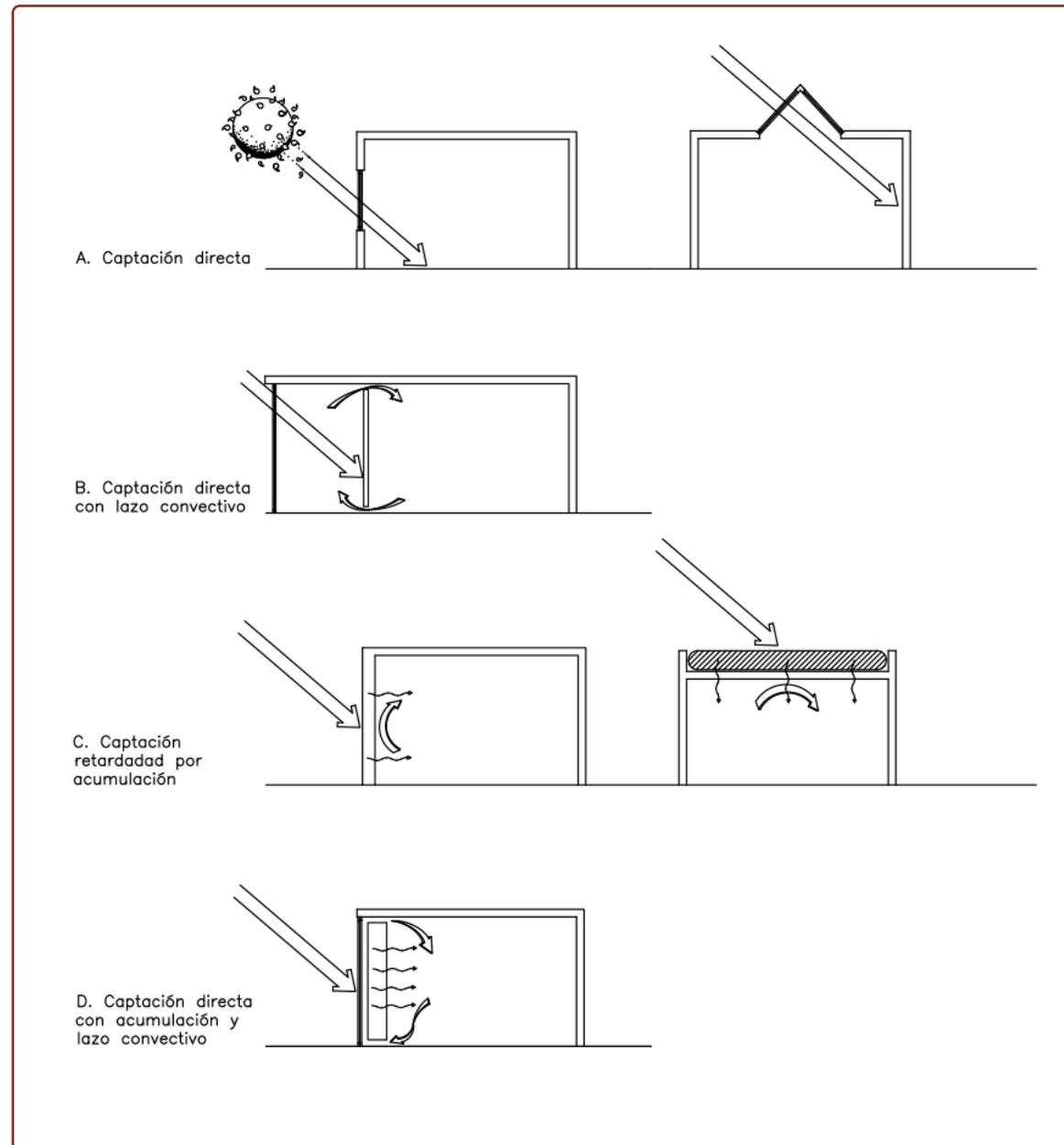
- Sistemas de captación directa.
- Sistemas de captación retardada a través de la envoltura opaca.
- Sistemas de captación directa con lazo convectivo.
- Sistemas de captación directa con almacenamiento de energía y lazo convectivo.

La captación directa se limita a la disposición de suficiente superficie acristalada correctamente orientada.

Sólo exige un adecuado diseño del edificio y no representa ningún coste adicional, por lo que el

retorno de la inversión es a tiempo cero. Tiene como inconveniente la dependencia absoluta de las horas de sol, lo que unido al incontrolado proceso de acumulación, que se va a producir en los suelos y paredes cercanos al punto de captación, provoca una irregular distribución del calor en la habitación. Es el más habitual de los sistemas y lo vemos empleado en infinidad de edificios en los que se cuida la orientación.

Para **dimensionar** un sistema de captación solar es necesario conocer la **demanda energética** del edificio. La demanda de calor depende de las transmisiones por la envoltura y de la renovación del aire. Cuanto más aislado esté el edificio, tanto en la parte opaca, más espesor de los aislante y eliminación de puentes térmicos, como en los huecos acristalados, mayor calidad de vidrios y carpinterías, menor demanda. En cuanto a la ventilación, las soluciones son el empleo de un pretratamiento del aire con pozos canadienses o el uso de una red de aire y un recuperador de calor. Si se integran esas características menores serán la demanda y la superficie de captación necesaria.



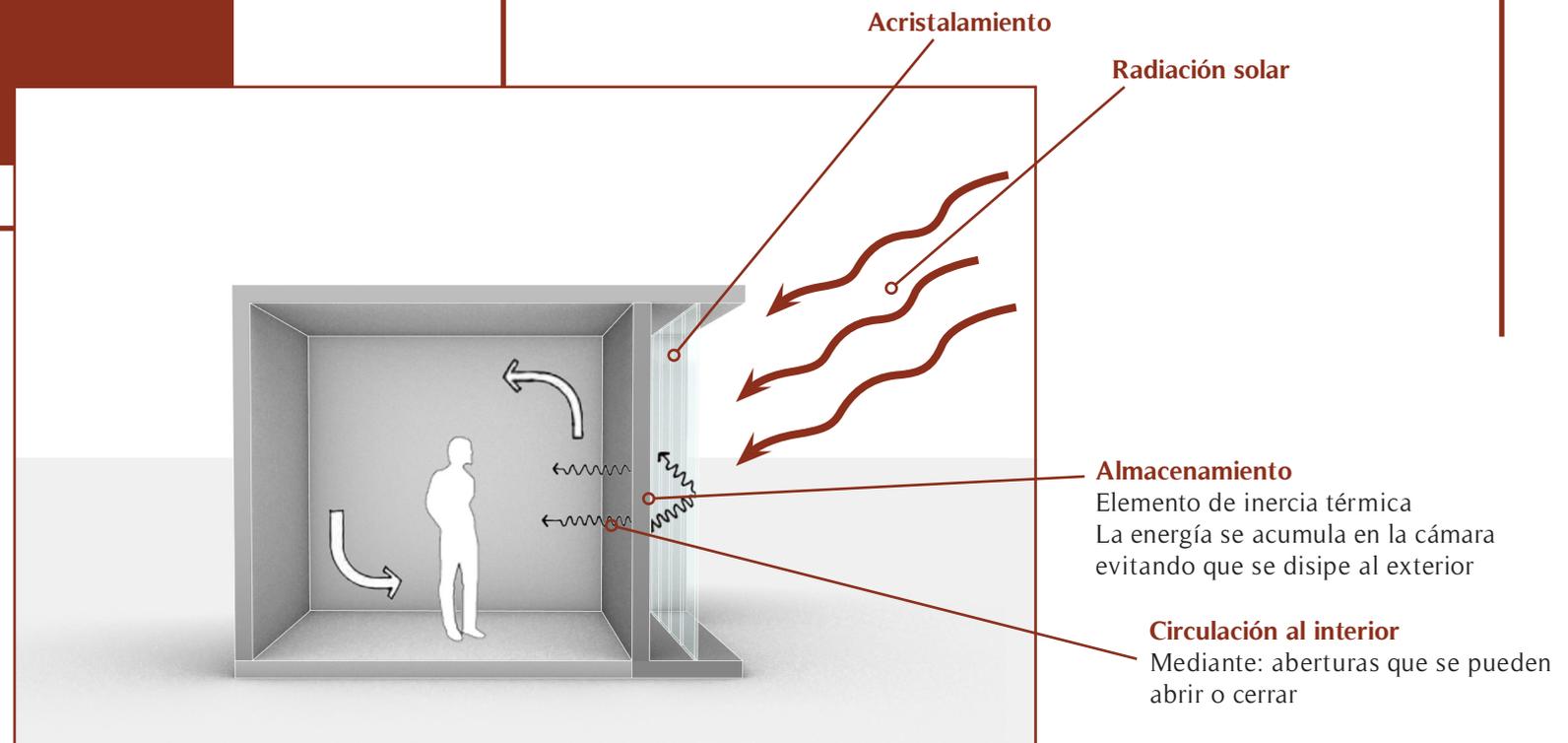
Estrategias de aprovechamiento de la radiación solar



Si supusiéramos que un edificio en Cáceres cumple con las exigencias del **CTE DB HE1 de 2013** en cuanto a demanda de calefacción (la edición de 2018 no fija demanda ni diferencia calefacción de refrigeración o ACS), en el mes de enero debería tener una demanda máxima de 6,25 kWh por m² de vivienda (una vivienda de 200 m² supone 1250 kWh). A través de 1 m² de vidrio orientado a sur se recibe en un día de enero 2,815 kWh; para los 31 días representa 87,265 kWh. Dividiendo ambas cifras se verá que hacen falta un mínimo de 14,32 m² para captar suficiente energía. Pero en realidad hace falta más porque parte no llega a penetrar, como ya se ha comentado en este manual, parte se reflejará en las superficies interiores y se escapará por los mismos huecos que la captaron, y parte no se almacenará con suficiente rapidez debido al color y la efusividad térmica de los acabados. Eso podía suponer entre el 19 y el 30%, por lo que la superficie final debería estar entre 15 y 19 m². O menos, si el edificio está muy bien diseñado y construido y mejora las exigencias del CTE, algo obligatorio ya con la edición de 2018.

invierno hay una gran pérdida de la energía recibida hacia el exterior, lo que hace que sólo sea aprovechable en cerramientos muy delgados; el inconveniente en verano es que no contempla ningún procedimiento para evitar que siga pasado hacia el interior la energía como en el invierno. Las únicas soluciones son colocar los muros al otro lado de un vidrio y una cámara de aire que eviten las pérdidas hacia el exterior; serían los muros **trombe** o los **parietodinámicos**. En ambos casos la energía se capta a través de los vidrios, se almacena en los muros y luego pasa al aire desde la superficie (Neila, 2004); se explicarán más adelante.

Los **sistemas de captación retardada por acumulación** son elementos verticales u horizontales opacos a la radiación solar, que la recogen y acumulan directamente por su cara exterior. Como el proceso de transferencia de calor hacia el interior es por conducción, será lento, durando varias horas en función del espesor y de los materiales; coincide con el denominado desfase de la onda térmica. También se producen muchas pérdidas por enfriamiento de la cara exterior que hace que gran parte de la energía almacenada se pierda; es el factor de amortiguación. En su conjunto es muy poco efecto ya que en



Funcionamiento del muro Trombe en verano: Sistemas de captación directa con almacenamiento de energía y lazo convectivo, Ece Alan, CC BY-SA 4.0



Los **sistemas solares pasivos** que se basan en estos mecanismos son las denominadas galerías acristaladas e invernaderos adosados. Estos sistemas son muy similares, realizando una función energética parecida. En general permiten crear espacios viveros o de tránsito integrados en el edificio. Ha sido una solución muy habitual en muchas regiones donde se aprecia mucho la luz y que, al mismo tiempo, no tienen veranos muy calurosos. En la arquitectura bioclimática contemporánea se emplea muy frecuentemente porque resulta de una gran efectividad, ya que aunque ese espacio se caliente irregularmente no tiene mayores problemas, ya que es de tránsito, mientras que la habitación colindante recibe comedia y correctamente el aire caliente a través de las aberturas. A su vez, esta habitación puede tener ventanas en la fachada norte, para iluminar, sin los problemas de deslumbramiento que se tienen con las ventanas a sur, que reciben directamente la radiación.



Invernadero de los jardines de Kew, Londres



Invernadero del Jardín Botánico de Dunedin, Nueva Zelanda, Benchill, CC BY-SA 3.0



"NECESITAMOS ESTRATEGIAS
PARA CONOCER QUÉ ES ESENCIAL
Y PARA LLEVARLO A CABO.
¿QUÉ ES ESENCIAL ENTONCES?
¿HACER LO MÁXIMO CON LO
MÍNIMO?"

Jean-Philippe Vasal



La combinación de los mecanismos de captación directa, con acumulación y creando el lazo convectivo da lugar a uno de los sistemas solares más populares, el **muro trombe**. El muro trombe, patentado en 1881 por **Edward Morse**, fue popularizado por quien le daría su nombre, el francés **Félix Trombe**, quien, junto con el arquitecto Jacques Michel, realizó en 1967 en Odeillo, Pirineo francés, una vivienda experimental. Este sistema, que es básicamente un invernadero de dimensiones diminutas, consta de una pequeña masa de aire confinada entre un vidrio exterior y una pared interior. Esta pared, que en un invernadero convencional puede llegar a ser también de vidrio y no tiene una excesiva importancia en cuanto a sus características, en un muro trombe resulta fundamental. En este caso es un muro de gran espesor y gran densidad. **El muro trombe cumple con tres funciones, la captación directa de radiación solar a través del vidrio, su acumulación en el muro y la distribución del aire caliente** generado con esa energía a través de los huecos dispuestos en el muro. Una vez que la radiación ha atravesado el vidrio, incide sobre el muro calentándolo, cediendo, posteriormente, el calor por convección al aire que ocupa la pequeña cámara confinada por el vidrio. Si esa cámara permaneciera estanca, el aire se calentaría

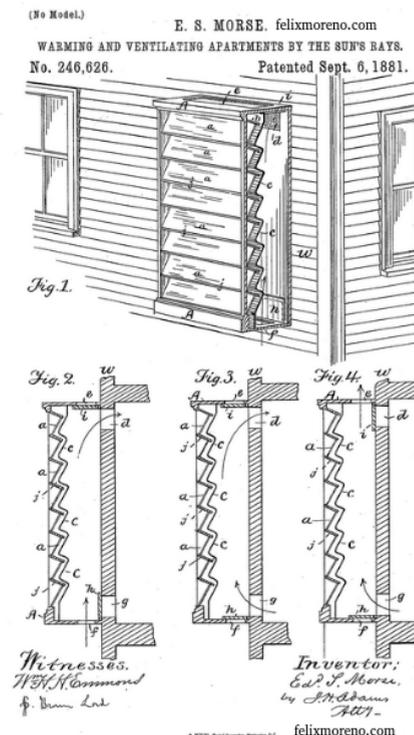
excesivamente y su energía se perdería hacia el exterior a través del vidrio. Para evitarlo, **el muro dispone de dos conjuntos de orificios**, unos situados en la parte alta del mismo, y los otros en la parte inferior. El aire, al calentarse, asciende por convección natural y, atravesando el muro por los huecos superiores, pasa al interior del local. El pequeño vacío que se crea en la cámara es suficiente como para arrastrar, a través de



Félix Trombe, <https://www.pyrenees-cerdagne.com>

los orificios inferiores, el aire frío de la habitación que se encuentra estratificado a nivel del suelo. De este modo se crea una circulación de aire frío de la habitación al muro y, una vez caliente, del muro a la habitación. La superficie exterior

del muro debe ser de color oscuro para evitar las pérdidas por reflexión y permitir que absorba el máximo de energía. El efecto de captación directa con lazo convectivo del muro trombe coincide con los momentos de incidencia de la radiación solar. Por tanto, dado que cesaría la circulación del aire a la misma hora en la que dejase de incidir el sol sobre el muro, no se cubrirían las necesidades de energía del resto de las horas del día y de la noche si no hubiera una parte de acción retardada. Esta acción la realiza el muro con la energía que tiene acumulada. Por todo ello, el dimensionado del espesor del muro es muy importante.



La energía almacenada en el muro se empleará de dos formas distintas. En primer lugar, mientras reciba radiación solar y se mantenga más caliente que el aire que penetra frío de la habitación por las rejillas inferiores, lo seguirá calentando y permitiendo su salida y circulación por las rejillas superiores. En segundo lugar, cuando ha acumulado suficiente calor, al cabo del tiempo, la energía habrá atravesado el muro y aflorará por la cara interior, calentando la habitación directamente por convección y radiación. Para optimizar este doble funcionamiento conviene que este segundo fenómeno no comience hasta que haya cesado la máxima intensidad del primero, es decir cuando cese de recibir la radiación solar. Para ello es necesario dimensionar su espesor, de tal modo que coincida el momento en el que deja de dar el sol sobre el muro, con el momento en el que la onda de calor lo ha atravesado en su totalidad. Dado que la energía empieza a atravesar el muro en el mismo momento en el que comienza a recibir la radiación solar, el desfase de la onda térmica, es decir, el número de horas que tarda el calor en atravesarlo, debe coincidir con el número de horas de asoleamiento del muro. Suponiendo que en un día de marzo el sol empieza a incidir sobre un muro trombe orientado a sur a las 6:30 y deja de incidir a

Patente del muro Trombe por Edward Morse, 1881, <https://www.felixmoreno.com>



las 17:30, el número de horas que hay entre esos dos momentos, que es de 11 horas, debe coincidir con el desfase de la onda térmica. Si el muro es de hormigón, piedra o ladrillo macizo el espesor debe ser aproximadamente de unos 40 cm.

Sin embargo, un muro de ese espesor pone tales dificultades al paso del calor que la mayor parte de él no llega a atravesarlo nunca y rebota hacia el exterior. El amortiguamiento de la onda térmica en el muro del ejemplo es altísimo, de más del 94%, lo que indica que poco más del 5% de la energía llega a la cara interior del muro y que el resto vuelve a la cara exterior. Sin embargo, este calor no se pierde como lo haría en un cerramiento convencional, ya que se invierte en seguir calentando el aire de la cámara y seguir forzando su circulación a través de la habitación. Para que realmente no se pierda, dado que aflorará durante las horas de la tarde y de la noche, habrá que proteger el vidrio exteriormente para que no se enfríe. Esa protección, que debe extenderse durante las horas en que no incide el sol sobre el muro y, sobre todo, en las horas frías de la noche, puede consistir en una persiana exterior, que será tanto mejor cuanto más aislada esté. De este modo se evita que el vidrio se enfríe en exceso y robe calor por radiación y por convección al muro. Para evitar problemas de

sobrecalentamiento en verano, la persiana deberá permanecer bajada durante las horas de sol.

Una estrategia similar es el muro **parietodinámico**. En este caso no se recicla el aire de la habitación a través del lazo convectivo, sino que entra aire nuevo constantemente por un hueco situado en la parte inferior del muro, que da al exterior. Es un sistema de pretratamiento de aire de ventilación higiénica, que entra templado o caliente en la habitación en lugar de hacerlo frío a través de los aireadores de las ventanas.

LA DIFERENCIA ENTRE UN MURO TROMBE Y UNO PARIETODINÁMICO ES QUE EL SEGUNDO SÓLO UTILIZA LOS EFECTOS CONVECTIVOS DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR

Muro parietodinámico en una vivienda en Wisconsin usando una chimenea solar, <https://angelsinocencio.com>



El sobrecalentamiento

El **sobrecalentamiento** es un fenómeno que se produce a lo largo de todo el año como consecuencia de la transformación, en un espacio cerrado, de la radiante solar en energía térmica. El ejemplo más familiar es el de un coche expuesto al sol. Al cabo de varias horas su temperatura interior será muy superior a la del exterior, tanto mayor cuanto más oscuro sea el vehículo, más tiempo haya estado al sol y mayor haya sido la irradiancia recibida. Lógicamente los mecanismos que han actuado han sido la transformación de la radiación, al ser absorbida por un cuerpo, y el efecto invernadero, que evita la dispersión de la radiación de onda larga emitida desde el interior. Este fenómeno, ya sea en un coche, ya sea en un edificio, provoca en el interior temperaturas superiores a las del ambiente exterior, que en verano ya son de por sí elevadas.

Elementos semitransparentes

Al igual que en invierno los huecos acristalados son la base del aprovechamiento de la radiación solar, también pueden ser el punto débil de la envolvente en condiciones de verano, si se permite que penetre en el edificio un exceso de energía. En ese sentido, todo lo dicho a la hora de la captación debe repetirse aquí: debe buscarse la orientación óptima teniendo en cuanto el comportamiento anual del hueco para cubrir las necesidades del edificio.

Cubiertas y fachadas

La cubierta es el **cerramiento que recibe más radiación solar** a lo largo del día; una cubierta plana sin obstrucciones recibe desde el primer rayo del amanecer hasta el último del anochecer. Si unimos este hecho a la circunstancia de que no se usan habitualmente materiales de acabado claros en las cubiertas, las convierte en uno de los elementos más conflictivos del edificio. El acabado claro como solución sería lo más adecuado; simplemente pintar de blanco la superficie de la cubierta reduce el riesgo de sobrecalentamiento y la

demanda de refrigeración. Incluso no es desdeñable pensar el empleo, en alguna circunstancia, de acabados metálicos de aluminio con una reflectancia casi especular, que mejora aún más su comportamiento. Como complemento o alternativa, un aislamiento térmico potenciado o una cubierta vegetal pueden ser las soluciones.

Dado que el problema del recalentamiento de la cubierta y el posterior sobrecalentamiento de la planta bajo ella es debido a la absorción de la radiación solar, si no se puede evitar con alguna de las soluciones mencionadas anteriormente, se puede recurrir a la ventilación de la cubierta, de tal modo que el calor absorbido por la capa exterior se elimine con la ventilación. Si la cubierta se ventila suficientemente, el calor generado en su interior, al absorber el elemento de cobertura (teja, pizarra, etc.) la radiación solar, se diluye con el aire exterior alcanzándose en la cámara una temperatura similar a la del ambiente exterior. Para que esto sea posible son necesarios unos caudales de aire suficientes y una cámara de aire amplia, de no menos de 20 cm, con unos huecos de ventilación generosos. Para no perder el efecto aislante de la cubierta, que ha pasado a convertirse en un sombrero de paja que evita que la radiación solar dé directamente sobre los elementos de cerramiento, es necesario incorporar suficiente aislamiento térmico entre la cámara de aire de la cubierta y el forjado superior del último piso.

Protección de la cubierta en el edificio de Sanitas en Madrid, mediante un jardín, un suelo con cámara de aire y elementos fotovoltaicos de sombreado



LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE CALOR ES DIRECTAMENTE PROPORCIONAL A LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE EL INTERIOR Y EL EXTERIOR

La **ventilación más sencilla** se establece en las cubiertas inclinadas con **faldones** sobre tabiquillos, que dejan una cámara de espesor variable no habitable. Más difícil es la ventilación de las cubiertas planas o de las cubiertas inclinadas de una hoja.

Otra forma de lucha contra el sobrecalentamiento es mediante el **tratamiento adecuado de las fachadas**. Un acabado claro tiene un coeficiente de absorción de la radiación solar bajo, entre 0,10 y 0,20. Esto quiere decir que en una superficie opaca únicamente el 10 o el 20% de la radiación solar que incide sobre el cerramiento se transforma en calor, mientras que el resto se refleja. Sin embargo, una superficie oscura, próxima al negro, tiene una absorción del orden de 0,95, lo que quiere decir que únicamente se refleja un 5%, y que el 95% restante se absorbe convirtiéndose en calor y penetrando parcialmente al interior. En situaciones calurosas y de alta radiación es, por tanto, muy recomendable el empleo de acabados claros, incluso blancos, frente a opciones de ladrillo o recubrimientos oscuros.

En los **muros verticales**, como complemento o alternativa a los colores del acabado exterior, están las **fachadas ventiladas**. El funcionamiento es idéntico al de las cubiertas ventiladas, y tienen como objetivo, igualmente, eliminar mediante la ventilación el calor absorbido por las hojas exteriores de la fachada cuando reciben el sol. La combinación con el aislamiento es muy positiva, pero únicamente si se coloca el aislante en la hoja interior. Los conceptos relativos al empleo del aislamiento son idénticos a los de las condiciones de invierno, por lo que en un muro

aislado se reduce la velocidad de entrada del calor al interior. No obstante, no hay que olvidar que la velocidad de transmisión de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. En el caso concreto de Madrid, a efectos de cálculo, ese salto térmico es de unos 24 °C para el invierno y de sólo 9 °C para el verano, por lo que la efectividad del aislamiento en verano es casi una tercera parte que en invierno; en Cáceres o Badajoz

el salto térmico de cálculo en invierno sería de 20 o 21 °C y en verano de 10 u 11 °C. Si el clima del lugar tiene verano e invierno diferenciados prevalecerán siempre las condiciones de invierno, más extremas a la hora del espesor del aislamiento.

La **incidencia de la radiación solar** sobre la fachada varía, no sólo en intensidad, sino en las horas en las que lo hace. Teniendo en cuenta el tiempo que tarda la onda térmica en atravesar la fachada y su combinación con la temperatura exterior en cada momento, hace muy complejo analizar el problema con precisión. Emplear un muro grueso hará que la onda térmica tarde en atravesarlo y que amortigüe gran parte de la energía que podría entrar al edificio. Una edificación antigua de muros anchos reduce notablemente el paso del calor, hasta el punto de permitir que en el interior se mantenga la temperatura estable, independientemente de la fluctuación de la temperatura exterior. Un cerramiento ligero sin aislar puede tener un factor de amortiguamiento de 0,6, lo que quiere decir que pasa al interior el 40% de la energía absorbida; el 60% restante vuelve hacia el exterior en el momento en el que disminuye la temperatura exterior y la radiación solar. Aunque la amortiguación sea elevada, la cantidad de calor que atraviesa el cerramiento es lo



Fachada ventilada cerámica en un edificio en Berlín



suficientemente grande como para provocar una subida considerable de la temperatura interior. Si se aísla y trasdosa ese muro la cantidad de energía que penetra se reduce al 20% nada más; si esta actuación va acompañada de un adecuado color exterior, el sobrecalentamiento se reduce drásticamente.

Para las condiciones de **verano** la colocación óptima del **aislante** es siempre **próxima al ambiente exterior**, ya que se incrementa de esta forma la masa y la inercia del local. Hay que tener en cuenta que el empleo intensivo de la masa puede hacer que la temperatura en el interior permanezca fija, con un valor igual a la temperatura media del día; esta temperatura en invierno es muy baja, pero en verano es una temperatura de bienestar.

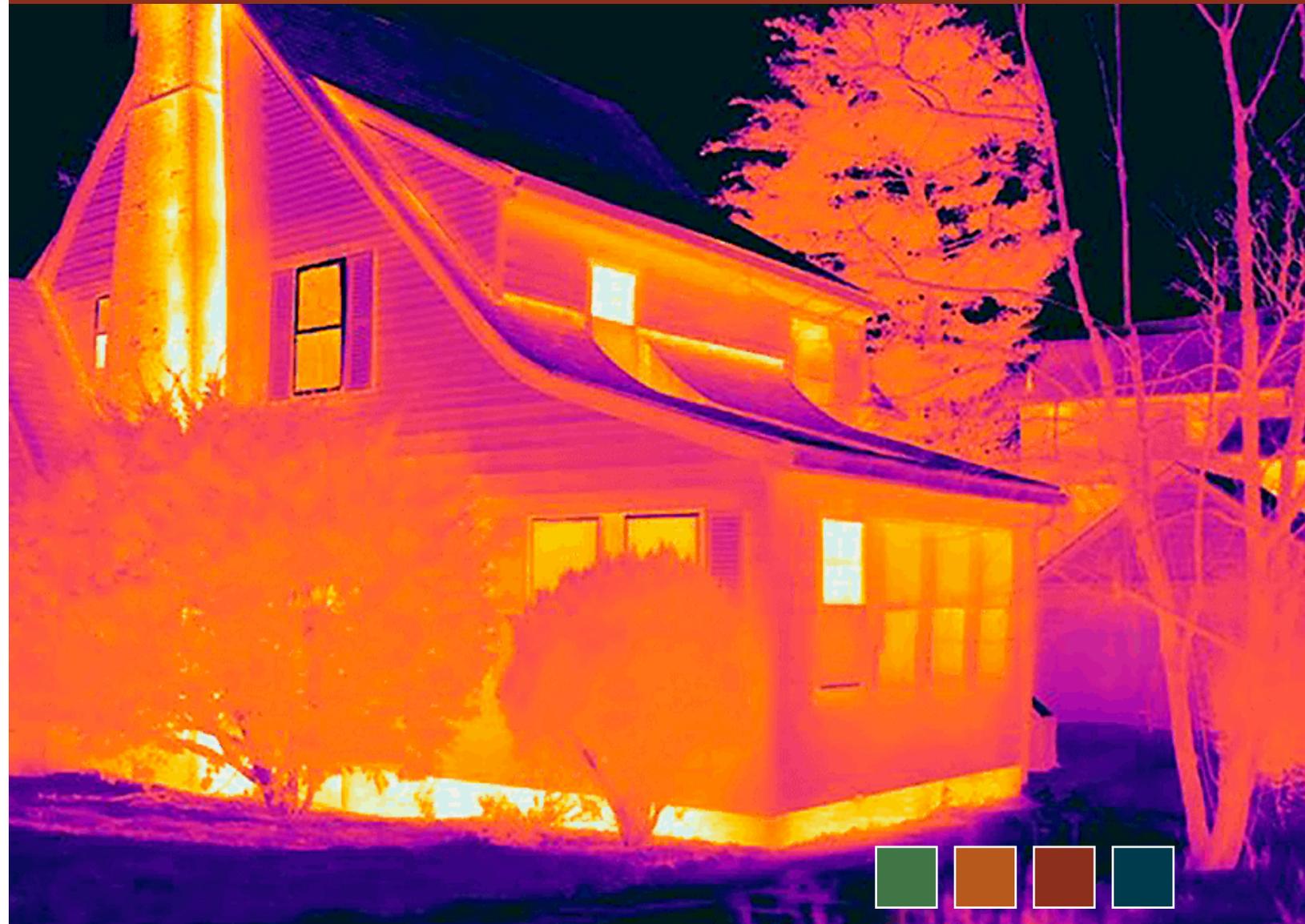
Cargas internas

A pesar de todas las medidas para evitar la entrada directa de la radiación solar dentro de los edificios o el calentamiento indirecto provocado a través de la envolvente opaca, siempre habrá algo de sobrecalentamiento. La causa está en las cargas internas, que es el calor provocado por el uso del edificio. Es decir, el calor metabólico, el calor del alumbrado artificial y el calor producido por los electrodomésticos y por cualquier otro equipo que haya consumido energía. Su influencia global es claramente menor que la provocada por la radiación solar pero nunca es despreciable. El control que tenemos sobre las cargas internas es también reducido ya que, por ejemplo, el calor metabólico no se puede alterar ya que la ocupación dependerá del aforo y el calor generado de la actividad. Sin embargo, en lo relativo a electrodomésticos y equipos las mejoras son notables ya que los fabricantes cada vez ponen en el mercado equipos más eficientes tanto en el consumo de agua como en electricidad, y, por tanto, en el calor residual producido.

Medidas contra el calentamiento

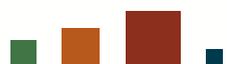
Las medidas contra el sobrecalentamiento tienen dos etapas, la primera las **preventivas** para evitar en lo posible que se produzcan y en segundo lugar las de **eliminación**. Las de eliminación están basadas en la ventilación que cumplirá así otra de las funciones fundamentales en el edificio bioclimático. Pero previamente habrá que haber aplicado medidas preventivas tanto frente a la radiación solar como frente a las cargas internas.

Termografía de vivienda, <https://www.impais.com>



"LA ENERGÍA Y PERSISTENCIA CONQUISTAN TODAS LAS COSAS"

Benjamin Franklin



Protección solar

Las protecciones del hueco acristalado tienen como objetivo **mejorar su comportamiento energético**. Por un hueco acristalado y orientado al oeste, a las 15:00 de un día de julio, en Cáceres, penetra una cantidad de radiación de 576 W/m^2 . A través de un metro cuadrado de muro aislado y pintado de blanco en ese mismo instante no pasarían más de 20 W . Estas cifras deben servir para que se entienda la gran importancia que tiene el tratamiento adecuado de los huecos acristalados.

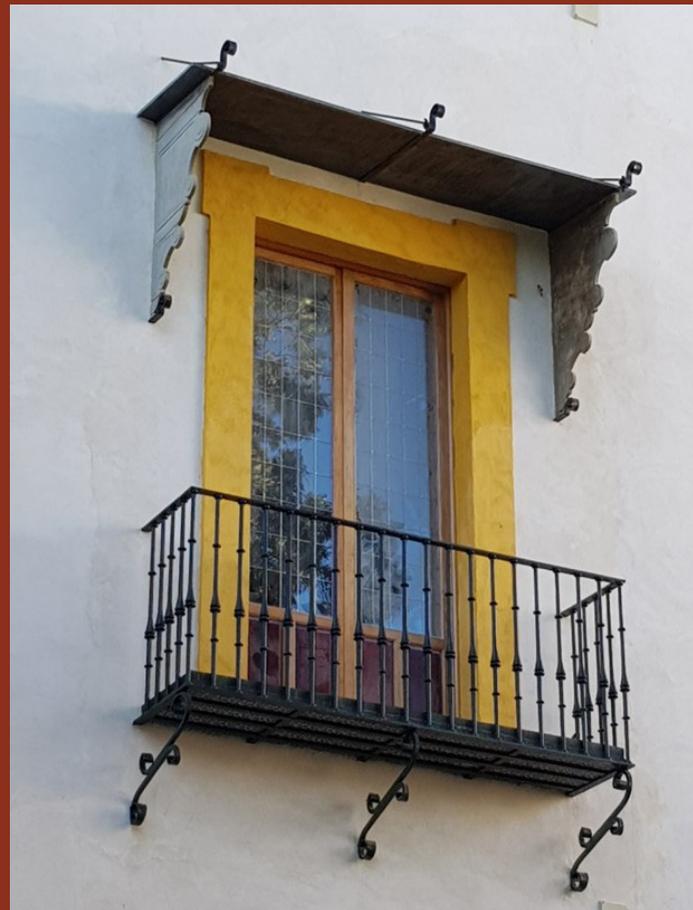
Si bien, en condiciones de verano la protección más significativa es la que evita la incidencia de la radiación solar, también hay que considerar aquellas protecciones que mejoran su aislamiento térmico. Por ello se podrían clasificar en protecciones exclusivamente de la radiación solar y protecciones de la radiación solar y de la transmisión de calor; este último caso, menos flexible en su aplicación, sería el de una persiana completamente bajada.

Los dispositivos de protección exclusivamente de la radiación solar se denominan parasoles, y su función es únicamente la de sombrear el hueco acristalado. Estos elementos, a su vez, pueden ser elementos fijos o elementos móviles, dando lugar a los diferentes modelos y sistemas de protección solar.





Las **protecciones fijas** tienen la ventaja de exigir poco mantenimiento y, si han sido correctamente dimensionadas, no se pueden utilizar incorrectamente equivocando sus funciones. Sin embargo, los apantallamientos móviles son los que permiten una mejor interceptación de la radiación solar en cualquier orientación, ya que adaptan su posición y geometría a cada situación concreta. No obstante, los apantallamientos móviles también permiten la captación flexible de la radiación solar directa, en función de características variables, tales como época del año, ocupación, o actividad desarrollada en el local a acondicionar. Los toldos, con sus diferentes variantes, horizontal, vertical o proyectado, corresponden a uno de los mecanismos más clásicos de apantallamiento móvil exterior.

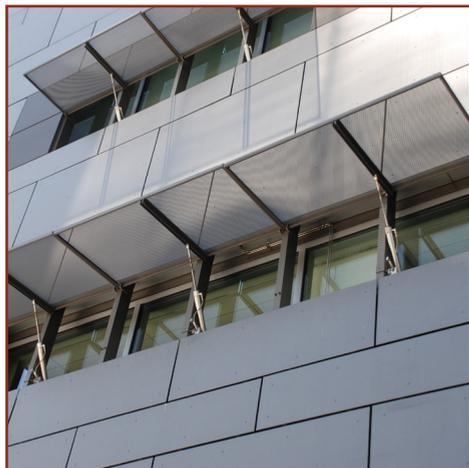


El **diseño bioclimático** y la selección de los diferentes tipos de protecciones viene determinada fundamentalmente por la superficie y orientación del acristalamiento. Se puede afirmar, en general, que los acristalamientos en **Extremadura** orientados al sur pueden protegerse simplemente con parasoles horizontales, pero si se quiere conseguir que el sombreado se mantenga en las horas en las que el sol incide sesgado sobre esa fachada, habrá que completarlo con parasoles verticales o prolongarlos horizontalmente más allá de los límites del hueco. Sin embargo, en la **fachada oeste difícilmente se podrá sombrear** los huecos con parasoles horizontales, ya que la altura solar es escasa. Las soluciones más efectivas en estos casos son los apantallamientos paralelos a la fachada, fijos o móviles.

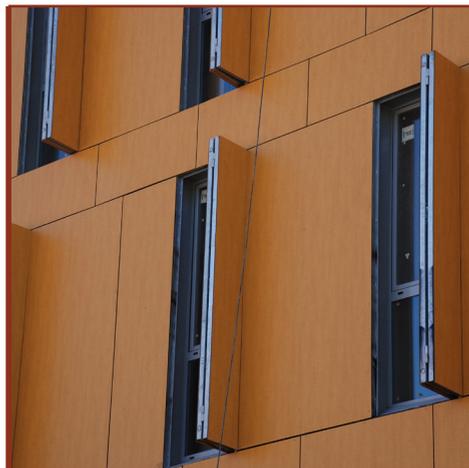
La protección simultánea de la radiación solar y de la transmisión de calor inciden doblemente sobre el intercambio energético a través de cerramientos acristalados. Mediante este tipo de protecciones las transmitancias térmicas del conjunto acristalamiento-protección son inferiores a los obtenidos exclusivamente mediante el acristalamiento, con lo que se reduce la transmisión de calor.

Ejemplos de protecciones solares fijas

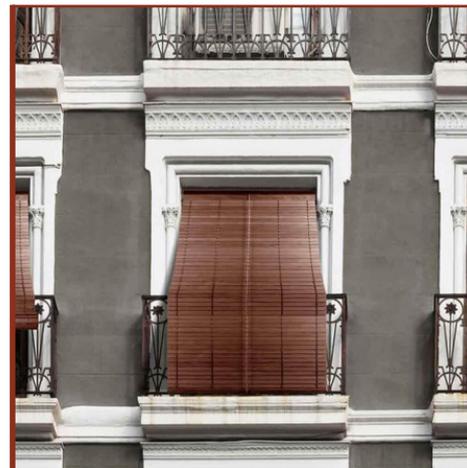




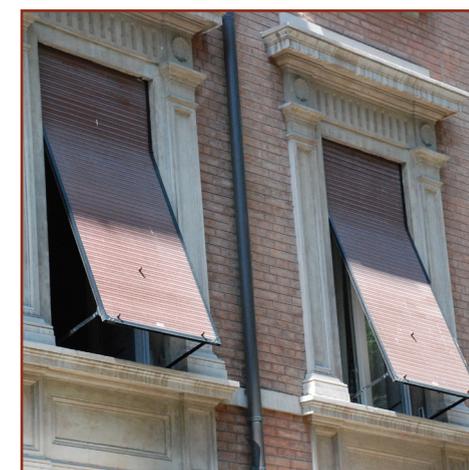
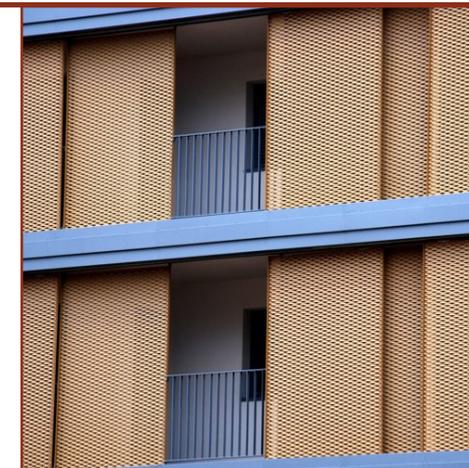
Protecciones solares móviles en un edificio de Los Ángeles, EEUU



Protecciones solares móviles en una fachada oeste en un edificio del Ecobulevar, Madrid



Persianas proyectables gracias al desplazamiento del carril que permiten mantener la ventilación y un cierto nivel de iluminación, Bolonia (Italia)



Protecciones solares paralelas a fachada, desde lo más tradicional a lo más sofisticado

Estas protecciones obstruyen total o parcialmente el paso del sol, llegando a utilizar algunas para el oscurecimiento completo de los locales. Por ejemplo, las persianas se utilizan más para la ocultación y cierre de los acristalamientos, que, para la interceptación de la radiación solar, aun cuando, la persiana proyectable, cumple el cometido de interceptar la radiación solar, permitiendo la iluminación y la ventilación natural. La persiana enrollable de lamas orientables es una mezcla entre la tradicional enrollable y la veneciana; las lamas son móviles cuando la persiana está totalmente bajada.





Relieves de árboles de incienso y mirra en viviendas, expedición de Hatshepsut a Punt, <https://hmn.wiki/es>

Envolvertes vegetales

La **cubierta vegetal** es una cubierta convencional con la adicción de un substrato y de plantas. Ese tipo de cubierta es preferentemente plana pero se aplica también en cubiertas inclinadas. La combinación de construcción con vegetación ha sido una constante a lo largo de la historia de la arquitectura; las descripciones más antiguas son originarias de Egipto y Persia, y datan del 2600 A.C.

La radiación solar absorbida por la superficie de las hojas no se invierte completamente al aumentar su temperatura, ya que **esa energía absorbida se libera en parte por evapotranspiración** (entre el 20 y 40%) y en parte creando biomasa mediante la fotosíntesis (entre el 5 y el 10%). Por otra parte, la propia estructura de la masa vegetal permite la evacuación de calor en forma de aire caliente. Una superficie con vegetación también pierde calor por convección en el verano, ya que la temperatura media del aire es generalmente algo más baja que la temperatura superficial de las hojas, y, sin embargo, ganará calor por convección en el invierno. El resultado es que las plantas mantienen una temperatura en sus hojas en torno a la temperatura ambiente, sin sobrecalentamiento ni subenfriamiento.



La capa exterior de **hojas** juega un papel de **protección solar**, ya que cuanto más clara y brillante sea la superficie de la hoja tanto mayor será la reflexión de la radiación incidente. Por otro lado, una agregación de hojas lleva a un aumento del sombreado por el efecto de máscara; una hoja aislada, debido a sus propiedades ópticas, puede tener una transmitancia unitaria del 20%, pero al presentarse una capa compacta de hojas superpuestas, puede estimarse una transmitancia global próxima al 0%. De ahí que los valores de la radiación reflejada y de la radiación absorbida pasen a definir todo el proceso del balance energético.

Si la transmitancia ante la radiación solar llega a ser nula, y dado que la reflectancia, función del color de la hoja estará entre el 10 y el 30%, la absorción deberá estar entre el 70 y el 90%. Esta cantidad en un acabado inorgánico habría supuesto un incremento notable de su temperatura.



Cubierta plana vista desde la Torre SWFC

Cubierta curva del pabellón de la India en la Expo de Shanghai 2010



La **cubierta ajardinada** (Neila *et al*, 2008) comparte las ventajas de la cubierta invertida, ya que el sustrato y la vegetación actúan como aislamiento y como protección del impermeabilizante. Pero no son sólo ventajas energéticas las que se pueden encontrar al diseñar bioclimáticamente con una cubierta vegetal, también se obtienen otros beneficios medioambientales:

- Ventajas para el clima de la ciudad y de la región, al retener polvo y otras sustancias contaminantes. Las plantas filtran las partículas del aire, produciendo al tiempo oxígeno. La atmósfera se limpia de sustancias y gases de efecto invernadero (CO₂) y la temperatura exterior no se incrementa.
- La vegetación ofrece una gran protección contra la radiación solar al no permitir que se caliente la cubierta. En la medida en que se protege el punto más vulnerable del edificio, que es la cubierta, se minimizan los flujos energéticos entre ambiente exterior e interior.
- Se incrementa el aislamiento térmico, ya que tanto el sustrato como la vegetación retienen aire en su interior, lo que les proporciona propiedades aislantes.
- Las plantas retienen parte del agua de lluvia que llega a la cubierta. Eso mejora el desagüe pluvial del edificio, disminuyendo el flujo de agua superficial sobre la cubierta y reduciendo el caudal de agua que soportan las canalizaciones urbanas. Con esto, también se reducen los costes de depuración de aguas residuales y se minimizan los riesgos de inundación, devolviendo el agua de lluvia al ciclo natural.
- Con ellas se reduce el efecto de la isla de calor. Durante el verano, la evaporación del agua puede producir grandes efectos refrigerantes dentro de las ciudades. Grandes superficies verdes dentro de los densos centros urbanos reducen el efecto de isla térmica. Dado que, desafortunadamente, las superficies verdes en los centros urbanos desaparecen por el crecimiento, la implantación de cubiertas ajardinadas repondría la situación original.



Capas de una cubierta ecológica

Las cubiertas con vegetación se clasifican según el espesor del sustrato, el tipo de vegetación y el mantenimiento. Según ello, **las cubiertas ajardinadas pueden ser de dos tipos, extensivas o intensivas.**

La cubierta intensiva o ajardinada

Tiene un sustrato de mayor espesor (mayor de 20 cm), con plantas, árboles y arbustos de mayor altura y mantenimiento típico de cualquier jardín. La cubierta ajardinada exige una estructura reforzada por el considerable aumento de cargas, tanto debido a las plantas como a los elementos constructivos, ya que el sustrato puede tener un espesor entre 20 y 50 cm, para herbáceas, y hasta 1 o 2 m, para árboles o arbustos. En la cubierta intensiva debe colocarse sobre la impermeabilización una capa drenante de árido de canto rodado similar, cuyo espesor ha de ser de 20 cm como mínimo. La sobrecarga de estas cubiertas puede alcanzar entre 700 y 1200 kg/m², lo que llevará a un dimensionado especial de la estructura. Las plantas pueden ser de todo tipo, pero exigen un mantenimiento sistemático y un riego periódico.

La cubierta extensiva o ecológica

Tiene un sustrato de poco espesor, habitualmente menor de 10 cm, con plantas autóctonas de bajo porte, en las que el abastecimiento de agua y de nutrientes se efectúa por procesos naturales. Su mantenimiento es nulo o muy escaso. Es capaz de tener las ventajas de las cubiertas intensivas, pero sin muchos de sus inconvenientes.

- En la cubierta ecológica, la capa de sustrato tiene un espesor típico entre 8 y 12 cm, lo que equivale a una carga de 100 kg/m² solamente.
- En este caso, las plantas han de ser seleccionadas cuidadosamente para resistir de forma espontánea a las condiciones climáticas extremas, ya que el riego y el mantenimiento son nulos o mínimos. Por ello, en cada región, a la hora de decidir la especie que se va a plantar, se tendrá en cuenta, obviamente, las condiciones particulares del clima, sobre todo el régimen de lluvias.
- La biomasa que se genera en una cubierta extensiva es muy inferior a la de una intensiva, lo que puede ser valorable al evaluar el riesgo de incendio.

Sustrato

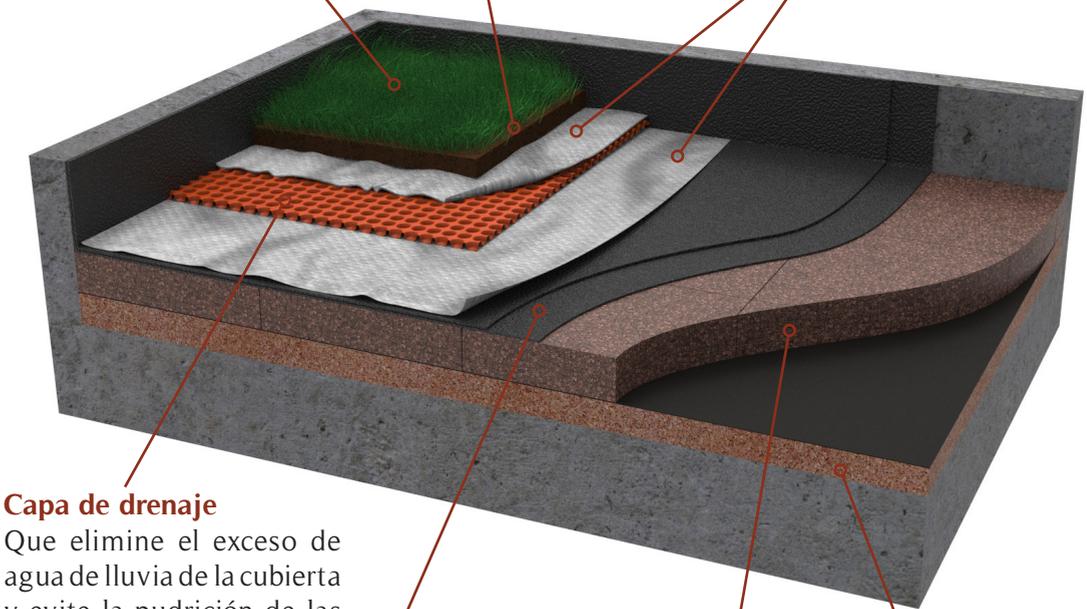
puede ser orgánico (corteza de pino, residuos de remolacha, etc.), inorgánico (arcilla expandida, picón volcánico, etc.) o mixto. Su misión será retener humedad y nutrientes, y drenar el agua excedente

Especies vegetales

Las que mejor se adapten al clima

Filtro geotextil

Con la función de impedir el paso de los finos del sustrato



Capa de drenaje

Que elimine el exceso de agua de lluvia de la cubierta y evite la pudrición de las raíces

Capa impermeabilizante/antirraíces

Que impida la penetración de las raíces en el forjado y garantice la idoneidad del sistema de cubierta

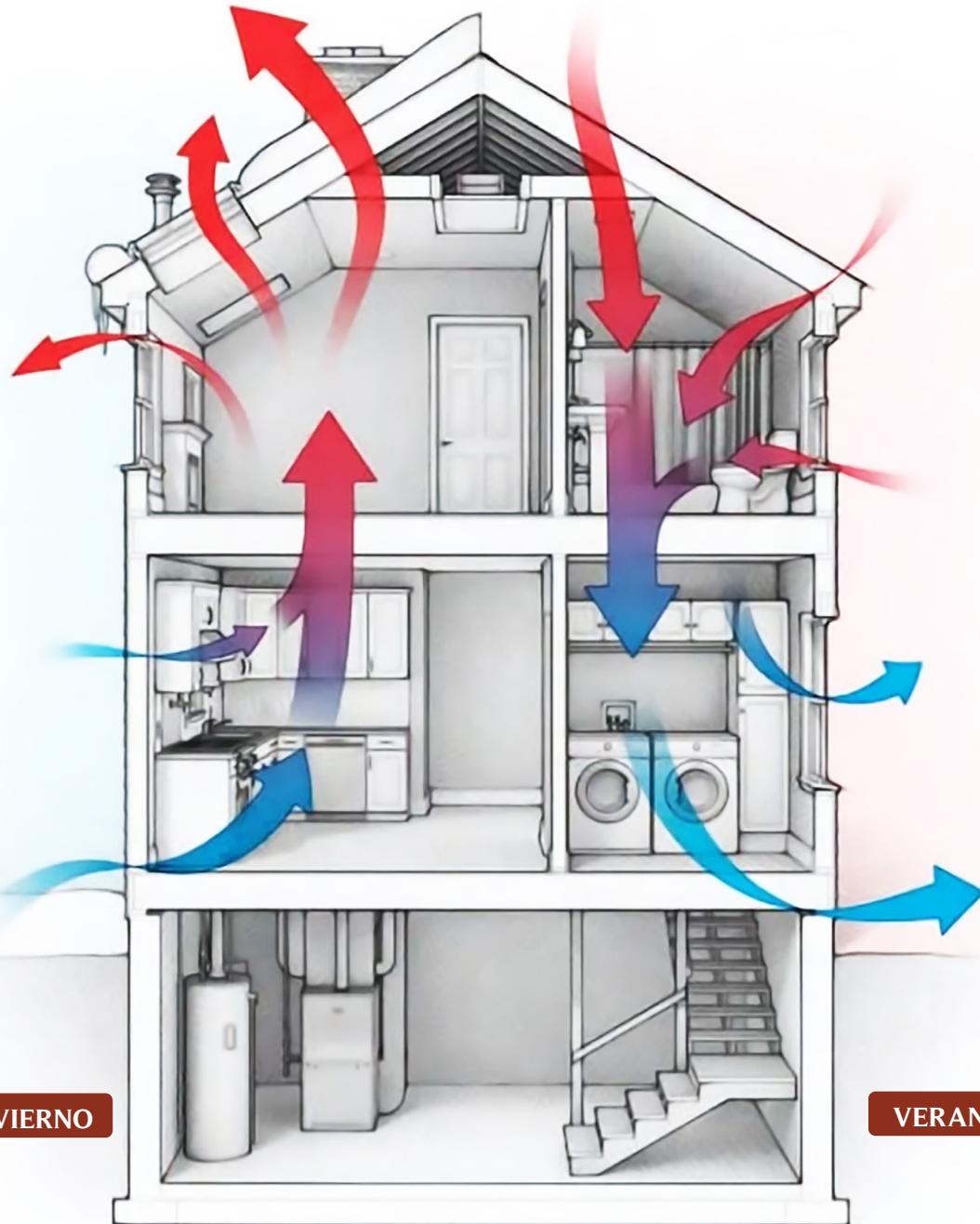
Formación de pendientes

Para garantizar el desagüe

Aislamiento térmico

Si las condiciones locales lo exigen





INVIERNO

VERANO

La ventilación como estrategia de eliminación del sobrecalentamiento

El conjunto de todas estas actuaciones, difícilmente cuantificables sin aplicarlas a un ejemplo concreto, pueden reducir notablemente la cantidad de calor que penetra en un edificio simplemente bien diseñado, respecto de lo que penetra en otro mal concebido. A pesar de todo, aunque sea una cantidad reducida de calor provocará algo de **sobrecalentamiento** y, si no se pone remedio, las condiciones interiores irán empeorando paulatinamente. Por ello, hay que poner en práctica las medidas de **eliminación del sobrecalentamiento**, que son tan imprescindibles como las **actuaciones preventivas**. Estas medidas se pueden resumir en una palabra: ventilación. La ventilación se debe utilizar para sustituir el aire interior sobrecalentado por aire exterior, pues, aunque su temperatura sea elevada y, tal vez, por encima de la de bienestar, siempre será inferior a la del ambiente interior si éste se ha mantenido cerrado.

"ME SIENTO MÁS CONFIADO QUE NUNCA QUE EL PODER PARA SALVAR EL PLANETA DESCANSA EN EL CONSUMIDOR INDIVIDUAL"

Denis Hayes



Estrategias de ventilación: diferencia de presión entre huecos

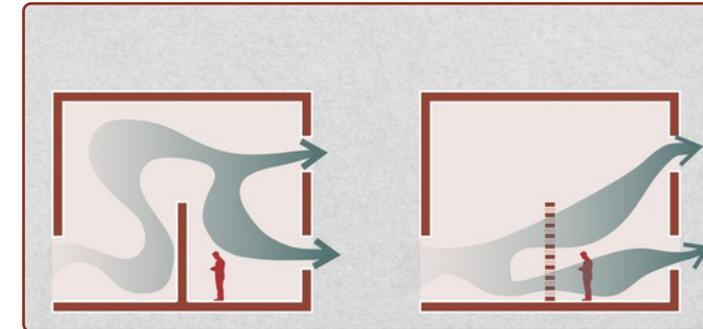
La ventilación surge como una **estrategia de múltiples aplicaciones** en condiciones de verano, motivo por el que ha sido objeto de utilización y empleo a lo largo de todos los tiempos, y que en la actualidad se utiliza como la gran estrategia bioclimática en los edificios de alta tecnología.

La ventilación natural es aquella que se obtiene mediante **técnicas naturales**, sin necesidad de emplear ningún dispositivo mecánico. La diferencia de presión entre dos huecos provocada por una diferencia de temperatura, de

densidad o de velocidad, son los mecanismos que se emplean solos o combinados para mover el aire:

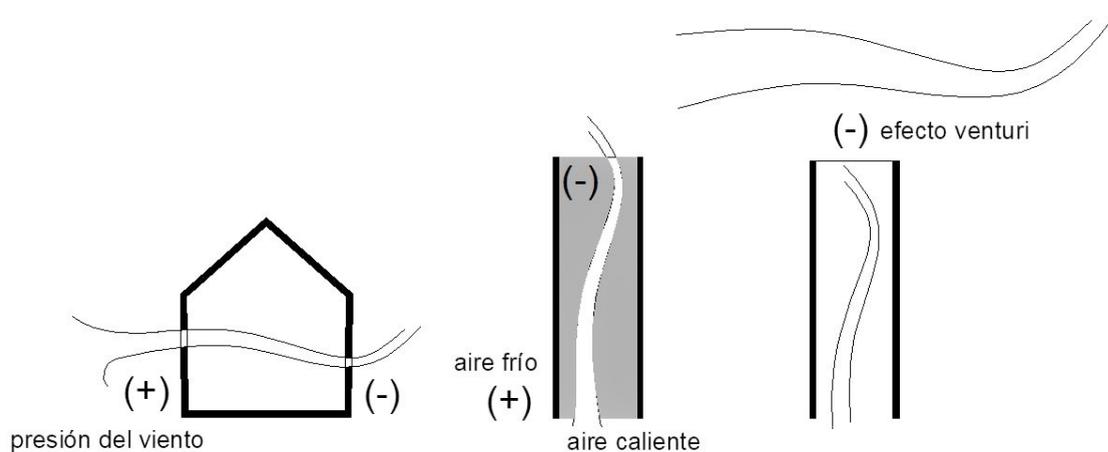
- Diferencia de presión provocada por la presión dinámica del viento al acometer de forma diferenciada sobre el edificio.
- Diferencia de presión provocada por la diferencia de temperatura y altura; efecto chimenea.
- Diferencia de presión provocada por la succión; efecto Venturi.

La **ventilación natural** lleva acarreados habitualmente ciertos problemas: descontrol, pues no se puede cuantificar el aire renovado; ruido, al ser necesario abrir el edificio al exterior; introducción de polvo, polen y olores, al no disponer generalmente de ningún dispositivo de filtración, cuya pérdida de carga no podría salvar la ventilación natural; y frío o calor excesivos, cuando el edificio se encuentra situado en climas extremos.



Esquemas de ventilación, Matheus Pereira, <https://www.archdaily.cl>

La ventilación natural más empleada en nuestro clima es la **renovación de aire** a través de las ventanas abiertas durante un período del día. Los dos ambientes puestos en contacto tienden a equilibrar su presión intercambiando masas de aire. Si para la ventilación se dispone exclusivamente del hueco de la ventana se forma un gradiente de presiones, de tal modo que, en invierno, en la parte superior se forma una zona de mayor presión por la que sale el aire y en la parte inferior una depresión que succiona aire exterior; en verano, por contra, la salida de aire se produce por debajo de la línea neutra y la entrada por arriba. Depende de la velocidad del aire, porque en caso contrario la ventilación es muy reducida, y del tamaño del hueco (A) (ASHRAE, 1987).



Fenómenos físicos de la ventilación de edificios

$$Q = 0,025 \cdot A \cdot V_{\text{aire}}$$

$$Q = 0,025 \cdot 1 \cdot 1 = 0,025 \text{ m}^3/\text{s} \quad (90 \text{ m}^3/\text{s})$$

Para una vivienda de 100 m³: 0,9 renov/h



La renovación del aire se mejora cuando se establece entre dos huecos situados en puntos de la envolvente, fachadas o cubierta, con condiciones de presión diferentes; es la ventilación cruzada.

Dos fachadas distintas están necesariamente expuestas a presiones de viento distintas y, por tanto, se establecen diferencias de presión entre los huecos situados en estas fachadas, lo que provoca la ventilación natural. Si las fachadas son opuestas y una está sometida al viento, en ella se crearán presiones, mientras que en la opuesta se producirán depresiones, lo que hace que las diferencias sean aún mayores y la ventilación más eficaz. En esta ventilación es muy importante entender el concepto del **área efectiva de ventilación (A_{ef})** (ASHRAE, 1987).

$$\frac{1}{A_{ef}^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2}$$

Si los dos huecos son iguales de superficie:
(ej. 2 ventanas de 1 m² de área)

$$\frac{1}{A_{ef}^2} = \frac{1}{1^2} + \frac{1}{1^2}$$

→ **Área efectiva** $A_{ef} = 0,71$

Si los dos huecos son diferentes de superficie:
(ej. 1 ventana de entrada de 1,5 m², 1 ventana de salida de 0,5 m²)

$$\frac{1}{A_{ef}^2} = \frac{1}{1,5^2} + \frac{1}{0,5^2}$$

→ **Área efectiva** $A_{ef} = 0,47$

Lo que debe llevar a diseñar los huecos de entrada, uno o varios, con un área total similar al área de salida, por uno o varios huecos.

Ejemplo de cálculo de ventilación cruzada (ASHRAE, 1987)

- Huecos a la misma altura
- Velocidad del viento de 1 m/s
- 2 huecos: 1 de entrada y 1 de salida de 1 m² ambos

$$Q = C_d \cdot A_{ef} \cdot V_{aire} \cdot \sqrt{\Delta C_p}$$

$$C_d \text{ (coeficiente de descarga)} = 0,61$$

$$V_{aire} = 2 \text{ m/s}$$

$$\Delta C_p \text{ (diferencia de coeficiente de presión en fachada batida por el viento)} = 0,91$$

$$A_{ef} \text{ (2 ventanas de 1 m}^2\text{)} = 0,71 \text{ m}^2$$

$$Q = 0,61 \cdot 0,71 \cdot 2 \cdot 0,954 = 0,826 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (2974 m}^3/\text{h)}$$

Para una vivienda de 600 m³: 4,95 renov/h



Igualmente se puede incrementar el efecto de la ventilación cruzada cuando los **huecos** están no solamente en planos distintos sino **a alturas diferentes**. Esto se puede conseguir dentro de la misma habitación colocando uno de los huecos a la altura del techo. Más eficaz resulta colocar las entradas de aire en una planta y la salida en otra, conectándolas verticalmente para crear un mejor movimiento el aire. Sin embargo, la mayor eficacia se produce cuando la ventilación de salida se establece por la cubierta. En condiciones de verano el aire caliente tiende a acumularse en el techo; si se abren huecos en la cubierta ese aire caliente tendrá una tendencia natural a salir, ayudado por la depresión que se establece en la cubierta, y ayudando a que la ventilación por sobrepresión entre por las fachadas batidas por el viento; por otro lado, esto creará un tiro natural en todo el edificio que inducirá al movimiento de aire de todos los locales (ASHRAE, 1987).

$$Q = C_d \cdot A_{ef} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot T_o \cdot \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_e} \right)}$$

Ejemplo de cálculo de ventilación cruzada con huecos a diferente altura

- Hueco de entrada: 1 m²
- Hueco de salida: 1 m²
- Área efectiva de ventilación: 0,71 m²

$$Q = 0,61 \cdot 0,71 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 3 \cdot 293 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{308} \right)} = 0,416 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,416 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1498 m}^3/\text{h)}$$

Para una vivienda de 600 m³: 2,5 renov/h



Chimenea de ventilación del edificio de la Stuttgart University of Applied Sciences presentado en el evento Solar Decathlon Europe celebrado en Madrid en 2010

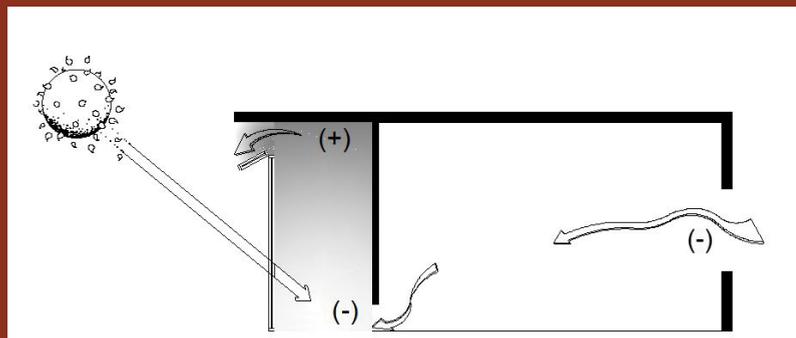


Edificio de Endesa, con dispositivos de ventilación natural mediante chimeneas térmicas



Cuando un local tiene una sola fachada es imposible colocar huecos en varias paredes de la misma habitación para crear la **ventilación cruzada**. Aunque se dispongan múltiples huecos situados en la misma pared, al estar sometidos a la misma presión o depresión no hay diferencias entre ellos que induzcan a un movimiento fluido del aire de ventilación. La presencia de irregularidades en la fachada (cuerpos salientes, parasoles verticales, jardineras, etc.) puede dar lugar a diferentes zonas dentro de la misma fachada, creándose suficiente diferencia de presión entre huecos como para establecer una buena ventilación entre ellos.

La ventilación natural no funciona correctamente en muchas ocasiones por la dirección que trae el viento, pero en la mayor parte de los casos porque la velocidad es insuficiente para mover el caudal necesario. Por eso hay que considerar acelerar el movimiento del aire mediante refuerzos naturales basados en el recalentamiento del aire o en dispositivos que aceleren su extracción.



Ventilación natural forzada en una galería o invernadero, por recalentamiento solar

Los dispositivos bioclimáticos de calentamiento producen ese efecto en invierno y **aprovechan el aire caliente** generado para la calefacción para mover aire. Esos dispositivos de calentamiento, como el muro trombe o las distintas formas de galerías o invernaderos, pueden convertirse en auténticas trampas de calor durante el verano, si no se protegen y se evacua el calor generado. Si estos dispositivos se utilizan correctamente no solamente servirán para el calentamiento en invierno, sino que, al actuar como recalentadores de aire en verano, incrementarán su velocidad forzando de manera natural la ventilación. Para poder aprovecharse de este modo, los invernaderos, galerías acristaladas y muros trombe deberán modificar su funcionamiento. Por ejemplo, deberán protegerse durante el día, en lugar de durante la noche, como ocurre en invierno. También el régimen de aperturas de las rejillas de aireación debe modificarse. La rejilla superior de las cámaras que permitía la entrada de aire caliente en las habitaciones a nivel de techo debe permanecer cerrada. En su lugar debe haber otra rejilla o **huevo de aireación** situados, también en la zona alta de la cámara, pero dado hacia el exterior. El aire caliente generado en el interior de la cámara ascenderá hasta su parte superior y se escapará del edificio. La depresión generada en el interior provocará la succión de aire de los locales colindantes y, a su vez, en ellos de la fachada opuesta; dado que la orientación de los dispositivos de recalentamiento en fachada debe ser la sur, la entrada de aire se producirá de la fachada norte.



Dispositivos de ventilación natural: chimeneas térmicas y solares

También es posible utilizar sistemas de ventilación distintos de las ventanas, como las **chimeneas** térmicas y solares. Su función es la misma que la de las chimeneas de humos, pero eliminando aire caliente ya que, situadas en los puntos correctos, el aire caliente estaticado en los techos tendrá una tendencia natural a escapar por ellas. Las chimeneas térmicas funcionan por la diferencia de presión entre dos puntos, el bajo, de entrada del aire en el tiro, y el alto, el remate de la chimenea, de salida; cuanto mayor diferencia de altura exista y mayor sea la sección del tiro, mejor funcionará. Se puede complementar su funcionamiento de extracción con el del efecto **Venturi**, si se hace circular aire a cierta velocidad por el remate; para alcanzar ese objetivo es importante un correcto diseño de ese remate.

Para mejorar el funcionamiento de las chimeneas térmicas las llamadas chimeneas solares provocan esa misma diferencia de presión con mucha menos altura. Para lograrlo tienen expuesto su tramo exterior al sol para provocar un fuerte calentamiento de esa zona y de las masas de aire que se encuentren en ella. Ese aire no plantea ningún riesgo de sobrecalentamiento al edificio, pues al generarse por encima de la zona habitable no puede entrar.

La **chimenea solar** ideal tiene una de sus caras acristalada, la orientada a la zona de máxima radiación. Al otro lado del vidrio y del tiro de la chimenea, un muro pintado de negro y con suficiente masa térmica acumulará el exceso de calor de las horas de sol para reservarlo para el resto del día. Un complemento adecuado es el aislamiento térmico de



ese muro por su cara exterior. Otro procedimiento para facilitar la salida del aire es asegurar que en la embocadura actúa el viento sin riesgo de involución. Los **remates giratorios** aseguran ese efecto, al obligar al viento a actuar por la parte de atrás del hueco, al tiempo que incrementan la velocidad de expulsión del aire por efecto Venturi.



Actuaciones contra la sensación de calor sin enfriamiento

La temperatura efectiva es uno de los parámetros que sirve para medir la **sensación térmica** que nos provoca un ambiente. Como es sabido, la sensación de calor no depende exclusivamente de la temperatura. Cuando llevamos puesto un grueso abrigo sentimos un calor agobiante que desaparece en el momento en el que nos lo quitamos, aunque no haya variado la temperatura ambiente; es el arropamiento. Si nos vemos obligados a correr para coger un autobús o a transportar un pesado paquete sentimos más calor que si nos limitamos a estar sentados; es la actividad. Si nos ponemos delante de un ventilador, que simplemente mueve el aire de la habitación, sentimos más frescor; es la velocidad del aire. Si estamos en la playa bajo una sombrilla sentimos menos calor que cuando nos ponemos a pleno sol; es la radiación. Estos factores, junto con la humedad ambiente y otros muchos determinan la temperatura efectiva, es decir, la sensación de calor, de una habitación o de un espacio exterior.

La forma más natural que existe para corregir nuestra sensación térmica sin modificar la temperatura es adaptar nuestra vestimenta a las condiciones del verano; nos ponemos ropa muy ligera, que junto con la piel desnuda ofrezca menos resistencia a la disipación del calor que genera nuestro cuerpo. No obstante, existen otras actuaciones que, sin ser de una efectividad tan clara, deben ser contemplados en el diseño de un edificio bioclimático. De entre ellos hay tres de enorme importancia: facilitar la evapotranspiración reduciendo la humedad relativa; incrementar la convección aumentando el movimiento del aire; incrementar las pérdidas de calor por radiación incorporando la presencia de superficies frías.

Control de la humedad

La humedad, siendo fundamental, es difícil de controlar con recursos bioclimáticos. En condiciones de **verano** lo más adecuado sería **reducir la humedad ambiente para favorecer la evaporación** de nuestro sudor, ya que es uno de los mecanismos que emplea el organismo para disipar calor en verano. Incrementar la humedad ambiente es fácil, pero reducirla sin medios mecánicos es complicado. Independientemente de que podamos reducir la humedad ambiental, es necesario evitar que en ambientes húmedos se produzcan incrementos de la humedad del ambiente interior con respecto a la del ambiente exterior, que podríamos llamar de sobrehumectación. El hombre se encuentra confortable entre el 30 y el 60% de humedad relativa, y ese es el valor que no debemos superar; pasar del 30 al 80% de humedad relativa supone incrementar la sensación de calor en 4 °C.

Para **reducir la humedad** se pueden emplear tres categorías de sistemas. Primera, **poner en contacto** el aire húmedo con superficies frías (con una temperatura menor que la de rocío del ambiente); es el procedimiento mecánico convencional para deshumedecer, pero podrían existir fuentes pasivas de frío que cumplieran la misma

función. Segunda, haciendo **pasar el aire por superficies porosas** que por rozamiento absorban parte de esa humedad. Finalmente, mediante el **empleo de sales absorbentes**, como el silicagel (gel de sílice o dióxido de silicio) o el silicato cálcico. Estas sales tienen la virtud de absorber de forma natural la humedad del aire transformándose de una sal sólida en un gel. Este cambio de estado es reversible, si se calientan eliminarán la humedad que habían absorbido, recuperando su estado original de sal sólida.



Movimiento de aire

Mucho más sencillo resulta trabajar con la **velocidad del aire**. Cada vez que elevemos la velocidad del aire en 0,2 m/s reduciremos la sensación de calor en aproximadamente 1°C. Por ese motivo, cuando nos colocamos delante de un ventilador que mueve el aire a 1 m/s la sensación de bienestar es inmediata ya que, aunque la temperatura de la habitación fuera de 32 °C nosotros lo apreciaríamos como si estuviera a 27 °C; la efectividad de los ventiladores, ya sean de sobremesa o de techo, es por tanto evidente. En la configuración del edificio podemos tener también en cuenta este aspecto forzando la ventilación cruzada, que al tiempo ayudará a la eliminación del sobrecalentamiento.



Sistema de ventilación con remate orientable y recuperador de calor, pabellón de la ciudad de Londres, Expo de Shanghái



Grandes ventiladores de techo en la T2 del aeropuerto de Barajas en Madrid. Estos sistemas permiten ahorrar mucha energía de refrigeración al reducir directamente la sensación de calor

HAY UN LÍMITE DE INCOMODIDAD FUNCIONAL PARA LA VELOCIDAD DEL AIRE EN 1,1 M/S PARA CONDICIONES DE VERANO; SIN EMBARGO, EN SITUACIONES MUY CALUROSAS Y CON HUMEDADES RELATIVAS MUY ALTAS SE ADMITE PERFECTAMENTE, DURANTE CIERTOS PERÍODOS, VELOCIDADES DE 2 M/S EN AMBIENTES EXTERIORES.



Superficies frías

El último parámetro controlable con el que somos capaces de reducir la sensación de calor es la radiación. Todos los cuerpos por el hecho de tener una temperatura distinta del cero absoluto radian energía. El intercambio de energía por radiación se establece entre dos cuerpos a distinta temperatura; el que tenga mayor temperatura emitirá mayor cantidad de energía, por lo que el segundo cuerpo se convertirá, en el balance global, en el receptor de calor.

Para **protegerlos de la radiación solar** en los espacios exteriores procedemos a cubrir el terreno con toldos, pérgolas, vegetación, etc. Como sabemos, un suelo oscuro, como el del asfalto, puede provocar una sensación de calor enorme al alcanzar temperaturas de más de 60 °C; sin embargo, si está sombreado o es de un color claro que refleje la radiación solar y no se caliente, se favorece la creación de un ambiente más agradable. Todo esto influye en el microclima que rodea al edificio y hace que sea más o menos habitable.



Estrategias de enfriamiento

Si bien las posibilidades de enfriamiento pasivo son limitadas, aplicadas conjuntamente pueden dar resultados óptimos. Las categorías de intervención, basadas en los recursos que aporta la naturaleza, agua, cielo, tierra y aire, serían las siguientes:

- Enfriamiento evaporativo
- Enfriamiento radiante
- Enfriamiento conductivo
- Enfriamiento convectivo



Sistema de evaporamiento pasivo de la Alhambra, Granada

El enfriamiento evaporativo

El enfriamiento evaporativo o latente es un **enfriamiento adiabático**, es decir, sin alterar el cómputo total de energía de un ambiente, en el que se emplea parte del calor sensible del aire y los paramentos para evaporar agua. La energía que se mantiene en el ambiente en el calor de vaporización necesario para este proceso.

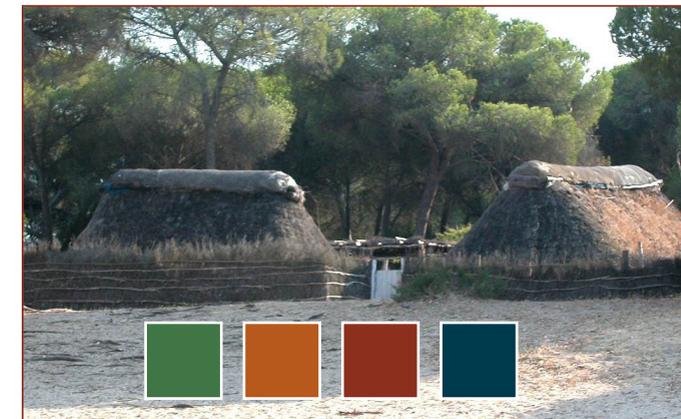
Para evaporar un gramo de agua son necesarios 2424 J que, aplicados a un metro cúbico de aire son suficientes para bajar su temperatura en 2,2°C. La efectividad del enfriamiento evaporativo es muy alta, pero tiene también grandes limitaciones: es necesario un ambiente suficientemente seco y exponer el agua a una corriente de aire. Una aplicación popular de este efecto es el botijo, que se humedece absorbiendo parte del agua que contiene y que, al evaporarse en contacto con el exterior, roba el calor necesario del agua que tiene en el interior enfriándola. Tradicionalmente se ha utilizado en los climas cálido-secos de Extremadura, Andalucía y el norte de África; es la arquitectura musulmana del agua: fuentes, canalillos, surtidores, estanques, vegetación, etc. Evaporar un gramo de agua por segundo representa generar una potencia de enfriamiento de:

$$1 \text{ g/s} = 2424 \text{ J/s} = 2424 \text{ W} \text{ (2,42 kW de potencia de enfriamiento).}$$

El empleo de **micronizadores, fuentes, estanques o vegetación** es aplicable al ambiente exterior. No obstante, no hay que olvidar que el calor que se siente en el interior del edificio es consecuencia de las características microclimáticas que rodean al edificio, por lo que, un edificio rodeado de vegetación que lo sombree y que baje la temperatura del suelo y del aire, seguramente no tendrá grandes necesidades de refrigeración.



Enfriamiento evaporativo en los ranchos marismeños en el Coto de Doñana, Huelva





Enfriamiento evaporativo mediante chorros en Madrid Río, Madrid, <https://www.telemadrid.es>



Enfriamiento evaporativo por nebulizadores en plaza de la Reina, Valencia, <https://www.20minutos.es>

Los **sistemas** de enfriamiento evaporativo pueden ser **directos o indirectos**. Los primeros aportan al aire el agua evaporada, mientras que los segundos no lo hacen, ya que el proceso de evaporación enfría un componente indirecto, con lo que se evita aumentar la humedad del ambiente a enfriar. Los sistemas directos son válidos para climas secos o semisecos, y los sistemas indirectos para climas húmedos.

Sistemas indirectos MZVR



El enfriamiento radiante

Dado que todos los cuerpos radian energía, se trata de hacerlo hacia un cuerpo que no emita nada o casi nada y actúa como un sumidero, como es el caso de la bóveda celeste, que se mantiene a una temperatura bajísima. Este fenómeno lo hemos podido apreciar en las noches estrelladas de verano en las que, a pesar de corresponder a días muy calurosos, necesitamos de algún abrigo, ya que nuestro propio cuerpo está actuando como emisor.

Para que los **sistemas de reirradiación o de radiación nocturna** sean efectivos es necesario que se den condiciones ambientales adecuadas. Esas condiciones son simplemente la nitidez atmosférica que se conseguirá en ambientes limpios, libres de contaminación, secos, libres de humedad ambiente excesiva, y sin nubosidad. En otras situaciones la efectividad se verá menguada ya que el calor irradiado por las superficies desde la Tierra se absorberá por los elementos interpuestos (polvo, contaminación y humedad) y será devuelta a su origen. Por otro lado, si el cielo se encuentra cubierto, no se podrá visualizar la bóveda celeste y será imposible usarla como sumidero. Los climas desérticos, alejados de los grandes núcleos urbanos, son los ambientes adecuados.

La superficie más adecuada para radiar hacia la bóveda celeste es un techo plano. Las superficies más emisivas en el infrarrojo serán las más adecuadas. Las emitancias más altas, del orden de 0,90 a 0,98, se obtienen casi con cualquier tipo de superficie o acabado, con excepción de los acabados plateados y espejados, en los que puede bajar hasta el 0,05, o los metálicos pulidos que alcanzan el 0,25.

La superficie exterior de la cubierta **radiará hacia la bóveda celeste**, fundamentalmente durante la noche, enfriándose. Si se hace circular aire por ella se conseguirá un fluido en condiciones de ser utilizado para el acondicionamiento. Para conseguir mayor efectividad se puede hacer circular el agua por un dispositivo similar a un colector solar plano y acumularla como agua fría en un depósito. Una vez enfriada el agua deberá llevarse a un depósito donde se acumulará. Empleando un gran depósito se puede mantener la temperatura del acumulador igual a la del ambiente exterior (por ejemplo, $\theta = \theta_e = 20^\circ\text{C}$); en esas condiciones la potencia de reirradiación llegará a ser algo más de 200 W/m^2 . Posteriormente, esa agua puede hacerse pasar por un suelo o un techo radiante o por la batería de un ventilador.



El **patio** es una herramienta bioclimática excepcional capaz de **intervenir directa o indirectamente** en el acondicionamiento de los edificios, en ocasiones colaborando en el mejor funcionamiento de algunas estrategias bioclimáticas, en otras, con aportaciones propias. Ese mismo efecto de enfriamiento por radiación nocturna puede ser acumulado en aire. El aire no radia, por lo que para que se enfríe tiene que ponerse en contacto con una superficie fría, que es la que se habrá enfriado por radiación. Posteriormente deberá ser almacenado, estratificándolo en algún espacio donde no se lo lleve el viento de la mañana. Estos lugares son los patios cerrados lateralmente, donde se embolsa el aire frío nocturno y del que no se escapa por convección al ser más pesado, cediendo su frescor a las habitaciones que lo rodean.



Patio, sistema de enfriamiento radiante

Enfriamiento conductivo

El enfriamiento conductivo se produce cuando los cuerpos **pierden calor por conducción hacia un sólido**. Para ello es necesario contar con superficies suficientemente frías en torno a los cerramientos. Las construcciones enterradas están completamente constituidas por muros fríos. Esto es debido a que la temperatura del terreno está sometida a la influencia de las condiciones climáticas exteriores en las primeras decenas de metros y a la temperatura del centro de la tierra en las capas profundas. De las capas superficiales, las más exteriores se ven afectadas por las variaciones diarias, mientras que las que hay a continuación sólo se ven afectadas por las variaciones anuales. En Badajoz, durante el mes de julio, a un metro de profundidad, la temperatura del terreno fluctúa a lo largo del día entre 23,1 y 29,1 °C (6 °C de variación) para unas temperaturas exteriores que pueden llegar a de 34,8 °C. A 5 m de profundidad la variación diaria se reduce a poco más de 1 °C, en torno a la temperatura media diaria, en este caso 26,1 °C. Para alcanzar ese mismo grado de estabilidad, pero a lo largo de todo el año tenemos que llegar a los 9 m, un tercer sótano, donde se alcanza una temperatura casi permanente a lo largo de todo el año de 13,9 °C. Tener uno o varios de los cerramientos del edificio en contacto con alguna de estas superficies frías es evidentemente más favorable que tenerlo en contacto con el ambiente exterior y sometido a la radiación solar.



En los cerramientos en **contacto con el terreno** se producen dos efectos distintos: el primero en los paramentos verticales, en los que la **profundidad marca la reducción de la temperatura**, y el segundo en los paramentos horizontales (suelos), donde se da el efecto de **manta aislante** que crea un gradiente horizontal de temperatura desde el borde hasta el centro, que es donde se alcanza el valor más bajo. En estos paramentos horizontales, como pueden ser las soleras de los sótanos o de las plantas bajas, se obtiene en su punto central una temperatura que equivale a la que se obtendría en un paramento vertical enterrado a gran profundidad. Para que se pueda conseguir una temperatura casi uniforme en toda la superficie y equivalente al valor que se obtenía en el centro, hay que aislar perimetralmente este elemento con bandas verticales, que reduzcan el efecto de borde.

Otro sistema que aprovecha la **estabilidad de la temperatura del terreno** es el de conductos enterrados (pozos canadienses cuando se utilizan en invierno). Si a través de un conducto enterrado se hace pasar una corriente de aire durante suficiente tiempo, el fluido alcanzará la temperatura del terreno y podrá impulsarse refrigerado al interior del edificio. Esos conductos pueden ubicarse a la profundidad que se desee, pero, lógicamente, cuanto más profundos más estable es el terreno y mayor es el aprovechamiento energético. Lo normal es ubicarlos en puntos vinculados a la excavación necesaria para cimentación, solera, sótanos, etc. Entre 2 y 3 m de profundidad puede ser suficiente, y a esa profundidad el terreno tiene una temperatura equivalente a la media de los tres meses anteriores. Por ejemplo, para Cáceres, en el mes de julio la temperatura media de abril, mayo y junio es de 18,1°C, una temperatura

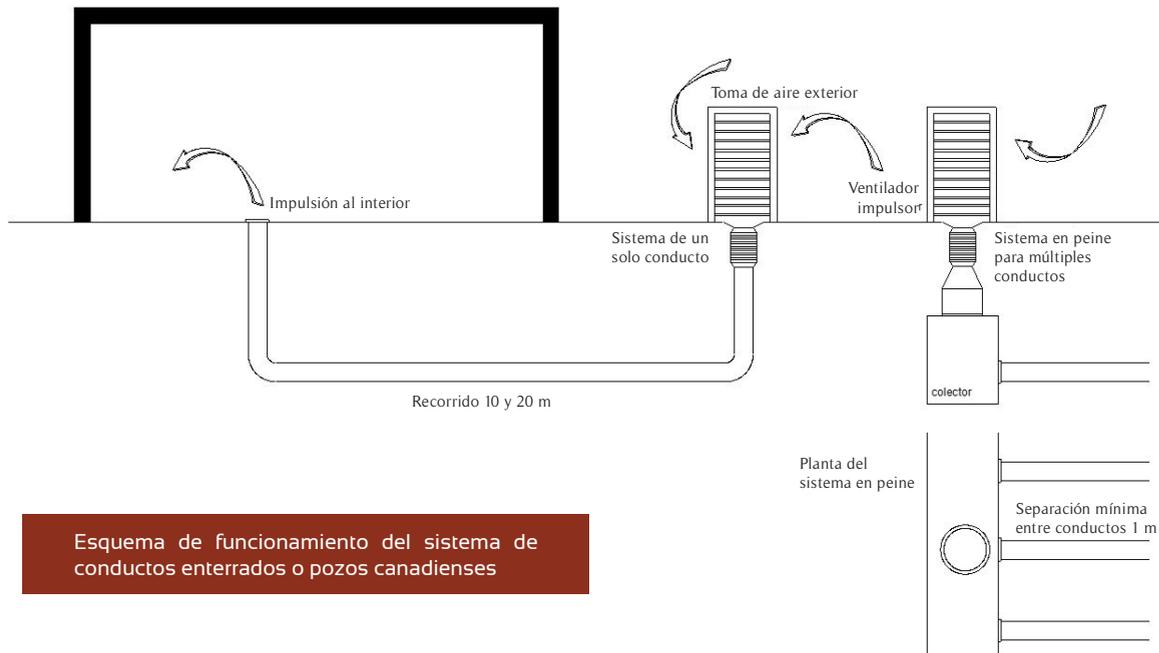
magnífica para impulsar aire frío al edificio. Pero también el sistema puede emplearse en invierno, no tanto para calefactar como para pretratar el aire de la ventilación higiénica, que en lugar de entrar un día de diciembre a una temperatura media de 8,7°C, entraría a 17 °C, que es la media de septiembre, octubre y noviembre. Por otro lado, utilizar el sistema tanto en verano como en invierno ayuda a estabilizar la temperatura del terreno y evitar un exceso de carga de calor cuando se utiliza para refrigerar nada más. Esto es aplicable a todos los sistemas geotérmicos. Si se enfría el aire cediendo su calor a la tierra, al cabo del tiempo, dos o tres años, la tierra puede perder sus propiedades y hacer inservible al sistema. Lo recomendable es utilizarlo haciendo circular alternativamente aire caliente y aire frío para recargarlo. Puede ser, aire caliente en verano y aire frío en invierno, que se templará y podrá usarse para la ventilación higiénica del edificio. También puede ser aire del día y aire de la noche, que deberá expulsarse hacia el exterior.

Para las condiciones climáticas de Extremadura, un conducto de 30 cm, de diámetro de cemento centrifugado y una longitud entre 10 y 20 m, enterrado a una profundidad entre 2 y 3 m, y por el que circule aire a 2 m/s, al final de su recorrido impulsará 0,141 l/s a una temperatura unos 15°C más baja de la que entró. Si el aire se impulsa a menor velocidad se obtendrá un menor caudal pero el tubo podrá ser más corto, y viceversa.

Conductos enterrados o pozos canadienses: Salida del aire en un edificio de oficinas en Badajoz; Galería de distribución del aire en el sistema en peine del edificio Hemiciclo Solar, Móstoles, Madrid



Las limitaciones del sistema las fijan la necesidad de un espacio exterior en donde enterrar el conducto y la de un ventilador que impulse el aire a una velocidad estable. Por otro lado, la bajada de la temperatura del aire, al no ser elevada, obliga a mover un caudal de aire importante, si se pretende alcanzar una temperatura media confortable en la habitación empleando únicamente este sistema. Para ello, dado que el conducto no puede ser muy ancho (no habría un buen contacto entre el aire y el terreno) y que la velocidad no puede ser muy elevada (obligaría a un recorrido excesivamente largo) es necesario colocar una batería de múltiples conductos capaces de impulsar suficiente cantidad de aire. Sin embargo, es preferible utilizar una combinación de sistemas que se complementen, como por ejemplo utilizar el aire enfriado por los conductos como el aire frío necesario para la ventilación cruzada que, al tiempo que evitará la entrada de aire caliente por alguna ventana eliminará el sobrecalentamiento.



Esquema de funcionamiento del sistema de conductos enterrados o pozos canadienses

El enfriamiento convectivo

En verano, los escasos momentos del día en que la temperatura del aire se puede considerar suficientemente baja como para ser confortable es durante la noche. Por ese motivo, la ventilación nocturna ha sido empleada amplia y espontáneamente en todos los países calurosos.

En los climas cálidos-secos, en gran medida, y en los cálidos-húmedos en menor, la temperatura durante la noche baja. En un día normal de julio en Cáceres o Badajoz, por ser

un clima continentalizado, el aire de madrugada puede bajar cerca de 18 °C. Si la vivienda se ventila con el aire de la noche y la **construcción es suficientemente masiva**, forjados y tabiques pesados, y fachadas con el aislamiento por el exterior, las paredes se enfriarán y **mantendrán la temperatura** durante casi todo el día. Mediante este proceso se consigue el enfriamiento directo del aire, su acumulación en la masa del edificio e, incluso, la reducción de la sensación de calor de 2 °C (**efecto de pared fría**) con relación al muro convencional caliente.

"LA ARQUITECTURA TRATA REALMENTE SOBRE EL BIENESTAR. CREO QUE LA GENTE QUIERE SENTIRSE BIEN EN UN ESPACIO... POR UN LADO SE TRATA DE REFUGIO, PERO TAMBIÉN SE TRATA DE PLACER"

Zaha Hadid





Estabilidad térmica y acumulación de energía renovable



Sistemas de acumulación de energía

Las estrategias bioclimáticas trabajan con recursos climáticos irregulares. Por ejemplo, la energía solar sólo puede aprovecharse con suficiente efectividad unas horas al día (aproximadamente 4 horas en invierno); sin embargo, a pesar de ello, en esas horas podría aportar toda la energía necesaria para acondicionar al edificio durante todo el día. La forma de disponer de esa energía renovable en los momentos de necesidad es acumulándola. Esto, no sólo permitirá repartir adecuadamente la energía a lo largo de los períodos de consumo, sino que evitará el golpe térmico que se produce en los momentos de captación. Es decir, una habitación diseñada para captar energía solar, si no tiene algún sistema de almacenamiento, alcanzará temperaturas muy superiores a las de bienestar a las horas en las que la está recibiendo.

LA ENERGÍA SOLAR SÓLO PUEDE APROVECHARSE
4 HORAS EN INVIERNO; SIN EMBARGO EN ESAS
HORAS PODRÍA APORTAR TODA LA ENERGÍA
NECESARIA PARA ACONDICIONAR AL EDIFICIO
DURANTE TODO EL DÍA

Sistemas térmicos: sensibles y latentes

Aunque existen procedimientos muy variados para **almacenar energía**, los aplicables a la arquitectura **bioclimática** son los sistemas térmicos, dado que lo que se capta y lo que es necesario para el acondicionamiento es energía térmica. Los sistemas térmicos se pueden utilizar de dos maneras, en forma de **calor sensible** y en forma de **calor latente**.

Otros sistemas de almacenamiento: químicos, eléctricos, cinéticos

No obstante, para **almacenar energía renovable**, aunque éste sea el procedimiento más habitual en arquitectura, no solamente se emplean los sistemas térmicos. Cuando la energía producida es directamente eléctrica, como la que proviene de un sistema fotovoltaico o de un sistema eólico, si fuera necesario almacenarla se acumularía en baterías. También

es posible transformar esa energía eléctrica, a través de un proceso de electrolisis, en hidrógeno para su almacenamiento y uso posterior como combustible; supondría un almacenamiento en forma química. Esta es una alternativa muy clara que hoy se contempla de cara al futuro, ya que se dispondría de un combustible y se evitaría tener que almacenar la electricidad en baterías o derivarla a la red eléctrica. De ese modo los vehículos que funcionan con hidrógeno pueden ser una solución limpia, renovable y sin problemas de autonomía. Los sistemas cinéticos no parece que tengan ya mucho recorrido, pero en su momento se plantearon. Se trataría de trasladar una energía mecánica, por ejemplo, la proveniente de un molino, en el que movimiento de las palas se lleva a un volante de inercia que se moverá en un entorno prácticamente sin rozamiento. Cuando fuera necesario recuperarla bastaría con embragar de nuevo el dispositivo a un motor.





Estufa de inercia térmica rocket, <https://teoriadeconstruccion.net>

Almacenamiento en forma de calor sensible (Neila, 2000)

Dicho todo esto, la forma más sencilla de acumular energía térmica es calentando o enfriando alguna sustancia. La energía que se acumulará dependerá del tipo y cantidad de sustancia empleada y del rango de temperaturas que se establece entre el antes y el después del proceso.

Masa, masa térmica, inercia térmica

Los factores determinantes de la capacidad de acumulación de energía térmica de un cuerpo son su **volumen**, su **densidad** y su **calor específico**. El primero es el más sencillo de comprender. Hay que aportar más energía a una montaña que a un puñado de su tierra para cambiar su temperatura. El segundo tampoco plantea grandes problemas, ya que la densidad nos indica la cantidad de masa por unidad de volumen y cuanto más masa tenga un cuerpo más energía se puede acumular. El tercer concepto es el más complejo, pues se refiere a la **capacidad que tiene la materia para acumular energía en su unidad de masa**. Esta capacidad, que se denomina calor específico, es variable, y va desde el valor alto del agua, 4,18 kJ/kg·K, hasta valores menores como: 0,13 kJ/kg·K para el plomo, 0,92 kJ/kg·K para el hormigón, o 1,25 kJ/kg·K para la roca sólida. Es decir, en una representación simbólica, el volumen estaría representado por las capas que tiene un cuerpo, cuantas más mejor; la densidad por el número de cubos que cuelgan de esas capas, cuantos más haya más energía almacenaremos; y el calor específico por el tamaño de los cubos, que cuanto más grandes más energía guardarán.



Edificios auxiliares para Instalaciones Deportivas en Sihlhölzli, <https://pedrojhernandez.com>

El efecto conjunto de estos tres parámetros nos da la capacidad térmica de almacenamiento, o masa térmica, del cuerpo. Cuantitativamente el efecto de la masa térmica se obtiene multiplicando la masa por el calor específico (c_e). A su vez, la masa es el valor del producto del volumen (V) por la densidad (ρ).

$$m_t = m \cdot c_e = V \cdot \rho \cdot c_e$$



En base a esa capacidad, la **cantidad de energía térmica** almacenada depende de la temperatura que alcance el cuerpo, pero la energía aprovechable será función de la temperatura de extracción; es decir, se ha almacenado energía calentando una pared desde 0 °C hasta 24 °C ($\Delta\theta = 24$), pero como queremos utilizarla para calefactar una vivienda poniendo el aire de la habitación a 20 °C, la energía aprovechable es $24 - 20 = 4$ °C. La energía térmica acumulada aprovechable será:

$$Q = m_t \cdot \Delta\theta = V \cdot \rho \cdot c_e \cdot \Delta\theta$$

Donde $\Delta\theta$ es la diferencia entre la temperatura del cuerpo antes y después de la extracción de la energía. Puede coincidir con la energía acumulada, pero no necesariamente.

Las sustancias más adecuadas para acumular energía térmica son los fluidos, ya que en ellos, gracias a la convección que se establece en su seno, el calor se distribuye uniformemente, sin calentamientos superficiales excesivos, reduciendo, de este modo, las pérdidas. De entre todos los fluidos, el más adecuado es el agua, por su densidad, pero sobre todo por su alto calor específico. No obstante, la incorporación de masas líquidas en un edificio con el objetivo de calentarlas resulta complejo, y únicamente permitirán su integración los dispositivos muy bien diseñados.

Para **acumular** sobre los **sólidos** es necesario que la radiación solar incida directamente sobre ellos, o que el aire caliente o frío los rodee. Si se van a calentar directamente con la radiación es preciso que las superficies expuestas tengan un coeficiente de absorción elevado. También es necesario que su velocidad de calentamiento sea alta para evitar que la energía captada se pierda con la ventilación antes de almacenarla.

Una forma muy eficiente de acumular en los sólidos es emplearlos en forma fragmentada, grava, cascote, etc., y



hacer circular aire a través de ellos. Las piezas deben ser relativamente pequeñas, entre 2 y 5 cm de diámetro, para que se puedan calentar en su totalidad, sin dejar un corazón interior frío, que sólo ocuparía lugar. La granulometría de las piezas debe ser lo más uniforme posible; si fueran piezas de distinto tamaño, las pequeñas colmarían el espacio que dejan entre ellas las grandes, y no permitirían el paso del aire. Por todo, parece que la grava rodada representa la opción mejor.



"DE CUALQUIER MODO EL
ARQUITECTO TIENE UNA TAREA
OBVIA: ESTAMOS AQUÍ PARA
HUMANIZAR LA NATURALEZA
MECÁNICA DE LOS MATERIALES"

Alvar Aalto



La masa térmica del edificio (Acha, Neila, 2009)

El sistema de **acumulación** de energía más sencillo y económico es la utilización de la propia **masa del edificio**. La masa térmica del edificio será, por tanto, el destino inicial de la acumulación, y la inercia térmica, su consecuencia.

La **inercia** es la dificultad que ofrecen los cuerpos para cambiar el estado en el que se encuentran. La inercia térmica es, por tanto, la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura, y se obtiene cuantificando su masa térmica. Es decir, la inercia térmica tiene una vinculación directa con la acumulación de energía. Los cerramientos y locales con mucha inercia acumulan mucha energía. Esa energía actúa como un colchón protector ante las fluctuaciones de la temperatura exterior. Una bajada brusca de la temperatura exterior, antes de enfriar el ambiente interior robando energía de los cubos que se encuentran igualmente en el aire, debe vaciar de energía los cubos que se encuentran entre medias en el muro. Dado que al cabo del tiempo la temperatura exterior vuelve a subir o el muro recibe de nuevo radiación solar, antes de que se aprecie el enfriamiento en el interior del local se habrán recargado de energía los cubos del colchón protector.





Casa cueva en Guadix, Granada,
<https://www.booking.com>

Los locales con gran **masa térmica** son térmicamente **muy estables**. Es el caso de las cuevas o sótanos, donde la masa de la tierra que los rodea les da una gran inercia térmica, o de las iglesias, catedrales o simplemente casas de pueblo, donde el espesor de los muros es suficientemente importante; en el interior de estos edificios se puede sentir frío en un calurosísimo día de verano.



Ejemplo de arquitectura popular
con una construcción masiva



Cerramiento con el muro
acumulador situado hacia el
interior del local

Inercia térmica efectiva

Pero no es suficiente que un cuerpo tenga una gran masa térmica para que esa cualidad intervenga en la estabilidad térmica del local. Uno de los grandes axiomas de la arquitectura bioclimática es que **la energía para el acondicionamiento pasivo debe captarse y almacenarse por el interior del edificio**; por ello, la masa debe estar dentro. Un cerramiento convencional, con el aislamiento situado cerca del ambiente interior, con un trasdosado ligero, aporta únicamente entre el 10 y el 20% de su masa térmica a la inercia del local. Sin embargo, un cerramiento con el aislamiento situado por la cara exterior aportará el 90%, y uno que no necesite emplear aislante térmico entre el 40 y el 60% de su capacidad máxima.

Otro factor a tener en cuenta es la **capacidad de penetración de la energía** en el cuerpo. La energía penetrará en muros, tabiques y forjados por conducción, que es un mecanismo de transmisión de calor lento. Esa penetración se producirá mientras llegue energía al local, es decir, durante unas cuatro horas si es radiación solar u ocho si es enfriamiento nocturno. Durante esas horas la energía penetrará en los elementos constructivos, pero cuando ya no se capte cesará la penetración. En ese periodo de tiempo, dependiendo del material, la penetración puede ser de 12 a 20 cm, es decir, todo lo que supongan espesores superiores no es aprovechable. Por ello es preferible tener mucha masa distribuida entre varios elementos constructivos que tener un gran muro de fachada de 80 cm, del que sólo se aprovechará una fracción pequeña.



¿Cómo influye la inercia térmica en los edificios acondicionados mecánicamente?

La forma más sencilla de analizar el caso de un edificio de un equipo de acondicionamiento es mediante un ejemplo.

Supongamos que disponemos de un antiguo edificio, una casa de pueblo, un antiguo molino, un palacete o incluso un castillo, que se pretende rehabilitar. El nuevo uso de este edificio determinará el sistema constructivo de control que debemos emplear. Si su nueva utilización, completa o parcial, es de tipo cultural, y una de sus salas se reserva para impartir conferencias un día a la semana, la inercia térmica que lleva intrínseca en sí esta construcción no es aconsejable. Partamos de suponer que, en el interior del local, formado por muros de piedra de 60 cm, hay una temperatura de 15 °C cuando el sistema de acondicionamiento no ha entrado en funcionamiento, mientras que en el exterior hay una temperatura de 0 °C; ese valor es bastante generoso, pero se puede suponer que otras cargas de locales colindantes lo mantienen así de alto. Si disponemos de un equipo de calentamiento de una potencia dos o tres veces superior a la necesaria para el acondicionamiento del local, el tiempo transcurrido entre que se pone en funcionamiento y

el momento en el que se alcanzan los 20 °C interiores es de más de 20 horas. Esto quiere decir que, si se pretende tener acondicionado el local para la mencionada conferencia, será preciso encender el sistema casi un día antes. Esto es debido a que para que se eleve la temperatura del aire de la habitación es necesario que al tiempo se vaya elevando la temperatura de los muros, forjados, tabiques e, incluso mobiliario. Por contra, cuando el local se vacía, el calor acumulado en sus muros se conserva y se va desprendiendo lentamente durante las 20 horas siguientes, manteniendo relativamente caldeada la habitación, pero sin que nadie pueda aprovecharlo. Sin embargo, si el uso que se quiere dar a ese local es permanente, por ejemplo, uso de vivienda, las 20 horas necesarias para su puesta en régimen sólo serán necesarias la primera vez y a partir de ese momento, aunque se apague el sistema durante algunas horas, por la noche, o algún día, durante el fin de semana, la temperatura interior, gracias a la energía acumulada en los muros, se mantendrá casi inalterable, indiferente a las fluctuaciones exteriores.

Uso esporádico

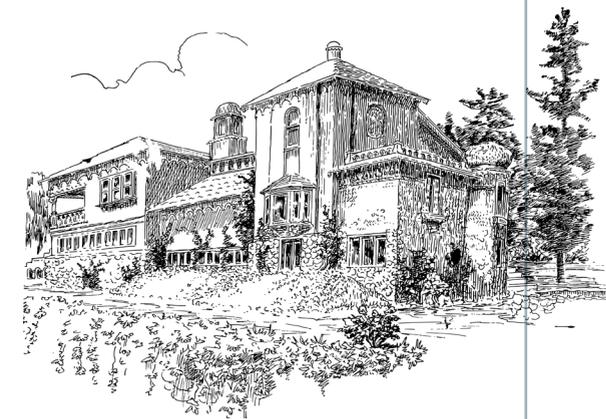
Salón de congresos que se usa para conferencias 1 vez por semana
Muros de 60 cm

Calentamiento de las instalaciones 20 horas antes de su uso

Uso de las instalaciones

Liberación de calor mientras el edificio está en desuso

Desaprovechamiento de la energía



Calentamiento de las instalaciones

Uso de las instalaciones

Liberación de calor mientras el edificio está en uso. Tiempo de descanso

Aprovechamiento de la energía

Uso continuado

Residencial
Muros de 60 cm



El primer caso planteado es un ejemplo del efecto negativo que provoca la inercia térmica, y el segundo del efecto favorable. Para solucionar la primera situación es necesario eliminar las consecuencias de la presencia de la inercia térmica. En este caso, el uso del aislamiento térmico es una gran solución. Si en el ejemplo mencionado se forra por la cara interior todos los cerramientos con 10 cm de material aislante, la posibilidad de acumular la energía que se genera en el interior se habrá reducido, y la fuente de calor de la que se absorbe se habrá trasladado al ambiente exterior. Concretamente, el mismo equipo de calefacción tardaría en este caso menos de 2 horas en alcanzar los deseados 20 °C, y de igual modo, 2 horas después de terminar la conferencia y apagarse el sistema, la habitación se enfría.

Almacenamiento en forma latente

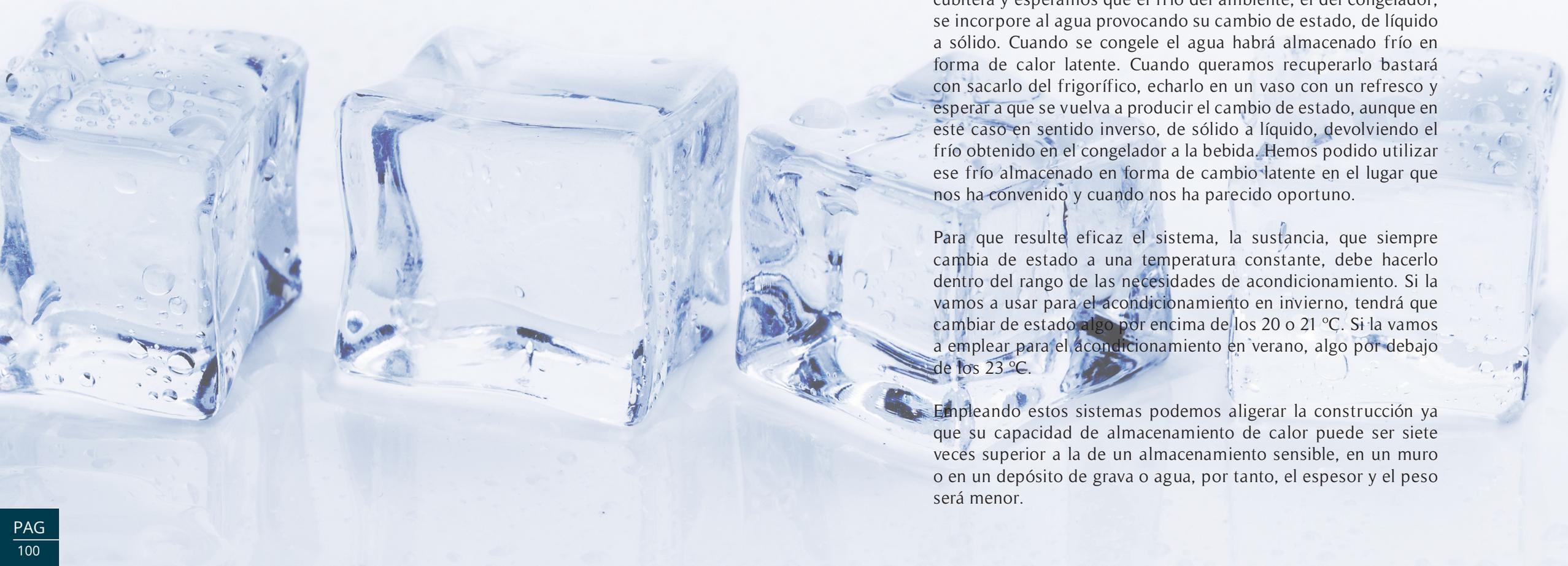
(Neila, 2008)

Un segundo procedimiento para **acumular energía térmica** es en **forma latente**. Este procedimiento es mucho menos empleado en arquitectura que la acumulación en forma sensible, pero su capacidad de acumulación es mucho mayor. Se basa en provocar el **cambio de estado de una sustancia**, de sólido a líquido, para acumular calor, y de líquido a sólido, para recuperarlo. En estos procesos se acumula la energía de cambio de estado, variable según la sustancia. Una vez licuada la sustancia se puede seguir calentando y acumulando energía en forma de calor sensible.

Un ejemplo doméstico del almacenamiento de forma de calor latente es el que se produce cuando producimos hielo en el congelador de nuestro frigorífico. Introducimos agua líquida en la cubitera y esperamos que el frío del ambiente, el del congelador, se incorpore al agua provocando su cambio de estado, de líquido a sólido. Cuando se congele el agua habrá almacenado frío en forma de calor latente. Cuando queramos recuperarlo bastará con sacarlo del frigorífico, echarlo en un vaso con un refresco y esperar a que se vuelva a producir el cambio de estado, aunque en este caso en sentido inverso, de sólido a líquido, devolviendo el frío obtenido en el congelador a la bebida. Hemos podido utilizar ese frío almacenado en forma de cambio latente en el lugar que nos ha convenido y cuando nos ha parecido oportuno.

Para que resulte eficaz el sistema, la sustancia, que siempre cambia de estado a una temperatura constante, debe hacerlo dentro del rango de las necesidades de acondicionamiento. Si la vamos a usar para el acondicionamiento en invierno, tendrá que cambiar de estado algo por encima de los 20 o 21 °C. Si la vamos a emplear para el acondicionamiento en verano, algo por debajo de los 23 °C.

Empleando estos sistemas podemos aligerar la construcción ya que su capacidad de almacenamiento de calor puede ser siete veces superior a la de un almacenamiento sensible, en un muro o en un depósito de grava o agua, por tanto, el espesor y el peso será menor.



Sustancias adecuadas

Teóricamente cualquier sustancia podría cumplir esta función, pero hay algunas más adecuadas. Se suelen emplear **sales**, cuya temperatura de cambio de estado suele ser alta; en la actualidad se usan para almacenar el calor de las centrales solares de campo distribuido. También se emplean grasas saturadas y parafinas. La **parafina**, la sustancia comúnmente empleada para la fabricación de velas, es el resultado de la mezcla de dos hidrocarburos, uno saturado y otro insaturado. Esto permite fabricarlas con temperatura de cambio de estado variables, de 1 a 60 °C, lo que las hace aptas para cualquier aplicación.

Las parafinas se pueden usar de formas muy diferentes. Se pueden usar a granel, es decir relleno con ellas huecos de gran tamaño que aparezcan en la construcción; macro encapsuladas, introduciéndolas en el elemento constructivo, previamente encapsuladas en un recipiente de tamaño moderado; o micro encapsuladas, cuando van rodeadas de una esfera polimérica que genera piezas de tamaño muy reducido, aptas para ser empleadas en mezclas con morteros de cualquier tipo.



Sistemas de almacenamiento de energía en parafina: Encapsuladas en cilindros metálicos de pequeño tamaño para situarlas en un suelo técnico

Sistemas arquitectónicos

(Cerón, 2012)

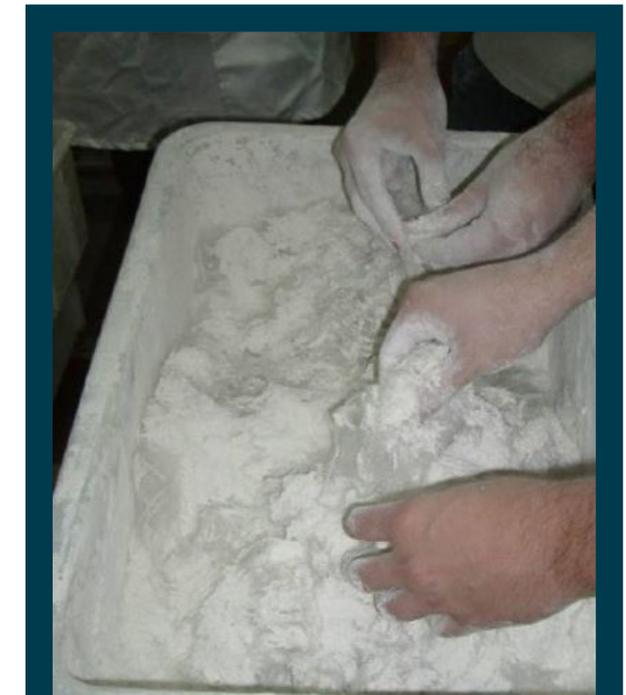
Se han empleado muchas soluciones para introducir las parafinas en elementos constructivos, con mayor o menor éxito: en la fachada, en las lamas de persianas, en el interior de un pavés, en falsos suelos o techos, en recubrimientos de yeso, cal o cemento, etc.

Un ejemplo son paneles de yesos laminado PYL con parafinas micro encapsuladas; en 4 cm de ese panel se acumula la misma energía que en medio pie de ladrillo perforado.



Sistemas de almacenamiento de energía en parafina: A granel, relleno la base de baldosas cerámicas

Parafina micro-encapsulada formando parte de la preparación de un panel de yeso laminado (PYL), (Oliver, 2011)



Sistemas de almacenamiento de energía en parafina: Macro encapsulada en cápsulas de plástico



Características de los materiales

En un edificio bioclimático los materiales deben ser elegidos siguiendo criterios de sostenibilidad al tiempo que se atiende a la eficiencia en su función, ya sea energética, de almacenamiento, de transmisión de calor, etc. Los materiales sostenibles serán aquellos que no se agoten con su uso porque se renuevan de forma natural, cómo ocurre cuando es de origen vegetal, porque se puedan reciclar con facilidad (de la tumba a la cuna), o por lo que hoy en día se considera más acertado que es que se puedan reutilizar una vez desmontados del edificio (de la cuna a la cuna) (McDonough, Braungart, 2005).

Otros de los criterios que deben tenerse en cuenta son los impactos que pueden generar sobre el medio ambiente en cualquier momento de su ciclo de vida, desde el agotamiento de recursos, la producción de gases de efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono, la eutrofización del agua, etc.

LOS MATERIALES SOSTENIBLES
SERÁN AQUELLOS QUE NO SE
AGOTEN CON SU USO PORQUE SE
RENUEVAN DE FORMA NATURAL



Instalación de sistema SATE en fachadas,
<https://jgyarquitectos.com>

Materiales sostenibles de baja energía embebida

Como ya se ha indicado en este manual, la elección de los materiales de un edificio bioclimático debe seguir **criterios de sostenibilidad**, es decir, a ser posible que no se agoten debido a que se pueden renovar de forma espontánea, porque se pueden reciclar, o porque sean reutilizables. De no ser posible ninguna de estas circunstancias al menos deberán emplearse materiales de baja energía embebida, es decir, aquellos que emplean poca energía

en su fabricación, y **materiales de proximidad**, lo que implicaría que no ha habido gasto de transporte significativo.

Materiales más adecuados para el almacenamiento de energía

Para decidir cuáles son los materiales más adecuados para el almacenamiento de energía debemos tener una visión global del funcionamiento del edificio. Estudiar si es viable la incorporación de materiales de cambio de estado o si es preferible utilizar materiales



para acumular en forma de calor sensible. En cualquier caso, emplear la masa del edificio como almacenamiento siempre será un acierto, por lo que, si no se quiere incorporar masa en particiones o forjados y sólo se van a emplear los cerramientos exteriores, es imprescindible aislar por el exterior para dejar la masa del muro hacia el interior, es decir, emplear **sistemas SATE o de fachada ventilada**.

Para almacenar calor, si el elemento constructivo va a recibir directamente la radiación solar, su color deberá ser oscuro, ya que toda la energía que se refleje se estará perdiendo. Para almacenar calor o frío, ya sean sistemas sensibles o latentes, el material de acabado que primero reciba la energía, debe tener una difusividad térmica elevada, es decir debe ser rápido de almacenamiento. Los más adecuados serían por tanto materiales cerámicos, los hormigones, la piedra, la tierra, etc.

La difusividad y la efusividad térmicas

Para que la energía penetre y se almacene en un elemento constructivo, es necesario que se vayan calentando todas las capas intermedias. El proceso debe ser rápido ya que si la energía permanece en el aire se eliminará con la **ventilación higiénica** que se estará produciendo en el local. El indicador que valora esa velocidad de calentamiento o enfriamiento se denomina difusividad térmica (a).

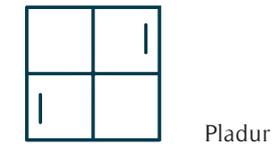
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_e}$$

Donde λ es la conductividad térmica, ρ la densidad y c_e es el calor específico.

Los materiales con altas **difusividades** serán materiales de calentamiento rápido; corresponde a conductividad alta, baja densidad y bajo calor específico (el calor pasa rápido y sin detenerse). Por el contrario, los materiales con bajas difusividades serán materiales de calentamiento lento; es decir, conductividad baja, alta densidad y alto calor específico (el calor pasa lento y se detiene para acumularse en las capas superficiales). La difusividad térmica también se empleará para calcular el desfase de la onda térmica y la amortiguación.

Materiales de calentamiento lento

Difusividad térmica baja



...

El aire interior de los edificios con gruesos acabados de madera se calienta muy rápidamente y con poco consumo de energía, ya que los muros no acumulan el calor o lo hacen de forma muy lenta.

No son capaces de acumular con eficacia la energía que reciben a lo largo de unas pocas horas o, incluso, minutos.

Materiales de calentamiento rápido

Difusividad térmica alta



...

La energía penetra en ellos en lugar de quedar en la superficie.

Almacenan energía.



La **efusividad térmica** (b) indica la capacidad efectiva que ofrecen los materiales para acumular calor. El material ideal es aquel con gran inercia térmica y por el que se mueve la energía con facilidad, para calentarse rápido y ceder calor igualmente rápido. Efusividades altas representan materiales con densidad y calor específico altos, es decir, gran masa térmica, y con alta conductividad térmica, es decir, el calor se mueve por ellos con facilidad; estos son, desde el punto de vista de la acumulación de calor en procesos bioclimáticos, los ideales. En cambio, los materiales con efusividades bajas son materiales con poca capacidad de acumulación, ya que su densidad y su calor específico son bajos, y, por el contrario, aislantes, es decir, el calor se mueve por ellos con lentitud.

$$b = \sqrt{\rho \cdot c_e \cdot \lambda}$$

Donde λ es la conductividad térmica, ρ la densidad y c_e es el calor específico.

LOS MATERIALES MÁS ADECUADOS PARA LA ACUMULACIÓN DE CALOR, NO SÓLO POR SU MASA TÉRMICA SINO TAMBIÉN POR LA RAPIDEZ QUE OFRECEN AL CALENTAMIENTO Y AL ENFRIAMIENTO SON LOS METALES, JUNTO CON HORMIGONES, PIEDRAS O CERÁMICAS



Acumulador de calor Marguerre en la planta de energía EDASZ, Sopron, Hungría, Kaboldy, CC BY-SA 3.0

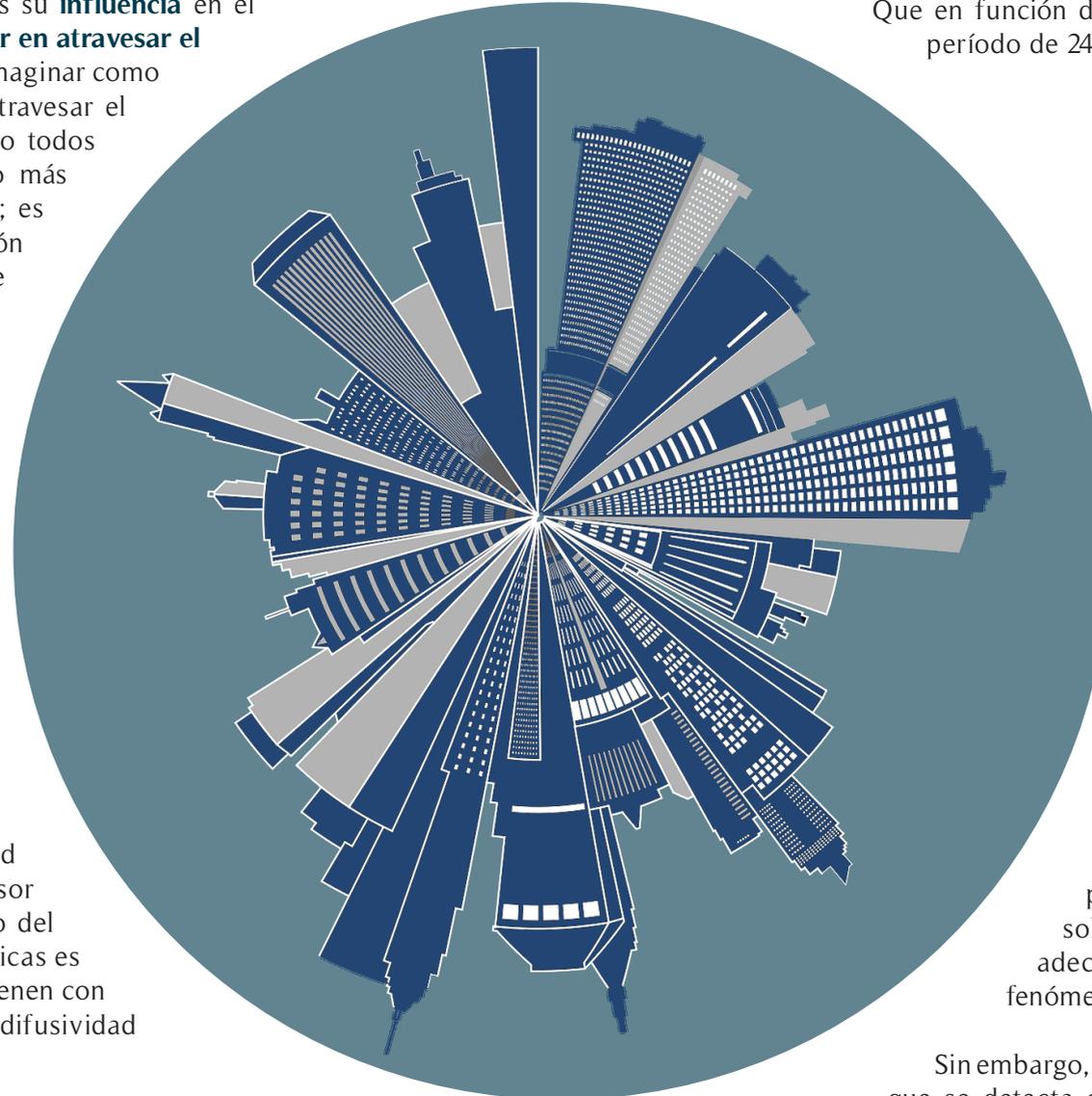


Desfase y amortiguación de la onda térmica por radiación

Otra consecuencia de la **masa térmica** es su **influencia** en el tiempo que **tarda la onda de calor exterior en atravesar el cerramiento**. La onda de calor se puede imaginar como una manguera soltando agua que para atravesar el muro y llegar al interior, debe ir llenando todos los cubos; cuantos más cubos existan o más grandes sean, más tardará en atravesarlo; es la lentitud de los procesos de conducción que se manifiesta como un desfase desde el momento en el que empezó a calentarse y cuando alcanza el interior. Termodinámicamente lo que ocurre es que las capas exteriores del muro están más calientes que las más profundas, por lo que la energía avanza a más o menos velocidad, pero cuando deja de dar el sol y ya no aporta energía, al estar más calientes que el ambiente exterior cede energía hacia fuera enfriándose y amortiguando parte de la energía almacenada. Este fenómeno se denomina amortiguación de la onda térmica.

El desfase (d_f), que es generalmente de varias horas, depende de la conductividad térmica (λ), de la densidad (ρ), del espesor (d), del calor específico (c_e) y del período del fenómeno (t), que para aplicaciones climáticas es de 24 horas. Los desfases mayores se obtienen con los materiales de mayor espesor y menor difusividad térmica.

Su expresión, con la conductividad térmica en $W/m \cdot K$, la densidad en kg/m^3 , el espesor en metros, el periodo en horas y el calor específico en $J/kg \cdot K$, para mayor comodidad de manejo en diversas magnitudes SI, es la siguiente:



$$d_f = 0,0167 \cdot \frac{t}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c_e}{\pi \cdot \lambda \cdot t}} \cdot d$$

Que en función de la difusividad térmica en m^2/s , y para un período de 24 horas, toma el siguiente aspecto:

$$d_f = \frac{0,0231 \cdot d}{\sqrt{a}}$$

Teniendo en cuenta que el proceso de transferencia de calor a través de los cerramientos acristalados es prácticamente instantáneo, y muy lento a través de los cerramientos opacos, es conveniente **desfasar** lo más posible el paso del calor a través de estos últimos para evitar su coincidencia o proximidad con las cargas térmicas generadas a través de las ventanas.

Teniendo en cuenta que **la energía se debe acumular desde el interior**, es decir dejando primero que penetre la radiación solar o el aire fresco de la noche, ese desfase habría que aplicarlo a la hoja interior del cerramiento. Si fuera medio pie de ladrillo perforado el desfase puede estar en torno a las 4 h, que es el período de tiempo aprovechable de captación solar. Por tanto, hay una coincidencia muy adecuada entre el elemento de acumulación y este fenómeno.

Sin embargo, ya se ha visto que no es éste el único fenómeno que se detecta en los cerramientos como consecuencia del régimen variable. Durante el lento proceso de conducción del calor a través del muro, las condiciones exteriores cambian: deja de dar el sol y baja la temperatura. Esto provoca que parte del calor que se había acumulado

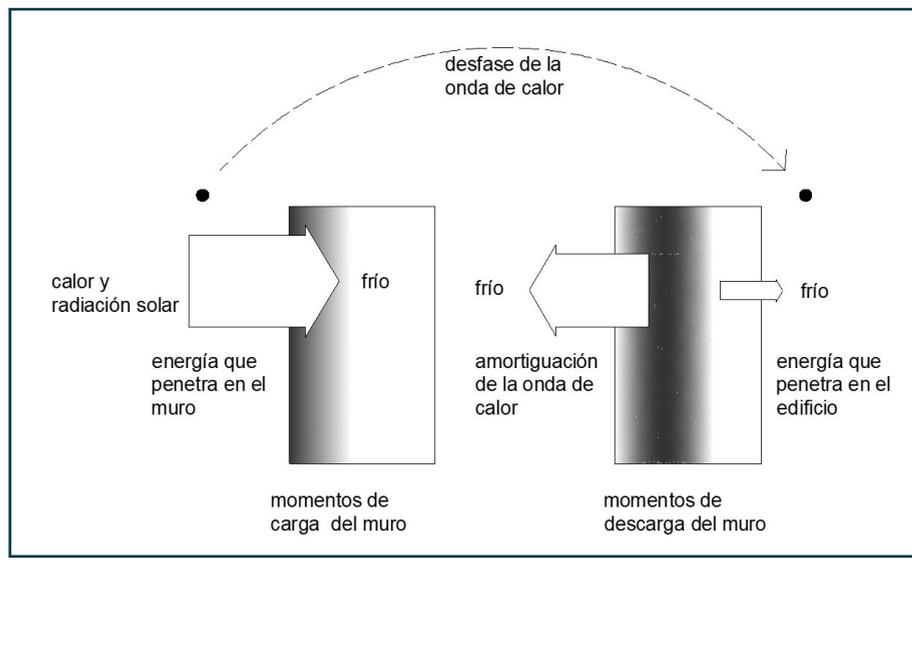


dentro del muro encuentre una salida térmicamente razonable hacia el exterior, produciéndose un rebote de la onda de calor. A esto se le denomina amortiguación de la onda térmica (f_a).

$$f_a = 1 - e^{(-0,0167 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \rho \cdot c_e \cdot d}{\lambda \cdot t}} \cdot d)}$$

Que en función de la efusividad térmica en $s^{1/2} \cdot W/m^2 \cdot K$, y para un período de 24 horas, toma el siguiente aspecto:

$$f_a = 1 - e^{\left(\frac{-0,0060 \cdot b \cdot d}{\lambda}\right)}$$



Desfase y amortiguación de la onda de calor: momento de captación de energía desde la cara exterior del muro; momento en el que cesa la carga y la energía acumulada en el muro se desplaza en los dos sentidos provocando la amortiguación de la onda

La **amortiguación de la onda térmica**, que como se ve depende de los mismos parámetros que el desfase de la onda, es muy elevada, generalmente por encima del 80%. Es decir, el 80% de la energía que había penetrado en el cerramiento vuelve hacia el exterior y se disipa. Si de nuevo lo vemos desde el interior y la captación se ha producido previamente en la habitación el fenómeno de amortiguación devolverá el 80% de la energía que estaba en el cerramiento hacia la habitación, por lo que no se pierde.

Cuando el cerramiento consta de varias capas el desfase se obtiene mediante la suma de los desfases de las diferentes capas. Sin embargo, en la amortiguación no se puede, ya que la amortiguación de una capa hay que aplicarla a la energía que había atravesado las capas anteriores, y no a la energía de origen. Haciendo esto con todas las capas, según el orden de colocación, se calcula la amortiguación total y la energía final que atraviesa todo el cerramiento.



Conclusiones

Como se ha podido ver en este manual, el proceso de diseño de edificios bioclimáticos sigue unos pasos muy claros que no deben perderse. El primero de ellos es obtener una base de datos climáticos y microclimáticos fiables y recientes, o calculándolos con la mayor precisión posible del lugar donde se va a realizar el edificio, incluso a nivel de barrio o de calle para tener en cuenta los efectos de la isla de calor. En segundo lugar, con esta información una vez analizada, se deben trasladar los datos a herramientas como los climogramas de bienestar, donde aparecerán las primeras pautas de diseño. Posteriormente habrá que seleccionar y evaluar las estrategias a aplicar. En climas como los extremeños, mediterráneos, suaves, pero continentalizados, con grandes diferencias día/noche, y con influencias oceánicas que generan inviernos moderados, hay que tener en cuenta en esas estrategias los efectos del verano y del invierno simultáneamente, valorando los efectos que puedan provocar a lo largo de todo el año. En estos climas en concreto resultará evidente la necesidad de captar radiación solar durante los meses fríos del invierno, utilizar la ventilación nocturna aprovechando el frescor de la noche para la refrigeración a largo del día en verano, aislar potentemente los cerramientos para evitar que esa energía se pierda hacia el exterior, y colocar el aislante térmico en el exterior de la fachada para dejar que la masa del cerramiento se encargue de acumular la energía que se ha captado. Posteriormente, siempre será recomendable someter al edificio, con las estrategias seleccionadas y dimensionadas, a una simulación energética para ajustarlas perfectamente. Si el proceso y las circunstancias son las correctas se podrá alcanzar como resultado el edificio de energía cero en acondicionamiento higrotérmico.



Agradecimientos

A Francisco Javier Neila González, como autor de este manual.

A todos nuestros socios del proyecto **LIFE ReNatural NZEB**, por hacer que la colaboración y el trabajo en equipo resulte tan sencillo:

- **LNEG**, Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- **ITECONS**, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico na Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade.
- **URVIPEXSA**, urbanizaciones y viviendas de Extremadura S.A
- **INTROMAC**, Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción.
- **CICYTEX**, Centro de Investigaciones Científicas Y Tecnológicas de Extremadura.
- **UCO**, Universidad de Córdoba.

A Álvaro Rodríguez Martín, por su trabajo e implicación en el montaje y maquetación de este manual.

Una mención muy especial a Mónica Ruiz-Roso Luna, por su inestimable dedicación y esfuerzo durante todo el desarrollo del Proyecto **LIFE ReNatural NZEB**.



Bibliografía y referencias I

AA.VV. El clima urbano de Madrid: la isla de calor, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1991. (Díaz *et al*, 1991)

AA.VV. Isla de calor y clima urbano en Madrid. Impacto en el consumo de edificios. Urban heat island, urban climate and building energy consumption, García Maroto, Editores, 2020, Madrid. (Sánchez-Guevara *et al*, 2020)

Díaz J, Carmona R, Mirón IJ, Ortiz C, León I, Linares C. Geographical variation in relative risks associated with heat: update of Spain's Heat Wave Prevention Plan. Environment International. 2015.. (Díaz *et al*, 2015)

DIRECTIVA (UE) 2018/2002 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 11 de diciembre de 2018 por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. (Directiva Europea, 2019)

El color de la energía (conferencia de Javier Neila) (Neila, 2019)

IDEA, Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica. (IDEA, s.f.)

Informe bioclimático elaborado para el Ayuntamiento de Miajadas (2021) por el grupo de investigación ABIO de la UPM (Javier Neila, Ester Higuera y Emilia Román). (Higuera *et al*, 2021)

Neila, F. J., Bienestar higrotérmico, INGeBOOK, 2012, Madrid. (Neila, 2012)

Neila, F. J., Miradas bioclimáticas a la arquitectura popular del mundo, García Maroto Editores, 2014, Madrid. (Neila, 2014)
Miradas 4 (Neila, 2022)

Neila F. J., Recorridos bioclimáticos por la arquitectura tradicional. Miradas 3, García Maroto, Editores, 2020, Madrid. (Neila, 2020)

Montalbán , B., Rehabilitación sostenible de la arquitectura tradicional del valle del Jerte, tesis doctoral, 2015. (Montalbán, 2015)

REDAREX, Red de Asesoramiento al Regante de Extremadura. (REDEX, s.f.)

Sánchez-Guevara, C., Nuevos indicadores de evaluación para las intervenciones en viviendas, tesis doctoral, 2016. (Sánchez-Guevara, 2017)

Texto de Ester (Higuera *et al*, 2022)

(www.meteoblue.com, s.f.)



Bibliografía y referencias II

ASHRAE Procedure for calculating natural ventilation air flow rates in buildings, F.S.E. Center, Editor, 1987. (ASHRAE, 1987)

Neila, F. J., Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible, Ed. Munilla-Lería, 2004, Madrid. (Neila, 2004)

Neila, F. J., La arquitectura vernácula más sostenible. Miradas 2, García Maroto Editores, 2017, Madrid. (Neila, 2017)

Neila, F. J. y otros, La cubierta ecológica de tercera generación: un nuevo material constructivo, Informes de la Construcción, 2008. (Neila et al, 2008)

Bibliografía y referencias III

Acha, C. y Neila, F. J., Arquitectura bioclimática y construcción sostenible, Editorial DAPP, 2009, Madrid. (Acha, Neila, 2009)

Cerón, I., y otros, Materiales de cambio de fase. Aplicaciones arquitectónicas, Arquitectura Viva, Nº 144, 2012. (Cerón, 2012)

Neila, F. J., La acumulación de las energías renovables (I). La inercia y la estabilidad térmica en las construcciones, Cuadernos Juan de Herrera, 2000. (Neila, 2000)

Neila, F. J. y otros, Los materiales de cambio de fase (MCF) empleados para la acumulación de energía en la arquitectura: su aplicación al proyecto Magic Box, Materiales de Construcción, 2008. (Neila, 2008)

McDonough, W. y Braungart, M., Cradle to cradle, 2005, MCGRAW-HILL. (McDonough, Braungart, 2005)

Oliver, A. y otros, Incorporación de materiales de cambio de fase en placas de yeso para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente: Caracterización térmica del material mediante la técnica DSC, Informes de la Construcción, 2011. (Oliver, 2011)





“Cualquier cosa buena que construyamos
termina construyéndonos”

Jim Rohn



MANUAL SOBRE DISEÑO BIOCLIMÁTICO DE EDIFICIOS



Proyecto cofinanciado con la
Contribución del Programa LIFE
de la Unión Europea

Project co-funded with the
contribution of the LIFE Programme
of the European Union

JUNTA DE EXTREMADURA
Consejería de Movilidad, Transporte y Vivienda

