

# ACE 37

Electronic offprint

Separata electrónica

## ANTONIO GAUDÍ, PRECURSOR DE LA SOSTENIBILIDAD Y LA BIOMIMÉTICA EN LA ARQUITECTURA, CON 100 AÑOS DE ANTELACIÓN

Carlos Salas Mirat, César Bedoya Frutos y José María Adell Argilés

---

Cómo citar este artículo: SALAS MIRAT, C.; BEDOYA FRUTOS, C. y ADELL ARGILÉS, J. M. *Antonio Gaudí, precursor de la sostenibilidad y la biomimética en la arquitectura, con 100 años de antelación* [en línea] Fecha de consulta: dd-mm-aa. En: ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y Entorno, 13 (37): 71-98, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5821/ace.13.37.5348> ISSN: 1886-4805.

ACE

Architecture, City, and Environment  
Arquitectura, Ciudad y Entorno

c

# ACE 37

Electronic offprint

Separata electrónica

## ANTONIO GAUDÍ, THE FORERUNNER OF SUSTAINABILITY AND BIOMIMICRY IN ARCHITECTURE, 100 YEARS IN ADVANCE

**Key words:** Bioclimatic architecture; ecology; environmental impact

### Structured abstract

#### Purpose

Sustainability in architecture is one of the major challenges of the twenty-first century. In biomimetic architecture, nature is the model of choice in the quest for sustainability; because it shows us the most environmentally friendly and sustainable models developed over 3.8 billion years of evolution.

Antonio Gaudí said that: "The architect of the future will build imitating nature, for it is the most rational, long-lasting, and economical of all methods". Gaudí, taking nature as his model, optimises his buildings bioclimatically; he widely uses bricks and tiles —the cheapest materials at the time—, he uses local stone, and he takes advantage of waste materials or debris, and optimises the structural design of his buildings.

#### Methodology

To assess Gaudí's contributions to sustainability in architecture today, his most significant works have been studied, and bibliographical records have been made of the systems developed by Gaudí to enhance the performance of his buildings in the three fields of sustainability: environmental, economic, and social.

#### Conclusions

Gaudí was a great forerunner of sustainability and biomimicry in architecture, and teaches us that buildings conceived as "machines for living" —by the great architect Le Corbusier— can evolve and become "ecosystems in which to live".

#### Originality

Gaudí's great artistic and creative talent has been assessed together with his innovative architectural style and his technical and structural innovations; however, his role as a forerunner of sustainability in architecture has not been studied.

ACE

Architecture, City, and Environment  
Arquitectura, Ciudad y Entorno

C

## ANTONIO GAUDÍ, PRECURSOR DE LA SOSTENIBILIDAD Y LA BIOMIMÉTICA EN LA ARQUITECTURA, CON 100 AÑOS DE ANTELACIÓN

SALAS MIRAT, Carlos <sup>1</sup>

BEDOYA FRUTOS, César <sup>2</sup>

ADELL ARGILÉS, José María <sup>3</sup>

Remisión inicial: 28-09-2017

Aceptación inicial: 17-04-2018

Aceptación inicial: 22-11-2017

Remisión final: 27-04-2018

**Palabras clave:** Arquitectura bioclimática; ecología; impacto medioambiental

### Resumen estructurado

#### Objetivo

La sostenibilidad en la arquitectura es uno de los grandes retos del siglo XXI. En la arquitectura biomimética, la naturaleza es el modelo a seguir en la búsqueda de la misma, puesto que nos enseña cuáles son los modelos de funcionamiento más ecológicos y sostenibles, desarrollados durante sus 3,8 billones de años de evolución.

Antonio Gaudí decía que: “el arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica de todos los métodos”; Gaudí tomando como modelo la naturaleza, optimiza bioclimáticamente sus edificios, emplea abundantemente el ladrillo y el azulejo —los materiales más económicos de la época— emplea piedra del entorno próximo, aprovecha materiales de desecho o demolición y optimiza el diseño estructural de sus edificios.

#### Metodología

Para evaluar las aportaciones de Gaudí a la sostenibilidad en la arquitectura de hoy en día, se estudian sus obras más significativas, y se documentan bibliográficamente los sistemas desarrollados por Gaudí para la mejora de las prestaciones de sus edificios, en los tres ámbitos de la sostenibilidad: medioambiental, económico y social.

#### Conclusiones

Gaudí fue un gran precursor de la sostenibilidad y la biomimética en la arquitectura, y nos enseña que los edificios concebidos como “máquinas para vivir” —por el gran arquitecto Le Corbusier— pueden evolucionar hasta convertirse en “ecosistemas para vivir”.

#### Originalidad

Se ha valorado el gran talento artístico y creativo de Gaudí, la innovación de su estilo arquitectónico, sus innovaciones técnicas y constructivas, pero no ha sido estudiado su papel como precursor de la sostenibilidad en la arquitectura.

---

<sup>1</sup> Doctorando de la Universidad Politécnica de Madrid - ETS Arquitectura - DCTA y miembro del Grupo de Investigación TISE. Correo electrónico: [carloossalasm@gmail.com](mailto:carloossalasm@gmail.com)

<sup>2</sup> Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid - ETS Arquitectura - DCTA, Director del Departamento y miembro del Grupo de Investigación TISE. Correo electrónico: [cesar.bedoya@upm.es](mailto:cesar.bedoya@upm.es)

<sup>3</sup> Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid - ETS Arquitectura - DCTA y Responsable del Grupo de Investigación TISE. Correo electrónico: [josep.adell@upm.es](mailto:josep.adell@upm.es)

## 1. Introducción

Las grandes transformaciones de Barcelona, desde principios del siglo XIX, el desarrollo industrial y la explosión demográfica, el gran ensanche urbanístico, el auge de la nueva burguesía industrial y la fuerte renovación de la cultura catalana —la literatura, el arte y la arquitectura— junto con acontecimientos como la primera Exposición Universal de España —celebrada en Barcelona en 1888— son el contexto histórico donde surge la figura de Antonio Gaudí (1852-1926), como arquitecto de proyección universal. Un hombre que “reflexionó profundamente sobre los problemas del arte y de la vida, actuó rigurosamente de acuerdo con su pensamiento (...) y demostró que la altísima inspiración artística corona el trabajo intenso, sostenido, lento, metódico y disciplinado” (Bergós, 1999, pág. 29).

El arquitecto catalán Antonio Gaudí —autor de siete obras declaradas patrimonio de la humanidad por la UNESCO— ha sido reconocido como un gran artífice de la renovación formal de la arquitectura del siglo XX (González, 1990); se ha valorado su talento artístico y creativo, la innovación de su estilo arquitectónico naturalista —con sorprendentes formas y colores— sus interesantes innovaciones técnicas y constructivas, e incluso las cualidades higienistas o bioclimáticas de su arquitectura, pero sin embargo, no ha sido apenas estudiado su papel como precursor de la sostenibilidad y la biomimética en la arquitectura de hoy en día. Es lógico que los valores estéticos de la arquitectura de Gaudí hayan sido los primeros en reconocerse, por ser los más aparentes y fácilmente reconocibles; posteriormente, han sido estudiadas y reconocidas sus innovaciones técnicas y constructivas —puesto que han requerido más estudio e investigación—, pero ahora, es el momento de profundizar, aún más, hasta llegar a nuevos valores de la arquitectura del siglo XXI, como son la sostenibilidad y la biomimética.

La importante renovación formal que supuso la arquitectura de Gaudí, a comienzos del siglo XX, no fue sólo una renovación estética o estilística, sino también funcional y tecnológica, hundiendo sus raíces en múltiples motivaciones sociales, económicas y medioambientales, precursoras de la ecología y la sostenibilidad modernas.

Hasta la Revolución Industrial, la arquitectura tiene muy en cuenta las implicaciones energéticas de la construcción, y recurre a formas de mínimo consumo adaptadas al clima y ejecutadas con materiales abundantes, próximos y renovables. Sin embargo, desde mediados del siglo XIX, la edificación es cada vez más despilfarradora y agresiva con el medioambiente, hasta que, a finales del siglo XX, empiezan a saltar las alarmas en las sociedades industrializadas, y comienza la preocupación por el desarrollo de la sostenibilidad en la edificación (Acha et al., 2013). Sin embargo Gaudí, con un siglo de antelación, ya valora como fundamentales, y pone en práctica en sus obras, muchos de los principios que hoy se estudian en el ámbito de la sostenibilidad en la arquitectura. Tomando como modelo la sabiduría de la naturaleza, a la que admira —y por tanto, a partir de principios biomiméticos— utiliza múltiples estrategias de mejora, como por ejemplo:

1. Empleo generalizado de materiales pétreos del entorno próximo.
2. Abundante empleo de materiales económicos como el ladrillo, o el azulejo.
3. Empleo de técnicas constructivas tradicionales de alta implantación y bajo coste.
4. Prefabricación de elementos constructivos.
5. Optimización mecánica del diseño estructural.
6. Sistemas de mejora de la iluminación natural.

7. Implantación de sistemas y mecanismos de ventilación natural.
8. Sistemas de mejora del aislamiento térmico.
9. Estudio de la incidencia del sol para la mejora del sombreado y soleamiento.
10. Reciclaje y reutilización de residuos de la industria y la construcción.
11. Implantación de vegetación autóctona.
12. Integración paisajística en el medio natural.
13. Aprovechamiento y gestión de recursos hídricos.
14. Mejoras para el confort del usuario.
15. Mejoras en salubridad.
16. Diseños ergonómicos.

Se puede afirmar que Gaudí empleó el “trencadís en aprovechamiento de material de desecho recogido directamente de la basura para su reciclaje, mucho antes de inventarse las palabras sostenibilidad o «arte povera»” (Estévez y Tur, 2002, pág. 36).

Gaudí optimizaba energéticamente sus edificios mediante el empleo de estrategias bioclimáticas tradicionales, e ingeniosos sistemas innovadores. A veces, creaba “formas nuevas e inéditas utilizando los materiales y las técnicas tradicionales” (Bassegoda, 1990, pág. 9).

En la Casa Batlló, por ejemplo, podríamos hablar de Arquitectura Bioclimática en mayúsculas, puesto que Gaudí empleó toda una serie de sistemas mecánicos pasivos de climatización, para un mayor aprovechamiento de las energías renovables (Usón y Cunill, 2004). En el Palacio Güell “la ingeniosidad de las soluciones técnicas y estructurales, de ventilación, iluminación y aislamiento acústico son, como mínimo, igual de sorprendentes que el carácter artesanal impreso en los acabados de todos los detalles” (Crippa, 2007, pág. 26).

## 2. La arquitectura biomimética

Hoy en día, existe una nueva ciencia denominada “biomimética” o “biomímesis” en la que —tal y como preconizaba Gaudí hace un siglo— se toma la naturaleza como fuente de inspiración en el desarrollo de nuevas tecnologías. La naturaleza, a lo largo de 3,8 billones de años de evolución, ha dado lugar a estructuras de “diseño inteligente” que podemos estudiar e imitar —o más bien reinterpretar— para aprender a diseñar tecnologías más sostenibles.

La arquitectura biomimética busca soluciones sostenibles en la naturaleza, no a través de la réplica de sus formas —como modelo estético o código estilístico— sino a través de la comprensión de las normas y principios que las rigen. No se trataría por tanto, de un simple “biomorfismo”, sino de un “biomimetismo”; es decir, de imitar no solo la forma, sino también el funcionamiento.

Por ejemplo, el “Eastgate Centre” de Zimbabwe intenta emular a las termitas en su habilidad para mantener constante la temperatura y la humedad de los termiteros del África subsahariana, donde la temperatura varía entre los 2°C y los 45°C. Este edificio es un complejo de oficinas que mantiene el frescor de la temperatura interior, con un consumo de energía de tan solo un 10%, respecto a un edificio convencional (Mokoka, 2010).

En el pabellón temático “One Ocean” para la EXPO 2012 en Yeosu, Corea del Sur, diseñado por la firma austriaca Soma, se incorporó el sistema de lamas denominado “Flectofin”, que está inspirado en el mecanismo de polinización de la flor Ave del Paraíso (Figura 1). Es un sistema de lamas, las cuales son capaces de doblarse hasta 90° sin necesidad de articulaciones, gracias al empuje producido por los cambios de temperatura. De esta forma puede controlarse eficazmente la ventilación y la radiación solar.

Figura 1. Pabellón “One Ocean” de la EXPO 2012



Fuente: [www.youtube.com/watch?v=iCAGlu4vPog](http://www.youtube.com/watch?v=iCAGlu4vPog)

Janine M. Benyus, fundadora en 2005 del “Instituto de Biomímesis”, afirma que “el primer nivel es imitar la forma natural. Pero se puede acceder a un segundo nivel, que es cuando se imita el proceso natural”.

En realidad, el acceso a este segundo nivel es la gran aportación que Gaudí anticipó en su arquitectura. El primer nivel —es decir, la imitación de las formas minerales, vegetales o animales, a nivel estético— ya había sido comúnmente utilizado en la arquitectura desde antiguo. Gaudí expresaba la importancia de la imitación de estas formas y procesos naturales, con su célebre frase: “originalidad quiere decir volver al origen” (Martinell, 1967, pág. 141); y el origen es la naturaleza y las leyes que la rigen.

## 2.1 La naturaleza como modelo de sostenibilidad

Se puede decir que realmente existen dos fuerzas creadoras, que son: la naturaleza y la mano del hombre. La naturaleza tiene unas leyes que no podemos alterar —a las que nos vemos sometidos— y es eminentemente práctica; sus creaciones poseen la finalidad de responder de forma eficaz a las necesidades concretas. El hombre, en sus creaciones, puede intentar respetar las leyes de la naturaleza apoyándose en ellas, o por el contrario, puede ir contracorriente —luchando contra los elementos— de forma caprichosa u oportunista (Bassegoda y García, 1999). No se trata de limitar la capacidad creativa del hombre, sino de hacer converger ambas fuerzas creadoras, para evitar el conflicto entre ellas. Cuando se respeta la naturaleza, se aprende de ella cuáles son los modelos de funcionamiento más ecológicos y sostenibles. La naturaleza, por sí sola —en todos sus ciclos de vida y funcionamiento— es el mejor y más perfecto modelo de sostenibilidad, equilibrio, reciclaje y auto-regeneración.

A finales del siglo XIX, en plena revolución industrial, la sociedad vive inmersa en un fervor de progreso e industrialización, que deja al margen cualquier preocupación por la naturaleza o el medio ambiente. A lo largo del siglo XX, se han conseguido espectaculares avances científicos y tecnológicos, pero también, se han ocasionado descomunales desastres naturales. En los albores del siglo XXI, nos hemos dado cuenta de que sin la protección y conservación de la naturaleza no hay progreso sostenible, sino retroceso.

Con 100 años de antelación, Gaudí se dio cuenta de la importancia de proteger y respetar la naturaleza, siguiendo sus enseñanzas, no solo como modelo estético o artístico, sino como modelo de eficiencia, versatilidad, salubridad y economía:

“El gran mérito de Gaudí reside, precisamente, en volver la mirada hacia la naturaleza para, reconociéndola como maestra generosa y manteniendo un ánimo humilde ante ella, no pretender inventar nada sino descubrirlo todo” (Bassegoda y García, 1999, pág. 47).

“Esta inspiración en la naturaleza no se plantea como un sueño romántico, ausente de la realidad cotidiana, sino que consiste en trabajar mediante una profunda observación de los modelos que la naturaleza ensaya desde hace millones de años para, aprovechándonos al máximo de su experiencia, ser capaces de leer sabias lecciones de bienestar, economía o reducción de costes, expresiones tan repetidas en la actualidad” (García, 1994, pág. 183).

Para Gaudí, “el gran libro, siempre abierto, que conviene esforzarse en leer, es el de la naturaleza” (Puig, 2015, pág. 95). Para él, en la naturaleza nada es caprichoso o gratuito, todo tiene un sentido que hay que descubrir, estudiar e interpretar. Por eso, decía que la imitación de la naturaleza, para el arquitecto del futuro, sería el método más racional, duradero y económico (Puig, 2015).

En 1969, Ian McHarg publicó el libro *Proyectar con la naturaleza*, que fue pionero en el concepto de “proyecto ecológico”, diseño ecológico y planificación urbana (Mac, 1969).

En el año 2000, los Principios de Hannover recogen, ya de forma explícita, la importancia de la naturaleza como modelo de sostenibilidad y eficacia, así como su relación con el urbanismo y la arquitectura (McDonough, 1992):

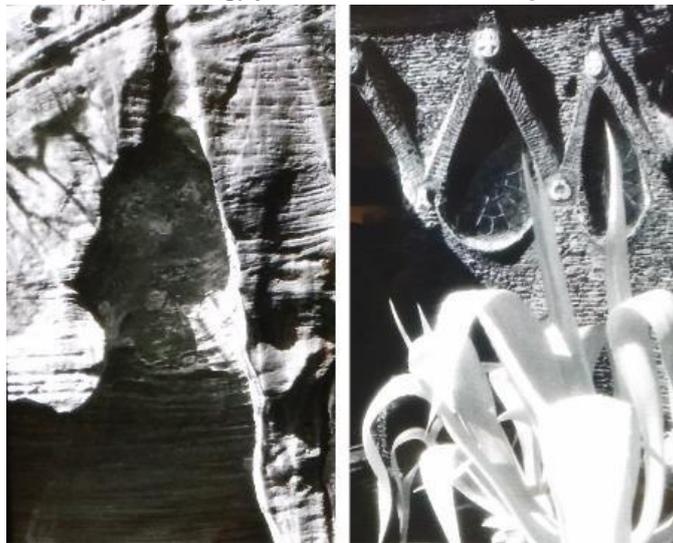
1. En el primer y segundo puntos, se habla de la coexistencia de la humanidad con la naturaleza y de la interdependencia de ambas; en el cuarto punto, de las consecuencias del diseño sobre el bienestar de la humanidad y de la importancia de la preservación de la naturaleza.
2. En el sexto punto, se habla de la imitación de la naturaleza en el ámbito de la eliminación de desechos o residuos, mediante el estudio de la evaluación de los ciclos de vida; en el séptimo punto, de la imitación de la naturaleza en el aprovechamiento eficiente y seguro de la energía natural del sol y de los elementos.
3. En el octavo punto, se dice que “aquellos que crean y planifican deberían practicar la humildad ante el ejemplo de la naturaleza. Trata la naturaleza como modelo y consejera...”.

En 2008, Brian Edwards afirmó en su *Guía básica de la sostenibilidad* que “la «naturaleza» es el principio rector de la sostenibilidad” (Edwards, 2008, pág. 12).

## 2.2 La geometría de la naturaleza

La naturaleza —tal y como se decía anteriormente— es el modelo más perfecto de sostenibilidad y eficacia; sus variadas y complejas geometrías —resultado de un proceso de adaptación de millones de años— también lo son (Figura 2).

Figura 2. La Roca (Mont-Roig) y ventanales de la Cripta de la Colonia Güell



Fuente: Elaboración propia (museo “Gaudí Centre” de Reus)

El problema reside en la complejidad formal de esas geometrías, y la dificultad de su traslado al diseño arquitectónico. Sin embargo, Gaudí se da cuenta de que determinadas formas —de las que abundan en la naturaleza— pueden ser fácilmente transferidas a la arquitectura, mediante el uso de herramientas sencillas, como reglas y cordeles. Tan solo, se trata de asimilarlas a las derivadas de la geometría reglada, es decir, a aquellas que pueden generarse mediante líneas rectas que se mueven en el espacio siguiendo sencillas leyes geométricas. Son superficies continuas de doble curvatura, que evitan el empleo de complicadas cimbras o elementos auxiliares:

“Gaudí había comentado en alguna ocasión que los propios albañiles quedaban asombrados al observar el resultado final de estas superficies, después de haberlas levantado exclusivamente con reglas y cordel, que es como siempre habían construido los muros y las bóvedas” (Bassegoda y García, 1999, pág. 72).

A pesar de ello, estas figuras son difíciles de manejar con los sistemas ortogonales convencionales —plantas, secciones y alzados— basados en el sistema diédrico. Gaudí también supera este problema, de forma práctica e inteligente, trabajando con maquetas a escala; es decir, proyectando sus edificios en el mismo medio en que van a construirse: en tres dimensiones (Bassegoda y García, 1999).

De esta forma, Gaudí utiliza eficazmente la geometría y realiza importantes innovaciones —como el arco parabólico, las superficies regladas o los pilares ramificados— que consiguen la optimización mecánica de los diseños estructurales.

### 3. La sostenibilidad en la edificación

Hoy en día, la construcción de edificios consume aproximadamente, el 40% de los recursos naturales extraídos y el 40% de la energía, produciendo entre el 30% y el 65% de los residuos enviados a vertederos, así como el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Acha et al., 2013). Esto convierte a la construcción en una de las actividades menos sostenibles del planeta, por su enorme impacto medioambiental (Usón et al., 2014). Al mismo tiempo, la edificación también tiene un extraordinario impacto a nivel económico y social, influyendo de forma decisiva en la calidad de vida de las personas y el desarrollo económico de los países. Nuestra vida cotidiana gira alrededor de una gran variedad de edificios: vivimos en casas, trabajamos en oficinas y nos relacionamos en bares y cafeterías (Edwards, 2008). Por ello, la sostenibilidad en la arquitectura es uno de los grandes retos del siglo XXI.

El “Informe Brundtland”, de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo, recoge una de las definiciones de sostenibilidad más ampliamente divulgadas, afirmando que el desarrollo sostenible es aquel que es capaz de satisfacer las necesidades del presente, sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones (CMMAD, 1987).

En los últimos años se han desarrollado muchos sistemas de evaluación de la sostenibilidad de los edificios como: BREEAM en Reino Unido, LEED en Estados Unidos, VERDE en España, HQE en Francia..., todos ellos con múltiples objetivos comunes. El método VERDE del “Green Building Council España” (GBCe) —vinculado a la Asociación Internacional “World Green Building Council” (WGBC)— permite evaluar los impactos más importantes generados por el edificio en el ámbito medioambiental, social y económico. Los objetivos fundamentales de la sostenibilidad, con respecto a estos tres ámbitos o fuentes de recursos, comúnmente reconocidos, son los siguientes:

#### 3.1 *Ámbito económico*

1. Reducción de costes de producción y transporte de materiales de construcción.
2. Reducción de costes de construcción del edificio.
3. Reducción de consumos de agua y energía.
4. Reducción de costes de mantenimiento y reparación del edificio.

#### 3.2 *Ámbito medioambiental*

1. Eficiencia energética.
  - Estrategias pasivas de acondicionamiento climático.
  - Sistemas activos de acondicionamiento climático.
2. Empleo de fuentes de energía renovable y no contaminante.
3. Reciclaje y reutilización de residuos.
4. Aprovechamiento de recursos naturales.
5. Protección del entorno natural, la vegetación y el paisaje.

### 3.3 *Ámbito social*

1. Confort del usuario: acondicionamiento ambiental, accesibilidad y otros parámetros.
2. Seguridad y salud del usuario.
3. Protección del patrimonio histórico, artístico y cultural.

## 4. Estudio bibliográfico de la sostenibilidad en la arquitectura de Gaudí

La clasificación de los apartados 3.1, 3.2 y 3.3, anteriormente desarrollada, es una simplificación para el análisis, pues lógicamente, la mayoría de los objetivos de cada uno de los ámbitos —económico, medioambiental y social— podría incluirse en los otros dos ámbitos, pues los tres están íntimamente relacionados entre sí.

A continuación, se realiza un estudio detallado —a través de ejemplos concretos, documentados con citas bibliográficas y fotografías— de los sistemas desarrollados por Gaudí, que tienen que ver con los objetivos de la sostenibilidad en la arquitectura, en el ámbito económico, medioambiental y social. Con el objeto de evaluar estos sistemas de forma objetiva, el estudio se realiza teniendo en cuenta el contexto histórico en que se desarrollan, es decir, teniendo en cuenta los sistemas constructivos y tipologías edificatorias de la época, en comparación con los sistemas desarrollados por Gaudí. Para el análisis se van a desarrollar los “ítems” del ámbito económico, medioambiental y social, que se consideran más significativos, como son:

### 4.1 *Ámbito económico*

1. Reducción de costes de construcción del edificio:
  - Aprovechamiento de residuos (ver apartado 6.5).
  - Empleo de materiales económicos, como el ladrillo y los azulejos (ver apartado 5.1.).
  - Empleo de elementos prefabricados (ver apartado 5.2.).
  - Optimización mecánica del diseño estructural (ver apartado 5.3.).
2. Reducción de costes de mantenimiento del edificio:
  - a) Eficiencia energética:
    - Iluminación natural (ver apartado 6.1.).
    - Ventilación natural (ver apartado 6.2.).
    - Aislamiento térmico (ver apartado 6.3.).
    - Sombreamiento y soleamiento (ver apartado 6.4.).
  - b) Aprovechamiento de recursos naturales (ver apartado 6.6).

### 4.2 *Ámbito medioambiental*

1. Reducción del consumo de energía:
  - Iluminación natural (ver apartado 6.1.).
  - Ventilación natural (ver apartado 6.2.).
  - Aislamiento térmico (ver apartado 6.3.).
  - Sombreamiento y soleamiento (ver apartado 6.4.).

2. Reducción del impacto medioambiental:
  - Aprovechamiento de residuos (ver apartado 6.5.).
  - Protección del entorno natural y aprovechamiento de recursos naturales (ver apartado 6.6.).

#### 4.3 *Ámbito social*

1. Confort del usuario:
  - Iluminación natural (ver apartado 6.1.).
  - Ventilación natural (ver apartado 6.2.).
  - Aislamiento térmico (ver apartado 6.3.).
  - Sombreamiento y soleamiento (ver apartado 6.4.).
  - Ergonomía (ver apartado 7.1.).
  - -Acústica (ver apartado 7.2.).
2. Salubridad (ver apartado 7.3.).
3. Bienestar social (ver apartado 7.4.).

### 5. **Ámbito económico: reducción de costes de construcción y mantenimiento**

Desde el punto de vista biomimético, la naturaleza es el mejor ejemplo de sostenibilidad, economía y reciclaje. Gaudí —tomando como modelo la naturaleza— estudiaba muy en profundidad la economía de sus obras, e intentaba siempre sacar el máximo partido de los medios materiales disponibles, reciclaba materiales de desecho, optimizaba mecánicamente la estructura de sus edificios, utilizaba —siempre que le era posible— materiales económicos como el ladrillo o los azulejos y minimizaba los gastos de transporte, utilizando materiales del entorno próximo; la mayoría de la piedra y los mármoles de sus edificios provenían de canteras del entorno próximo. En el Palacio Güell, los mármoles provenían de las canteras que Eusebi Güell tenía en el Garraf, localidad próxima a Barcelona.

En 1913, el anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña, contenía un artículo en el que se describían, de esta forma, las Escuelas de la Sagrada Familia:

“Gaudí planteó el problema arquitectónico introduciendo en la construcción el concepto de organismo natural, lo que implica que cada elemento sea del material más adecuado a su función y que su disposición, forma y dimensiones sean las estrictamente precisas para obtener un mínimo coste y esfuerzo. La sustitución de los elementos rectos y verticales por otros que siguen las curvas de presiones (...) consigue un ahorro de materiales y espacio, así como mayor comodidad y estética” (Bassegoda, 1989, pág. 547).

En las campanas de la Sagrada Familia, por ejemplo, “después de múltiples ensayos, Gaudí encontró las formas, longitudes y gruesos convenientes para obtener, con la mitad de metal, la misma intensidad y pureza de sonidos que con los tubos cilíndricos y las campanas corrientes” (Bergós, 1999, pág. 78).

## 5.1 Empleo de materiales económicos como el ladrillo y los azulejos

Excepto en algunas obras singulares como el Templo de la Sagrada Familia —o aquellas otras en las que el cliente requiere el empleo de materiales más ricos, como en el Palacio Güell— Gaudí tiene tendencia a emplear materiales económicos, como el ladrillo, los azulejos o materiales cerámicos en general. También hoy en día, los grandes edificios de las multinacionales —independientemente del empleo de mármoles, u otros materiales de calidad, acordes a su imagen corporativa— obtienen las más altas calificaciones en la evaluación de su sostenibilidad.

Durante siglos, en función de las zonas geográficas, el ladrillo y los azulejos han sido materiales de construcción baratos y ampliamente utilizados, en las construcciones más sencillas. Al fin y al cabo, se trata de un material abundante, de fácil producción, y con importantes cualidades de resistencia al fuego, durabilidad, monolitismo, inercia térmica, etc... La arquitectura industrial de aquella época empleaba habitualmente el ladrillo, por ser el material más barato y más versátil para este tipo de construcciones. En Cataluña, en concreto, el uso del ladrillo y de los materiales cerámicos, en general, se extendió y popularizó de tal manera que se hizo conocida la “bóveda tabicada a la catalana”, el “baldosín catalán” o el “gres catalán”.

Por lo tanto, lo que hace Gaudí, en definitiva, es utilizar el material más económico y popular de que dispone y adaptarlo a sus necesidades, puesto que “en Cataluña, como es sabido, el ladrillo contaba con muy buenos operarios. Tal circunstancia le lleva a elegir una cubierta de bóveda tabicada que resultará bien terminada y a bajo precio. Dicha bóveda debería llevar en su cara externa un revestimiento que la proteja de los agentes atmosféricos. Barcelona goza de inviernos suaves y un revestimiento cerámico puede obtenerse con materiales de desecho que, dada su fragmentación, se adaptarán además perfectamente a las superficies curvas que van a proteger” (Flores, 1994, pág. 29). La capacidad creadora de Gaudí, o la de sus colaboradores —como Francisco Berenguer— hará posible que tal solución utilitaria alcance gran belleza.

Las Escuelas de la Sagrada Familia “son la joya de la arquitectura modernista en ladrillo” (Adell y García, 2005, pág. 31) y están construidas, tan solo, con simples rasillas de ladrillo a panderete y vigas de madera. (Figura 3). La tecnología empleada es de la máxima sencillez y robustez, se trata de la tradicional bóveda a la catalana adaptada a la forma de conoide, puesto que “esta superficie reglada podía servir verticalmente para dar rigidez estructural a las paredes de cerramiento perimetral del edificio, con el uso mínimo de materiales y mano de obra” (Bonet, 2002, pág. 4). El mismo Le Corbusier quedó impresionado y manifestó públicamente su admiración por este pequeño edificio cuando lo visitó en 1928. En agosto de 1914, la revista “Ilustración Catalana” publicó un extenso artículo con fotografías de las escuelas, en el que afirmaba que era difícil “encontrar una escuela tan sencilla y al mismo tiempo tan alegre y práctica”. Y además “la Asociación de Arquitectos de Cataluña visitó el edificio escolar en 1912, y tal como se señaló en su momento, mereció el aplauso unánime de los arquitectos que asistieron, hasta llegar a proponer que sirviera de modelo para las escuelas que proyectaba construir la Mancomunidad en el futuro” (Bonet, 2002, pág. 14).

Figura 3. Escuelas de la Sagrada Familia



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, otros grandes ingenieros y arquitectos, como el uruguayo Eladio Dieste (1917-2000), también han sabido aprovechar las ventajas de la simplicidad y la economía del ladrillo:

“Las edificaciones de Dieste pueden considerarse como un manifiesto adelantado de la Arquitectura Sostenible, por su eficacia en el empleo de la materia” (Adell y Mas, 2005, pág. 13).

### 5.2 *Empleo de elementos prefabricados*

Gaudí también intentó el abaratamiento de costes por otros procedimientos —absolutamente novedosos en aquel entonces— como la prefabricación de elementos constructivos. Buen ejemplo de ello es el Park Güell, en el que bóvedas, columnas, almenas, bancos, escalinatas... fueron construidos a base de módulos prefabricados.

Agustín Munné —encargado y carpintero de la obra— comenzaba el trabajo preparando los moldes de madera; después se iban colocando, en el fondo de los moldes, las sucesivas hojas de bóveda tabicada hasta formar el prefabricado. Posteriormente, una vez fraguado el cemento, se sacaban del molde las piezas prefabricadas y se hacía el recubrimiento de “trencadís” (Bassegoda, 1989).

### 5.3 *Optimización mecánica del diseño estructural*

La optimización mecánica de los diseños estructurales fue otra de las grandes aportaciones de Gaudí a la arquitectura. A través de importantes innovaciones, consigue economizar gran cantidad de materiales, mejorar el aprovechamiento de los espacios interiores y aumentar los huecos de fachada para mejorar la ventilación, iluminación y soleamiento de los espacios, con el correspondiente ahorro energético.

Carlos Flores afirma que “los planteamientos experimentales para el diseño y cálculo de estructuras utilizados por Gaudí suponían un enfoque del problema tan adelantado a su tiempo, que ingenieros y arquitectos posteriores de extraordinario relieve han coincidido, normalmente sin proponérselo, con los métodos y sistemas planteados por Gaudí medio siglo antes” (Flores, 1982, pág. 223), poniendo como ejemplo las estructuras regladas, de doble curvatura, del Parque Olímpico de Múnich, construidas por Frei Otto en 1972.

Las nuevas tecnologías informáticas, para el cálculo matemático de finales del siglo XX, han demostrado la exactitud de los diseños y cálculos de estructuras planteados por Gaudí en su tiempo. En 1986, los catedráticos de estructuras de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña, Juan Margarit y Carlos Buxadé realizaron el cálculo de la estructura del Templo de la Sagrada Familia, y pudieron comprobar que coincidía perfectamente con las previsiones de Gaudí (Bassegoda, 1989).

El empleo del arco parabólico y las superficies regladas son el fruto de muchos años de investigación de Gaudí. Para ello empezó “recopilando información de los estudios publicados en aquella época por matemáticos, físicos, biólogos, arquitectos y otros científicos; como, por ejemplo, los estudios de geometría descriptiva de C.F.A. Leroy, publicado en 1855; los trabajos del matemático alemán Karl Hermann Amandus Schwarz; las investigaciones del filósofo y biólogo germano Ernest Heinrich Haeckel (...) y muchas otras publicaciones. Toda esa valiosa información, unida a su propio estudio de la geometría de la naturaleza, empujó a Gaudí a experimentar con las formas regladas” (Cussó, 2010, pág. 36).

Figura 4. **Maqueta funicular de la Iglesia de la Colonia Güell**



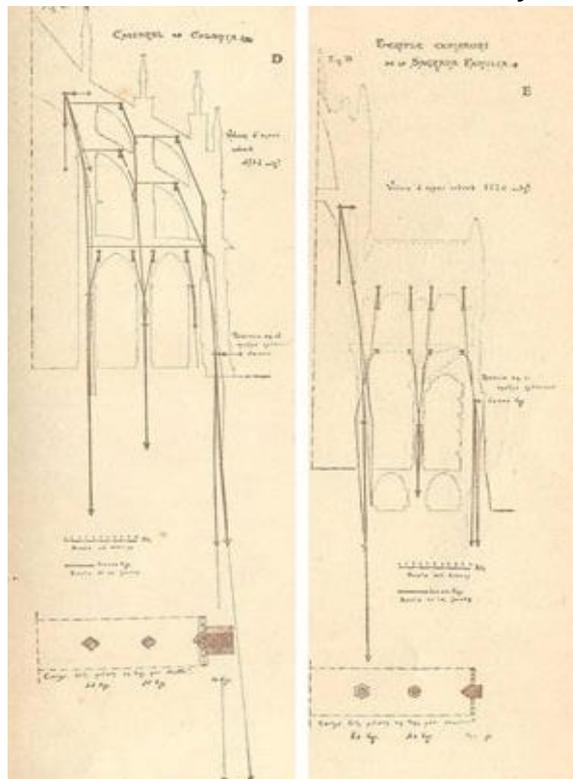
Fuente: Elaboración propia (museo diocesano de Barcelona)

El nuevo sistema de cálculo desarrollado por Gaudí en la maqueta estereostática funicular de la Iglesia de la Colonia Güell “es un paso esencial que va más allá de lo logrado por sus antecesores respecto de los experimentos con modelos [colgantes]. De acuerdo con los conocimientos de aquel tiempo, Gaudí construyó por primera vez un modelo colgante tridimensional para el diseño de un edificio” (Tomlow, 1989, pág. 61). En la Cripta de la Colonia Güell, diez años de estudios y maquetas funiculares precedieron el inicio de las obras, durante los cuales desarrolló un nuevo sistema de cálculo mediante maquetas estereostáticas —a base de cuerdas y pequeños sacos de perdigones— de las que posteriormente sacaba fotografías desde distintos puntos de vista; al darles la vuelta, se obtenía el trazado de los arcos parabólicos y las bóvedas (Figura 4).

Las propiedades mecánicas de la catenaria son conocidas desde 1691, y por tanto, desde ese momento, es posible la construcción de arcos catenarios. Sin embargo, en la historia de la arquitectura, este tipo de arcos han sido muy raramente empleados, hasta que son redescubiertos por Gaudí, a finales del siglo XIX (Bassegoda et al., 1992).

En la Sagrada Familia, Gaudí se propuso crear una arquitectura con nuevas estructuras más equilibradas y auto-resistentes, que mejorara las estructuras de las catedrales góticas europeas. César Martinell explica que “al encargarse Gaudí de la Sagrada Familia, empezada en estilo gótico —que era entonces casi obligado para las construcciones religiosas— fue su primera preocupación la de disminuir las fuerzas inclinadas, que obligan a construir contrafuertes, arbotantes y chapiteles” (Martinell, 1967, pág. 142).

Figura 5. Pilares y contrafuertes de la Catedral de Colonia y de la Sagrada Familia



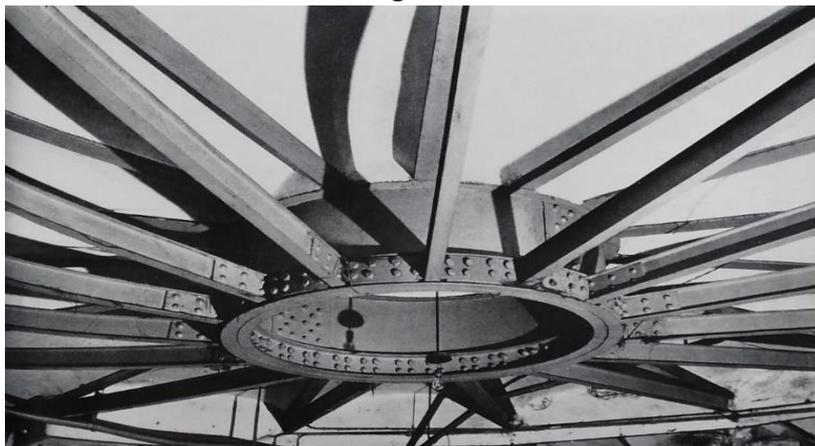
Fuente: [www.sagradafamilia.cat/sf-cast/docs\\_instit/estructura1.php](http://www.sagradafamilia.cat/sf-cast/docs_instit/estructura1.php)

Para ello, ideó los pilares de estructura arbórea ramificada —a partir del complejo estudio empírico de cordeles y pesos ya empleado en la cripta de la colonia Güell— que le permitía determinar el diámetro e inclinación de los pilares y las cargas transmitidas al núcleo central. De esta forma conseguía que la mayor parte de la estructura trabajara a compresión —en vez de a flexión— y que la distribución de cargas fuera mucho más equilibrada hacia los pilares interiores, y no sólo hacia los elementos perimetrales. Así, pudo eliminar los enormes arbotantes y contrafuertes del gótico —a los que Gaudí llamaba las “muletas del gótico”— con el consiguiente ahorro de material y de espacio en planta (Tomlow, 1989). A Gaudí le gustaba comparar las condiciones de estabilidad y resistencia de las naves de la Catedral de Colonia, una de las más alta del mundo (con 157,4 metros de altura), con las naves del templo de la Sagrada Familia (cuya altura prevista es de 172,5 metros). Con unas luces similares, la sección de los pilares de esta última es tres veces menor, y la de los contrafuertes cuatro veces menor (Bergós, 1999); una disminución de tal magnitud en la sección de los pilares, teniendo en cuenta la altura y proporciones del templo, supone un extraordinario ahorro de materiales, recursos y coste económico (Figura 5).

Además, en la Sagrada Familia, el original diseño aerodinámico de los campanarios ideado por Gaudí —de sección vertical parabólica y sección horizontal circular— reduce en más de la mitad el empuje del viento —uno de los principales problemas de las construcciones en altura— con respecto a los campanarios de sección horizontal cuadrada continua, diseñados en el proyecto primitivo; a esto también contribuyen las aberturas en la superficie de los campanarios diseñadas por Gaudí. De esta forma, consigue economizar una gran cantidad de materiales.

En el garaje de la Casa Milá, con el objeto de conseguir un espacio más diáfano y mejorar la maniobrabilidad de los coches, Gaudí diseñó una novedosa estructura metálica con vigas radiales en forma de rueda de bicicleta, que fue posteriormente imitada en el pabellón de Estados Unidos de la Exposición Universal de 1958, recibiendo numerosos elogios (Figura 6).

Figura 6. Estructura metálica con vigas radiales del sótano de la Casa Milá



Fuente: Martinell Brunet, C. (1967)

Además, en la Casa Milá, la innovadora estructura metálica formada por jácenas y pilares —a diferencia de los muros de carga, habitualmente empleados en España hasta mediados del siglo XX— permitía grandes luces y plantas casi diáfanas, es decir, “la planta libre

«lecorbusiana», que Gaudí anticipará en esta obra” (Flores, 1994, pág. 113). La eliminación de los muros de carga suponía un considerable ahorro económico (Figura 7):

“[Gaudí] pensando en que su coste será cuantioso decide prescindir de muros de carga, que además de encarecer imponen parecidas soluciones en cada piso, y adopta el procedimiento de pilares y jácenas, ya utilizado en la planta baja y sótanos de la casa de León” (Martinell, 1967, pág. 399).

Figura 7. Estructura de jácenas y pilares de la Casa Milá



Fuente: Elaboración propia (exposición “Espai Gaudí” de Barcelona)

En el Palacio Güell, el artesanado de la sala de visitas es “sorprendente tanto por su belleza como por su audacia mecánica” (González y Lacuesta, 2013, pág. 66), puesto que está formado por una “estructura espacial de gran eficacia resistente, que anuncia las futuras estructuras de este tipo” (González y Lacuesta, 2013, pág. 69), a base de viguetas reticuladas. De la misma manera, el techo del comedor y las salas contiguas están formados por grandes jácenas reticuladas y complejas cancelas con vigas reticuladas de inspiración hispano-musulmana.

## 6. **Ámbito medioambiental: reducción del consumo de energía y del impacto medioambiental**

Desde el punto de vista biomimético, la naturaleza es el mejor ejemplo de optimización de la energía y aprovechamiento de sus propios recursos. Gaudí —tomando como modelo la naturaleza— optimiza energéticamente sus edificios, y el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles, mediante el empleo de estrategias bioclimáticas tradicionales, ya conocidas y empleadas en la época, pero notablemente mejoradas por los múltiples e ingeniosos sistemas innovadores concebidos por él. También recicla todo tipo de materiales provenientes de residuos de construcción y de otros sectores industriales. El empleo de medidas pasivas —o de diseño bioclimático— es muy importante para la reducción del consumo de energía y del impacto medioambiental de los edificios (Bedoya y Neila, 1986).

## 6.1 Iluminación natural

Cuando Gaudí recibía el encargo de un proyecto, lo primero que hacía era estudiar detalladamente la orientación del edificio según los puntos cardinales, en función de la intensidad de la luz solar y la climatología. La luz era una preocupación constante en la arquitectura de Gaudí; por ello, en muchas de sus obras, la persiana adquiere una gran relevancia, junto con los múltiples mecanismos que utiliza para introducir y controlar la luz (Martí, 2005).

Gaudí, en su afán por superar y perfeccionar el gótico, ideó las bóvedas de la Sagrada Familia formadas por hiperboloides (Figura 8). Estas superficies regladas tienen en su centro un importante hueco de iluminación cenital, donde las antiguas bóvedas góticas tenían la clave. Esto permite aportar una gran cantidad de luz natural a las naves.

Figura 8. **Bóvedas de la Sagrada Familia**



Fuente: [blogdelaurac.blogspot.com.es/2013/05/sagrada-familia.html](http://blogdelaurac.blogspot.com.es/2013/05/sagrada-familia.html)

Al mismo tiempo, en la intersección de las bóvedas —donde en el gótico se situaban los nervios— los hiperboloides abren nuevos vanos de pequeño tamaño, que en la Sagrada Familia consiguen la sensación de cielo estrellado.

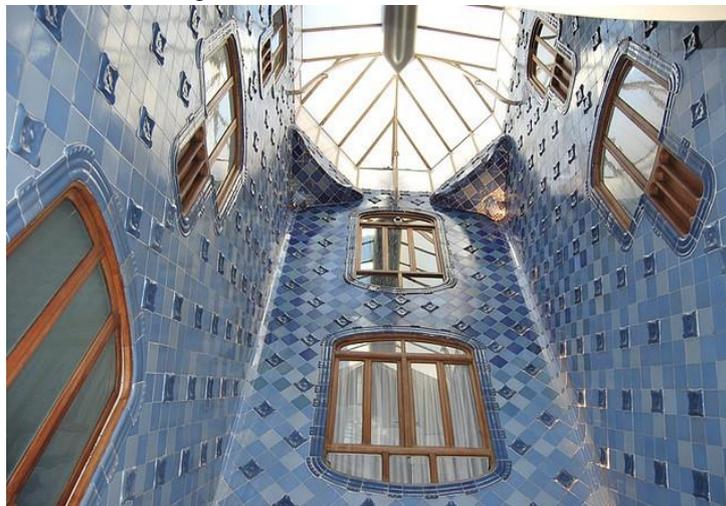
Por otro lado, Gaudí consigue que la luz natural llegue a la cripta, elevando el espacio central sobre las capillas laterales, para poder abrir grandes ventanales en todo el perímetro:

“Una de las principales modificaciones que Gaudí decidirá al hacerse cargo de las obras del templo expiatorio sería la de dotar a la cripta de una iluminación natural directa, circunstancia que no figuraba en el proyecto de Paula del Villar. Sus criptas y plantas de sótano o semisótano compartirán, en general, esta cualidad de contar con ventanas e iluminación directas; recordemos los casos de la cripta de la colonia Güell, de las plantas subterráneas del palacio Güell, del palacio episcopal de Astorga, de la casa Figueras, etc...” (Flores, 1994, pág. 114).

En la reforma de la Casa Batlló —construida originariamente en 1877 (Onecha et al., 2017)— la transformación afectó, en gran medida, a la ventilación e iluminación del edificio, puesto que una parte fundamental de la reforma fue el ensanchamiento del patio interior, y la apertura de grandes ventanales en la fachada y el patio.

Gaudí revistió el patio interior de azulejos en tonos azules, que van aclarándose en la parte inferior —donde hay menos luminosidad— para conseguir una distribución de la luz más homogénea en todas las plantas; además, las ventanas también van haciéndose más grandes en las plantas más bajas, donde llega menos luz natural. Gaudí también incorporó gran cantidad de fijos acristalados en las puertas de distribución interior, en las ventanas de la fachada y en las ventanas del patio interior, con el objeto de aumentar la superficie acristalada y la luminosidad del edificio (Figura 9).

Figura 9. Patio de la Casa Batlló



Fuente: [virginianapracticashistoria.blogspot.com.es/2013/05/casa-batllo-antonio-gaudi.html](http://virginianapracticashistoria.blogspot.com.es/2013/05/casa-batllo-antonio-gaudi.html)

En la Casa Milá, Gaudí también diseñó grandes patios de luces —para una mejor iluminación y ventilación de todos los pisos— y las ventanas también van agrandándose en los pisos inferiores, para compensar la menor cantidad de luz natural que reciben. Además, la fachada ya no es un pesado muro de carga, como era habitual en aquella época, sino un muro de cerramiento no estructural, en el que pueden abrirse grandes ventanales.

Tanto en la Casa Botines, como en el Palacio Episcopal de Astorga, Gaudí diseñó un foso exterior rodeando el edificio, con la finalidad de ventilar e iluminar los sótanos. Además, en la Casa Botines las torres funcionan como lucernarios, para que las esquinas del edificio no sean puntos ciegos, y los patios van ampliándose escalonadamente hasta la cubierta, con el objeto de hacer llegar más cantidad de luz cenital a las plantas bajas.

## 6.2 Ventilación natural

Gaudí utilizaba en muchos de sus edificios la ventilación natural como estrategia bioclimática para aumentar el confort y la salubridad de los usuarios, mejorando la calidad del aire, regulando la humedad y refrescando las estancias en verano.

Figura 10. **Sistemas de regulación de ventilación de la Casa Batlló**



Fuente: Elaboración propia

En el patio interior de la Casa Batlló hay ventanas de doble uso: la parte superior para iluminación y la parte inferior para ventilación (Figura 10). El edificio está dotado de un sistema de control de la ventilación cruzada de las viviendas, mediante palancas de regulación del caudal de entrada y salida de aire en puertas y ventanas; de esta forma, el patio funciona como una gran chimenea de ventilación natural.

### 6.3 *Aislamiento térmico*

Gaudí estudia la forma de conseguir el aislamiento térmico de sus edificios, y especialmente en las zonas más expuestas al frío y al calor, como las azoteas y cubiertas. Por eso decía frecuentemente que la cubierta tenía que ser “sombrero y sombrilla”, para referirse a que tenía que ser doble (Bassegoda, 1989).

Figura 11. **Planta ático de la Casa Milá (cámara aislante)**



Fuente: Elaboración propia

En la Casa Milá (Figura 11) “Gaudí diseñó la planta desván como una estructura independiente para que actuara como cámara aislante y de protección del edificio frente al frío y al calor exterior. Esa estructura se completó con un sistema de ventilación compuesto por dos tipos de ventanas, las pequeñas en la parte alta de las paredes y las grandes en la parte baja, que debían abrirse en verano para crear corriente de aire y cerrarse en invierno para conservar el microclima generado por el sol y los ladrillos” (Giordano y Palmisano, 2011, pág. 88).

En El Capricho de Comillas —localidad cántabra muy alejada del benigno clima mediterráneo— los ventanales de la fachada norte son de doble cristalera, con el objeto de mejorar el aislamiento térmico de las estancias (Figura 12). Este perfeccionamiento es algo insólito para la arquitectura de la época.

Figura 12. Ventanales con doble cristalera en El Capricho



Fuente: [www.cosasdearquitectos.com/2014/03/la-idea-arquitectonica-de-gaudi-y-sus-inicios-en-el-capricho/](http://www.cosasdearquitectos.com/2014/03/la-idea-arquitectonica-de-gaudi-y-sus-inicios-en-el-capricho/)

#### 6.4 Sombreamiento y soleamiento

El soleamiento del edificio, en función de la orientación, es muy importante para Gaudí y lo estudia detalladamente en todas sus obras. Su preocupación “por el control solar (...) derivó en ingeniosas soluciones para los huecos de fachada, como la galería del Palacio Güell (1886-1888), con control de las lamas desde el interior mediante engranajes, cadenas y ruedas de gusano, o las galerías de la Casa Calvet (1898-1900), en la fachada al patio de manzana, con persianas de librillo guiadas con un pasamanos ondulado, a semejanza de la patente francesa Cheyne” (Martí y Araujo, 2015, pág. 6).

En 1906, Gaudí instaló en la Casa Batlló las primeras persianas enrollables mecanizadas desde el interior. La Casa Milá incluía también unas novedosas persianas enrollables mecanizadas desde el interior, con un ingenioso sistema de proyección de los faldones hacia el exterior y doble persiana con doble tambor, para multiplicar las posibilidades de control solar, ventilación e iluminación (Martí y Araujo, 2015).

En El Capricho, Gaudí diseña una vivienda en forma de “U”, que rodea un invernadero orientado hacia el sur. De esta forma consigue aprovechar con gran efectividad los escasos

rayos de sol de esta fría localidad del norte de España, e introducirlos en la vivienda, para captar la energía térmica producida por el efecto invernadero. El sentido último de la forma de la vivienda es conseguir la máxima captación de energía solar a través del invernadero, pues cada habitación está dispuesta —con respecto a esta fuente de energía— de la forma más apropiada a sus funciones y usos (Sama, 2014). Para Antonio Sama García, los girasoles de los azulejos que decoran el edificio son el símbolo de una arquitectura solar —diseñada en función del sol— a semejanza de estas plantas heliotrópicas —que se orientan según la posición del sol— y por lo tanto, El Capricho es una arquitectura heliotrópica.

### 6.5 Aprovechamiento de residuos

Gaudí fue pionero en la reutilización y reciclaje de residuos de construcción procedentes de desecho o demolición, algo que en aquella época fue incomprendido e incluso criticado.

Es muy conocido su empleo de trozos de vidrio o azulejo, en el revestimiento de fachadas, chimeneas u otros elementos, técnica popularmente conocida como “trencadís”, que en catalán significa “roto” (Figura 13). Gaudí empleó esta técnica en muchos de sus edificios, como por ejemplo en el Palacio Güell, el Park Güell, la Casa Batlló, la Casa Milá, o el Templo de la Sagrada Familia. El material “procedía mayoritariamente de depósitos sobrantes y defectuosos de fábricas de cerámica” (Aguado et al., 2002, pág. 26). Otras veces, buscaba industrias o negocios que le facilitaran los desechos, como la Vidriería Pelegrí de Barcelona.

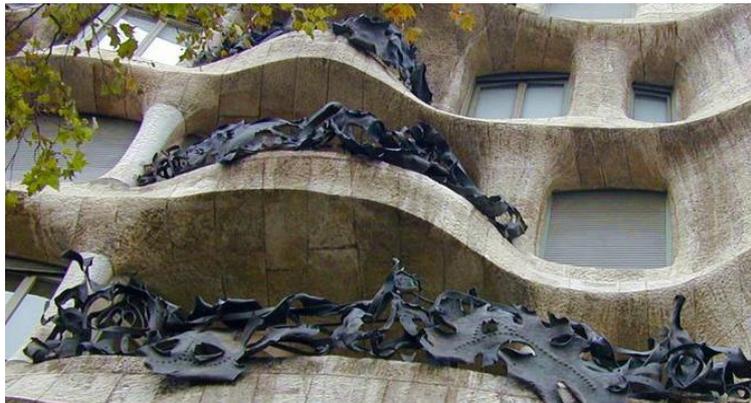
Figura 13. Desechos de vidrio empleados en las chimeneas de la Casa Milá



Fuente: Elaboración propia

Hay testimonios de que —tanto en la Sagrada Familia, como en la Casa Milá, o el Park Güell— los albañiles tenían orden de recoger todas las botellas, platos o tazas, que encontraran en la basura, camino de sus casas, para emplearlos en la confección de los mosaicos (Bassegoda, 1989). En la Casa Milá, los pilares de ladrillo se construyeron reutilizando los ladrillos procedentes de la demolición de un chalet existente, la casa Ferrer-Vidal (Bassegoda, 1989). Además las barandillas de los balcones de fachada (Figura 14) están realizadas con planchas, cadenas, mallas, perfiles, tornillos y otros elementos de chatarra para desguace, que Gaudí seleccionaba y reciclaba para su trabajo (Giordano y Palmisano, 2011).

Figura 14. **Balcones de la Casa Milá (realizados con chatarra de desguace)**



Fuente: [www.pasarlascanutas.com/gaudi/casa\\_mila\\_la\\_pedrera/casa\\_mila.htm](http://www.pasarlascanutas.com/gaudi/casa_mila_la_pedrera/casa_mila.htm)

En el revestimiento exterior de la aguja cónica del Palacio Güell, Gaudí empleó pequeños fragmentos de piedra arenisca roja vitrificada, procedentes de las paredes interiores de los hornos de cal inservibles, situados en terrenos de los Güell del macizo de Garraf (González y Lacuesta, 2013). La última chimenea en construirse —entre los años 1889 y 1890— fue revestida con desechos de loza de diferentes vajillas, especialmente con vajillas de la fábrica Pickman de Sevilla (González y Lacuesta, 2013).

Para las rejas de los ventanales de la Cripta de la Colonia Güell, se reciclaron agujas inservibles de los telares de la fábrica (Bassegoda, 1989). En los muros, Gaudí utilizó ladrillos “recochos” de desecho —demasiado quemados, retorcidos o alabeados— escoria y residuos de fundición.

Los 20 bancos de la Cripta de la Colonia Güell fueron realizados reciclando los flejes de acero de las balas de algodón que llegaban a la fábrica y las tablas de roble de los embalajes de la maquinaria. En el Park Güell con los flejes entrelazados, de dos en dos, se formaron los balaustres de las barandillas de hierro de algunas escaleras accesorias (Bassegoda, 1989).

## 6.6 *Protección del entorno natural y aprovechamiento de recursos*

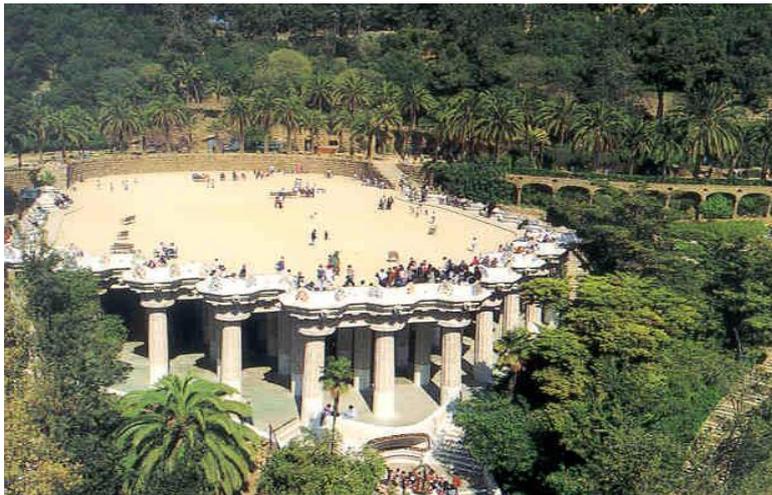
La admiración de Gaudí por la naturaleza iba siempre acompañada de la preocupación por la protección y conservación de la misma; esto le llevaba a un estudio pormenorizado de las actuaciones a realizar, del entorno, los recursos o la vegetación de la zona; “Antoni Gaudí i Cornet no deixava mai de considerar l’espai concret on s’havia d’actuar” (Pi de Cabanyes, 2002, pág. 6).

En la Cripta de la Colonia Güell, Gaudí cambió la forma de una escalera para salvar un gran pino que se interponía en el trazado de la misma, y posteriormente comentó: “yo puedo hacer una escalera en tres semanas, pero necesito veinte años para tener un pino como éste” (Bassegoda, 1989, pág. 370).

En el Park Güell —situado en la denominada “Muntanya Pelada” (Montaña Pelada) del barrio del Carmelo de Barcelona— la vegetación estaba constituida básicamente por hierbas y arbustos, puesto que su matriz geofísica —con pronunciadas pendientes y substrato rocoso—

favorecía los procesos erosivos que impedían la formación de suelo estable, para albergar estructuras vegetales desarrolladas (Figura 15). Sin embargo, Gaudí insistió en conservar los pinos, algarrobos y matorrales existentes, añadiendo otras especies autóctonas, para crear un entorno natural resistente y con pocos requerimientos de agua (Rojas et al., 2015). Se plantaron más algarrobos y además, romero, tomillo, retama, pitas, palmeras, yedra y glicinas (Bassegoda, 1989). Además, en las excavaciones y movimiento de tierras, Gaudí se preocupó de recoger cuidadosamente todos los fósiles encontrados, para que posteriormente fueran adecuadamente estudiados y catalogados (Bassegoda, 1989).

Figura 15. **Vegetación autóctona del Parque Güell**



Fuente: [www.acharvat.at/barcelona/barc41.html](http://www.acharvat.at/barcelona/barc41.html)

“Frenar la velocidad del agua, dividirla, filtrarla, recogerla de nuevo, todo forma parte de la estrategia de gestión hídrica destinada a evitar la erosión y poner el agua a disposición de las plantas, para transformar una situación erosiva en un proceso de generación de suelo y vegetación [...] La mayoría de los elementos usados por Gaudí en la urbanización del Park —camino, escaleras o viaductos— adquieren así funcionalidad dentro de una estrategia global frente al flujo del agua [...] cambiando una dinámica que producía un desierto por una nueva dinámica que generase un oasis” (Cuchí, pág. 10).

El Park Güell —además de obra artística y creativa— es una gran obra de ingeniería, puesto que “demostrando una sensibilidad especial con el problema de la escasez de agua, Gaudí concibió un ingenioso sistema de drenaje con el fin de aprovechar, para riego, la lluvia que caía sobre la gran plaza (...) Para facilitar el drenaje, el pavimento de la plaza está compuesto de varias capas de piedras, cuyo grosor aumenta con la profundidad, de manera que el agua se va filtrando sin arrastrar demasiadas impurezas” (Giordano y Palmisano, 2010, pág. 76).

Las robustas columnas de la sala hipóstila, huecas en su interior, son en realidad grandes bajantes de piedra, que conducen el agua de la plaza hasta la cisterna inferior, con una capacidad para 1200 metros cúbicos de agua. La cisterna “constituye, en sí misma, una estructura extraordinaria: múltiples columnas y arcos redondeados (...) cuidadosamente acanalados, para recibir el agua que entra en la cámara, han sobrevivido el continuo goteo de décadas de drenaje” (Kent y Prindle, 1992, pág. 86). La fuente del reptil de la escalinata, es en realidad el desagüe del depósito.

## 7. **Ámbito social: confort del usuario, salubridad y bienestar social**

Los principios biomiméticos requieren —como punto de partida— el respeto y la protección de la naturaleza, sin el cual, tampoco puede haber respeto hacia las personas, ni bienestar social. A Gaudí le preocupaba la protección y el respeto de la naturaleza, al tiempo que el bienestar social y el confort de los usuarios; por ello, estudiaba con detenimiento hasta los más pequeños detalles. En la mayoría de sus edificios, la preocupación “por el control solar, la salubridad del espacio interior y el confort, derivó en ingeniosas soluciones” (Martí y Araujo, 2015, pág. 6).

### 7.1 *Ergonomía*

En la Casa Batlló, el diseño de la barandilla de madera está perfectamente estudiado para su adaptación a la anatomía de la mano, y para su deslizamiento por ella. Gaudí diseña el mobiliario de las casas Vicens, Calvet, Batlló y Milá, así como del Palacio Güell y de la Torre Bellesguard, junto con el mobiliario litúrgico de la Sagrada Familia. En todos los casos efectúa cuidadosos estudios, de tipo funcional-ergonómico —antes incluso de inventarse tal palabra— para la perfecta adaptación del mobiliario a la anatomía humana, obteniendo diseños ergonómicos sumamente innovadores (Estévez y Tur, 2002).

Figura 16. **Diseños ergonómicos de Gaudí para la casa Milá**



Fuente: Elaboración propia (exposición “Espai Gaudí” de Barcelona)

En la Casa Milá todos los herrajes de puertas y ventanas —tiradores, manillas y pomos— fueron diseñados por Gaudí a partir de modelos de barro aplastados con los dedos, para el estudio de su ergonomía, antes de ser fundidos en bronce (Figura 16).

Figura 17. **Estudio ergonómico del banco del Parque Güell**



Fuente: Elaboración propia (museo “Gaudí Centre” de Reus)

En el Park Güell, Gaudí pidió a uno de los trabajadores que se sentara sobre una maqueta de yeso del banco que pensaba construir —cuando el yeso blanco aún no había endurecido— para sacar un molde del cuerpo humano, y poder hacer un banco con diseño ergonómico (Figura 17).

## 7.2 *Acústica*

Gaudí también realizó estudios de acústica en algunos de sus edificios, para mejorar el confort de los usuarios. En el Palacio Güell los adoquines con que está pavimentada la entrada de carruajes eran de madera de pino tea para atenuar el ruido de caballos y carruajes (González y Lacuesta, 2013).

En el Templo de la Sagrada Familia, Gaudí realizó profundos estudios para la mejora de la acústica en el interior del templo. Fruto de esos estudios es el innovador claustro-fachada que rodea todo el templo, cuya función es —además de la deambulación de los visitantes— el aislamiento del ruido exterior. Las pequeñas viseras, con inclinación graduada hacia abajo, que envuelven las torres de los campanarios, están diseñadas para que el sonido de las campanas pueda escucharse en toda la ciudad. Está previsto que el templo tenga 60 campanas fijas tubulares —con todas las notas musicales— accionadas por martillos y mecanismos eléctricos, desde un teclado convencional.

## 7.3 *Salubridad*

Para Gaudí, una de las principales condiciones de la comodidad —y determinante en la toma de decisiones— es la salubridad (Sama, 2014). A modo de ejemplo, la Casa de los Botines fue la primera casa en León que tuvo cuartos de baño (Bassegoda, 1989).

En el año 1900, la Casa Calvet recibió el premio al mejor edificio del año del Ayuntamiento de Barcelona; el jurado se mostró particularmente impresionado por “la buena ventilación y sifonaje de las conducciones de aguas residuales, que daban al edificio excelentes condiciones higiénicas” (Bassegoda, 1989, pág. 358). La Casa Calvet tenía además, una fuente con agua filtrada y refrescada a 13°, para uso de los vecinos. El agua provenía directamente del curso de agua Riera de la Malla, que atravesaba la parte posterior del solar (Bassegoda, 1989).

## 7.4 *Bienestar social*

A Gaudí le preocupaba la protección del medio ambiente y la naturaleza, pero también le preocupa el bienestar social. En el Templo de la Sagrada Familia, las Escuelas fueron financiadas por Gaudí —el coste total de la obra fue de 9.000 pesetas— para que pudieran estudiar de forma gratuita los hijos de los obreros (Cussó, 2010).

Las Escuelas acogían entre 120 y 150 alumnos, y disponían de un amplio patio exterior para actividades al aire libre, jardinería, etc... (Figura 18). Además, Gaudí proporcionaba gran estabilidad laboral a los industriales, albañiles y artesanos que trabajaban con él; normalmente, eran siempre los mismos en todas las obras (Bassegoda et al., 1992).

Figura 18. Clase de jardinería en las Escuelas de la Sagrada Familia



Fuente: Bonet Armengol, J. (2002)

## Conclusiones

Se ha estudiado y documentado bibliográficamente, con múltiples citas, la sostenibilidad de la arquitectura de Gaudí en algunas de sus obras más significativas, como:

- El Capricho.
- El Palacio Güell.
- El Palacio Episcopal.
- La Casa Botines.
- La Casa Calvet.
- La Cripta de la Colonia Güell.
- El Park Güell.
- La Casa Batlló.
- La Casa Milá.
- El Templo de la Sagrada Familia.
- Las Escuelas de la Sagrada Familia.

Gaudí hace una arquitectura bioclimática, a principios del siglo XX —cuando aún no existía el concepto de “diseño bioclimático”— y nos introduce en las teorías de la arquitectura biomimética del siglo XXI. Por ello, puede considerarse que Gaudí fue, realmente, un precursor de la sostenibilidad y la biomimética en la arquitectura, con casi un siglo de antelación.

Para el arquitecto Juan Bergós Massó (1894-1974) —discípulo y amigo personal de Gaudí, al tiempo que, gran estudioso de su vida y su obra— Gaudí demostró que la inspiración artística es siempre fruto de un trabajo intenso, metódico y disciplinado (Bergós, 1999). Es por ello que “sus soluciones plásticas, tan desusadas y sorprendentes, pocas veces resultan gratuitas o espontáneas y, menos aún, conflictivas frente a cualquier razón constructiva, estructural o de funcionamiento. Gaudí deja, en rigor, muy pocas veces realmente libre su imaginación pese a que, a primera vista, es esto lo que pudiera creerse. Sus personalísimos hallazgos plásticos se encuentran normalmente encadenados a un riguroso discurrir lógico del que sólo constituyen el eslabón final” (Flores, 1994, pág. 90); eso quiere decir que la creación artística de un arquitecto no tienen que entrar en contradicción con su rigor científico.

Para el arquitecto británico Norman Foster: “Los métodos de Gaudí, un siglo después, continúan siendo revolucionarios” (Bergós, 1999, pág. 10).

La creatividad formal y la libertad artística de la arquitectura de Gaudí ponen de manifiesto que el diseño bioclimático y sostenible no está reñido con la libertad del arquitecto para buscar la innovación, la originalidad, la creatividad u otros valores arquitectónicos; siempre y cuando, entendamos que no se trata de imitar las formas, colores o texturas de la naturaleza, por sus valores estéticos, sino por la inteligencia y eficacia de sus depurados diseños y sistemas de funcionamiento. De la misma forma, interpretar el mensaje de la arquitectura de Gaudí no es imitar sus formas, texturas o colores —ni tan siquiera, sus sistemas constructivos— sino imitar la profundidad y el rigor científico con que estudiaba sus obras, fijándose en la naturaleza como el ejemplo más perfecto de eficacia, economía, ecología, funcionalidad y belleza:

“La lección de Gaudí para el futuro no es la de copiar sus soluciones, sino buscar la inspiración en la naturaleza (...) la naturaleza no pasa de moda, al revés que los estilos históricos” (Bassegoda y García, 1999, pág. 32).

El ejemplo de Gaudí, también nos enseña que en la sostenibilidad de la arquitectura se funden indisolublemente otros muchos valores éticos, estéticos, científicos y tecnológicos, al servicio del bien común. Es fundamental que la arquitectura del siglo XXI sea una arquitectura sostenible; y si realmente lo es, también podrá aportar esos otros valores.

De esta forma, mirando hacia el pasado, el ejemplo de Gaudí y la genialidad de su arquitectura se proyectan hacia el siglo XXI, para ayudarnos en la búsqueda de un auténtico progreso científico y de un auténtico avance de la sostenibilidad en la arquitectura. Las ciudades y edificios, concebidos como “máquinas para vivir” por Le Corbusier —el gran arquitecto del siglo XX— pueden ahora evolucionar, en el siglo XXI, hasta convertirse en “ecosistemas para vivir”.

## Agradecimientos

Se agradece la colaboración del grupo de investigación TISE (Técnicas Innovadoras y Sostenibles en la Edificación) y del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas (DCTA) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSAM - UPM).

**Contribuciones de los autores:** El primer autor ha redactado el artículo, el segundo autor ha revisado los contenidos de sostenibilidad en la arquitectura y el tercer autor ha revisado los contenidos de sistemas constructivos *gaudianos*.

**Conflicto de Intereses:** Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

## Bibliografía

ACHA, C. *et al.* *Acondicionamiento ambiental y habitabilidad del espacio arquitectónico*. Madrid, Munilla-Lería, 2013.

ADELL, J. M. y GARCÍA, A. *Gaudí y las bóvedas de las Escuelas de la Sagrada Familia*. En: *Informes de la construcción*, 56 (496), marzo-abril 2005.

ADELL, J. M. y MAS, A. *Eladio Dieste y la cerámica estructural en Uruguay*. En: *Informes de la construcción*, 56 (496), marzo-abril 2005.

AGUADO, M. L. *et al.* *La restauración de los pabellones de entrada del Park Güell*. En: *Informes de la construcción*, 54 (481/482), septiembre-octubre/noviembre-diciembre 2002.

BASSEGODA, J. *La construcción tradicional en la arquitectura de Gaudí*. En: *Informes de la construcción*, 42 (408), julio-agosto 1990.

BASSEGODA, J. *El gran Gaudí*. Sabadell, AUSA, 1989.

BASSEGODA, J. *et al.* *Aproximación a Gaudí*. Madrid, Doce Calles, 1992.

BASSEGODA, J. y GARCÍA, G. *La cátedra de Antoni Gaudí: estudio analítico de su obra*. Barcelona, Ediciones UPC, 1999.

BEDOYA, C. y NEILA, F. J. *Acondicionamiento y energía solar en arquitectura*. Madrid, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1986.

BERGÓS, J. *Gaudí, el hombre y la obra*. Barcelona, Lunwerg, 1999.

BONET, J. *Las Escuelas de la Sagrada Familia*. Barcelona, Escudo de Oro, 2002.

CMMAD. *Informe Brundtland de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo* [en línea]. ONU. [Fecha de consulta: 25 septiembre 2017] Disponible en: <<https://es.scribd.com/doc/105305734/ONU-Informe-Brundtland-Ago-1987>>

CRIPPA, M. A. *Antoni Gaudí, 1852-1926: De La Naturaleza a La Arquitectura*. Alemania, TASCHEN, 2007.

CUCHÍ, A. *La Percepción del territorio desde el análisis de los flujos materiales* [en línea]. Universidad Politécnica de Cataluña. [Fecha de consulta: 8 marzo 2016] Disponible en: <<https://mastersuniversitaris.upc.edu/aem/archivos/informes/la-percepcion-del-territorio-desde-el-analisis-de-los-flujos-materiales.pdf>>

CUSSÓ, J. *Disfrutar de la naturaleza con Gaudí y la Sagrada Familia*. Lleida, Milenio, 2010.

EDWARDS, B. *Guía básica de la sostenibilidad*. 2ª ed. Barcelona, Gustavo Gili, 2008.

ESTÉVEZ, A.T. y TUR, J.R. *Gaudí*. Madrid, Susaeta Ediciones, 2002.

FLORES, C. *Sobre arquitecturas y arquitectos*. Madrid, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1994.

FLORES, C. *Gaudí, Jujol y el modernismo catalán, Tomo II*. Madrid, Aguilar, 1982.

GARCÍA, G. *Leyes de la naturaleza y composición arquitectónica: el ejemplo de Antonio Gaudí*. Universidad Politécnica de Cataluña, 1994.

GIORDANO, C. y PALMISANO, N. *La última obra civil de Gaudí, la Pedrera, Casa Milá*. Barcelona, Dos de Arte Ediciones, 2011.

GIORDANO, C. y PALMISANO, N. *El proyecto Park Güell*. Barcelona, Dos de Arte Ediciones, 2010.

- GONZÁLEZ, A. *Gaudí, constructor (la materialización de una arquitectura singular)* En: *Informes de la construcción*, 42 (408), julio-agosto 1990.
- GONZÁLEZ, A. y LACUESTA, R. *Palacio Güell Gaudí, itinerario de visita*. Barcelona, Diputación de Barcelona, 2013.
- KENT, C. y PRINDLE, D. *Hacia la arquitectura de un paraíso*. Madrid, Hermann Blume, 1992.
- MAC, I. *Design with nature*. New York, American Museum of Natural History, 1969.
- MARTÍ, N. *Les persianes de Gaudí, eines de la llum: la llum en el seu aspecte més sensible i subordinada a criteris constructius*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- MARTÍ, N. y ARAUJO, R. *La persiana enrollable. Revisión del sistema constructivo y sus requisitos medioambientales*. En: *Informes de la construcción*, 67 (540), octubre-diciembre 2015.
- MARTINELL, C. *Gaudí: su vida, su teoría, su obra*. Barcelona, Colegio de Arquitectos de Cataluña y Baleares, 1967.
- MCDONOUGH, W. *The Hannover principles: design for sustainability*. Charlottesville, William McDonough & Partners, 1992.
- MOKOKA, L. *Architecture's Intent: Beyond Green Rating Tools in Form and Aesthetics in Green Architecture* [en línea]. University of the Witwatersrand (South Africa). [Fecha de consulta: 30 noviembre 2017] Disponible en: <[https://src.lafargeholcim-foundation.org/dnl/274164ab-31ec-44fd-88aa-27022b281ec2/2\\_Architecture's%20intent\\_Lomile%20Mokoka.pdf](https://src.lafargeholcim-foundation.org/dnl/274164ab-31ec-44fd-88aa-27022b281ec2/2_Architecture's%20intent_Lomile%20Mokoka.pdf)>
- ONECHA, B. et al. *Plan Director de restauración de la Casa Batlló de Gaudí, un antes y un después*. En: *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, [en línea]. Febrero 2017, vol. 11, núm. 33, p. 65-86 DOI: <<http://dx.doi.org/10.5821/ace.11.33.4732>>
- PI DE CABANYES, O. *Cases Modernistes De Catalunya*. Barcelona, Edicions 62, 2002.
- PUIG, I. *El pensamiento de Gaudí*. Barcelona, Dux, 2015.
- ROJAS, G. M. et al. *La vegetación en el confort micro climático. Comparación de especies del clima mediterráneo de Barcelona, España*. En: *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, [en línea]. Octubre 2015, vol. 10, núm. 29, p. 59-84 DOI: <<http://dx.doi.org/10.5821/ace.10.29.3589>>
- SAMA, A. *El manifiesto del girasol. Una obra maestra de Gaudí: el Capricho de Comillas*. Santander, Ediciones Universidad de Cantabria, 2014.
- TOMLOW, J. *El modelo colgante de Gaudí y su reconstrucción. Nuevos conocimientos para el diseño de la Iglesia de la Colonia Güell*. En: *Informes de la construcción*, 41 (404), noviembre-diciembre 1989.
- USÓN, E. y CUNILL, E. *Dimensiones de la sostenibilidad*. Barcelona, Ediciones UPC, 2004.
- USÓN, E. et al. *Los edificios de consumo energético casi nulo: propuesta para el centro de tratamiento de residuos sólidos de Mercabarna*. En: *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, [en línea]. Junio 2014, vol. 9, núm. 25, p. 13-42. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/2099/14902>> DOI: <<http://dx.doi.org/10.5821/ace.9.25.3620>>