



Clasificación inédita de catedrales góticas españolas en función de su iluminación

Unpublished classification of gothic cathedrals depending on his lighting

J. M. Medina^(*)

RESUMEN

La luz natural y la arquitectura gótica son dos conceptos que viajan inseparables. Son muchas las teorías existentes acerca de la luz gótica y su valor simbólico y teológico, pero no existe ningún estudio de esa luz como realidad física cuantificable, cualificable y por tanto, clasificable.

El presente artículo recoge algunos de los resultados de la investigación realizada en busca de una metodología de entendimiento de la luz gótica a través de la definición de unos factores inéditos que matizan sus cualidades. La investigación se ha desarrollado mediante un análisis profundo de seis espacios góticos singulares, aportando una clasificación según «tipos de luz gótica» que pretende ser un nuevo condicionante a tener en cuenta en el futuro, ayudando a entender y respetar, aquello que fue en su inicio motor principal del proyecto arquitectónico y que hoy día no se valora suficientemente tan solo por falta de conocimiento: **su luz**.

Palabras clave: Gótico; catedrales; iluminación; clasificación; cualidades.

ABSTRACT

Natural light and Gothic architecture represent two inseparable concepts. There are many theories around the gothic light and its symbolic and theological values, but there isn't any deep study of this light as a physical quantifiable and qualified reality and therefore, classifiable.

*The present work presents some of the results of the investigation trying to reach a methodology to understand the gothic light, showing unpublished new factors which define all its qualities. The investigation has been developed through a deep analysis of six representative gothic spaces and proposing a new classification according to "types of light quality" that is intended to be a new conditioning factor to keep in mind in the future, helping to understand and respect, in possible interventions on the architectural heritage, what was the main engine to start the architectural project and which today is not valued enough due to the lack knowledge: **the light**.*

Keywords: Gothic; cathedral; lighting; classification; qualities.

Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia)

Persona de contacto/ Corresponding author: jm.medinad@uniandes.edu.co (J. M. Medina)

Cómo citar este artículo/Citation: Medina, J. M. (2014). Clasificación inédita de catedrales góticas españolas en función de su iluminación. *Informes de la Construcción*, 66(535): e028, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.132>.

Licencia/License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

1. INTRODUCCIÓN

La luz, ese valor intangible de la arquitectura, ha tenido a lo largo de la historia un protagonismo determinante pero es, sin duda, en las catedrales góticas uno de esos lugares donde la magia de la luz se convierte en espacio. El paso del románico al gótico supuso una ruptura con la pesadez arquitectónica de la piedra maniatada bajo el corsé estructural de las bóvedas de cañón y de los muros estructurales, para dar paso a una arquitectura que evoluciona hasta hacer posible la ejecución de verdaderas cajas de vidrio (1), buscando con su naturaleza simbólica, la «pérdida de la serenidad» (2) y una suerte de efecto hipnótico que entusiasma del mismo modo la mirada del visitante ajeno cómo lo hace con el ojo preparado del arquitecto más experto, o del artista avezado. La expresividad de su espacio es, sin lugar a duda, uno de los hitos arquitectónicos de la historia, capaz de capturar la esencia del misterio con el uso de la escenografía perfecta.

Los momentos clave de la historia de la arquitectura se conocen bajo parámetros de ruptura referidos a la estructura y a la forma que reaccionan al estilo anterior y que lo superan, elevando el listón de la técnica y la expresividad. Así lo hace el gótico frente al románico. La utilización de nervaduras frente a bóvedas de cañón, altura frente a peso y filamentos frente a muros ha definido la transición entre estos dos estilos como, probablemente, el salto más grande de la historia de la arquitectura.

Pero ¿por qué el gótico es tan hipnótico?

Existe un factor determinante de la realidad arquitectónica gótica, un elemento de diseño que diferencia de manera drástica el cambio de estilo de cualquier otra evolución en la historia de la arquitectura: **la utilización de la luz** (3).

El gótico modela la luz de una manera absolutamente novedosa. Los nuevos paramentos calados de vanos con vidrieras dan lugar a una recreación de espacios con una composición de la luz realmente inédita; «la arquitectura gótica se forma como la estructura de un árbol, dejando que la luz filtre entre la hojarasca a través de coloridas vidrieras» (4). Esta luz traspasa los muros generando una escenografía nueva, antes desconocida, que no se basa exclusivamente en la cantidad de luz ni en la direccionalidad de la misma sino en el misticismo que por ella se crea. Al contrario de lo que suele juzgarse, las aberturas de las ventanas de iglesias medievales no deben ser estudiadas según la cantidad de luz a la que dan paso hacia el interior sino de la composición y transfiguración de la luz misma que, como potencia de culto, provoca un efecto arrebatador tan grande como las mismas formas arquitectónicas (5). Esta luz es manipulada por los vitrales distribuidos en los muros de las catedrales y la transformación por estos provocada se comprende al momento cuando se observa una imagen de cualquiera de las catedrales bombardeadas en la II Guerra Mundial cuando estas fueron desposeídas de sus vitrales coloreados y quedaron influenciadas bajo la «luz natural» (5). La manipulación lumínica consigue completar el hechizo de la arquitectura, y en combinación con esta «elevarnos por encima del mundo cotidiano» (6).

Es por esto por lo que la luz gótica precisa de un estudio mucho más pormenorizado, no sólo como elemento simbólico, sino también como hecho físico modelador del espacio interior. Es necesario conocerla, clasificarla y cualificarla en

función de su intensidad y su color, distinguiendo así estilos de luz igual que distinguimos estilos de arquitectura. El estudio de la luz en las catedrales góticas se reduce en la bibliografía actual a descripciones simbólicas, filosóficas e incluso metafísicas, obviando sus cualidades como fenómeno físico cuantificable, y por tanto cualificable y clasificable. La escasez de fuentes directas de la época tratada (7), unido a una interpretación parcial de la luz como mera consecuencia de la disposición estructural de las nuevas catedrales, relega el estudio de la luz hasta apuntes introductorios sin fundamentación física ni métrica.

El presente artículo intentará determinar esos «estilos de luz» dentro de la arquitectura gótica en aras a intentar rellenar un vacío del conocimiento de una parte fundamental del gótico: La cualificación de su luz.

2. CONTEXTO HISTÓRICO Y RESUMEN DEL CONOCIMIENTO.

Profundizar en el conocimiento de la luz gótica requiere conocer dos niveles de documentación, por un lado el legado de documentos escritos de la época en la que se construyen las catedrales y por otro lado todas aquellas corrientes que han estudiado la realidad lumínica del gótico con posterioridad al mismo hasta nuestros días.

El primero de los niveles de investigación de fuentes arroja un resultado desolador; la inmersión en el estudio de los manuscritos góticos que han llegado hasta nuestros días nos muestra una documentación escasa, inexacta e inconexa que describe aspectos constructivos y formales de la arquitectura de la época pero que en ningún caso se pueden considerar tratados completos de construcción y mucho menos documentos que nos muestren claves sobre los conceptos de proyecto aplicados a la iluminación natural de los espacios servidos (8). Apenas podemos encontrar algunos dibujos descriptivos de elementos constructivos, tracerías de ventanales y composición de pináculos entre otros, como son los de Villard de Honnecourt (9), o los «tratados» de Mathes Roriczer y Hanns Schmuttermayer.

El segundo de los niveles de investigación de fuentes sería el de las corrientes posteriores al gótico referidas a la composición de la luz. Si bien la documentación legada por los autores de las catedrales es prácticamente inexistente, en los años posteriores al gótico y hasta nuestros días se han desarrollado multitud de teorías y han sido muchos los autores que han tratado la luz como elemento distinguido de la organización espacial. Desde Hugo de San Víctor hasta Santo Tomás de Aquino, pasando por Dante y su «luz divina que penetra el universo según su dignidad» y por Platón. Más tarde fueron San Agustín y el Pseudo-Areopagita, que establecen que la luz es el primer principio tanto de la metafísica como de la epistemología. Este último pensador fue personaje de máxima influencia del Abad Suger, primer «impulsor» del gótico luminoso, y que, entre sus teorías abogaba por «la Luz verdadera que brilla en las tinieblas, por cuya acción fueron hechas todas las cosas, y que ilumina a todos los hombres que vienen a este mundo».

Autores mucho más actuales como Panofsky, justifican la utilización de la luz gótica dentro del principio de clarificación de las cosas. Otros como Otto Von Simson abogan por una concepción de la luz gótica como la de un elemento de desmaterialización de los muros, como elemento que lo pe-

netra y que, fundiéndose con él, lo transfigura (10). Dentro del panorama español encontramos también autores como Nieto Alcaide que aseguran que la luz simbólica gótica se crea por la transfiguración de la misma y que esta es coloreada, cambiante y oscura (3) y otros como la profesora Cassinello aseguran que la catedral gótica nació para hablar a través de su luz, y se pregunta «¿por qué existen en España catedrales casi tan cerradas como cajas de oscuridad?, ¿por qué existen “catedrales mudas”?» (11). Esta última pregunta de la profesora Cassinello es la base de inicio de la presente investigación, que trata de desentrañar las cualidades de la luz gótica y porqué esta se manifiesta de manera diferente según cada catedral.

El repaso a las teorías y corrientes derivadas del estudio de la luz gótica se ha realizado de manera sistemática atendiendo a todos los autores que han profundizado en el tema y cabe resumir que todas ellas tratan la luz como elemento simbólico y compositivo que mueve sentimientos y escenografías de una manera única, pero lo que es un hecho es que ninguna de ellas estudia su naturaleza como hecho físico medible y cuantificable. Ese es el marco de investigación en el que se inserta el presente estudio a través de la presentación de una clasificación de catedrales según su «tipo de iluminación gótica», tratando de medir lo «intangible» y de «cuantificar las sensaciones».

3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA CLASIFICACIÓN

Para adentrarnos en este conocimiento de luz gótica lo primero que plantea el estudio es la preclasificación de 6 catedrales tipo que engloben toda la variedad de formas y volúmenes detectados de entre las configuraciones de catedrales del panorama gótico español. Estas muestras serán las auténticas fuentes de conocimiento empleadas para la clasificación y, como única prueba viva de la realidad construida son la base objeto de análisis de cualquier conocimiento específico sobre la forma de proyectar, entender y construir el espacio arquitectónico de los maestros medievales góticos. Estas catedrales «muestra» se han analizado en profundidad para conocer su luz y se han comparado entre sí para obtener los

factores determinantes que modulan las distintas cualidades lumínicas.

Las catedrales preseleccionadas se han tomado en función de unos parámetros previos que engloban los distintos tipos de espacios góticos. Estos son el grado de decalaje de su sección escalonada, la distribución en planta, el número de naves y su forma y su grado de transparencia de muros de acuerdo a su grado de sismicidad (12) y situación de contrafuertes (interiores o exteriores) (13). De las catedrales seleccionadas tres poseen estructura tipo sismica: La catedral de Gerona, la basílica de Santa María del Mar y la catedral de Sevilla y tres poseen estructura de tipo francés: La catedral de Toledo, la catedral de León y la capilla de la Sainte Chapelle de París (14).

Las muestras estudiadas han sido filtradas por un profundo análisis metodológico para llegar a conocer el estado de la iluminación gótica en su estado inicial, cuando fue concebida. Para ello se han recreado las condiciones originales de proyecto a través de un levantamiento en dos dimensiones de su distribución en planta, sus secciones y la composición de huecos, tracerías, y disposición de vitrales distribuidos a lo largo de sus muros de cerramiento (15). Posteriormente se realizó un modelo informático en tres dimensiones de cada muestra (Figura 1).

Para la obtención de datos lumínicos iniciales se ha utilizado finalmente el programa 3d Studio Max Design 2011 V-Ray con su aplicación informática dedicada al cálculo de iluminación interior de los espacios mediante un estudio a través de radiancia de los materiales. Este método permite tomar datos de iluminación indirecta fruto de la las radiaciones visibles producto de la luz directa del sol y la luz difusa de la atmósfera a partir de la componente reflejada interior (CRI) y la componente cielo (CC) a partir de un cielo cubierto representativo. Estos valores se toman a partir de la posición geodésica de cada edificio (Tabla 1). De ese mismo modo obtenemos datos de la iluminación directa resultante de la proyección de haz lumínico que atravesaría las vidrieras e impactaría sobre el suelo de la catedral en cada momento.

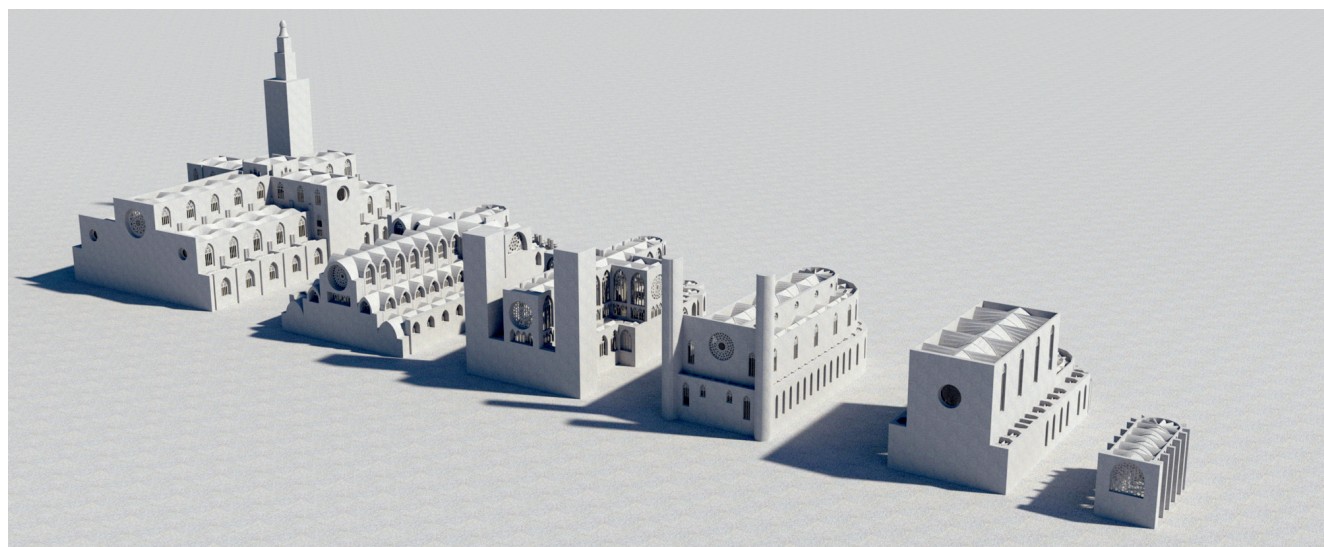


Figura 1. Modelado en 3D de las 6 muestras estudiadas.
Autor: Juan M. Medina.

Tabla 1. Referenciación de las catedrales con las radiaciones de cielos difusos a partir de la calculadora solar de *natural frequency*. Fuente: <http://naturalfrequency.com/>

Radiación horizontal difusa	Latitud	Longitud	Em en lux
Catedral de Sevilla	37.23-N	5.59-O	8.100
Catedral de Toledo	39.51-N	4.01-O	7.900
Catedral de León	42.36-N	5.34-O	7.600
Santa M. ^a del Mar (Barcelona)	41.23-N	2.11-E	7.700
Catedral de Gerona	41.59-N	2.49-E	7.600
Sainte Chapelle (París)	48.51-N	2.21-E	6.900

El material de textura utilizado en la reconstrucción del modelo 3D de la catedral fue un material mate, *stone granite gray speckled*, con un nivel de reflexión difusa. Para el vidrio de todas las muestras se seleccionó un factor de filtrado medio de las distintas vidrieras. Este vidrio se supone sin color para poder identificar perfectamente el efecto de la iluminación directa sobre el suelo, aportando imágenes de blanco sobre azul que esquematizan el mapa de la radiación proyectada sobre la planta.

El estudio hecho de cada muestra no podía ceñirse a una única toma de datos ya que esta obviaría la variabilidad provocada por los cambios de estación del año. Por ello se estudiaron las muestras para los 4 días «extremos» del año: los solsticios de verano e invierno y los equinoccios de primavera y otoño (21 de marzo, 21 de junio, 21 de septiembre y 21 de diciembre, respectivamente) y para cuatro horas diferentes cada día: las 10:00, las 12:00, las 14:00 y las 16:00 horas. Estas mediciones se complementaron con mediciones dentro de las catedrales en la actualidad, tomando como referencia los mismos días y a las mismas horas a las que estudiamos el programa informático, los solsticios y equinoccios desde 2008 hasta 2012.

Un factor determinante de la composición lumínica de las catedrales góticas es su color y por tanto, como complemento al conocimiento de la luz directa e indirecta se estudió para cada catedral un conjunto de vidrieras representativo de los siglos estudiados correspondientes al gótico (finales del S. XII, S. XIII y principios del S. XIV), midiendo en cada caso las proporciones de utilización de cada color dentro del conjunto de la vidriera.

4. FACTORES INTRÍNSECOS Y COYUNTURALES QUE MODULAN LAS CUALIDADES LUMÍNICAS

Una vez aplicado el método analítico sobre las muestras seleccionadas obtuvimos los principales indicadores que fundamentan la iluminación gótica. Estos indicadores son, por un lado, unos factores intrínsecos, propios de cada catedral e invariables, tal como explicaremos a continuación y por otro lado un factor coyuntural que no depende de la propia cate-

dral sino del uso que se haga de ella en la actualidad, el factor de distorsión (16), y que ha quedado excluido del presente estudio precisamente por su carácter coyuntural y variable.

Entre los indicadores intrínsecos tenemos, en primer lugar, los definidos por la forma y volumen concreto de cada catedral; a estos los denominaremos **factores de forma**. En segundo lugar, tenemos los indicadores que relacionan la cantidad de vano abierto en los muros con las superficies y volúmenes de espacio interior servido, son los denominados **factores de transparencia**, y en tercer lugar el indicador de color, que hemos llamado **factor de color**, de nuevo particular de cada catedral.

Tanto los factores de forma como los de transparencia se determinan según las dimensiones geométricas clave de cada catedral (Tabla 2).

Los dos primeros factores definidos, los factores de forma, son: el **factor de esbeltez** (Fe), que relaciona las anchuras de cada nave con la altura de las mimas y el **factor de altura de arranque de claristorio** (Fhc), que define la altura a la que arrancan los ventanales de la nave central.

En segundo lugar tenemos los factores de transparencia que a su vez se dividen en tres: el **factor de transparencia del muro** (Ftm), que define la relación entre vano y macizo en los cerramientos de fachada, el **factor de proyección lumínica** (Fpl), que relación a la cantidad de vano existente en el muro con respecto a la superficie en planta a la que sirve y el **factor de transparencia total** (FtT), que relaciona la cantidad de vano en relación con el volumen total del espacio servido.

Los dos factores de forma y los tres factores de transparencia influyen de manera definitiva tanto en la iluminación directa como la indirecta. Estos se obtienen de las dimensiones tomadas en la sección (Tabla 3).

Por último tenemos el referido como **factor de color**, que relaciona la cantidad existente de cada color de la gama de



Figura 2. Reflejo de la expresividad en la Catedral de León el 21 de Marzo a las 12:00 según proyecto original. Autor: Juan M. Medina.

Tabla 2. Cuadro de dimensiones lineales de las muestras estudiadas. Autor: Juan M. Medina.

Catedral	Dimensiones lineales (m)							
	Nº naves	B	H1	H2	H3	V1	V2	V3
Gerona	1-h	11,6	34,00			22,04		
Santa M. ^a del Mar	3-hhh	13,5	32,00			28,07		
Sevilla	5-hhhhh	10,97	35,77	25,14	25,14	15,70	11,26	10,31
Toledo	5-hhhhh	7,62	29,40	18,73	11,68	12,84	9,86	9,64
León	3-hhh	6,49	30,00	13,29		12,07	7,03	
Sainte chapelle	1-h	6,77	20,40			12,72		

Tabla 3. Resumen de dimensiones básicas de las muestras y factores de forma y transparencia resultantes. Autor: Juan M. Medina.

Catedral	Sup. Cerram. (m²)	Sup. Vanos (m²)	Sup. Planta (m²)	Sup. Muros (m²)	Volúmenes por crujía (m³)			
	ΣSc	ΣSv	ΣSplanta	ΣSm	VL1	VL2	VL3	VLT
Gerona	344,72	48,68	394,40	296,04	8.692,58			8.692,58
Sta. M. ^a del Mar	375,58	39,88	432,00	335,7	12.126,24			12.126,24
Sevilla	351,68	33,33	943,97	318,35	6.160,63	3.105,35	2.843,35	18.058,03
Toledo	204,05	35,77	455,75	168,28	2.876,52	1.407,24	857,98	7.406,96
León	177,21	59,53	280,95	177,21	2.350,03	606,35		3.562,73
Sainte Chapelle	122,8	57,93	138,11	64,87	1.756,73			1.756,73

Catedral	Factores de esbeltez (%)			Factores de transparencia (%)			Factor alt. Clarist.
	Fe1	Fe2	Fe3	Ftm	Fpl	Ftt	Fhc
Gerona	1,54			16,44	0,12	1,12	18,95
Sta. M. ^a del Mar	1,14			11,88	0,09	0,66	17,22
Sevilla	2,28	2,23	2,44	10,47	0,04	0,37	25,66
Toledo	2,29	1,90	1,21	21,26	0,08	0,97	20,19
León	2,49	1,89		33,59	0,21	3,34	13,56
Sainte Chapelle	1,6			89,30	0,42	6,60	3,86

Donde:

Volumen, nave central (VL1), lateral 2 (VL2) y lateral 3 (VL3): $VLn = Hn \times Vn \times B$

Volumen total: $VLT = \sum VLn$

Factor de esbeltez, nave central (Fe1), lateral 2 (Fe2) y lateral 3 (Fe3): $Fe = Hn / Vn$

Factor de transparencia de muro: $Ftm = (\sum Sv / \sum Sm) \times 100$

Factor de proyección lumínica: $Ftm = (\sum Sv / \sum Splanta) \times 100$

Factor de transparencia total: $Ftt = (\sum Sv / \sum VL) \times 100$

las vidrieras en proporción a la totalidad del vidrio que lo contiene. Este factor termina de acotar el filtrado lumínico de cada vidriera y, además, permite adjetivar como es la luz que atraviesa hacia el interior de los espacios en función de su temperatura de color.

5. DEFINICIÓN DE LAS CUALIDADES DE LA LUZ GÓTICA

Para definir las cualidades lumínicas góticas hemos comparado tanto las iluminaciones indirectas como las directas entre las distintas muestras estudiadas, ya sea para las catedrales en su totalidad como para los puntos singulares de las mismas. Estudiadas las muestras en profundidad y considerando sus particularidades como edificios góticos, se han detectado 5 cualidades fundamentales con las que se puede definir su iluminación. 4 de ellas son inherentes a su propia configuración formal, invariables por tanto y perfectamente definibles, mientras que la última es una cualidad coyuntural tal como veremos en su definición. Estas cualidades abarcan los matices propios de la iluminación gótica y la suma de sus partes

nos facilita una lectura de una realidad de otro modo intangible. Las cualidades detectadas son:

Expresividad: Se define como la capacidad que tiene un espacio gótico de recibir impactos de iluminación directa coloreada sobre el espectador. Se mide en superficie de luz proyectada directa sobre el suelo dividido entre la superficie total en planta (m^2 impactos/ m^2 planta).

Si entendemos que la catedral gótica «tenía que hablar», la medición de luz directa que es capaz de proyectar el conjunto de vidrieras sobre los espectadores (Figura 2), promediada a lo largo de todos los espacios de la catedral y los distintos días y horas del año censados, pasa a ser un valor fundamental para cualificar las catedrales (Tabla 4).

Tabla 4. Comparativa de la incidencia de la luz directa sobre la planta de las muestras: «Expresividad». Autor: Juan M. Medina.

Catedral	Relación luz directa / m^2 planta. "Expresividad".
Gerona	3,35
Sta. M. ^a del Mar	3,24
Sevilla	1,38
Toledo	1,40
León	6,72
Sainte Chapelle	78,31

Intensidad: Se define como la capacidad que tiene un espacio gótico de admitir luz en su interior de manera indirecta, es decir, iluminación ambiente reflejada.

Para obtenerla se ha medido la cantidad de iluminación indirecta recibida por cada muestra a lo largo de los distintos espacios de la catedral original en relación con la luz exterior, recreada por el programa informático según la ubicación geodésica de cada catedral y las componentes CRI y CC

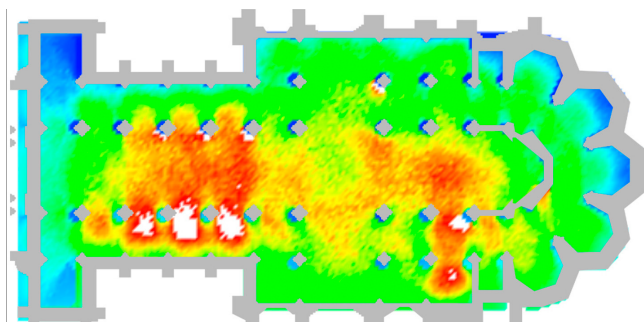


Figura 3. Reflejo de la intensidad en la Catedral de León el 21 de Marzo a las 12:00 según proyecto original. Autor: Juan M. Medina.

explicadas con anterioridad (Figura 3). La media ponderada de todos los datos obtenidos en los puntos censados (un punto de medición debajo de cada bóveda de crucería de la catedral), y a lo largo de los distintos días del año, nos arroja el valor de intensidad media global, al que hemos denominado «intensidad» (Tabla 5).

Tabla 5. Comparativa de la incidencia de la luz indirecta sobre la planta de las muestras: «Intensidad». Autor: Juan M. Medina

Catedral	Luxes medios totales promediados. «Intensidad».
Gerona	9,25
Sta. M. ^a del Mar	10,76
Sevilla	11,07
Toledo	11,30
León	19,44
Sainte Chapelle	70,00

Color: Es la cualidad que determina la simbología de la catedral estudiada y que matiza cómo es la temperatura de su luz interior.

La variedad de colores incluidos en las diferentes vidrieras del gótico clásico es muy amplia y la determinación exacta del colorido de cada una de las catedrales es, lógicamente, incompleta. Para poder establecer un método riguroso cuyo análisis hubiera arrojado conclusiones ciertas habría que haber censado la totalidad o gran parte de las vidrieras originales de las distintas muestras y estudiar sus coloridos. Tal empresa es imposible hoy día puesto que apenas existe un pequeño porcentaje de vidrieras originales en algunas de las muestras estudiadas, y las que hay, aun cuando en muchos casos responden al concepto gótico de distribución de cristales y emplomados, no así lo hacen en lo referente a las proporciones de color originales ya que muchos de estos han sido restaurados y variados.

Recorrido: La cuarta de las cualidades determina el sentido de crecimiento de la iluminación a lo largo de la nave central.

Una vez estudiados pormenorizadamente todos los recorridos de iluminación por naves y cómo estas se comportan a lo largo del día y de los diferentes días del año, se ha detectado que la iluminación varía según un «recorrido de vidrieras» particular en función de la forma de la catedral. La nave definida como parámetro comparativo ha sido la nave central ya que esta es la única que se repite en todas las catedrales y porque además contiene los puntos singulares de las mismas: los pies, el crucero y el presbiterio.

Distorsión: Se define como la cualidad que determina el estado actual de la iluminación en comparación con el estado inicial gótico.

Esta cualidad relaciona la luz original gótica con la existente en la actualidad y como veremos más adelante, queda excluida de la presente clasificación.

6. FACTORES QUE MODULAN LAS CUALIDADES LUMÍNICAS Y RANGOS QUE LAS ACOTAN

Cada una de las cualidades definidas depende de uno u otro modo de los factores explicados anteriormente, a continua-

ción se resume de qué factores depende cada cualidad y en que rangos de valores se mueve cada una.

Expresividad: Depende de una combinación de tres factores: el factor de transparencia total (FtT), el factor de proyección lumínica (Fpl) y el factor de altura de arranque de los ventanales del claristorio (Fhc). Si atendemos a sus factores, la catedral será más «expresiva» cuanto mayor sea su FtT, mayor sea su Fpl y menor su Fhc.

Así, León tiene el mayor factor de transparencia total (FtT = 3,34) de las catedrales españolas estudiadas y a su vez posee el mayor factor de proyección lumínica (Fpl = 0,21). Esto, unido a una altura de arranque de ventanales muy baja (Fhc = 13,56) hace que esta catedral sea la de mayor expresividad (6,72).

Sevilla, por el contrario, tiene el menor factor de transparencia total (FtT = 0,37) y también el menor factor de proyección lumínica (Fpl = 0,04) y sin embargo la altura de arranque de sus ventanales es muy alta (Fhc = 25,66). La combinación de estos tres factores le lleva a ser la catedral estudiada con menor expresividad (1,38).

Este análisis permite comprobar como algunas catedrales sísmicas como son Santa María del Mar y Gerona, poseen expresividades de 3,24 y 3,35 respectivamente a pesar de tener limitada su capacidad de transparentar sus muros, y son capaces de expresar su sentido gótico mejor que algunas catedrales francesas como es el caso de la catedral de Toledo, cuya expresividad apenas alcanza el valor de 1,40.

Los rangos definidos para la expresividad (porcentaje de impactos luminosos de vidriera sobre la superficie en planta total) serán:

- Muy Expresiva (ME); si $E > 4$
- Expresiva (E); si $2 > E > 4$
- Muda (M); si $E < 2$

Intensidad: Depende de una combinación de tres factores: el factor de transparencia total (FtT), el factor de transparencia de muro (Ftm) y el factor de altura de arranque de los ventanales del claristorio (Fhc).

De ese modo, la catedral será de intensidad alta cuanto mayor sea su FtT y en caso de factores de transparencia totales parecidos, cuanto mayor sea su Ftm y menor su Fhc. También influye, para que la intensidad sea mayor el tener un menor decalaje entre naves, aunque este aspecto influye en menor medida.

Así la Sainte Chapelle y León tienen los mayores factores de transparencia totales (FtT = 6,60 y 3,34 respectivamente) y eso determina que sean las de mayor intensidad media general (70,00 y 19,44 luxes medios respectivamente).

Toledo y Gerona tienen factores de transparencia totales similares (FtT = 0,97 y 1,12 respectivamente) y aunque el factor de transparencia de Gerona algo menor que el de Toledo (16,44 frente a 21,26) esto se corrige con una menor altura de arranque de claristorio por parte de Gerona (Fhc = 18,95 frente a los 20,19 de Toledo). Todo esto combinado hace que la intensidad de iluminación final comparativa entre ambas sea muy parecida. (11,07 y 11,30 luxes medios respectivamente).

Por último podemos observar como el factor de transparencia total de Sevilla ($FtT = 0,37$) condiciona su baja iluminación general, siendo la catedral de menor iluminación de las estudiadas (9,25 luxes medios).

Los rangos definidos para la intensidad (luxes totales medios a lo largo del año y de los distintos espacios de la catedral) serán:

- Alta (A); si $I > 15$
- Media (M); si $10 > I > 15$
- Baja (B); si $I < 10$

Color: Depende de un único factor, el factor de color (F_c).

Analizados los factores de color de los conjuntos de vidrieras del gótico clásico aún existentes en cada catedral estudiada hemos detectado que el color rojo es el color más utilizado con un 24,4 % sobre el total. El segundo color más utilizado es la grisalla, color blanquecino utilizado para resaltar volúmenes (16,4 %), seguido del azul oscuro, que sumado al azul claro alcanza las proporciones de utilización del rojo (24,3 %). Por tanto según el análisis realizado y también apoyados por los estudios que previamente se han realizado sobre las vidrieras por Víctor Nieto (17) y por el *Earth Modelling Group* de Canada (18), se puede establecer que el «simbolismo gótico» se centraba en dos colores fundamentales, el rojo y el azul oscuros (que en nuestro estudio suman un 48,7 % del total), combinados con el uso de la grisalla para resaltar algún volumen. Ellos dos matizan la entrada de la luz de manera definitiva, más que ningún otro y por eso se usarán de manera sistemática en el gótico clásico. Posteriormente, y a medida que entremos en el renacimiento, su uso se hará más residual

para, en su ausencia, poder introducir mayor cantidad de luz natural.

En un escalón inferior, tendríamos el amarillo y el verde que, en proporciones similares, se utilizan bastante menos que el rojo y el azul, en torno a un 50% menos (12,3 % de utilización). Su uso se circunscribe a la voluntad de completar el colorido y resaltar matices de las figuras, permitiendo a través de sus colores la entrada de rayos de luz directos que son los que inciden sobre el suelo. Es en estos colores donde la luz penetra, se define y, finalmente, impacta sobre el espectador. Por último los colores negro, violeta y marrón, con un régimen de utilización mucho más bajo en general, con valores que apenas superan el 4 ó 5 % de media.

Los rangos definidos para el color son:

- Color Gótico, si contienen más del 40% de color entre rojos y azules.
- Color no Gótico, si contienen menos del 40% de color entre rojos y azules.

Recorrido: Depende de una combinación de dos factores, la cercanía del crucero al presbiterio y la disposición de naves.

El primero de los factores es el que más influye en esta cualidad por lo que las naves serán **crecientes** cuando se halle su crucero cercano al presbiterio, es decir, aquellos cuyo brazo central no avanza más allá de su intersección con la nave transversal o incluso que no posea tal nave. También influye que los ventanales al este y al oeste del crucero estén cerca y sean capaces de iluminarlo, esto se dará con mayor facilidad

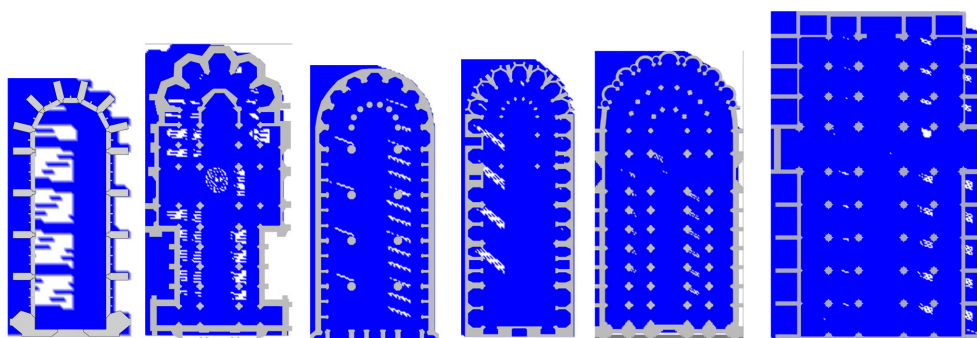


Figura 4. Expresividad de las muestras. De Izquierda a derecha: Sainte Chapelle y León (Muy expresivas), Sta. María y Gerona (Expresivas) y Toledo y Sevilla (Mudas). Medidas según recreación informática para el día 21 de junio del año 1600 a las 12:00 horas. Autor: Juan M. Medina.

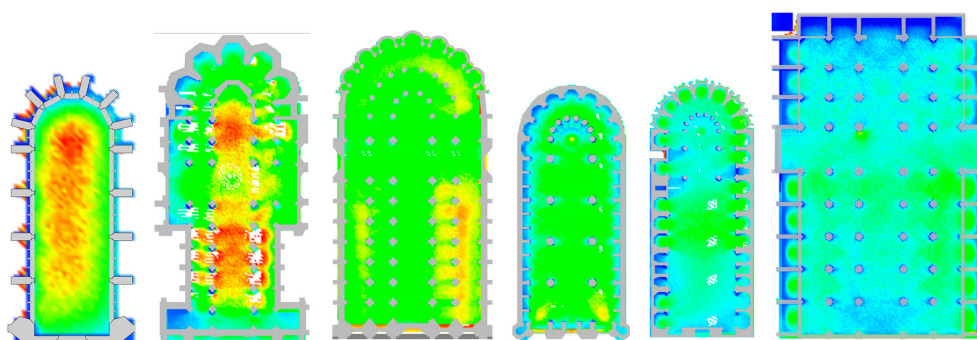


Figura 5. Intensidad de iluminación de las muestras. De Izquierda a derecha: Sainte Chapelle y León (Intensidad alta); Toledo, Sta. María y Gerona (Intensidad media) y Sevilla (Intensidad baja). Medidas según recreación informática con 3ds Max Design 2011 para el día 21 de Junio del año 1600 a las 12:00 horas. Autor: Juan M. Medina.

en las catedrales de una sola nave o en aquellas que, aun teniendo nave transversal, esta sea corta.

Los rangos definidos para el recorrido son:

- Recorrido creciente, si la iluminación aumenta de los pies hacia el crucero.
- Recorrido decreciente, si la iluminación disminuye de los pies hacia el crucero.

Distorsión: Depende de un único factor, el factor de distorsión (Fd) que, como referíamos anteriormente, depende de cuestiones coyunturales a cada momento y del uso de la iluminación artificial superpuesta de los espacios góticos (19). Es por esta razón por la que su estudio y definición queda excluida de la presente clasificación que relaciona cualidades de la iluminación en función de valores intrínsecos de los espacios catedralicios.

7. CLASIFICACIÓN DE CATEDRALES EN FUNCIÓN DE SU ILUMINACIÓN

Una vez definidas y determinadas las cualidades, y establecidos los factores que las modulan hemos definido los siguientes tipos de catedrales góticas en función de su iluminación:

Expresividad: de las muestras estudiadas son **muy expresivas** (rango de impactos sobre planta de más del 4%) la capilla de la Sainte Chapelle y la catedral de León. En segundo orden son **expresivas** (rango de impactos sobre planta entre 2 y 4%) la basílica de Santa María del Mar y la catedral de Gerona. Y en tercer lugar son **mudas** (rango de impactos sobre planta menor del 2%) la catedral de Toledo y la de Sevilla (Figura 4).

Intensidad: Aplicando el método de estudio, de las muestras estudiadas son de **intensidad alta** (más de 15 luxes medios totales) la catedral de León y la Sainte Chapelle de París. En segundo lugar son de **intensidad media** (entre 10 y 15 luxes medios totales) la catedral de Toledo, la basílica de Santa María del Mar y la catedral de Gerona. Y por último es de **intensidad baja** (menos de 10 luxes medios totales) la catedral de Sevilla (Figura 5).

Color: De las muestras estudiadas son de color **Gótico** (más del 40% de rojos y azules) las catedrales de Gerona, Toledo, León, Sevilla y la Sainte Chapelle, y de color **No gótico** (menos del 40% de rojos y azules) la basílica de Santa María del Mar (Figura 6).

Recorrido: Aplicando el método de estudio, de las muestras estudiadas son **crecientes** la catedral de Gerona, la basílica de Santa María del Mar y la Sainte Chapelle de París, y **decrecientes** las catedrales de Sevilla, Toledo y León.

8. CONCLUSIONES

La primera de las conclusiones destacada del estudio propuesto es que la arquitectura gótica no sólo busca introducir luz en los espacios sino controlarla y manipularla.

La arquitectura gótica, como evolución de un sistema arquitectónico completo, consigue de manera magistral introducir la luz en el interior de los espacios definidos por su arquitectura a través de la apertura de grandes vanos en su piel exterior. Sin embargo, los arquitectos medievales «atrapaban» su luz, la transfiguraban y matizaban para, una vez transformada, proyectarla sobre el espectador en forma de color. Por ello, las iglesias góticas no son un canto a la luz, son un canto al simbolismo del color. Este simbolismo se articula a través de un único elemento constructivo; **la vidriera**, y los colores más utilizados serán los rojos y azules oscuros, que responden a una voluntad expresa de matización y filtrado de la luz.

La demostración empírica de este hecho se ha determinado en el presente artículo con la recreación de condiciones iniciales de proyecto y la obtención de datos de iluminación indirecta que muestran como la arquitectura gótica es una arquitectura eminentemente oscura, de luz matizada, manipulada y coloreada.

La segunda de las conclusiones determina que las catedrales góticas son clasificables en función de su luz.

El grado de sensibilidad alcanzado por los maestros góticos en lo que se refiere al manejo de la luz matizada y coloreada permitió que, con regímenes bajos de iluminación, ésta

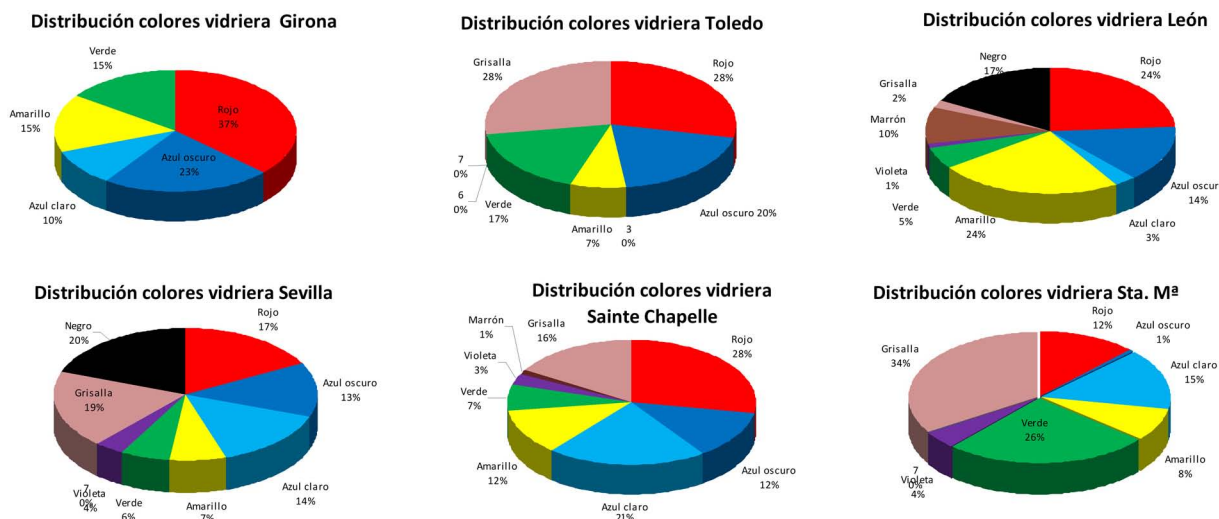


Figura 6. Distribución de colores en las vidrieras estudiadas: Gerona, Toledo, León, Sevilla y Sainte Chapelle (Color Gótico) y Sta. María (Color No gótico). Autor: Juan M. Medina.

se materializara de un modo cambiante e identificable a lo largo de los diferentes espacios que conforman las catedrales y las diferentes catedrales entre sí. Esto permite cuantificar los espacios catedralicios en función de su iluminación y, por tanto, clasificarlos en función de unas cualidades inherentes a la realidad de la luz gótica, como son:

La **expresividad**, o «capacidad de hablar» de las catedrales en función de su recorrido de vidrieras y su luz directa proyectada, siendo estas **Expresivas** o **Mudas**.

La **intensidad** de la iluminación indirecta de su interior, que determina si las catedrales son de iluminación **Baja**, **Media** o **Alta** según rangos identificables.

El **color** de sus espacios, simplificado según un estudio de la composición cromática de sus vidrieras. Estas quedan divididas en dos grupos, las de color **Gótico** o **No gótico** dependiendo de la proporción de rojos y azules existentes.

Y por último, el **recorrido** de la iluminación de su nave central, siendo estas **Crecientes** o **Decrecientes** según la forma de su arquitectura y si la iluminación se manifiesta con más intensidad a los pies o en el crucero de la catedral.

Según las cualidades descritas, el cuadro clasificatorio resultante del estudio de las muestras es el siguiente: (Tabla 6).

La tercera de las conclusiones sería que existen relaciones entre volumetrías, forma y estructura y su resultado luminoso.

Se han descubierto, a lo largo del análisis de estudio metodológico, indicadores inéditos fundamentales que influyen en la luminosidad de las catedrales góticas.

Estos factores engloban aspectos muy variados de la morfología de las catedrales pero fundamentalmente se enmarcan en tres grupos: en primer lugar están los **factores de transparencia**, como son el factor de transparencia de muro (Ftm), el factor de transparencia por volumen (FtT), y el factor de proyección lumínica (Fpl). En segundo lugar se encuentran los **factores volumétricos**, como son el factor de esbeltez (Fe), y el factor de altura de arranque del claristorio (Fhc). Por último existe un factor propio de cada catedral, es el **factor de color** de las vidrieras (Fc).

Todos ellos influyen en el comportamiento de entrada de la luz directa e indirecta, condicionan de manera determinante los comportamientos escenográficos de los espacios góticos y, combinados de manera adecuada, nos facilitan la comprensión de las cualidades lumínicas de las catedrales. Analizando las secciones de otras catedrales góticas españolas y, a falta de introducir sus variables en el filtro metodológico completo de reconstrucción en 3D, el presente estudio adelanta que, existe una posible aproximación a «cualidades esperadas» en función de los factores volumétricos determinados anteriormente.

Según estos factores y modulando lo que estos influyen en cada una de las cualidades, la clasificación extendida al resto de espacios góticos sería la siguiente: (Tabla 7).

Tabla 6. Clasificación de las catedrales estudiadas en función de sus cualidades lumínicas. Autor: Juan M. Medina.

Catedral	Expresividad (m ² luz proyec / m ² planta)			Intensidad (m ² luxes medios totales)			Recorrido (puntos nave central)		Color (% Rojo y Azul)		Denominación
	Muy exp. (ME)	Exp. (E)	Muda (M)	Alta (I)	Media (II)	Baja (III)	Crec. (C)	Decr. (DC)	Gótico	No gótico	
	Ex>4	2<e<4	Ex<2	II>15	10<i<15	II<10	Si/No	Si/No	R+A>40%	R+A<40%	
Gerona		x			x		x		x		Tipo E-II-C-ND-Gót
Sta. M. ^a		x			x		x			x	Tipo E-II-C-ND-No gót
Sevilla			x			x		x	x		Tipo M-III-DC-D-Gót
Toledo			x		x			x	x		Tipo M-II-DC-D-Gót
León	x			x				x	x		Tipo ME-I-DC-D-Gót
Sainte Chapelle	x			x			x		x		Tipo ME-I-C-ND-Gót

Tabla 7. Extensión de la Clasificación al resto de catedrales españolas. Autor: Juan M. Medina.

Catedral	Fecha const. Gótica	Naves y decalaje	Clasificación
Burgos	1221	3-hHh	E-II-C
León	1253	3-hHh	E-III-C
Palma De Mallorca	1253	3-hHh	M-II-C
Barcelona	1298	3-HHH	M-II-C
Santa María Del Mar	1328	3-HHH	E-II-C
Gerona	1312	1	E-II-C
Pamplona	1397	3-hHh	M-II-C
Palencia	1321	3-hHh	M-II-C
Sevilla	1403	5-HHhHH	M-I-C
Toledo	1227	5-HHhHH	M-II-C
Segovia	1523	3-hHh	M-II-C
Ávila	1190	3-hHh	E-III-C
Zamora	1176	3-hHh	E-I-C
Burgo de Osma	1232	3-hHh	E-II-C
Vitoria	S.XIII	3-hHh	M-II-C
Tarragona	S.XII	3-hHh	M-I-C

REFERENCIAS

- (1) Viollet-Le Duc, E., Rabasa, E., García, R. (2000). *La construcción medieval: el artículo «Construcción» del Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Madrid: Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo Instituto Juan de Herrera.
- (2) Ortega y Gasset, J. (2009). *La deshumanización del arte*. Madrid: Editorial Castalia.
- (3) Nieto, V. (1978). *La luz, símbolo y sistema visual. El espacio y la luz en el arte gótico y del renacimiento*. Madrid: Ediciones Cátedra (Grupo Anaya).
- (4) Escrig, F. (2000). La estructura gótica. O de cómo las fuerzas encontraron su camino. En Graciani, A. *La técnica de la arquitectura medieval*. Sevilla: Servicio de Publicaciones Universidad de Sevilla.
- (5) Jantzen, H. (1979). *La arquitectura gótica*. Buenos Aires: Nueva Visión.
- (6) Simson, O.V. (2003). *The Gothic Cathedral: Origins of Gothic Architecture and the Medieval Concept of Order*. Londres: Textbook Publishers.
- (7) Castro, A. (1996). *Historia de la construcción medieval. Aportaciones*. Barcelona: Ediciones UPC, S.L.
- (8) Medina, J.M. (2011). Investigación en ausencia de fuentes. Estudio de la distribución y cuantificación de la luz en la Catedral de Toledo. *Actas de las IV Jornadas Internacionales sobre investigación en Arquitectura y Urbanismo*. Valencia: Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- (9) Honnecourt, V. (2001). *Cuaderno*. Madrid: Ediciones Akal.
- (10) Simson, O.V. (1993). *La catedral gótica*. Madrid: Alianza Editorial.
- (11) Cassinello, M.J. (2005). Influencia de los terremotos históricos en la construcción de las catedrales góticas españolas. *Annali di architettura*, (17): 9-20.
- (12) Mas-Guindal, A. (1996). Criterios de intervención y recomendaciones de diseño a sismo en las estructuras de patrimonio histórico. *Informes de la Construcción*, 48(443): 5-14. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1996.v48.i443.1002>.
- (13) Medina, J.M. (2011). Influencia de los diseños estructurales antisísmicos de las Catedrales Góticas españolas en la distribución de su luz interior. *Actas de las Jornadas Internacionales de investigación en construcción, Hitos Estructurales de la Arquitectura y la Ingeniería*. Madrid: CSIC.
- (14) Cassinello, M.J. (2003). *Trazado y estabilidad de la arquitectura gótica* (Tesis doctoral no publicada). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (15) Más-Guindal, A., Clemente, C., Cases, G., Quintana, J.L. (1988). Támara: Seguimiento y Diagnóstico de un monumento. *Informes de la Construcción*, 39(393): 17-34, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1988.v39.i393.1602>.
- (16) Medina, J.M. (2013). *La luz natural como generadora del espacio arquitectónico de la catedral gótica* (Tesis doctoral no publicada). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (17) Nieto, V. (2003). Aspectos técnicos e iconográficos de las vidrieras de las capillas de la catedral de León. *Actas del Congreso Internacional La Catedral de León en la Edad Media*. León: Universidad de León.
- (18) Simmons, C., Mysak, L. (2010). Transmissive properties of Medieval and Renaissance stained glass in European churches. *Architectural Science Review*, 53(2): 251-274, doi: <http://dx.doi.org/10.3763/asre.2009.0073>.
- (19) De Luxán, M. (1989). Restauración de la iluminación natural. *Informes de la Construcción*, 40(399): 37-41, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.1989.v40.i399.1513>.

* * *