

# La cúpula oval de la iglesia de Santa Clara de Quito y su sistema de contrarresto

Fabián S. López Ulloa  
Rosa Ana Guerra Pestonit  
Ana Angélica López Ulloa

La cúpula oval de la iglesia de Santa Clara situada sobre su nave central (figura 1), posee unas notables dimensiones que, junto con su propia forma y características constructivas de singular factura, se constituye en un elemento distintivo entre las iglesias coloniales de Quito. Su origen data del siglo XVII con una reconstrucción en 1868 y ha sido intervenida en varias ocasiones. La particularidad de su forma se aparta del canon constructivo de la época, ya que como se detalla más adelante, más que una cúpula oval, es una bóveda de cañón flanqueada por dos semicúpulas (figura 2) construida en ladrillo, con unas dimensiones que «no son indiferentes ya que prácticamente cubre la mitad de la nave central de la iglesia, inscribiéndose en una planta rectangular de aproximadamente 15 metros por 8 metros y una altura interior de 18 metros desde la base de la iglesia» (López 2019, 565), (figura 3).

En la presente comunicación, nos acercamos a descubrir el comportamiento estructural de la cúpula a través de su estudio con la teoría del Análisis Límite de Estructuras,<sup>1</sup> contribuyendo así a la difusión de esta herramienta de estudio para las estructuras abovedadas de Quito, que son numerosas, con miras más bien a la prevención de intervenciones quizás no necesarias y peor aún si éstas incluyen un componente demasiado invasivo de consolidación estructural con otro tipo de materiales, que muy por el contrario pueden agravar situaciones que en muchos de los casos son poco extremas. Intervenciones que además terminan alterando la propia estructura, la funcionalidad,

y el comportamiento estructural característico de este tipo de construcciones, cuya estabilidad ha quedado demostrada a lo largo de los siglos.

Estas estructuras, a pesar de situaciones extremas como los sismos, han tenido un notable comportamiento, llegando a nuestro tiempo, con muy escasos colapsos (figura 4) respecto al gran número de bóvedas y cúpulas que si han resistido a estos embates naturales<sup>2</sup> (figura 5), no sin dejar de desconocer que los sismos son un componente importante ante los cuales hay que estar alerta con una necesaria prevención.

Para este estudio ha sido de mucha utilidad el levantamiento arquitectónico realizado con escáner láser y fotogrametría, a partir de los cuales se ha obtenido los dibujos correspondientes que idean la forma real de la cúpula, para poder conocer su comportamiento estructural, teniendo en los resultados algunas novedades que son las que se presentan a continuación, previo a un marco teórico que nos revela el significado y la utilidad de esta herramienta de análisis.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### Marco teórico

La estructura de la cúpula se analiza dentro del marco del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, en concreto, la adaptación realizada por Heyman (1966; 1999) de la Teoría Plástica a este tipo de estructuras.

Para que los teoremas del cálculo plástico se puedan aplicar a las estructuras de fábrica el material



Figura 1  
Quito, iglesia de Santa Clara (Foto de los autores)



Figura 2  
Quito, iglesia de Santa Clara, cubiertas (Foto de los autores)

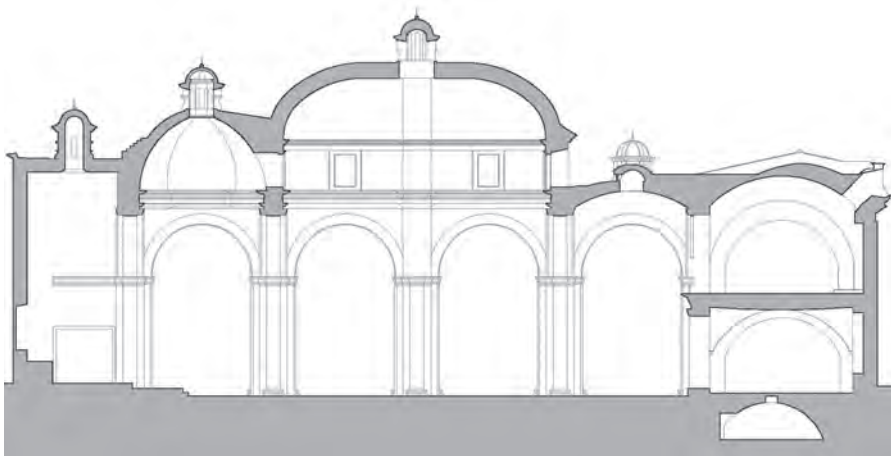


Figura 3  
Quito, iglesia de Santa Clara, sección longitudinal ([CIMPC 1993] López 2018)

debe cumplir tres hipótesis: 1) no resiste tracciones, 2) la resistencia a compresión es infinita, y 3) el fallo por deslizamiento no es posible. La primera de estas condiciones juega ligeramente a favor de la seguridad, pues las fábricas pueden tener una pequeña capacidad de tracción. Sin embargo, la segunda y la tercera no son estrictamente ciertas y su asunción, en principio, sería contraria a la seguridad.

Si bien la resistencia a compresión no es realmente «infinita», las tensiones a las que están sometidas las fábricas son extremadamente pequeñas, incluso en las construcciones más desafiantes.<sup>3</sup> La resistencia del material no será, por tanto, un factor determinante y la segunda hipótesis se puede aplicar con seguridad (salvo en el caso poco frecuente de una excesiva concentración de tensiones). Respecto al deslizamiento, la precompresión ejercida por el peso propio, unida a la rugosidad del material, hace que el deslizamiento sea improbable. Debe comprobarse, sin embargo, que la inclinación de los esfuerzos en las juntas se mantiene dentro del ángulo de rozamiento admisible.

De los tres teoremas fundamentales de la Teoría Plástica, del de la Seguridad, o del Límite Inferior, resulta el teorema fundamental para el cálculo de las estructuras de fábrica. Si puede hallarse un estado de tensiones en equilibrio con las cargas exteriores que no viole las condiciones de resistencia del material (para las fábricas, que no existan tracciones), la es-



Figura 4  
Quito, iglesia del Carmen Alto, cúpulas colapsadas, terremoto de 1868 (Fotografía Nacional 2018)



Figura 5  
Quito, panorámica Centro Histórico (Foto de los autores 2018)

estructura será estable. No se busca el estado «real» de la estructura, solo uno de los muchos posibles. La estructura adoptará ese estado de equilibrio antes de colapsar.

En palabras de Heyman (1999,14): «desde un punto de vista antropomórfico, ... si el proyectista puede encontrar un modo en el que la estructura se comporte satisfactoriamente, con toda seguridad la estructura por sí misma puede encontrarlo también». El corolario de este teorema es que, en una estructura de fábrica es suficiente con encontrar una línea de empujes que se mantenga dentro de los límites de la estructura, sin crear un mecanismo, para poder afirmar que esta no colapsará.

La seguridad de la estructura se convierte en un problema geométrico y vendrá dada por la distancia de la línea de empujes al borde de la estructura para las distintas secciones críticas. Para arcos, Heyman propone un coeficiente de seguridad geométrico que resulta de la comparación entre el espesor total del arco real y el espesor del arco límite (Heyman 1999, 24-25). Para estribos, Huerta propone un valor equiparable que resulta de dividir la mitad del ancho del estribo entre la desviación de la resultante respecto al punto medio (Huerta 2004, 106-107). El menor de los coeficientes de seguridad encontrado será, al menos, el de la totalidad de la estructura.<sup>4</sup> El valor de estos coeficientes se determina de forma empírica. Para arcos se estima que debe ser mayor de 2 y para estribos, mayor que 4 (Huerta 2014, 107).

Una segunda consecuencia del Teorema del Límite Inferior es que permite simplificar un problema complejo como es el de la transmisión de los esfuerzos en una estructura tridimensional. La estructura se puede descomponer en un conjunto de rebanadas susceptibles de ser analizadas bidimensionalmente mediante el conocido como «método de los cortes».<sup>5</sup> Si todas las rebanadas son estables, con más razón lo será la estructura completa. Este método se ha aplicado en el análisis de la cúpula de Santa Clara.

### Geometría de la cúpula

Aunque descrita como de forma «oval», las proporciones de la cúpula de Santa Clara sugieren la forma de una bóveda de cañón central flanqueada por dos semicúpulas (figura 6). De hecho, en la sección transversal se aprecia que la parte central debió de ser diseñada con sección horizontal (en la actualidad está ligeramente hundida), carente de la curvatura habitual en las secciones de otras cúpulas ovales.

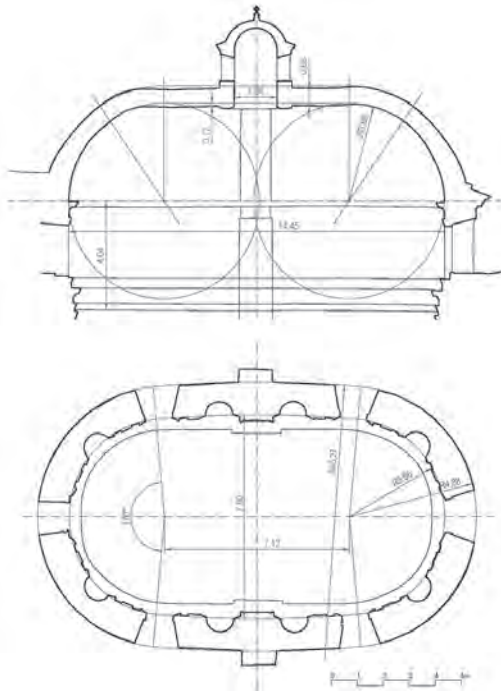


Figura 6  
Planta y sección longitudinal de la cúpula (Dibujo de los autores 2018)

La cúpula sostiene una linterna y se asienta sobre un tambor de aproximadamente 4 metros de altura. Las luces son de 14,45 y 7,60 metros en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. La franja central en la dirección transversal está reforzada por un nervio con un ancho aproximadamente igual al hueco del óculo de la linterna. Este nervio sobresale por el interior y exterior y que se ensancha por el exterior del tambor formando dos pequeños contrafuertes.

La sección horizontal del tambor tiene forma oval y en un análisis detallado a partir del escaneo se pueden identificar los arcos que componen el óvalo exterior, de radios 4,88 y 45,27 metros. En la planta de la cúpula no es posible identificar la pauta oval si bien se percibe un ligero aumento de su luz en la parte central. El espesor medio del tambor es de algo más de 1,20 metros. El espesor mínimo de la cúpula no se

ha podido determinar con exactitud, pero se estima en 0,66 metros.<sup>6</sup> La sección longitudinal muestra el descenso de la parte central de la cúpula de unos 12 centímetros respecto a un perfil teórico que se ha supuesto horizontal.

### Características de los materiales

La cúpula está construida con fábrica de ladrillo. En los ensayos realizados para el estudio estructural elaborado en 1993 el valor promedio del peso específico fue de 1,6 T/m<sup>3</sup>, con una desviación estándar de 0,2 T/m<sup>3</sup>. En ese estudio se adoptaron los valores de 1,6 T/m<sup>3</sup> (17,7 kN/m<sup>3</sup>) para las cubiertas y 1,75 t/m<sup>3</sup> (17,2 N/m<sup>3</sup>) para los muros (CIMPC 1993). En el estudio que aquí se presenta, sin embargo, se ha tomado el valor más conservador del peso habitual de una fábrica de ladrillo: 17,5 kN/m<sup>3</sup>.

### Modelización y cálculo

Como se indica arriba, el método de los cortes ofrece una herramienta que permite simplificar el cálculo del estado de equilibrio dentro de la seguridad que proporciona el Teorema del Límite Inferior. Huerta (2007) ha estudiado en profundidad las cúpulas ovales y propone la aplicación del método de los cortes manteniendo el mismo despiece que se aplica a las cúpulas de revolución: arcos de lunas opuestas generado por planos meridianos. La razón se basa en que la sección resulta de la transformación afín de la semicircular y en cúpulas sometidas a su peso propio la línea de empujes sufre la misma transformación geométrica y, por tanto, la proporción entre distancias que constituye el factor geométrico de seguridad se mantiene constante (figura 7).

La de Santa Clara no se puede interpretar como una bóveda oval que resulte del «estiramiento» de una cúpula semiesférica como las analizadas por Huerta. En este caso se ha utilizado el método de los cortes, pero con una propuesta de partición diferente. La cúpula de Santa Clara se ha dividido en sus componentes básicos: una bóveda de cañón y dos semicúpulas sobre sus correspondientes partes del tambor (figura 8). La linterna se ha reducido a su peso aplicado sobre la franja de la bóveda que la soporta.

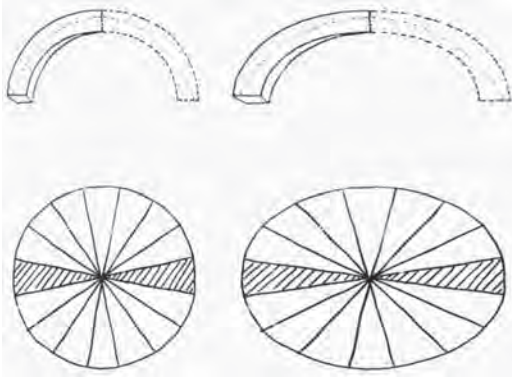


Figura 7  
Método de los cortes aplicado a cúpulas ovales (Huerta 2007)



Figura 9  
Franja central de la bóveda de cañón para la que se calcula la línea de empujes (Dibujo de los autores 2018)

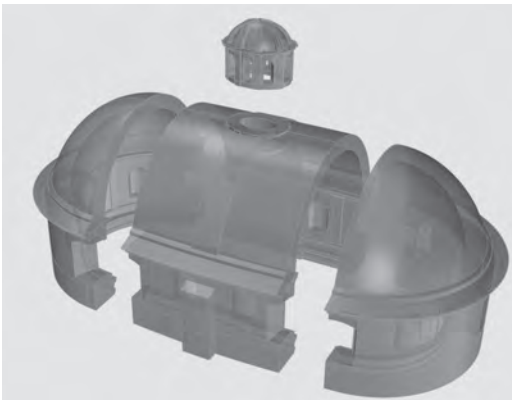


Figura 8  
Modelo conceptual de la división de la cúpula (Dibujo de los autores 2018)

Para el análisis de la bóveda central se han estudiado dos secciones transversales. La primera es la franja central en la zona reforzada, que se corresponde con el ancho de la luz del óculo (1,64 m) y que absorbe la mayor parte del peso de la linterna (figura 9). La segunda es una franja lateral de esta bóveda, con menor espesor y sin el peso de la linterna (figura 11).

Se ha podido trazar una línea de empujes en el interior de la sección, con un coeficiente geométrico de seguridad en la base del tambor (la sección más crítica) de 2,5 (figura 10).

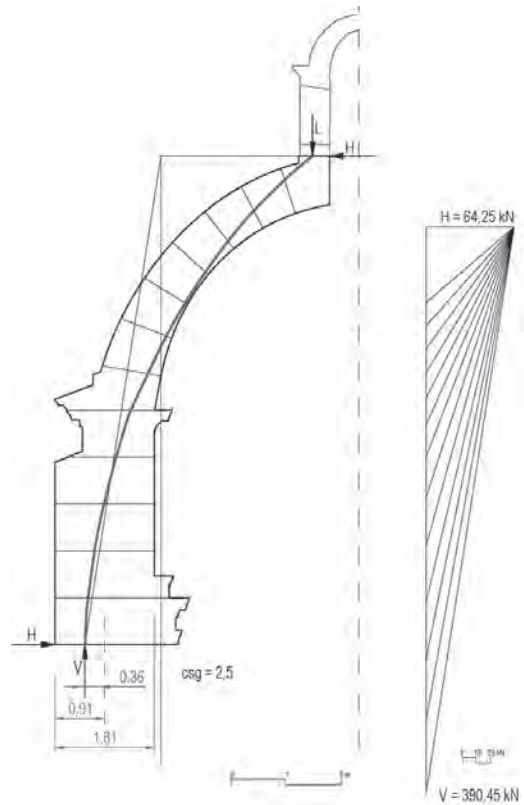


Figura 10  
Línea de empujes de la franja central de la bóveda de cañón (Dibujo de los autores 2018)



Figura 11  
Franja lateral de la bóveda de cañón que se analiza (Dibujo de los autores 2018)

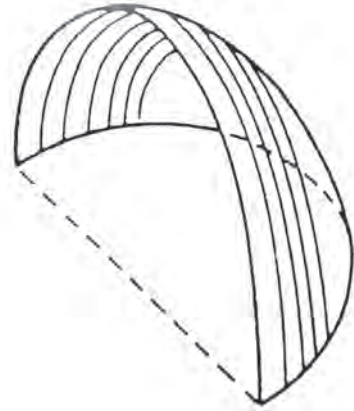


Figura 13  
Estabilidad de una semicúpula dividida en arcos paralelos (Heyman 1995, 45)

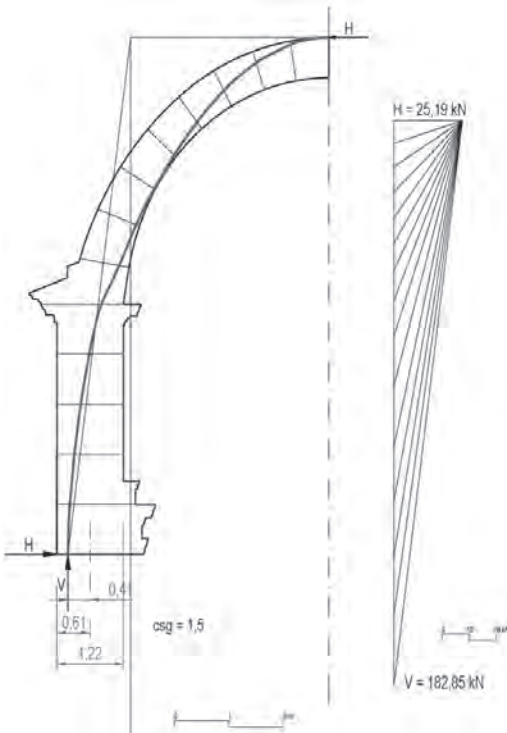


Figura 12  
Línea de empujes de la franja lateral de la bóveda de cañón (Dibujo de los autores 2018)

Para la franja lateral de la bóveda el equilibrio resulta más comprometido (figura 11). Se ha estudiado una franja de 1 m de ancho y, si bien se ha podido encajar una línea de empuje en el interior de la fábrica, el coeficiente geométrico de seguridad en el base del tambor no supera el valor de 1,5 (figura 12).

Respecto a las semicúpulas, la estabilidad de estas estructuras ha sido extensamente discutida por Heyman (1995, 44-48). En su análisis concluye que una semicúpula con el suficiente espesor (algo mayor que el 10% de su radio) es estable ya que se



Figura 14  
Luna de la semicúpula que se analiza (Dibujo de los autores 2018)

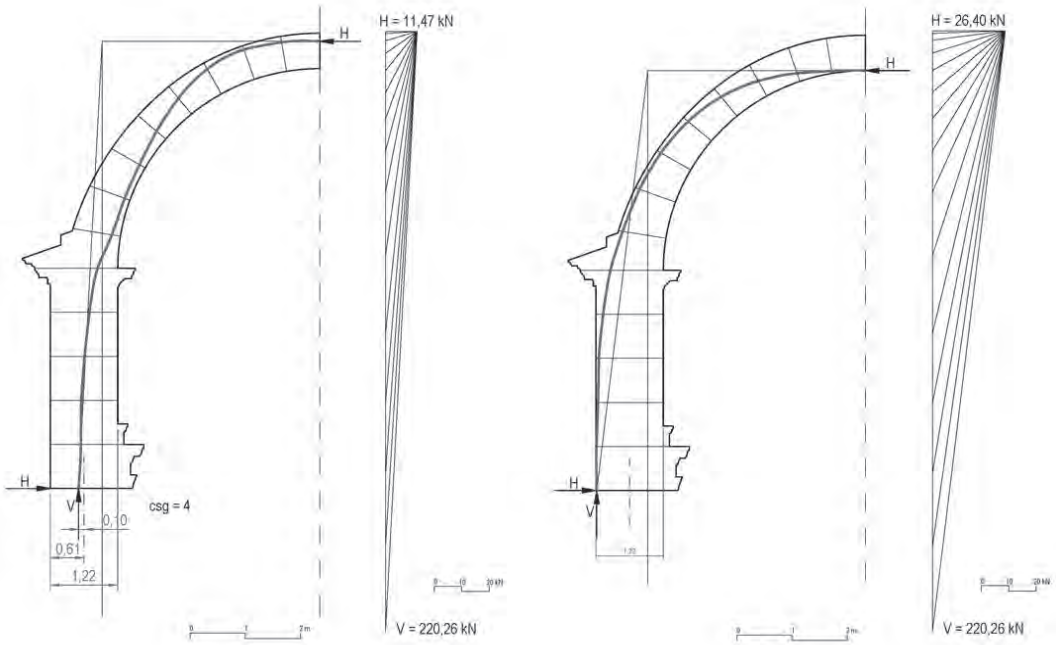


Figura 15  
 Líneas de empujes en una luna de la semicúpula. Izquierda: coeficiente geométrico de seguridad en la base del tambor de 4; derecha: empuje horizontal máximo en estado límite (Dibujo de los autores 2018)

puede descomponer en una serie de arcos semicirculares paralelos y cada uno de ellos sería estable (figura 13). El borde vertical libre puede soportar grandes esfuerzos de compresión en su parte superior.

Se ha analizado una luna o gajo de la semicúpula con una abertura de 20° (figura 14). La línea de empujes se ajusta holgadamente dentro de la sección. Se ha calculado su trayectoria para un coeficiente geométrico de seguridad de 4 en la base del tambor. Alternativamente, se ha comprobado el empuje máximo horizontal que soportaría en un estado límite. Para la luna de 20° este empuje es de 26,40 kN. Sumando las resultantes de las distintas lunas, la semicúpula podría resistir un empuje horizontal máximo de 152 kN en su parte superior (figura 15). El empuje horizontal que transmite el anillo de compresión que se forma alrededor del óculo es mucho menor y su valor se encuentra por debajo del calculado en el primero de los casos.

**CONCLUSIONES**

Este estudio muestra un método para afrontar el análisis de la estabilidad de la cúpula con una geometría como la de Santa Clara, que se aparta de las formas de las cúpulas ovales habituales.

El método de los cortes, permite descomponer la estructura en bloques y analizarlos por separado. Con este procedimiento se ha podido encontrar una solución de equilibrio si bien los coeficientes de seguridad resultan muy justos para una estructura de este tipo.

Las limitaciones del levantamiento no han permitido aquilatar la contribución de las bóvedas que rodean la cúpula a su estabilidad. La sección que se ha considerado de la base del tambor posiblemente se podría situar en una posición más elevada, lo que arrojaría resultados más favorables.

El nervio de refuerzo de la sección transversal resulta imprescindible para la transmisión del peso de

la linterna. Incluso sin esa carga, la sección no reforzada no alcanza un coeficiente de seguridad suficiente para sostener su peso propio.

Frente a la debilidad de la parte central de la cúpula, los casquetes laterales son muy estables y resisten con holgura los empujes horizontales que resultan del anillo de compresión que se forma alrededor del óculo.

## NOTAS

1. La presente comunicación continúa la presentada en el III Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción, realizado en la ciudad de México (López F. 2019, 565), en la que se dio a conocer una historiografía de la iglesia del monasterio de Santa Clara de Quito, reconociendo sus particularidades constructivas que a través de su cúpula oval la hacen distintiva del resto de iglesias coloniales de la ciudad.
2. Entre diez de las más significativas construcciones coloniales del Centro Histórico de Quito se han catalogado más de ochenta cúpulas y cupulines (López A. 2019, 57).
3. Huerta (2004, 28-29) comenta y tabula las tensiones máximas de las grandes estructuras de fábrica. Los resultados se mantienen uno o dos órdenes de magnitud por debajo de las tensiones de rotura.
4. Sobre la adaptación de la Teoría Plástica al análisis de estructuras de fábrica ver Heyman (1999; 2011). Se han publicado dos volúmenes con la recopilación traducida al español de parte de sus artículos en los que analiza las peculiaridades de distintos tipos de estructuras (Heyman 1995; 2015).
5. El uso del método de los cortes para el análisis de bóvedas se inicia con Frezier en 1737. Poleni lo utilizó en su análisis de la cúpula de San Pedro en 1743. Sobre su utilización posterior y vigencia véase Huerta (2004, 442-449; 528-530).
6. No ha sido posible establecer con precisión el espesor en la parte alta de la cúpula debido a dificultades técnicas. La estimación del espesor se ha deducido de la geometría del resto de la estructura.

## LISTA DE REFERENCIAS

- CIMPC. 1993. Diseño estructural del reforzamiento de la cubierta y muros de la iglesia del Monasterio de Santa Clara de Quito, Convenio Ecuador-España, Quito: Centro de Investigación de la Memoria y el Patrimonio Cultural, [DCS-INF-04569].
- Fotografía Nacional. 2018. Santa Clara - después del derrumbe del campanario por el terremoto de 1868, Quito - Pichincha - Ecuador, 1874. Fotografía Patrimonial. Recuperado de <http://www.fotografianacional.gob.ec/web/app.php/es/galeria/element/5540>
- Heyman, Jacques. 1966. «The Stone Skeleton». *International Journal of Solids and Structures* (2):249-279.
- Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica: colección de ensayos*. Editado por Santiago Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Heyman, Jacques. 2011. *Teoría básica de estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Edición original, 2008. *Basic structural theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. Edición original, 1995. *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Heyman, Jacques. 2015. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Vol. 2. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas: geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, Santiago. 2007. «Oval Domes: History, Geometry and Mechanics». *Nexus Network Journal* 9 (2): 211-248.
- López, Ana y F. López. 2019. *Arcos, bóvedas y cúpulas, arquitectura colonial de Quito*, Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- López, Fabián y A. López. 2019. «Análisis de las bóvedas y cúpulas de la iglesia del Monasterio de Santa Clara de Quito, Ecuador». *III Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción, Ciudad de México*, 21-25 de enero de 2019. Vol. 1. Del Cueto, Juan et al (eds.). Madrid: Instituto Juan de Herrera.