

Bioclimatismo en la arquitectura de Le Corbusier: El Palacio de los Hilanderos

Ignacio Requena-Ruiz

▶ **To cite this version:**

Ignacio Requena-Ruiz. Bioclimatismo en la arquitectura de Le Corbusier: El Palacio de los Hilanderos. Informes de la Construccion, 2012, 64 (528), pp.549-562. 10.3989/ic.11.121 . halshs-01279892

HAL Id: halshs-01279892
https://shs.hal.science/halshs-01279892

Submitted on 7 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

Bioclimatismo en la arquitectura de Le Corbusier: El Palacio de los Hilanderos.

Autor: Ignacio Requena Ruiz

RESUMEN

Consecuencia de la crisis del internacionalismo en arquitectura, a partir de los años treinta la obra de Le Corbusier giró para establecer vínculos con el lugar, representado por la cultura y el clima. Estudiar sus proyectos, métodos y obras mediante los actuales mecanismos de análisis energético, permite conocer de un modo objetivo aproximaciones a la sostenibilidad anteriores a nuestros días.

El trabajo experimental se centra sobre el *Palacio de los Hilanderos* en Ahmedabad como edificio significativo de este cambio, arrojando luz sobre la verdadera funcionalidad medioambiental de las propuestas del arquitecto suizo.

Soluciones como el *brise-soleil,* el *aerateur* o la cubierta ajardinada eran parte de una respuesta global hacia el clima, en la que el trabajo sobre los aspectos formales y constructivos de la arquitectura desde una perspectiva científica, constituyó el núcleo de su adaptación al medio.

Palabras clave: arquitectura bioclimática; Le Corbusier; simulación energética; sostenibilidad.

Bioclimatism in the Architecture of Le Corbusier: The Millowners Association Building.

SUMMARY

After the crisis of internationalism in architecture during the 1930s, the work of Le Corbusier changed toward a new sense of relationship with local culture and environment. Employing current bioclimatic procedures of analysis to study his projects, methodologies and works, we can know objectively early approaches to sustainability.

The research, focused on Millowners Association Building (Ahmedabad, 1951) as an outstanding work in this period of change, reveals the environmental functionality of the proposals made by the Swiss architect.

Architectural devices like the brise-soleil, the aerateur or the garden roof, were only different parts of a comprehensive response to climate. As a result, the work in shape and construction from a scientific perspective, became the core of an architecture adapted to the environment.

Keywords: bioclimatic architecture; Le Corbusier; energy simulation; sustainability.

1. Introducción

El periodo internacionalista de la arquitectura moderna, en realidad no fue más que una expresión concreta de la modernidad acaecida principalmente en el contexto de Centroeuropa durante el periodo entreguerras (1). En su anhelo de una arquitectura democrática, racional y de calidad se aproximaron a la optimización industrial, promulgando una arquitectura en serie. La normalización de los aspectos antropométricos, higrotérmicos y sociales del habitante universalizó los criterios modernos ante cualquier usuario y lugar. En definitiva, en los años veinte los arquitectos de las vanguardias trataban de construir una verdadera "máquina de habitar (*machine à habiter*)" (2), capaz de responder por medio de la técnica moderna ante el ser humano y la naturaleza.

Le Corbusier, uno de los principales ideólogos de esas vanguardias, desarrolló un marco conceptual en el que la técnica era el soporte de los "cinco puntos para una nueva arquitectura", reflejándose en dos soluciones: el sistema *Dom-ino*[1] como mecanismo estructural y la "Respiración exacta (*respiration exacte*)"[2] como sistema de climatización. La suma de ambos le permitió elaborar una versión conceptualmente verosímil hasta el momento de la arquitectura internacional en los "Grandes trabajos (*grands travaux*)" de final de la década.

Sin embargo, la incapacidad de la técnica para resolver eficazmente los problemas planteados (3) le condujo, entrados los años treinta, hacia un periodo de investigación sobre la adaptación de la arquitectura al entorno. Sus inquietudes pasaron por la protección ante el soleamiento, el control de ventilación y humedad y la construcción con sistemas naturales, tratando de recuperar las enseñanzas de la cultura constructiva tradicional sin perder el papel renovador de la modernidad.

El paralelismo general del contexto histórico de la actualidad con los años treinta, unido a las posibilidades aportadas hoy en día por las técnicas de monitorización y simulación energética, nos permite revisar el modo en que el arquitecto suizo abordó las cuestiones medioambientales en arquitectura. El análisis aplicado sobre el *Palacio de la Asociación de Hilanderos*, lo sitúa como ejemplo representativo de un grupo de obras en el que los recursos bioclimáticos de la arquitectura vernácula fueron asumidos en los métodos científicos del proyecto moderno.

Se trata de entender mediante las técnicas e inquietudes actuales por la sostenibilidad, la manera de relacionar la arquitectura con el clima, para conseguir el confort interior con recursos bioclimáticos pasivos. La investigación se circunscribe a este campo atemporal de la arquitectura, puesto que evaluar aspectos inexistentes en el periodo de estudio produciría lecturas obvias y anacrónicas.

2. Evolución metodológica

El ciclo de crisis y transición de los años treinta en la obra de Le Corbusier inició con los viajes a Sudamérica (1929-1936) y Argel (1931), donde conoció culturas cuyas construcciones vernáculas, adaptándose a las exigencias de climas agrestes, creaban espacios habitables con soluciones de una plasticidad no premeditada. Este duplo de valores, climáticos y culturales, marcó la transformación de su arquitectura en las décadas venideras.

Comenzó a partir de entonces un proceso de implementación de métodos provenientes de campos diversos de la ciencia y, empleando la geometría, los adaptó a su propia visión de la arquitectura. Hasta final de los años cuarenta agregó protocolos de cálculo gráfico del soleamiento basados en las cartas solares y la gnomónica, aplicados anteriormente en arquitectura por el estadounidense W. Atkinson en 1912, difundidos desde 1932 en Europa por W. Körte y formando parte del manual de E.

[1] El sistema *Dom-ino* (1914) estaba basado en un entramado de pilares y vigas de hormigón armado con un forjado de viguetas en doble T con bovedillas huecas. Su sencillez constructiva liberaba la planta de los rígidos muros de carga, permitiendo también una ejecución seriada con mano de obra poco especializada.

[2] La *Respiration exacte* (1928) estaba formada por una envolvente estanca de doble capa con cámara de aire intermedia climatizada, el llamado *mur neutralisant*. El segundo componente era la *aeration ponctuelle* destinada a la renovación y climatización del aire interior.

Neufert "El arte de proyectar arquitectura"[3] desde 1936. Proyectos como el *Sanatorium* (Zurich, 1934), el Estadio de 100.000 espectadores (1936) o el *Rascacielos del Quartier la Marine* (Argel, 1938) mostraron esta inquietud (4).

Prototipo heliotécnico

La oportunidad de consolidar un prototipo arquitectónico en el que trabajar a gran escala sobre las investigaciones realizadas hasta el momento, le condujo a la fundación en 1943 del *Atelier des Bâtisseurs* (AtBat). Un gabinete técnico consignado al desarrollo de los proyectos de ejecución de las *Unité d'habitation* (Marsella, 1947) y, simultáneamente, de la *Manufactura Duval* (Saint-Dié, 1946).

El *brise-soleil* alcanzaba un papel fundamental uniéndose al esquema base del sistema *Dom-ino*, evolucionando el concepto estructural y funcional para responder al programa residencial y al clima (Figura 1). Desterró así la *Respiration exacte* a cambio de la confianza en las cualidades formales de la arquitectura para controlar los efectos ambientales.

La modulación de los apartamentos y de la estructura, regidas por el *Modulor*[4], coartaban la planta libre. El *brise-soleil* configuraba junto a la estructura una unidad constructiva, ejecutándose muros, pilares y losas en hormigón *in-situ*, mientras que el resto de elementos (antepecho, celosía y jambas) eran de hormigón prefabricados con acabado de grava.

Esa vinculación de forma, estructura, ambiente y función es constatable en la documentación de los proyectos elaborados en AtBat. Son numerosos los planos dedicados al dimensionado y ensayo de propuestas diferentes de *brise-soleil,* análisis de sombras proyectadas y niveles de iluminancia interiores. Pero incluso también lo sugiere la propia imagen del prototipo en construcción (Figura 2).

La protección solar quedó unida al espacio interior de modo funcional, constructivo y representativo, convirtiéndose en imagen identificativa de los edificios de alojamiento colectivo en cualquiera de sus variantes desarrollados por Le Corbusier.

De esta manera, si el *brise-soleil* quedó unido al programa de alojamiento colectivo, los espacios colectivos inherentes a estos proyectos requirieron una envolvente distinta, el *pan de verre ondulatoire*. Cerramiento complementario, elaborado con la ayuda de I. Xenakis[5], integrado por una carpintería de abundantes elementos verticales de hormigón cuya modulación variable producía efectos dinámicos.

Las distintas versiones del prototipo dependieron de las características del programa y del lugar, pudiendo encontrarse en sus posteriores aplicaciones variaciones en la relación entre *brise-soleil* y *pan de verre ondulatoire*. Aunque las *Unité d'habitation* (Marsella, 1947-Firminy, 1960) fueron un fallido estandarte de este prototipo adaptado al clima, resultaron mucho más certeros otros ejemplos como la *Casa de Brasil* (París, 1952) o el *Convento de la Tourette* (Eveux-sur-l'Arbresle, 1953).

Desarrollo del método. La forma y el clima

La complejidad de las técnicas empleadas hasta el momento dificultaba el ajuste de forma y clima en los primeros estadios del proyecto, lo que unido a los diferentes requerimientos ambientales de los nuevos trabajos en el trópico (Ahmedabad y Chandigarh), le condujo hacia la sistematización de los conocimientos previos en métodos más operativos.

[3] Título de la traducción al castellano del original *Bauentwurfslehre. Handbuch für den Baufachmann, Bauherren, Lehrenden und Lernenden*.

[4] Regla de proporciones antropométricas desarrollada por el arquitecto suizo para estandarizar las dimensiones humanas en arquitectura.

[5] Iannis Xenakis (1922-2001), ingeniero griego que centró su mirada creativa en los modelos probabilísticos de composición aplicados en arquitectura y música contemporánea.

En 1951 Xenakis elaboró un nuevo procedimiento gráfico, los *Epure du soleil,* donde resumió los cálculos gráficos de soleamiento en un sólo dibujo, facilitando su comprensión y aplicación por cualquier proyectista del atelier. Estos ábacos de diseño eran específicos a cada emplazamiento, en los cuales, fijando azimut, fecha y hora, se obtenían azimut y altura solar.

Sin embargo, las diferencias entre el clima tropical y el centroeuropeo, junto a la relación con el ingeniero A. Missenard[6], conllevaron la ampliación del espectro de análisis para contemplar un nuevo rango de aspectos climatológicos: "[…] adaptación climática: lluvia; sol de verano; sol de invierno; ventilación por temperaturas diferenciales por la mañana; ventilación por la tarde; ventilación artificial; iluminación"[7] (7).

Con este objetivo Xenakis, Doshi y Missenard elaboraron el *Grille climatique* en 1951, donde estudiaban variables relativas al confort humano: temperatura del aire, humedad, velocidad del aire y temperatura radiante. La tabla vinculaba la toma de datos con la combinación necesaria de actuaciones bioclimáticas (radiación solar, ventilación, humedad ambiental e inercia térmica) representadas en catorce croquis elaborados personalmente por Le Corbusier[8] (8).

Este proceso dio a luz una familia de obras que superaban el prototipo heliotécnico de los años cuarenta. El sistema *Dom-ino* aparece aquí inalterado e independiente del uso y, al igual que en el caso anterior, el *brise-soleil* formaba parte del esquema fundamental del edificio junto a la estructura a pesar de no ser materializados conjuntamente.

Ateniéndose a las recomendaciones del *Grille Climatique*, la forma de la arquitectura se adaptó para gestionar la permeabilidad al aire con los *aerateur*[9], la sensación térmica mediante la relación entre altura/profundidad y la humedad relativa con la vegetación.

Las aplicaciones de este método produjeron una relación con el clima más abstracta y compleja, condicionando la forma y la estructura para generar un espacio interior habitable y flexible. Cada elemento presentaba una función específica: la estructura estaba dimensionada en base al cálculo estático; el *brise-soleil* era calculado y orientado según los requerimientos del clima y el programa; las particiones, dispuestas libremente en la planta, delimitaban espacios monofuncionales; los *aerateur,* según su número y posición, gestionaban la permeabilidad al aire.

Del mismo modo que la arquitectura vernácula interpretó su relación con el medio ambiente desde el conocimiento empírico heredado, Le Corbusier la diseccionó con los mecanismos del pensamiento racional.

En esta búsqueda de la adaptación de los parámetros de la modernidad a los valores de la cultura y el clima local, las investigaciones del arquitecto suizo fueron anteriores a los trabajos de V. Olgyay sobre soleamiento, higrotérmia y ventilación recogidos en 1963 en el manual de bioclimatismo *"Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism"* (9). No es casualidad lo común del enfoque regionalista de la técnica bioclimática en arquitectura.

[6] André Missenard (1901-1989) fue un *polytechnicien* (formado en la escuela politécnica), físico de vocación e industrial de profesión. Profesor de la *École des Travaux Publics*, la *École Polytechnique* y la *École des Beaux-Arts*, sus trabajos sobre el confort humano, la temperatura operativa y la calefacción radiante le valieron el premio de Rietschel en 1928, creando el nomograma de Missenard (6).

[7] Enumeración recogida en el plano de "Adaptación climática" del *Secretariado* de Chandigarh.

[8] Estrategias expuestas en los croquis de aplicación del *Grille Climatique*. Documentos del archivo de la Fondation Le Corbusier con signaturas desde FLC 5627A hasta FLC 5627P.

[9] Compuertas situadas en cerramientos y particiones destinadas al control de la ventilación. Son de proporción esbelta e igual altura que el espacio interior.

3. Análisis aplicado: El Palacio de los Hilanderos.

3.1. Descripción del edificio

El ejemplo más completo donde Le Corbusier aplicó los procedimientos de proyecto descritos fue el *Palacio de la Asociación de Hilanderos* (Ahmedabad, 1951-1956). Encargo donde las particulares características de los clientes[10], junto a la dualidad del programa entre lo privado y lo representativo, le permitieron trabajar en el marco conceptual de la casa-palacio (10).

Ahmedabad (23°06'N 72°40'E) es una ciudad situada al noroeste de la India con clima seco estepario cálido (Bsh)[11], caracterizado por precipitaciones anuales concentradas en periodo de monzón y temperatura media anual superior a los 18°C. Las máximas diarias en verano superan los 40°C y las mínimas de invierno no bajan de los 10°C, combinándose con la estación de monzón intenso de temperaturas hasta los 35°C y humedad relativa media superior al 70%.

La parcela original era sensiblemente rectangular (43x115 m.) de orientación principal este-oeste en su longitud mayor. El edificio, de planta cuadrada (27x27 m.), fue situado hacia el extremo oriental en el área más próxima al río Sabarmati.

En la singular formalización de esta obra (Figura 3) quedaron presentes las estrategias bioclimáticas anteriormente descritas, reinterpretando desde la modernidad el conocimiento climático de la arquitectura vernácula hindú.

Control radiación solar

Dos de las cuatro fachadas del edificio (norte y sur) eran ciegas ya que recaían hacia las parcelas lindantes, evitando injerencias en la privacidad. Las otras dos (este y oeste) presentaban sendos *brise-soleil* de hormigón armado[12] estrechamente condicionados por el lugar (12).

Hacia el este, estaba compuesto por piezas perpendiculares al plano de fachada con 1,10 m. de profundidad, abierto al río y los vientos dominantes. El de orientación opuesta, presentaba elementos verticales girados 45° respecto a la fachada y profundidad de 2,00 m., cerrándose al sol de poniente y al tráfico de la avenida principal.

La doble estrategia en respuesta a soleamiento y ventilación fue defendida por Le Corbusier: "…el edificio se abre a los vientos dominantes. Las fachadas este y oeste tienen sus *brise-soleil* calculados según la latitud de Ahmedabad y la trayectoria solar exacta" (13).

Permeabilidad al aire

La configuración abierta del edificio transformaba la arquitectura en una construcción porosa al paso del aire y protegida de la radiación, dejando las zonas privadas delimitadas por cerramientos específicos. En su interior, las fachadas abiertas a la luz y el aire estaban compuestas por carpinterías de madera[13], a lo largo de las cuales proyectó un *aerateur* cada 1,42 m. para garantizar ventilación cruzada y disipación del calor interior. La buena aireación, acompañada de la gran altura libre (3,66 m.) de los espacios, preveía mitigar la sensación térmica en los periodos cálidos del clima tropical (Figura 4).

[10] Asociación de industriales textiles vinculados por lazos de casta, religión y sangre con actitudes filantrópicas e intereses culturales.
[11] Según la clasificación climática Köppen-Geiger basada en la caracterización por índices fitoclimáticos.
[12] El hormigón armado de los *brise-soleil* fue ejecutado con encofrado de madera, mientras que el de muros y estructura se hizo con encofrado metálico.
[13] En la carpintería de madera se insertaron vidrios simples, *aerateur* y paneles ciegos.

El propio Le Corbusier justificó estos mecanismos tratando de evitar la dependencia de los sistemas de aire acondicionado, lo cual hubiera encarecido la construcción y el mantenimiento de todos los edificios proyectados en la India[14].

Construcción de alta inercia térmica

Entramado estructural[15], cubierta y muros de ladrillo caravista macizo[16] (Figura 5), generaban una construcción de gran masa capaz de amortiguar el impacto de la fluctuación térmica exterior.

En el prototipo heliotécnico de los años cuarenta, la construcción solidaria de estructura y *brise-soleil* añadía la inercia y superficie de captación del parasol a la del resto del edificio, dificultando la habitabilidad en periodos punta de verano. El calor captado en la fachada era cedido a la estructura y, si carecía de una correcta ventilación, no llegaba a ser disipado en ciclos de menor temperatura, comportamiento monitorizado en el edificio de la *Casa de Brasil* (15).

Con el objetivo de evitar estas deficiencias realizó tres modificaciones en el sistema. En primer lugar redujo el volumen de hormigón armado expuesto a la radiación solar directa. En comparación con los 0,26 m^3/m^2 del *brise-soleil* de la *Casa de Brasil*, en el *Palacio de los Hilanderos* pasó a 0,09 m^3/m^2 en la fachada este y 0,15 m^3/m^2 en la oeste, mejorando también la adaptación formal a las trayectorias solares.

Introdujo una discontinuidad constructiva entre el *brise-soleil* y el forjado, quedando unidos puntualmente por ménsulas. El calor captado y almacenado en el *brise-soleil* no se transmitía por conducción al forjado interior, evitando aumentar la cesión de energía.

La tercera medida fue disminuir al máximo los elementos de hormigón presentes en el plano de fachada con exposición directa al soleamiento, sustituyendo los antepechos solidarios a la estructura por barandillas metálicas o piezas de hormigón independizadas.

Vegetación integrada

A la altura del forjado, el *brise-soleil* incorporó un dintel de mayor canto con espacio para contener una línea de jardineras. De esta manera, por un lado minimizaba la exposición al sol de los forjados y, por otro, las plantas colaboraban en el enfriamiento evaporativo del aire interior, dispositivo especialmente efectivo en las estaciones secas.

Asimismo, la cubierta en forma de V sobre la sala de asambleas contaba con dos parterres ajardinados y un pequeño estanque. El objetivo era recoger el agua de lluvia, regular la humedad ambiental y aislar térmicamente frente a la radiación solar directa. En la actualidad esta combinación de cubiertas ha sido eliminada debido a patologías de humedad provocadas por la fisuración de la lámina impermeable. Problema común surgido con el paso de los años en la mayoría de las cubiertas planas de la época, de efectos acrecentados en este caso por la solución ajardinada.

3.2. Materiales y métodos.

El análisis está estructurado en tres fases que permiten una aproximación progresiva al funcionamiento bioclimático de la arquitectura.

La primera, el estudio de la relación con el clima y el emplazamiento partiendo de los datos climatológicos de referencia de la estación meteorológica de Ahmedabad, a saber: temperatura

[14] Carta de Le Corbusier a P. L. Varma, ingeniero jefe del proyecto en Chandigarh. Archivo de la Fondation Le Corbusier FLC P1-10-306

[15] Estructura de hormigón armado con trama regular de pilares circulares que soportan un entramado de vigas de canto sobre las que apoyan las losas macizas.

[16] Los muros están compuestos por una hoja exterior de un pie de ladrillo caravista macizo, una cámara de aire y una hoja interior de ladrillo que aparecía enfoscada de blanco o revestida con piedra rojiza en zonas nobles.

media, máxima y mínima; humedad relativa; velocidad media y dirección del viento; índice de nubosidad medio; radiación global y difusa[17] (16).

Con objeto de valorar cuantitativa y cualitativamente las exigencias del clima se elaboran la carta solar y los climogramas en las coordenadas geográficas del emplazamiento. El Climograma de Bienestar Adaptado (CBA) (17), basado en la teoría de la carta bioclimática de Olgyay, es empleado para el estudio de los periodos de confort, requerimientos de sombra, radiación y ventilación. Mientras que el Climograma de Givoni (18), vinculado al ábaco psicométrico, acota la efectividad de las medidas bioclimáticas pasivas o activas.

La adaptación de la forma arquitectónica a las conclusiones de los climogramas es evaluada por medio del coeficiente volumétrico de transmisión de calor (G)[18] y las máscaras de sombras. El valor de G marca el grado de exposición al ambiente exterior (19) lo cual es significativo, bien de la capacidad de conservación de la energía en climas fríos, o bien de su aptitud al intercambio energético con el aire en climas tropicales. Las máscaras de sombra de los *brise-soleil,* al compararlas con las cartas solares y las exigencias de sombra/radiación, permiten conocer la adecuación de las protecciones solares propuestas.

En segundo lugar, se realizan simulaciones[19] estacionales con diferentes criterios de ventilación que reflejan el comportamiento higrotérmico del edificio en conjunto. El procedimiento responde a los principios establecidos en la física de transferencia de calor considerando los mecanismos de conducción, convección y radiación, además de acumulación e inercia térmica.

Las simulaciones son comparadas y ajustadas en base a trabajos de monitorización elaborados y publicados en investigaciones específicas (20), constituyendo la necesaria peritación de las obras en su realidad física (21)[20].

Los resultados de temperatura del aire, temperatura radiante de los paramentos y humedad relativa (22) son analizados usando tres coeficientes derivados: coeficiente de estabilidad térmica (CET)[21], desfase de la onda térmica[22] (23) y voto medio previsto (VMP)[23] (24).

Por último, el espectro de análisis se amplía con el estudio de los espacios tipo por medio de simulaciones específicas que permiten conocer en detalle el grado de habitabilidad y el funcionamiento de los sistemas propuestos por Le Corbusier.

El estudio del aire según la dinámica de fluidos[24] predice la distribución de temperaturas y el movimiento del aire. Las condiciones de contorno de los análisis vienen establecidas por los días promedio de cada estación, tomados de la simulación higrotérmica general realizada en la etapa anterior.

---

[17] Datos obtenidos de la Indian Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ISHRAE) y de la International Weather for Energy Calculations (IWEC) de la ASHRAE.

[18] Coeficiente obtenido a partir del sumatorio de superficies de cerramiento multiplicadas por su conductividad térmica (k), dividido por el volumen total confinado, sumando al conjunto las pérdidas por renovación del aire.

[19] Simulación higrotérmica realizada mediante DesignBuilder Software empleando el motor de cálculo Energyplus del U.S. DOE (Departamento de Energía de Estados Unidos).

[20] La diferencia entre la monitorización y la simulación del modelo en condiciones exteriores semejantes indica un error medio en mediciones de temperatura del 2'75% (D_m = 1'66).

[21] Cociente entre la amplitud de la temperatura exterior y la amplitud de la temperatura interior.

[22] Diferencia en horas entre el momento de la temperatura máxima exterior y la interior.

[23] El VMP o *Predicted Mean Vote (PMV)* se desarrolla según formulación establecida en la ISO 7730.

[24] Simulación con Designbuilder más el motor de cálculo Computational Fluid Dynamics (CFD) basado en el algoritmo de cálculo Simpler.

La simulación[25] lumínica evalúa el aprovechamiento de la luz natural y el confort lumínico durante los solsticios de verano e invierno y en los equinoccios, mostrando los niveles de iluminancia, factores de luz diurna y autonomía de luz solar anual en horas de trabajo.

3.3. Relación con el emplazamiento

Climogramas

El CBA (Figura 6) y su desarrollo horario en el diagrama de isopletas (Figura 7) indican la necesidad de mantener los espacios habitables en sombra durante todo el año, tan sólo es posible prescindir de ella hasta las 11:00 h. durante el periodo invernal (octubre a febrero). La ventilación natural también ha de ser constante en horas de alta radiación en las estaciones de verano (marzo a mayo) y monzón (junio a septiembre), empezando entre 13:00-17:00 h. en febrero y llegando de 12:00 h. hasta el crepúsculo en mayo. Aún así los rigores del clima tropical exigen actuaciones complementarias, pasivas o activas, en las horas centrales del día desde marzo hasta julio.

Al realizar el análisis con el climograma de Givoni (Figura 8) es preciso distinguir los parámetros y criterios en cada una de las tres estaciones. En el periodo cálido sólo existen condiciones de confort durante el 15% del tiempo, por lo cual se precisan medidas pasivas de sombreado de los huecos, construcción de alta inercia térmica, ventilación natural y enfriamiento evaporativo. Soluciones que aumentarían el periodo de confort al 44%, haciendo necesaria la deshumidificación y el enfriamiento durante un periodo prolongado.

A lo largo de la etapa de monzón, temperatura y humedad exteriores no están en el rango de confort. Debido a ello ninguna medida pasiva es eficaz y, por tanto, es imprescindible reducir humedad y temperatura con sistemas activos.

En invierno durante el 32% del tiempo, los datos climatológicos permanecen dentro del ámbito de confort. Durante las horas de baja temperatura, el desajuste puede equilibrarse mediante la ganancia por radiación directa a través de las ventanas y usando un sistema constructivo de alta inercia térmica, no siendo necesaria calefacción artificial. La misma inercia térmica, unida al sombreado constante y a la ventilación natural, es recurso suficiente para mantener el confort en las horas de mayor radiación.

Aspectos formales

En un clima tropical con estaciones claramente diferenciadas, el edificio responde con una arquitectura íntegramente abierta al exterior, cuyo coeficiente volumétrico de transmisión de calor (G) global maximiza las oportunidades de intercambio energético y tiende a un valor infinito.

No obstante, existen espacios cerrados dentro de esa estructura permeable que permiten aislar determinadas zonas cuando el aislamiento térmico es necesario. Contemplando sólo estos espacios el coeficiente G está entre 0,55 y 0,75 W/m^3 °C, valor reducido dado el grado de protección que les otorga toda la estructura exterior independiente. Aun así este parámetro puede gestionarse en base a las condiciones climatológicas abriendo los *aerateur* de las fachadas, lo cual mejora la transferencia de energía con el aire exterior.

Orientación y soleamiento

Un análisis en base a temperaturas y radiación solar muestra el azimut óptimo (Figura 9) según datos anuales hacia el sur (185,5°), mientras que el más favorable en periodo cálido está al este (92,5°). El *Palacio de los Hilanderos* mira directamente a levante por imposición urbanística y del propio emplazamiento, desviándose 95,5° sobre el óptimo anual y 2,5° sobre el de la canícula. Por ello el

[25] Simulación con Ecotect más los motores de cálculo *Radiance* y *Daysim*, que parten de un modelo matemático híbrido entre el método Monte Carlo y el trazado de rayos (*raytracing*), dividiendo la luz en tres componentes: luz directa, luz especular indirecta y luz indirecta difusa.

dimensionado y construcción del *brise-soleil* como envolvente protectora ante la radiación solar fue esencial.

Hacia el este el *brise-soleil* presenta huecos frontales de relación 1:2 y 1:3 en alzado que protegen de la radiación directa desde una altura solar de 51,5°. Los coeficientes de sombra globales obtenidos son del 81,8% (mín. 27,9 – máx. 100%) en verano y del 86,2% (33,3-100%) en invierno.

Al oeste el entramado cierra los elementos verticales, dejando un resquicio de captación de luz difusa y brisas hacia el suroeste. Esta abertura permite la entrada de radiación directa con azimut 157°-270° y altura solar menor de 35°, es decir, únicamente durante el periodo invernal. Los coeficientes de sombra son del 94% (85,2-100%) en verano y del 94,7% (75,3-100%) durante el invierno (Figura 10).

La distribución del programa interior atiende principalmente a criterios funcionales y representativos, dentro de los cuales está el soleamiento y la ventilación. Los espacios abiertos, que suponen un 51% de la superficie útil, y las salas de administración y oficinas de uso diario, con el 19%, son todos pasantes entre las dos fachadas principales. El resto, con usos privados o acotados temporalmente, suponen un 30% del programa y disponen de una sola fachada.

3.4. Análisis higrotérmico global

Verano (marzo a mayo)

Las condiciones exteriores de alta temperatura con baja humedad establecen un VMP medio exterior de +2,1 (caluroso)[26], por lo que los *aerateur* permanecen abiertos valiéndose de la ventilación natural para evitar acumulaciones de aire caliente.

El comportamiento de los espacios interiores (Figura 11) indica una evolución de las temperaturas más suave que la exterior, consiguiendo un coeficiente de estabilidad térmica (CET) medio de 0,52 con desfase de onda térmica de 2 h. 50'. El VMP medio es de +2,4 (caluroso), pero al tratarse de espacios de 3,66 m. de altura libre, el calor tiende a estratificarse en la zona superior, mejorando las propiedades de la zona habitable. En este caso, los 2,30 m. inferiores están 0,6°C por debajo de la temperatura media, ponderando el VMP a +2,1 (caluroso), diferencia prácticamente inapreciable.

En cuanto al espacio público abierto de la planta segunda, denominado *breeze-hall*, tiene un comportamiento más parecido al exterior, presentando un CET de 0,75 asociado a desfase de 1 h. 15'. Su mayor exposición al exterior aumenta la temperatura, pero también mejora la circulación del aire, por lo cual la sensación térmica indica un VMP +2,6 (caluroso). A pesar de presentar una altura libre de 5,92 m., la continua circulación de aire impide su acumulación superior y reduce el efecto de estratificación.

Monzón (junio a septiembre)

Debido a las características de la estación, con alta humedad y temperatura acompañadas de vientos y lluvias intensos, los *aerateur* están cerrados durante el día, permitiendo únicamente un flujo de aire de ventilación higiénica establecido en 10,5 l/s por persona y hora[27]. El VMP exterior en estas circunstancias es +1,7 (ligeramente caluroso).

La alta nubosidad reduce la presencia de radiación directa en el ambiente, provocando que la oscilación de temperaturas exteriores a lo largo del día sea menor. En consecuencia, las temperaturas de los espacios cerrados son más estables y aumenta el CET a 0,62 con desfase de la onda térmica de 2 h. 15'. La sensación térmica es de +1,82 (ligeramente caluroso), equilibrado por una estratificación vertical de 0,6°C en los 2,20 m. inferiores con respecto a la media, dejando el VMP ponderado en +1,5 (ligeramente caluroso).

[26] El VMP exterior responde a las condiciones de la semana promedio.
[27] Criterio de habitabilidad en oficinas recomendado por la ASHRAE (25).

El *breeze-hall* presenta una respuesta térmica casi idéntica a la exterior, con CET de 1,00 sin desfase de onda térmica. El VMP obtenido en estas circunstancias es de +1,9 (ligeramente caluroso), que no puede ser ponderado por no producirse estratificación debido a la intensa ventilación cruzada.

Invierno (octubre a febrero)

Las condiciones exteriores son las más favorables con temperaturas moderadas, baja humedad relativa y poca nubosidad, resultando un VMP medio de -1,1 (fresco). Esta proximidad al confort en el ambiente conlleva un modelo con *aerateur* abiertos, propiciando la evacuación del calor interior acumulado.

En los espacios cerrados las temperaturas oscilan menos que fuera, como indica el CET medio de 0,41 con un desfase de la onda térmica de 3h. 50', logrando una sensación de confort con VMP de -0,4 (neutro). El efecto de estratificación logra conservar los 2,10 m. inferiores 0,5°C por debajo de la media y el VMP ponderado queda en -0,7 (neutro).

El *breeze-hall* oscila menos que la temperatura exterior, por lo cual presenta un CET de 0,70 con desfase de 1 h. 40'. Se logra así un VMP de -0,3 (neutro) no ponderable, al igual que en casos anteriores.

3.5. Análisis pormenorizado

Distribución térmica y movimiento del aire

Durante el verano la organización de temperaturas en planta está en función de los vientos dominantes, siendo más cálida junto a la entrada de aire. En el recorrido interior la temperatura tiende a equilibrarse por el intercambio energético con la masa térmica del edificio. Según la rosa de vientos la velocidad media en estos meses es de 2,40 m/s (brisa muy débil)[28] y las direcciones dominantes son NW y W.

En el caso de los espacios confinados pasantes, el aire tras el cerramiento queda embolsado en una cuarta parte de la longitud total. A partir de ahí la temperatura continúa estable hasta la fachada opuesta, con una diferencia entre ambas de 1,5°C y estratificación uniforme de cuantía descrita en el análisis general.

La velocidad de circulación es superior en el lado de la entrada del aire, resultando una media de 0,25 m/s (agradable)[29]. Exceptuando las discontinuidades en el área de afección detrás de cada *aerateur*, la distribución de velocidades es regular a toda la altura debido al formato vertical de las compuertas (Figura 12).

Por el contrario, si los *aerateur* estuvieran cerrados, la corriente convectiva generada entre los planos de cerramiento más fríos mezclaría todo el aire de la estancia, la temperatura media interior subiría 2,9°C y la estratificación se vería reducida.

En cuanto al *breeze-hall*, al estar directamente expuesto al viento, la distribución horizontal de temperaturas deja la zona cálida hacia la parte de entrada del viento, diferenciándose en 2,7°C las dos vertientes. La temperatura es prácticamente uniforme en toda la altura debido a la circulación constante del aire (Figura 13).

Las formas curvas del auditorio y los servicios reducen su oposición al paso del aire, aunque también disminuyen la anchura de paso por la fachada oeste y lo aceleran a 0,80 m/s (generalmente agradable) hasta los 6,30 m. de profundidad. En los 6,10 m. de la zona central, al situarse a sotavento y aumentar la sección, el aire circula con velocidades menores a 0,27 m/s (agradable). A los 6,90 m. antes de llegar a la fachada este, el aire vuelve a acelerarse a 1,25 m/s (molesto) por efecto de la subpresión exterior.

[28] Según la Escala de Beaufort de medida empírica para la intensidad del viento.
[29] Según la escala de efectos sobres los seres humanos propuesta por Olgyay (26).

Durante el periodo de monzón los espacios exteriores están expuestos a condiciones higrotérmicas poco confortables, con vientos medios de 3,9 m/s (brisa débil) y rachas punta superiores a los 18,2 m/s (temporal duro). Los vientos provienen del mar con direcciones dominantes SW-W.

Los espacios interiores, al tener los *aerateur* cerrados, presentan un reparto de temperaturas estable en toda la sala, siendo ligeramente más cálido hacia la zona donde incide directamente el viento. La estratificación es igualmente uniforme, el aire 1,3°C más frío queda en los 2,10 m. inferiores.

Al no haber un flujo de ventilación natural se produce una corriente convectiva por diferencia de temperaturas entre las dos fachadas acristaladas opuestas. La velocidad de este movimiento está por debajo del umbral de percepción de 0,20 m/s y no afecta al confort.

El *breeze-hall*, con poca radiación directa y viento constante, mantiene una gradación térmica horizontal leve. Las zonas más diáfanas presentan una temperatura inferior debido a su exposición al aire en movimiento, mientras que a sotavento de las piezas de vestuarios y auditorio la temperatura sube 0,9°C. Los patrones de movimiento del aire, exceptuando las rachas de vientos huracanados, son iguales a los del verano.

En invierno, todos los parámetros higrotérmicos exteriores muestran valores suaves. Los vientos alisios provocan el role de las direcciones principales a NE y E, quedando la velocidad media en 1,8 m/s (brisa muy débil).

Dentro de los espacios confinados hay una distribución de temperaturas sensiblemente uniforme, con una zona este 0,6°C más fría provocada por la entrada de aire fresco a través de los *aerateur* de la fachada este. A los 10,00 m. del cerramiento aparece un efecto de estratificación que mantiene la franja inferior de 2,10 m. unos 0,8°C más fría que la superior. El aire se mueve de manera semejante al análisis del verano pero en sentido inverso.

En el *breeze-hall* aparece una transición continua en profundidad, manteniendo al este el área fresca y la cálida al oeste, con una diferencia de 1,9°C. La zona de transición está en el espacio central de 5,60 m. de anchura. A pesar de presentar una baja velocidad del aire el funcionamiento sigue siendo lineal en toda su altura. Los estrangulamientos provocados por obstrucciones como el ascensor o los aseos, producen remansos tras ellos y aceleran ligeramente el aire en las zonas libres.

Niveles lumínicos y autonomía de luz solar

El *brise-soleil*, al tratarse de un mecanismo de control de la radiación solar, modifica los niveles lumínicos del interior alterando y delimitando el uso.

La mayoría de los análisis indican que la radiación directa tan sólo afecta a la zona interior inmediatamente posterior al *brise-soleil* este, presentando los niveles de iluminancia más altos. Este área de afección directa, ocurre desde el amanecer hasta las 10:00 h. (verano) o las 12:00 h. (invierno), llegando a una extensión máxima en verano de 8,00 m. y en invierno de 10,00 m. En periodo de monzón, cuando la nubosidad permite la entrada de los rayos solares, la zona iluminada llega hasta los 4,50 m. Durante el resto del tiempo, todo el edificio opera con radiación indirecta puesto que los *brise-soleil* impiden la entrada directa de los rayos solares (Figura 14).

Dada la orientación de esta zona de radiación directa sus efectos térmicos son bajos, duran poco tiempo y se disipan en el volumen construido debido a que el sol de levante a baja altura transmite poca energía calorífica en comparación al de la tarde. El edificio está planteado de manera que impide el acceso de la radiación directa más perjudicial durante todo el año, por ello la distribución horizontal de temperaturas e iluminancias responde a un comportamiento sin momentos punta, propio de la predominancia de radiación difusa.

A efectos de cálculo de autonomía de luz solar el margen horario de análisis es de 8:00 a 18:00 h. ininterrumpidamente, variando la iluminancia mínima exigida según las exigencias del programa del espacio analizado.

En los espacios de oficinas de planta baja, con un nivel exigido en el plano de trabajo de 500 lux, desde el este tienen autonomía del 90% hasta los 3,40 m., del 80% hasta los 6,30 m. y del 70% a los 7,70 m. Desde el oeste, debido a lo tupido del *brise-soleil*, hay una autonomía del 70% hasta los 1,90 m. de la fachada. La zona central, de 12,00 m. aproximadamente, consigue una autonomía media del 30%, por lo cual requieren luz artificial buena parte del año (Figura15).

En la sala de conferencias del tercer piso, con nivel mínimo requerido de 300 lux y operando exclusivamente con la luz cenital indirecta proveniente de los lucernarios, todo el espacio está por encima del 90% de autonomía, exceptuando los 1,60 m. de la parte oeste donde llega a bajar al 70%.

En cualquiera de los casos se debe tener en cuenta que los niveles de comparación de los análisis son actuales a pesar de haber sido proyectado a principio de los años cincuenta, época en la que la iluminancia mínima requerida por normativa era muy inferior.

En la obra de Le Corbusier la aplicación de argumentos funcionales en la iluminación terminó reflejándose en mobiliario, acabados, posición de los *aerateur*, colores, etc. Los acabados, texturas o tonos de materiales elegidos en paramentos verticales y horizontales ayudaban a la mejora del control lumínico, así como el uso de techos blancos colaboraba a la difusión de la radiación indirecta.

La suma de los dos análisis, térmico y lumínico, verifica un funcionamiento paralelo lumínico-térmico que genera subespacios no físicos de cualidades ambientales diferentes (27): los de alta frecuencia de cambio y los de baja frecuencia. Los primeros, asociados a la radiación directa con mayor oscilación de los valores térmicos y lumínicos, cuyo nivel de cambio depende de la accesibilidad de radiación solar exterior. Los segundos, unidos a la radiación difusa y a la masa térmica del edificio, donde los cambios evolucionan con los valores medios estacionales de cada ámbito.

Aunque no existen documentos históricos que demuestren el conocimiento por parte de Le Corbusier de los referidos subespacios, la disposición de las fuentes lumínicas o de elementos como los *aerateur* en base al uso, ya establecía una relación entre uso, luz y temperatura desde el origen del proyecto.

4. Aplicaciones en otros proyectos

Los métodos proyectivos propuestos por Le Corbusier durante los años cincuenta se nutrieron de las características bioclimáticas y formales de la arquitectura vernácula hindú. Empleando mecanismos científicos para analizar las variables climáticas e interpretándolas con el cálculo gráfico y la geometría, unió la arquitectura moderna con el clima.

La oportunidad de construir en la India (Ahmedabad y Chandigarh) fue el primer y más importante campo de ensayos de los nuevos procedimientos del maestro suizo.

La *Torre de las sombras* (Chandigarh, 1950) fue una aplicación con mayor grado de abstracción por tratarse de una estructura de carácter escultórico cuya envolvente estaba vinculada al sol, quedando su espacio interior carente de uso (28).

El uso en vivienda quedó ilustrado exclusivamente en la *Villa Shodhan* (Ahmedabad, 1951), una construcción que alternó espacios de distinta permeabilidad, altura y profundidad en base al programa.

Idénticos criterios rigieron el conjunto del Capitolio, cambiando su apariencia dependiendo de la formalización del *brise-soleil* elegida en cada edificio, pero siempre supeditada a soleamiento, ventilación y control higrotérmico. Su desarrollo a nivel de proyecto aparece en los citados esquemas sobre adaptación climática del *Secretariado* (Chandigarh, 1953) o en la serie de plantas y secciones de soleamiento y circulación del aire que acompañaban a cada edificio del Capitolio[30].

[30] Sirvan de ejemplo los planos del archivo de la Fondation Le Corbusier FLC 04635 a FLC 04639 sobre ventilación de la *Corte de Justicia* de Chandigarh.

Los métodos de proyecto respecto al clima inundaron especialmente los trabajos elaborados por el maestro suizo en los últimos años de su vida. El *Centro Carpenter de Artes Visuales* (Boston, 1961) es una aplicación construida en clima continental, donde los elementos verticales buscaron la orientación para maximizar la captación solar y la forma propició la compacidad. Pero también hay ejemplos en otros proyectos, a modo ilustrativo: *Hotel y Palacio de Congresos Gare d'Orsay* (Paris, 1961), *Centro de cálculos electrónicos Olivetti* (Rho, 1963), *Embajada de Francia* (Brasilia, 1964) y *Palacio de Congresos* (Estrasburgo, 1964).

5. Conclusiones

Evaluar la obra de un arquitecto desarrollada en unas coordenadas socioculturales distintas de los actuales criterios de ecología y sostenibilidad, exige crear puentes en conceptos comunes que eviten conclusiones anacrónicas o evidentes. En concreto, la arquitectura de mitad del s. XX mantuvo una relación directa con el clima y el lugar a nivel proyectivo y constructivo. Es en este contexto en el cual la obra de Le Corbusier se aproximó a nuestra sostenibilidad.

Desde la perspectiva de los métodos, los últimos recursos elaborados por el atelier establecían una visión compleja y dinámica del clima por medio de los *Epure du soleil* y los *Grille Climatique.* Los primeros fueron una aplicación avanzada de las cartas solares, mientras que los segundos resultaron ser predecesores de los climogramas de bienestar. Actualmente cartas solares y climogramas son recursos del proyecto de arquitectura evolucionados por el aumento de variables analizadas con estudios estadísticos del clima y el confort humano, pero sobretodo con simulaciones informáticas que permiten medir y representar con precisión los intercambios energéticos en arquitectura.

A través del *brise-soleil*, Le Corbusier puso en valor los espacios intermedios interior-exterior presentes en toda nuestra historia de la arquitectura, cuyo indefinido carácter constituyó el germen de su eliminación desde la lógica optimizadora de los años veinte. En esta investigación han sido cuantificados y cualificados, indicando valores de transición en el CET o en los niveles de iluminancia, que hablan de su efectividad. Son por tanto espacios de amortiguación térmica, lumínica y funcional que construyen un ambiente interior más aislado de los constantes cambios exteriores.

La transformación de los factores climáticos en parámetros abstractos y objetivos elaborados por disciplinas paralelas, junto a su posterior interpretación a través de procedimientos geométricos, sirvió para integrar el clima en el proyecto moderno generando una respuesta formal acorde. Le Corbusier interpretó la forma arquitectónica como mecanismo eficaz para la construcción de un ambiente habitable, dejando las soluciones tecnológicas en un segundo plano. En definitiva, una escala de valoración de sostenibilidad acorde con la propugnada hoy en día por los sectores menos tecnocráticos, apelando a la sensatez del buen conocimiento de los recursos arquitectónicos (29).

Las lecturas de los ensayos realizados muestran en general una arquitectura capaz de: controlar la radiación solar en orientaciones perjudiciales; emplear la inercia térmica a su favor reduciendo el impacto de la onda térmica exterior; aprovechar el efecto de estratificación térmica en altura; permitir al usuario gestionar la permeabilidad al aire según las condiciones exteriores; mejorar el confort higrotérmico y lumínico en espacios interiores.

Sin embargo, los requerimientos del clima tropical de la India hacen necesario el empleo de mecanismos externos de climatización en parte del verano y durante el periodo de monzón. En estos periodos el edificio objeto de estudio no logra mejores parámetros de habitabilidad respecto a los registros exteriores. Con el paso del tiempo, el cambio de las exigencias del programa y los usuarios, así como la gran difusión del aire acondicionado, ha provocado su introducción en el *Palacio de los Hilanderos*, en las viviendas de Ahmedabad y en la mayor parte de los edificios del Capitolio de Chandigarh.

Los resultados obtenidos nos muestran la necesidad de superar visiones sesgadas, anacrónicas o carentes de soporte científico, pero también de evitar el fundamentalismo plástico o histórico que rodea la obra de Le Corbusier. Analizar con objetividad nuestro patrimonio construido desde una

perspectiva energética en su conjunto, es el origen de una arquitectura vinculada al medio ambiente, al usuario y verdaderamente sostenible.

AGRADECIMIENTOS:

A la *Fondation Le Corbusier* y al Proyecto *MES INNPACTO* del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación financiado con fondos FEDER.

BIBLIOGRAFÍA

(1) Calduch Cervera, J.: *La arquitectura moderna nacional. De 1927 a 1935: la crisis del internacionalismo*. p. 43, Universidad de Alicante, Alicante, 2003.
(2) Le Corbusier: *Hacia una arquitectura*. p. 73, Poseidón, Buenos Aires, 1998 (Ed. original: *Vers une architecture.* Crès, París, 1923).
(3) Torres Cueco, J.: *Le Corbusier: Visiones de la técnica en cinco tiempos.* p. 145, Fundación Caja de Arquitectos, Barcelona, 2004.
(4) Siret, D.: "Généalogie du brise-soleil dans l'oeuvre de Le Corbusier: Carthage, Marseille, Chandigarh", *Cahiers thématiques*, nº 4 (2004).
(5) Cohen, J.L. : *Le Corbusier Le Grand.* p. 301, Phaidon, Londres, 2008.
(6) Missenard, A.: *L'Homme et le climat.* Libreirie Plon, París, 1937.
(7) Le Corbusier: *Le Corbusier. Oeuvre complète 1946-1952*. p. 136, Les Éditions d'Architecture, Zurich, 1976 (1ª edic. 1953).
(8) Siret, D.: "1950 - Grille climatique - Chandigarh", *Le Corbusier Plans.* Paris, Editions Echelle-1 y Fondation Le Corbusier, DVD-ROM, 2006.
(9) Olgyay, V.: *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.* Gustavo Gili, Barcelona, 1998 (Ed. original: *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Va Nostram Reinhold, Nueva York, 1963).
(10) Le Corbusier: *Une Maison Une Palais.* Editions Connivences, Paris, 1989 (Ed. original: *Une Maison Une Palais. À la recherche d'une unité architecturale*. Collection de L'Esprit nouveau, París, 1928).
(11) Le Corbusier. *Le Corbusier et son atelier rue de Sèvres 35. Oeuvre complète (1952-1957)*. p. 145, Les Éditions d'Architecture, Zurich, 1977.
(12) Siret, D.: "Architecture et contrôle de l'ensoleillement", *Cahiers thématiques. IBPSA France 2006 à La Réunion,* (2006), pp. 4.
(13) Le Corbusier: *Le Corbusier et son atelier rue de Sèvres 35. Oeuvre complète (1952-1957)*. p. 144, Les Éditions d'Architecture, Zurich, 1977 (1ª edic. 1957).
(14) Futagawa, Y. (ed.) "Le Corbusier Millowners Association Building Ahmedabad, India, 1954". *Global Architecture*, Vol. 37 (1975), p. 21.
(15) Requena Ruiz, I.: *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960).* Tesis doctoral, Universidad de Alicante, Alicante, 2011, pp. 215.
(16) U.S. Department of Energy.: "Wheather data". Disponible en: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm [consultado 5 noviembre 2010].
(17) Neila González, F.J.: *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible.* p. 250, Munilla-Lería, Madrid, 2004.
(18) Givoni, B.: *Man, Climate and Architecture.* Elsevier, Amsterdam, 1969.
(19) Yáñez Parareda, G.: *Arquitectura solar e iluminación natural. Conceptos, métodos y ejemplos.* p. 262, Munilla-Lería, Madrid, 2008.
(20) Faruqui, Z.: *Environmental performance of the buildings designed by the modern masters in the tropics: architecture of Le Corbusier and Louis I Kahn in India and Bangladesh.* Tesis doctoral, Architectural Association School of Architecture, Londres, 2000.
(21) Requena Ruiz, I.: *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960).* Tesis doctoral, Universidad de Alicante, Alicante, 2011, p. 11.
(22) AENOR: *UNE EN 15251:2008 Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.* AENOR, Madrid, 2008.
(23) Neila González, F.J.: *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible.* p. 250, Munilla-Lería, Madrid, 2004, p. 381.
(24) AENOR: *UNE EN ISO 7730:2006 Ambientes térmicos moderados. Determinación de los índices PMV y PPD y especificaciones de las condiciones para el bienestar térmico (ISO 7730:2005).* AENOR, Madrid, 2006.
(25) ASHRAE: *Standard 62.1-2007 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.* ASHRAE, Atlanta, 2007.
(26) Olgyay, V.: *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.* p. 20, Gustavo Gili. Barcelona, 1998 (Ed. original: *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism.* Va Nostram Reinhold, Nueva York, 1963).
(27) Marincic, I. y del Río, A.: "El tiempo como factor de diseño arquitectónico". *Palapa,* vol. 2 nº 001 (2007), pp. 35-43.

(28) Siret, D.: "1950 - Etudes d'ensoleillement - Tour d'ombres - Chandigarh", *Le Corbusier Plans*. Paris, Editions Echelle-1 y Fondation Le Corbusier, DVD-ROM, 2006.
(29) García Navarro, J.: "¿Sostenibilidad? ...o simplemente sensatez", *Informes de la construcción*, vol. 62 nº 517, pp. 4. doi: 10.3989/ic.2010.v62.i517