

## LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO DEL PÓRTICO DE LA FACHADA PRINCIPAL DE LA CATEDRAL DE BARCELONA

Eduardo López Azurmendi  
Operador fotogramétrico  
SERFOCAR, S.C.C.L.  
C/ Saragossa, 95-97, entlo. 3ª  
08006 Barcelona  
Laboratorio de Cartografía y Fotogrametría, E.P.S.E.B.  
Avda. Doctor Gregorio Marañón 44-45  
08028 Barcelona  
Tutores: Felipe Buill Pozuelo  
Javier Muñoz Capilla

**Palabras clave:** fotogrametría terrestre, Catedral, restitución.

Este proyecto forma parte del levantamiento completo de la fachada principal de la Catedral de Barcelona, desarrollado desde el Laboratorio de Cartografía y Fotogrametría de la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona y la empresa SERFOCAR, S.C.C.L.

El proyecto parte de una primera fase del proceso de levantamiento fotogramétrico ya realizada. Esta parte previa esta compuesta por el proceso de toma fotográfica y el proceso topográfico.

El objetivo del presente proyecto es la obtención de un modelo 3D del pórtico de la fachada principal de la catedral de Barcelona del tiene como parte central y de más detalle el pórtico en sí, incluyendo su rosetón superior. La zona de restitución se extiende hasta los dos contrafuertes incluyendo los dos ventanales inferiores.

La escala de presentación será 1:50.

El proyecto consta de tres fases:

La primera fase es la de ajuste del bloque, donde se obtienen los parámetros de orientación de cada haz.

La segunda fase es la de restitución. En esta fase se procede al dibujo en tres dimensiones de la parte de fachada a restituir.

La tercera es la de edición donde se perfilan y terminan los resultados del dibujo. Se eliminan zonas ocultas y se comprueban los puntos libres.

Este proyecto es la primera restitución de la Catedral, y a su vez será utilizado para trabajos de restauración de la fachada y estudios sobre los métodos y técnicas utilizados en su diseño y construcción por historiadores.

## 1. Historia y emplazamiento

La Catedral de Barcelona se encuentra en el Distrito número uno de la ciudad de Barcelona, más concretamente en el Barrio Gótico de la ciudad. Ubicada en frente de la Avinguda de la Catedral, entre las Ramblas y Vía Layetana, se alza en el Pla de la Seu haciendo manzana con las calles de Sta. Llúcia, Bisbe y Comtes.

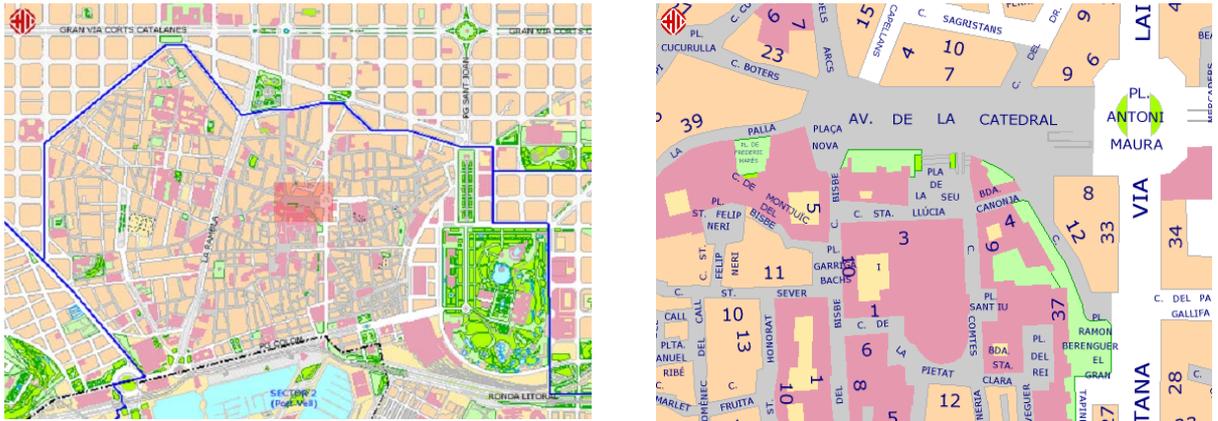


Figura 1: Distrito de Ciutat vella y ampliación de la zona

Las Obras de la actual Catedral gótica se iniciaron el 1 de Mayo de 1298 y se dieron por prácticamente acabadas a mediados del siglo XV, ya que se construyó la parte inferior del cimborrio que fue cubierto por un artesonado de madera, y a la vez se abrieron -con unos arcos más amplios- las capillas de los pies de la iglesia. Esta fue cerrada con un simple muro (año 1417) esperando la construcción de la fachada. Esta espera fue de algo más de cuatro siglos, y su aspecto fue el que aparece en la fotografía (año 1887).



Figura 2: Fotografía de la fachada en el 1887

## 2. Trabajos previos

### 2.1 Fase fotográfica

Las fotografías se realizaron con una cámara semimétrica de la casa Rollei, modelo Rolleiflex 6006 con un résau de 11x11 cruces (retículo de calibración con malla de 5 mm.). La película utilizada ha sido de diapositivas RDPIII-Fujichrome Provia 100F ASA con formato de 6x6 cm.



Figura 3: Cámara semimétrica Rollei 6006

Se usaron dos objetivos con dos focales distintas: Distagon 40.49 mm y Planar 80.15 mm. Finalmente se utilizó el de 80.15 mm para conseguir una escala mayor.

La toma se realizó el 13 de Mayo de 2003 desde una grúa Liftlux Tisora situada en el Pla de la Seu desde una distancia entre 16 y 18 m. La base de la toma fotográfica fue de 4.5 m, el recubrimiento longitudinal entre un 60% y un 70% aproximadamente y el transversal de un 30%.

Fueron usados 22 carretes (12 fotogramas cada uno), de los cuales hemos utilizado para este proyecto 5 de ellos: 3, 5, 7, 9 y 11. Todas las fotos de la mitad izquierda de la fachada se tomaron en sombra ya que estaba nublado, esta luz difusa y homogénea es buena para la toma. Pero al llegar la cobertura a la parte derecha del pórtico central salió el sol, lo cual obligó a cubrir de nuevo la zona del pórtico con fotos de sol porque se hace difícil la visión estereoscópica de un modelo compuesto por una foto de sombra y una de sol. Los carretes de sombra son el 3, el 5 y el 7, se expusieron a una velocidad de 1/125 seg. y con una apertura de diafragma de 4. Los de sol se expusieron a la misma velocidad pero con el diafragma más cerrado debido a la mayor entrada de luz: el carrete 9 a 5.6 y el 11 a 8.

La cobertura fotográfica consta de tres pasadas que cubren la fachada a excepción de los campanarios y el cimborrios que se incorporaran como modelos independientes al futuro proyecto. Los fotogramas que cubren la parte de la fachada perteneciente a mi proyecto son 23 son:

- Pasada 1: 1\_04, 1\_05, 1\_06, 1\_06\_B y 1\_07 ( 3 modelos)
- Pasada 2: 2\_02, 2\_03, 2\_04, 2\_05, 2\_06, 2\_06\_B, 2\_07, 2\_08 y 2\_09 (7 modelos).
- Pasada 3: 3\_02, 3\_03, 3\_04, 3\_05, 3\_06, 3\_06\_B, 3\_07, 3\_08 y 3\_09 (7 modelos).

Los fotogramas 1\_06\_B, 2\_06\_B y 3\_06\_B son los tomados en sol y substituyen a los de sombra 1\_06, 2\_06 y 3\_06 respectivamente para formar modelo con el 1\_07\_B, 2\_07 y 3\_07 que son de sol.

La parte final del proceso fotográfico es el de la digitalización de los fotogramas. En este caso se realizó un escaneo de las diapositivas con un escáner plano AGFA DUOSCAN (1000x2000ppi).

### 2.2 Fase topográfica

El siguiente paso fue la toma de puntos de apoyo. Éstos cubren toda la fachada de la catedral, hasta los campanarios. En total son 136 puntos, de los cuales vamos a utilizar para nuestro proyecto 63 de ellos.

Las coordenadas se obtuvieron mediante el método de intersección directa.

Una vez obtenidas las coordenadas, se las sometió a un giro y un cambio de ejes.

El giro al sistema de coordenadas se realizó para que el plano X-Y fuese paralelo al plano de la fachada. Para ello se eligieron dos puntos situados en los extremos de la fachada junto al suelo (el 14 y el 111), a partir de los cuales se planteó una transformación de semejanza bidimensional o transformación de 4 parámetros, la cual consiste en una transformación del plano compuesta por una rotación de ejes de ángulo  $\alpha$ , una homotecia  $\lambda$  y una traslación de vector  $t=(t_x, t_y)$ . En nuestro caso no existe homotecia.

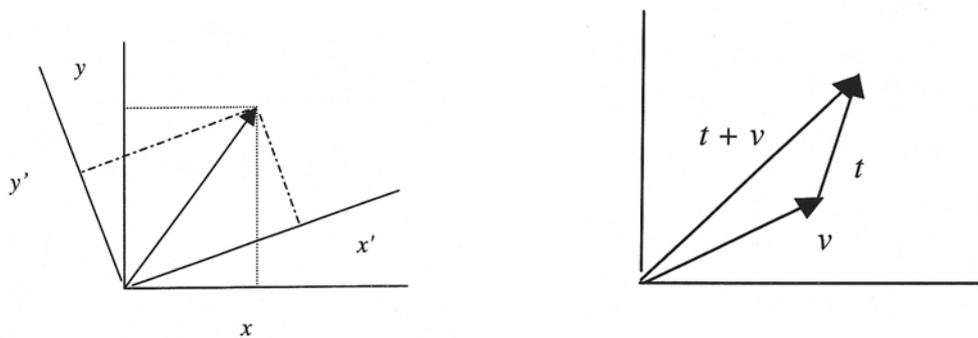


Figura 3: Giro y translación

La transformación viene dada por los parámetros:

$$ax+by+g=x' \quad (1)$$

$$-bx+ay+h=y' \quad (2)$$

donde

$$a=\cos\alpha, \beta=\sin\beta \quad (3)$$

y por tanto,

$$\alpha = \arctg \frac{b}{a} \quad (4)$$

$$g= t_x, h= t_y \quad (5)$$

Una vez obtenidos estos parámetros por mínimos cuadrados, se obtienen las coordenadas transformadas

El cambio de ejes que se realizó fue el del eje Y por el Z. Este cambio se realiza para hacer más coherente nuestro caso fotogramétrico, para seguir considerando la coordenada Z como la altimetría de fotogrametría aérea, que en nuestro caso son profundidades.

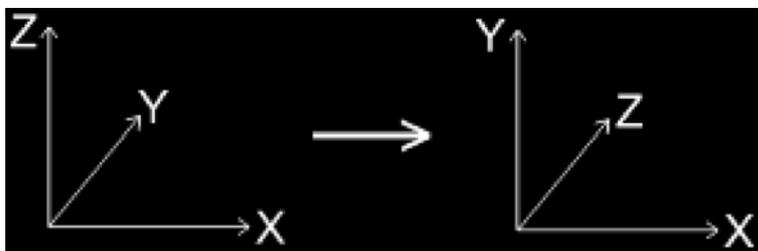


Figura 4: Cambio de ejes

### 3 Ajuste del bloque

Esta fase consiste en el ajuste de las fotografías entre si para formar un bloque con la ayuda de las coordenadas calculadas y los datos de calibración de la cámara.

Tras haber digitalizado los fotogramas, la siguiente fase tiene por objeto la obtención de los parámetros de orientación de cada haz. Con esto se reconstruye, par a par, un modelo estereoscópico enlazado al sistema de coordenadas de los puntos de apoyo.

En esta fase es cuando entra en juego la estación fotogramétrica digital, con el software de la casa Bae Systems, Socet, desde el cual se gestiona y visualiza el proyecto. Es un programa con diferentes módulos del cual utilizaremos el módulo de restitución PRO600 ( en conexión al programa MicroStation) y el de aerotriangulación que se realiza en conexión con el software Orima.

#### 3.1 Orientación interna

En esta fase se relacionan el sistema de coordenadas imagen (fila y columna de la matriz de píxeles que conforma la imagen) con el sistema de coordenadas fotográficas a partir de la medida de las marcas fiduciales cuyas coordenadas vienen en el certificado de calibración. La medición de las fiduciales sobre la imagen permite establecer una transformación bidimensional afín (6 parámetros) que contempla una translación a lo largo de cada eje ( $T_x, T_y$ ) un giro en torno a ambos ( $\alpha$ ), una deformación en la ortogonalidad ( $\beta$ ) y un factor de escala distinto para cada eje ( $\lambda_x, \lambda_y$ ).

#### 3.2 Aerotriangulación

Hasta ahora hemos conseguido reconstruir los haces a partir de la orientación interna, la siguiente fase, de ajuste del bloque, tiene por objeto colocar esos haces en la misma posición que en el momento de la toma, es decir, determinar los parámetros de orientación externa de los fotogramas: los centros de proyección ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) y los giros  $\Omega_0, \Phi_0, K_0$ .

Para este proceso necesitamos los puntos de apoyo que hemos medido previamente mediante topografía clásica.

El ajuste lo hemos realizado con el programa Orima incorporado a Socet. El método utilizado ha sido el ajuste simultáneo o de haces. Este método se basa en las ecuaciones de colinealidad, que expresan la relación entre las fotocoordenadas de un punto y sus coordenadas en el terreno, partiendo de la premisa de que para cada haz, el centro de proyección, las coordenadas imagen del punto y sus coordenadas en el terreno están en una misma línea.

Esta relación tiene la forma:

$$x = -f \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{12}(Y_p - Y_0) + r_{13}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)}$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{23}(Z_p - Z_0)}{r_{31}(X_p - X_0) + r_{32}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \quad (6)$$

En los procesos de aerotriangulación se distinguen tres fases: preparación, medida y cálculo.

En la preparación se seleccionan las imágenes y las pasadas en las que se reparten, se introducen unas coordenadas de los centros de proyección aproximadas, se analizan los recubrimientos longitudinales y transversales y se recopila información de los puntos de apoyo. Con estos datos el sistema computa de forma inicial los parámetros de orientación externa, colocando las fotos en su posición aproximada.

En la fase de medida se toman los datos que más tarde van a ser objeto de cálculo. Se realizan dos tipos de mediciones:

- Puntos de enlace o de control menor: son puntos de los que desconocemos las coordenadas, y nos sirven para enlazar los fotogramas. La medición consiste en la identificación de un punto en un fotograma y de sus homólogos en los fotogramas colindantes. En la teoría general para cada modelo estereoscópico se han de medir, para tener comprobación, al menos seis puntos distribuidos en las zonas de Gruber o zonas críticas del modelo, en nuestro caso se han llegado a medir cien puntos en un modelo, que a su vez son medidos en los modelos anterior y posterior, y en las pasadas superior e inferior, donde aparecen. La medición en este caso se realiza estereoscópicamente y de manera automática.

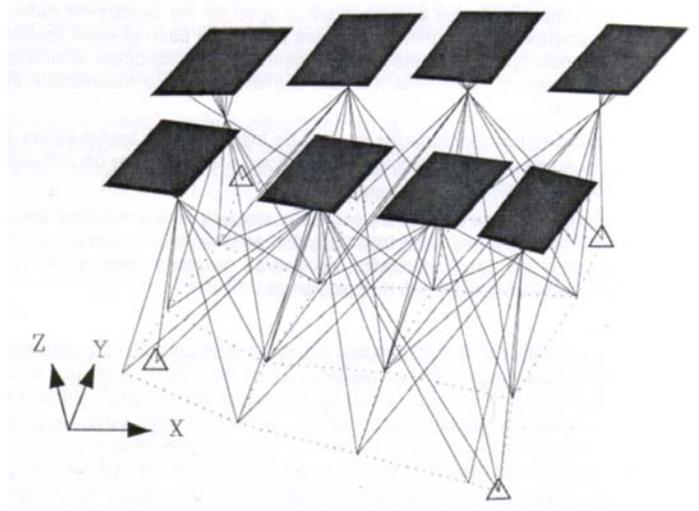


Figura 5: Principio de aerotriangulación mediante haces de rayos

La última fase es la de cálculo o compensación del bloque en la que se corrigen y analizan los datos, se detectan los errores groseros, se depuran los datos y se determinan los parámetros. Por cada medición realizada en un fotograma, se plantean dos ecuaciones de colinealidad (una para cada coordenada imagen). En los puntos de control las coordenadas terreno/objeto son conocidas (en ocasiones se han utilizado puntos planimétricos o altimétricos solamente) y en los puntos de enlace tenemos 3 incógnitas. Para cada haz se han de determinar las coordenadas de los centros de proyección y sus giros, de los cuales tenemos unos valores aproximados obtenidos

en la preparación del proyecto. El sistema plantea un sistema matricial sobredeterminado que se resuelve de forma iterativa mediante mínimos cuadrados.

Esta fase de calculo lleva asociada las labores de corrección y análisis de los datos, detección de errores groseros, depuración de los resultados y determinación de los parámetros. Esta fase se realiza de manera automática, si bien requiere un análisis exhaustivo y toma de decisiones por parte del operador. Se requiere que se remidan ciertos puntos de enlace o puntos de control que han sido mal identificados. Se repite el proceso hasta que se obtienen residuales aceptables.

Finalmente se obtienen los parámetros de orientación externa obtenidos para cada fotografía. Seguidamente se muestra los parámetros de una fotografía:

```
*Image ID. 3_07                      Camera ID.  cathedral_80
Strip No.      3
Scale 1:      225.
  Proj. Center      St.Dev.  Ext.Reliab.

XO      1019.31154    0.02395    0.012
YO      1007.20832    0.02359    0.010
ZO       27.13481    0.01414    0.010

  Rot. Angles (gon)      St.Dev.  (gon)

Omega      2.59176    0.08219
Phi        399.42044    0.08178
Kappa     2.60373    0.03560
```

#### 4. Fase de restitución

Esta fase tiene por objetivo la obtención de las coordenadas que definen la geometría de cada uno de los elementos a representar. No se obtiene un listado de coordenadas, sino vectores que definen la planimetría y altimetría de la fachada. El dibujo de los vectores se realiza sobre el programa MicroStation enlazado a Socet a través del módulo Pro600.

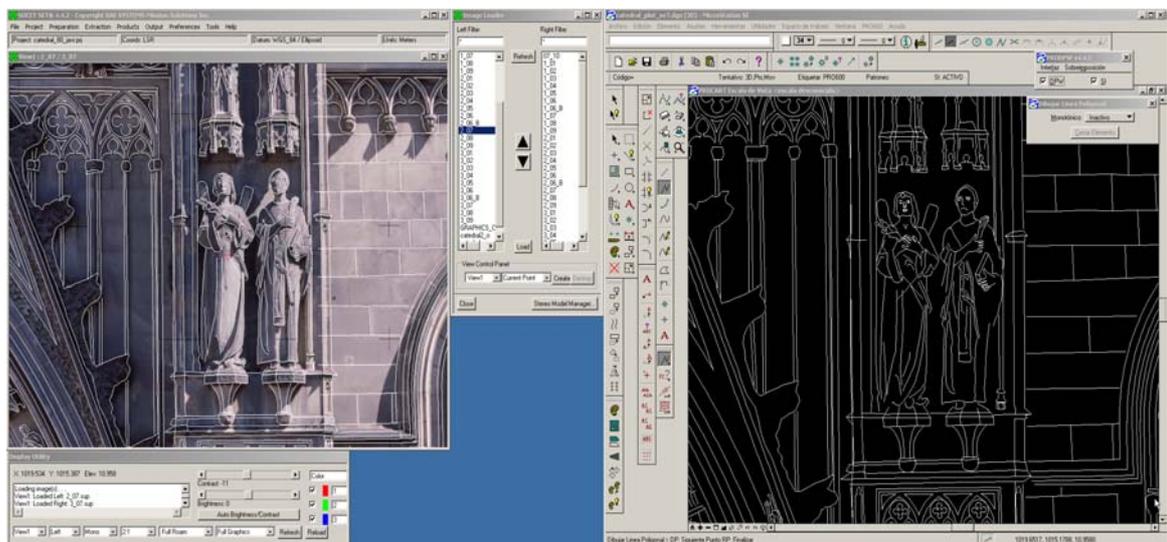


Figura 6: Módulo Pro 600 conectado a Socet

El operador se desplaza por el par estereoscópico utilizando el ratón 3D y dibujando cada elemento, y paralelamente los elementos gráficos quedan registrados en el sistema CAD en tres dimensiones.

Las herramientas gráficas que usamos en el dibujo son arcos y polilíneas. En la fachada principalmente tenemos que dibujar aristas y líneas de relleno:

- Aristas: éstas a su vez pueden ser rectas o en arco. Entre las rectas encontramos las columnas, contrafuertes, marcos de la puerta o ventanales. Los arcos abundan en la fachada: los arcos simples (los de mayor tamaño) como los del pórtico o los ventanales, el dibujo de los cuales queda bien ajustado gracias a la herramienta de arco mediante tres puntos del mismo. Arcos combinados uno tras otro dan forma a la ornamentación diversa de la fachada. Para ajustar bien estos arcos es conveniente fijarse en las juntas de unión de los mismos, ya que son arcos prefabricados y unidos posteriormente. Dentro de las aristas también se incluyen los contornos aparentes de las figuras escultóricas.
- Líneas de relleno o relieve: las cuales se utilizan para dar forma a las imágenes de apóstoles, santos y demás figuras, para darles más información de profundidades. También se utilizan líneas de relleno en columnas para definir su forma cilíndrica.

La calidad en la restitución depende en gran parte en el posado estereoscópico que realiza el operador, la precisión condiciona la calidad métrica de los vectores extraídos, y la paralaje vertical dificulta esta acción. También hay que tener en cuenta la fotointerpretación, sobretodo en zonas del par donde la calidad del fotograma es defectuosa, o se hace difícil la visión a causa de haber una foto con sol y otra con sombra.

Para obtener una buena precisión en el dibujo, la zona utilizada de cada modelo para dibujar se ha limitado a la parte central, porque a medida que te acercabas a los bordes del modelo, el ajuste perdía calidad.

La radiometría de los fotogramas se debe ajustar para mejorar la visión estereoscópica. Dependiendo de la zona a restituir se ajusta el brillo y el contraste de ambas fotos de manera conjunta, o bien por separado.

En los modelos centrales de la pasada 3 ha habido problemas con las personas que aparecen en los fotogramas y ocultan los elementos. Ha ocurrido especialmente en la escalinata, en su extremo derecho donde no se han dibujado los escalones inferiores.

## **5. Fase de edición**

En esta fase se depuran los resultados de la restitución, haciendo comprobación de lo dibujado y completando las zonas ocultas.

Se deben detectar todas aquellas líneas que no unen con otras por alguno de sus extremos.

Hay zonas en las fotografías que no son visibles y no se han podido dibujar. Ésto ha ocurrido en los contrafuertes donde a causa de la diferencia de profundidad y de la proyección de la toma fotográfica no se ha podido dibujar la intersección del lateral del contrafuerte con el plano de la fachada. También ha habido problema con las verjas situadas en la puerta de entrada y a los extremos de la fachada restituida, las cuales ocultan en parte lo que tienen detrás y hacen difícil su restitución.



Figura 7: verja del pórtico

Las personas que aparecen en las escaleras dificultan el dibujo de éstas.



Figura 8: escaleras del pórtico

Los escalones inferiores no han podido ser dibujados para este proyecto. Todas estas zonas pueden completarse mediante digitalización de otras fotografías o por mediciones en campo.

## 6. Minuta de restitución planimétrica

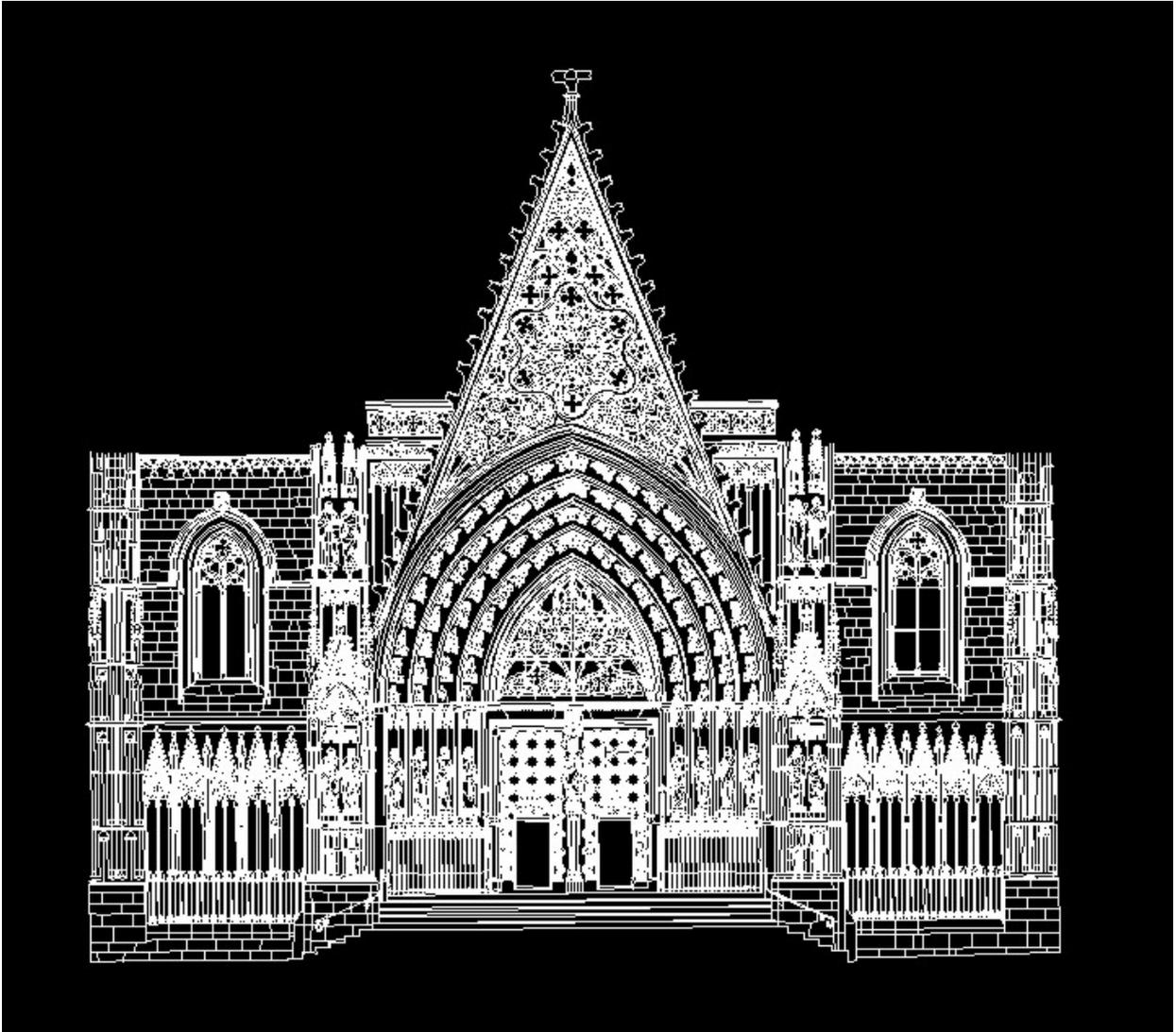


Figura 9: minuta de restitución planimétrica

