

Urban mapping of Cadiz during the War of Spanish Succession: a paradigm of the cartography enterprise undertaken by the Military Engineer Corps

The War of Spanish Succession, as a consequence of the fight between Habsburg and Bourbon dynasties to grab the Spanish throne, not only supposed a structural change in the Spanish Kingdom but also paved the way to a huge reform of the cartographic style in the urban representation. This reform had been growing up along the seventeenth century, since further geometric precision was needed in this period. So, the urban cartography was losing the three-dimensional representations whilst leading to standard mapping projections. In this way, within the urban representation context, the pragmatism of the seventeenth century urban maps would substitute the former hegemony of chorographic views.

In this background, during this period, Cadiz became the best exponent of the territorial and urban cartographic representation due its important role as the main stronghold of the

kingdom and route header between the Atlantic Ocean and Mediterranean sea.

In this paper the most characteristic urban plans of Cadiz during the first quarter of the seventeenth century will be analysed from a cartometric point of view. It is a clear example of the vital transformation suffered by the cartography style introduced by the "*Corps royal du Génie*" and it was continued by the newly-created Spanish Military Engineer Corp as a consequence of this conflict. The cartometric analysis carried out has made possible to check the scale, orientation and planimetric accuracy of the maps. As a consequence, these documents must be considered as an actual instrument of power and military planification in a serious moment for the safety of the kingdom.



Joaquín Aguilar-Camacho
Ph.D., engineer and professor of the Graphic Engineering Department of the University of Seville (Spain). His main research line focuses on the assessment of positional accuracy of urban historical cartography and the evolution of its cartographic style, with particular attention to the urban maps of the city of Cádiz during the Modern Age.



Gabriel Granado-Castro
Ph.D. and full professor at the Graphic Engineering Department at the University of Seville. His teaching and research interests are in survey/topography and cartography. His two main areas of research are: maps of the city of Cádiz (Spain) in the Modern Age and the work of military engineers in the representation of territory.



José Antonio Barrera-Vera
Geographer and Building Engineer. Full professor at Graphic Engineering Department, University of Seville (Spain). GIS, HBIM and surveying researcher.

Keywords:
differential distortion; planimetric accuracy;
Cadiz; engineer corps; historical cartography.

1. INTRODUCTION

In recent decades, the importance of the analysis of historical cartography has been confirmed as a tool for the research of urban areas and for its diachronic evolution.

Likewise, there is an increasing number of studies related to the cartometric analysis of historical maps, in which valuable information regarding the measurement and representation techniques that were used at the time of their creation have been achieved by means of determining their metric characteristics (scale, orientation, projection system, positional accuracy, etc.).

Within the great variety of historical maps that have been preserved, those created by the military engineer corps during the Modern Age are especially interesting due to their great leadership in the fortification of the territory and the representation of the urban landscape.

The War of Spanish Succession (1700-1713) presented a milestone that led the Spanish kingdom to free itself of the ties to the Old Regime and to build a future with major changes in all areas of society. In the following pages, we verify how these changes also directly affected cartography.

2. OBJECTIVES

Firstly, this paper aims to highlight the exceptional cartographic activity carried out by the military engineer corps in Cadiz during the war of succession.

This labour supposed a turning point for the creation of urban maps of this city. To this end, the most representative urban maps of Cadiz created by French and Spanish military engineer corps in the early eighteenth century are thoroughly analysed.

The main features of the aforementioned maps, such as the scale and orientation, are described and the positional accuracy is studied by using state-of-the-art tools and techniques of cartometric analysis.

3. BACKGROUND

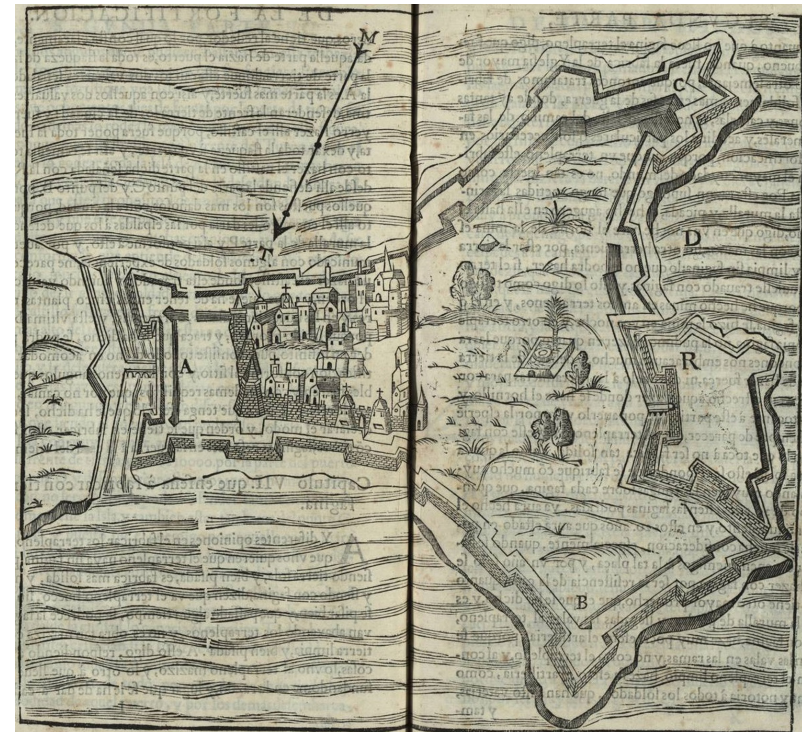
3.1. Earlier graphical representations of Cadiz in the Modern Age by means of studying the sixteenth century chorographic views.

Cadiz is one of the Spanish cities with most preserved maps, although the sixteenth century cannot be considered a prolific time in this regard due the almost total absence of complete maps of the city. Only a few partial maps have been preserved to the present day, whereby the chorographic views provide the most characteristic graphic representation of Cadiz in this century.

One of the two complete maps conserved was made in 1578 by Francés de Álava Beamonte,

the Ambassador of King Felipe II in Paris and the engineer Captain-General of the Artillery. In this map, only the walled perimeter is represented, and it lacks information about its urban fabric. The other map should be located in the Treaty of Cristóbal de Rojas of 1598 titled "*Teorica y practica de fortificacion, conforme las medidas y defensas de estos tiempos: repartida en tres partes (año 1598)*" (de Rojas, 1598). In this map, the famous engineer uses Cadiz, where he carries out a large proportion of his work (Mariátegui, 1985), as a model of a fortified city. Unlike the previous

Fig. 1 - "*Teorica y practica de fortificación, conforme las medidas y defensas destes tiempos: repartida en tres partes*", Cristóbal de Rojas, 1598 (Biblioteca Central Militar, 1598-3).



map, part of the interior of the city is represented (figure 1).

However, as stated above, only chorographic views could be found as a graphical documentation of great historical interest. Nevertheless, their value lies more in their expressive richness than for their geometrical objectivity, which is completely lacking. The 1513 view preserved in the General Archive of Simancas is considered the oldest view of the city (figure 2). Research thereon (de Navascués y de Palacio, 1996) reveals that it involves a faithful panorama of the city in the early sixteenth century, where the city walls, castle, doors, churches and other elements of the urban fabric are finely represented.

The other two preserved views (figure 3) date from the second half of the sixteenth century and were carried out by the Flemish painters Joris Höefnagel (1564) and Anton van den Wyngaerde (1567) (Kagan, 1986). The latter painter provides a higher level of detail and graphic precision, which makes his view one of the most interesting means for the study of the physiognomy of the city before it was ransacked and destroyed by the Anglo-Dutch army in 1596.

3.2. Cartographic style and its evolution on mapping Cadiz throughout the seventeenth century.

From the point of view of the cartographic representation of the city, the seventeenth century plays a crucial role in the search for a stable



Figure 2. "Dibujo de la ciudad de Cadiz sobre un postigo que han abierto en la fortaleza y en el muro", unknown author, 1513 (Archivo General de Simancas, MPD-25-047).

Figure 3. "La muy noble y muy leal ciudad de Cadiz. Civitates orbis terrarum", Joris Höefnagel, 1564 (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, RM.23969).



technique that enables a rigorous representation of the urban environment to be attained. This means precision from the metric point of view without losing the expressiveness that dominated representations from the previous century (Arévalo Rodríguez, 2003), whose peak was achieved in the chorographic views. In this respect, although there are no views of the city in the seventeenth century, the three-dimensional representations of buildings or elements of the fortified perimeter remain present in the complete maps of Cadiz. These three-dimensional drawings would lose significance as the century unfolded, and led to planimetric maps where perspectives are rarely present. Furthermore, rising awareness regarding representation of the fortifications of the city and its faithfulness in the first half of the century, deserve mention. On the other hand, the representation of the urban fabric appears to become relatively unimportant, whereby only

simple three-dimensional representations of the most emblematic buildings are provided. This is the case of the map preserved in the National Library of France (*Bibliothèque nationale de France*) that we date back to the 1630s. On this map, the interior network is shown in perspective and lacks metric objectivity. In addition, it is especially interesting to analyse how the type of perspective is used in an effort to make the whole map look like a view of the city (figure 4).

In the second half of the century, the preserved maps would stop using perspectives and plan views would dominate the entire representation of the city (figure 5). Furthermore, greater metric objectivity in the drawing of the urban fabric would



Figure 4. "Fortificacion y sitio de la ciudad de Cadiz", B. D'Aossada, 1645 (Bibliothèque nationale de France, GE SH 18 PF 61 DIV 4 P 1/1 D).

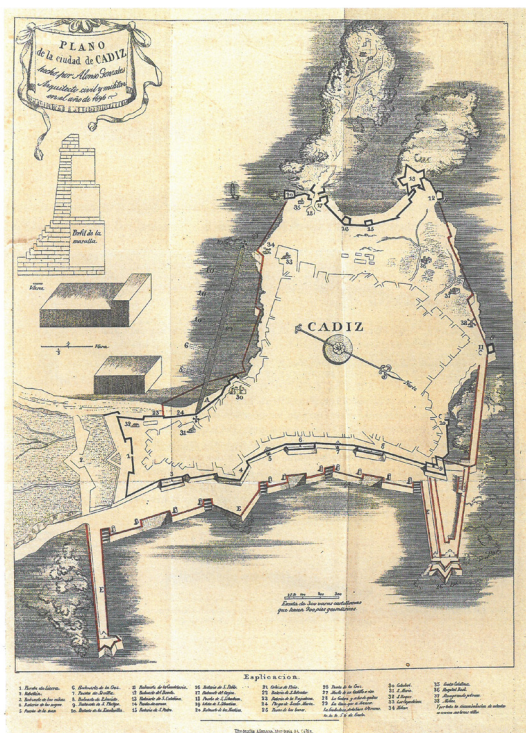


Figure 5. "PLANO de la ciudad de CADIZ hecho por Alonso Gonzales Arquitecto civil y militar en el año de 1696", Alonso Gonzales, 1862 (Biblioteca de D. Federico Joly Höhr, Centro Cultural Reina Sofía, Cádiz).

arise (Granado-Castro & Aguilar-Camacho, 2019).

3.3. *Le Corps Royal du Génie*: an organisation model for the configuration of the Spanish Royal Corps of Military Engineers.

It is no coincidence that, following the War of Spanish Succession, and with the creation of the Royal Corps of Military Engineers, there was a major transformation in urban cartography in Spain. The representation of the city would become more rigorous from the geometric point of view. A more recognizable and standardized symbology would be employed as a result of the new rules

established by the engineering corps, who were the real protagonists in urban representation in the eighteenth century. After the war for the succession to the throne, the Spanish State felt the need to modernize by reforming administrative structures and renovating infrastructures. The war had exposed the weak situation of the country. In order to tackle this complicated task, it was necessary to develop a more accurate cartography that would respond to these new demands. Cadiz was one of the main strongholds of the Kingdom and, consequently, a city with a large cartographic production (Chías-Navarro & Abad-Balboa, 2011). It represents an exemplary case that clearly illustrates the changes in urban cartography taking place in the early eighteenth century. Nevertheless, these advances in urban representation did not occur spontaneously. In fact, they were carried out in the late seventeenth century within *Le Corps Royal du Génie*, which became specialised in the production of military cartography following the inception of the Corps. These advances enhanced the surveying instruments and the representation techniques (Bonet Correa, 1991, pp. XXXVI-XL). The great architect of these changes was Vauban who, once appointed General Commissioner of Fortifications in 1668, proposed the codification of the rules of the drawings made by engineers specialized in the production of fortification maps (Warmoes, 2008, p. 55). Until the intervention of Vauban, there was a boundless variety of cartographic practices, whereby each engineer had a particular graphic language. In this new regulation, the colour and type of line to be used in maps would be established in order to differentiate finished work from that under execution or in its project stage. In the same way, the most appropriate scales to be used in maps would be set. These new rules began to prevail in the cartographic practice of engineers during the final decades of the seventeenth century, and then, in 1714, they would be compiled in the *Instruction pour les ingénieurs et dessineurs qui levent les Plans des Place du Roy ou des Cartes* (Vauban, 1714). The aim was to obtain a uniform representation of all

the military territories of the Kingdom.

In addition to this instruction, in this shifting period between the seventeenth and eighteenth centuries, other treaties were published where these new graphic codes were disseminated, whereby their need for implementation was patent. In this regard, the work of the military engineers, Henri Gautier de Nimes, Nicolas Buchotte, and Louis Charles Dupain de Montesson, deserve mention since they defined a set of rules that affected not only the selection of materials, but also the techniques and colours to be used in maps (D'Orgeix, 2016).

As discussed in greater detail below, the maps of Cadiz drawn up by the French engineers during the War of Succession would have a very characteristic coding of their own as a result of the numerous changes in France that had already become a reality. Their comparison with the maps created by Spanish engineers in the second half of the seventeenth century leaves no room for doubt. In 1711, when the Military Engineers Corps was created in Spain, led by the General Engineer Jorge Próspero Verboom, with a substantial presence of French and Flemish military engineers (Capel Sáez, Eugeni Sánchez, & Moncada, 1988, pp. 14-33), these new trends in the Cartographic coding were known by most engineers thereof, and would be put into practice in survey drawings that were produced during the eighteenth century, particularly in Cadiz. Even certain military engineers who had worked in the city before the creation of the corps, such as Pedro Borrás and Diego Luis Arias, had also worked in Flanders in contact with Sebastián Fernández de Medrano and Verboom (Cano-Révora, 2017, pp. 329-355).

Finally, it is important to bear in mind that these changes in the representation of maps developed in France in the late seventeenth century not only influenced the Spanish urban cartography of the eighteenth century, but have also been found to exert a direct impact on British military cartography. It could even be said that, in France, the foundations were laid for new military theories and practices in Europe, and coincided with the establishment of a professional corps of military

engineers in most countries. During the eighteenth century, there was also a "militarization of cartography" in Britain, whereby new standards relating to colour, scale, and terminology would be introduced. A corps of military engineers would be created that emulated the new French practices (Fleet, 2007).

4. METHODOLOGY

4.1. Description of the maps analysed.

A succinct description of the most representative maps of Cadiz by French and Spanish authors dating from the early eighteenth century is provided below (Figure 6).

Map 1.- *'Plan de la Ville de Cadix'*. D'Anville Collection (Le Petit Atlas Maritime, Volume IV, plan 57), Bibliothèque nationale de France (GE-DD-2987), 433.1 x 316.6 mm. Map of French origin, in which the appearance and elements of the perimeter of the city lead us to place its creation in around 1703-1705. Unsigned map, attributed to Jacques Nicolas Bellin.

Map 2.- *'Plan de la Ville de Cadix'*. Bibliothèque nationale de France (GE-SH-PF-18-61-21-D-DIV 4 P), 519.8 x 380.6 mm. Map of French origin, in which the appearance of the perimeter, in addition to the information that appears reflected in the legend, indicate that it was drawn in around 1706. Unsigned map, unknown author.

Map 3.- *'Plan de la Ville de Cadix'*. Bibliothèque nationale de France, D'Anville Collection (GE-DD-2987-1729), 454.9 x 289.9 mm. Map of French origin, in which the appearance of the perimeter and urban plot, in addition to the information that appears reflected in the legend, allow us to place its creation in around 1709-1710. Unsigned map, attributed to Jean de Beaurain.

Map 4.- *'Plano de Cadiz con la Explicacion de su Recynto...*' General Military Archive of Madrid (AT-194/28), 585.7 x 407.8 mm. Map of Spanish origin,



Map 1- (1703-1705)



Map 2- (1706)



Map 3- (1709-1710)



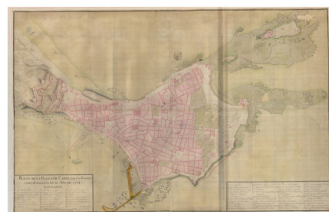
Map 4- (1723-1724)



Map 5- (1723-1730)



Map 6- (1724)



Map 7- (1724)



Figure 6.- List of the urban maps of Cadiz from the early eighteenth century (authors' own).

in which the appearance of the city, in addition to the information that appears reflected in the legend, lead us to locate its origin in around 1723-1724. Unsigned map, unknown author.

Map 5.- '*Mapa particular de la Plaza de Cadix*'. Bibliothèque nationale de France (GE-D-15954), 527.2 x 347.0 mm. Map of French origin, in which the appearance of the city barely allows us to specify the date of its development, which we believe is around 1723-1730. Unsigned map, attributed to Charles Le Brun.

Map 6.- '*Plano General de la Plaza de Cadiz*'. General Military Archive of Madrid (CA-33/17), 1046.2 x 622.1 mm. Map of Spanish origin dated in the title of the map in the year 1724. Unsigned map, unknown author.

Map 7.- '*Plano de la Plaza de Cadiz con sus Fuertes...*'. General Military Archive of Madrid (CA-30/7), 1363.5 x 881.9 mm. Map of Spanish origin dated in the year 1724 in the title of the map. Unsigned map, unknown author.

4.2. Cartometric analysis

From a high-resolution digitized copy of each map, we have carried out an analysis to evaluate the geometric rigour of these maps. This analysis is based on three verifications: average scale, planimetric accuracy, and compass-rose alignment.

4.2.1. Average scale

In historical cartography, it is necessary to distinguish between the theoretical scale (the one intended by the author of the map) and the real scale (obtained as the average of the different scales present in the document).

We have determined the theoretical scale, for those maps that contain a graphic scale, by means of their conversion to the Spanish system of scales used in that era (or to the French system when the Spanish failed to offer any correspondence) [1].

The real scale has been evaluated with MapAnalyst software, which is a specific tool for this type of analysis (Jenny & Hurni, 2011; Jenny, Weber, & Hurni, 2007), and verified by differential distortion analysis (Claeys Bouûaert et al., 2016), in both cases these are from a Helmert transformation. This real scale is an average value of the whole map, whose representativeness depends on the number of control points used and their homogeneous distribution.

4.2.2. Planimetric accuracy

The positional accuracy has been evaluated in terms of the Root Mean Square Error (RMSE) and its standard deviation, which has been obtained as the residual of an affine transformation (bidimensional regression) between homologous points of control of the historical map and a recent map of the city (Cadiz 2006, ED50 / UTM zone 29N EPSG: 23029).

For its implementation, the MapAnalyst software and an affine transformation of six parameters have been applied. This transformation is the most suitable (Beineke, 2001, pp. 16-19; Cajthaml, 2011, p. 2; Krejčí, 2009, p. 46; Niederöst, 2005, pp. 70-73) when the state of conservation of the cartographic support presumes the existence of differential distortions (of scale and orthogonality) that can mask the original accuracy of the map. Various studies (Baiocchi & Lelo, 2010, p. 101; Jenny & Hurni, 2011, p. 409; Jongepier, Soens, Temmerman, & Missiaen, 2016, p. 116) endorse the use of this type of transformation even when the maps compared fail to use the same map projection, but only when it is a small area represented on a large scale and a local conformal projection is employed (Claeys Bouûaert et al., 2016, p. 1260), as happens in the case study. The relevance of the RMSE as an indicator of the positional accuracy of a historical map is highly dependent on the number of control points used in its determination and on its homogeneous distribution (Giordano & Nolan, 2007, p. 62; Krejčí, 2009, p. 2). In this respect, the favourable configuration of the historical urban fabric of

Cadiz, consolidated at the end of the eighteenth century and practically intact, has paved the way towards the identification of a large number of control points (mainly at the corners of buildings and defensive elements of the city) with a homogeneous spatial distribution. Finally, in order to compare the positional accuracy between the various maps in terms of the RMSE and its standard deviation, the analysis has been repeated by means of using the same cloud of control points common to all the maps.

4.2.3. Compass-rose alignment

In the historical maps oriented by a compass rose, it is possible to ascertain with relative certainty how the rose was aligned with respect to the urban fabric. In our case, the verification boils down to determining the rotation experienced by the north materialized by the compass rose with respect to the north of the UTM grid. This can be calculated with the help of a Helmert transformation between the historical map and its current reference. From the values of grid convergence and magnetic declination, which have been determined coetaneously for the age of the historical map at a central point of the urban fabric of the city, an approximate hypothesis can be established as to how the compass rose was aligned [2].

5. RESULTS AND DISCUSSION

5.1. Average scale

Table 1 shows the results obtained in the Spanish and/or French scales system of the era [3], as appropriate, and their respective conversions into a metric scale. In general, the maps are drawn up in the proportion indicated by their graphic scale bar, with small oscillations of approximately 1%. These are probably due to the state of preservation of the supports (paper or paper over canvas) [4]. However, the proportion represented by the graphic scale bar shown in maps 4 and 5 is not

accurate. Both copies are characterized by an evident artistic nuance in their respective trace and composition, which has not been observed in the other maps analysed. Map 4 is part of an atlas on the Kingdom of Spain's strongholds, most of which are dated in the 1720s and mapped by the Marseille engineer Miguel Marín [5]. Map 5 is a reproduction of the city of Cadiz made in the workshops of the famous French painter Charles Le Brun [6]. The composition and the aesthetics possibly prevailed over the accuracy of these maps, which were destined to become part of an atlas. Map 3 presents a double graphic scale bar, expressed in French toises and in Castilian varas, which fail to maintain the same proportion. The analysis carried out confirms that the correct scale is that of the French. The Castilian scale corresponds to a somewhat higher proportion, probably due to an error in its conversion.

5.2. Positional accuracy and quality

Positional accuracy has been evaluated in two different scenarios. In the first, all those ground control points identified in each map are used (between 534 and 724 points). In the second, only those ground control points linked to all maps are considered (386 points). With this double approach, not only have the positional accuracy and the average scale of each map been ascertained with the highest possible consistency, but the homogeneous and comparable RMSE values have also been identified from among all the maps. In Table 2, we detail the results obtained. The maps are ordered according to the RMSE value calculated for the same sample of control points (386 points). The last column of the table shows the positional quality [7] in each example.

Map	Date	Scale bar ratio	Theoretical scale			Real scale	Change %
			Spanish	French	Metric	Metric	
1	1703-1705	150 t / 1.44 p	-	1250 t/f	1:7 500	1:7 498	-0.03
2	1706	400 t / 3.84 p	-	1250 t/f	1:7 500	1:7 414	-1.15
3	1709-1710	300 t / 32 l 800 v / 5.05 d	2533,3 v/pa	1350 t/f	1:8 100	1:8 068	-0.40
4	1723-1724	400 t / 64 l	-	900 t/f	1:5 400	1:5 946	+10.11
5	1723-1730	700 v / 3 p	2800 v/pie	-	1:8 400	1:8 708	+3.67
6	1724	300 t / 64 l	-	675 t/f	1:4 050	1:4 052	+0.05
7	1724	200 t/ 6 p	-	400 t/f	1:2 400	1:2 443	+1.79

Table 1. Percentage variation between the theoretical and real scale in each map (t: French Toise; p: French Pouce; l: French Ligne; f: Pied de Roi or French Pied; v: Castilian Vara; pa: Castilian Palmo; d: Castilian Dedo; pie: Castilian Pie or Pie de Burgos) (authors' own).

Positional accuracy and quality						
Map	Date	Scenario 1		Scenario 2		
		GCPs	RMSE ± σ (m)	GCPs	RMSE ± σ (m)	RMSE ± σ (mm)
6	1724	697	12.6 ± 8.9	386	10.8 ± 7.6	2.7 ± 1.9
7	1724	679	15.5 ± 10.9	386	13.6 ± 9.6	5.6 ± 3.9
3	1709-1710	537	20.2 ± 14.3	386	18.5 ± 13.1	2.3 ± 1.6
2	1706	543	20.4 ± 14.4	386	19.5 ± 13.8	2.6 ± 1.9
1	1703-1705	534	21.2 ± 15.0	386	19.7 ± 14.0	2.6 ± 1.9
5	1723-1730	653	25.1 ± 17.8	386	21.0 ± 14.8	2.4 ± 1.7
4	1723-1724	724	35.6 ± 25.2	386	25.8 ± 18.2	4.3 ± 3.0

Table 2. Positional accuracy and quality, according to RMSE and its standard deviation, in scenarios of analysis 1 and 2 (authors' own).

In the last column of Table 2, it can be observed that the best and worst positional qualities correspond to the lowest and highest scale maps, respectively [maps 5 and 7]. In all the maps, the values obtained are well above the quality standard in current cartographic production (0.2 mm), which is supposed to be the limit of human visual perception [Baiocchi & Lelo, 2010, p. 98].

Maps 6 and 7 turn out to pose the least positional distortion. Both copies, unsigned but dated in 1724, must have been drawn up by members of the Royal Military Engineers Corps assigned to the Cadiz fortification work during this stage. Among them, Jorge Prospero Verboom and Ignacio Sala Garrigo deserve special mention [8].

On the other hand, the lowest positional accuracy belongs to maps 4 and 5, which illustrate the state of the fortification work of the city close to 1725. The aforementioned artistic aspect of these specimens could explain a lesser positional rigour in their trace.

Maps 1, 2, and 3, of French origin, date back to the first decade of the eighteenth century and show the defensive configuration of the city during the War of the Spanish Succession (1701-1713). They have an average RMSE value slightly lower than that in maps 4 and 5, although their spatial distribution is singularly heterogeneous. The visualization of the local distribution of the deformations in these three French samples enables their relative positional accuracy to be better explained.

For this study, the differential distortion analysis method was used [Claeys BouÛaert et al., 2016; Vervust, Claeys BouÛaert, De Baets, Van de Weghe, & De Maeyer, 2018], which is an improved version with respect to the approach used by MapAnalyst for the visualization and local interpretation of the distortion in a historical map [9]. The calculations and their graphical visualizations have been generated by means of Matlab R2018a and QGIS 3.4.8 respectively.

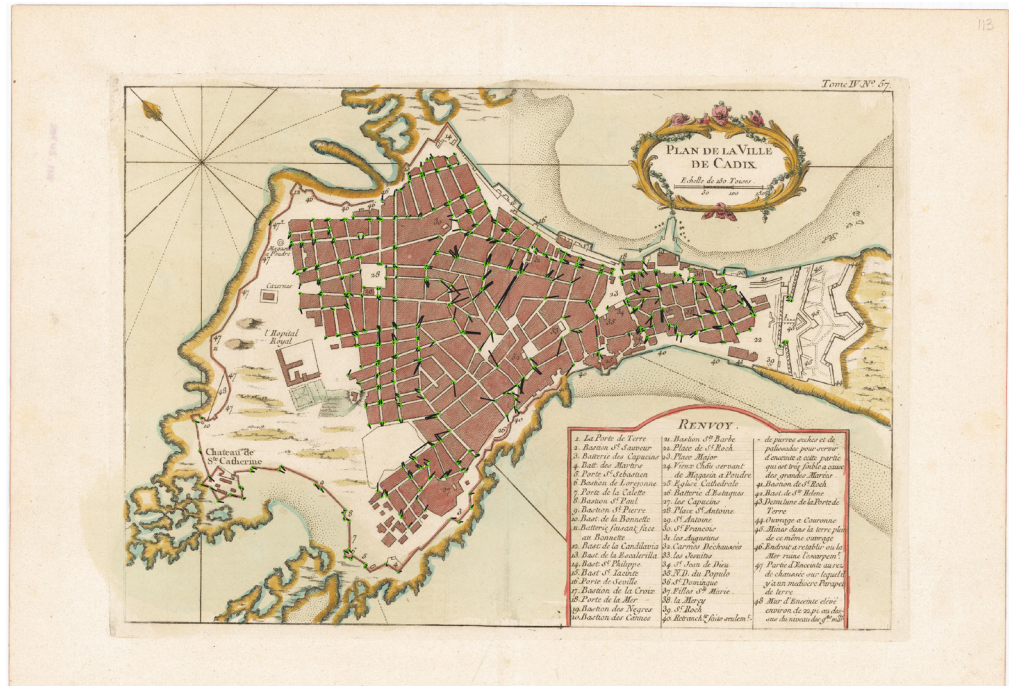
Figure 7 shows the displacement vectors of the control points in maps 1, 2, and 3, obtained with a Helmert transformation. In these maps, the length of the vectors is greater in the central area

of the urban fabric, although it does decrease in its outline and in the fortified perimeter of the city (see Table 3).

In Figure 8, the local deformations of these maps are visualized by a distortion mesh, the logarithm in base 2 of the area scale factor (σ), and the

Map	Date	Displacement vector length (m)					
		GCPs in defensive perimeter			GCPs in map		
		GCPs	min	max	mean ± σ	GCPs	mean ± σ
1	1703-1705	33	2.1	22.9	10.3 ± 5.5	386	14.3 ± 13.5
2	1706	33	1.5	19.0	10.3 ± 4.9	386	14.1 ± 13.4
3	1709-1710	33	2.0	22.3	10.1 ± 5.2	386	13.6 ± 12.5
4	1723-1724	33	4.5	61.6	26.3 ± 14.5	386	22.9 ± 12.7
5	1723-1730	33	7.3	58.9	25.8 ± 13.8	386	18.3 ± 10.2
6	1724	33	2.4	23.7	12.3 ± 5.4	386	9.1 ± 5.8
7	1724	33	4.4	23.1	10.7 ± 5.0	386	12.0 ± 6.2

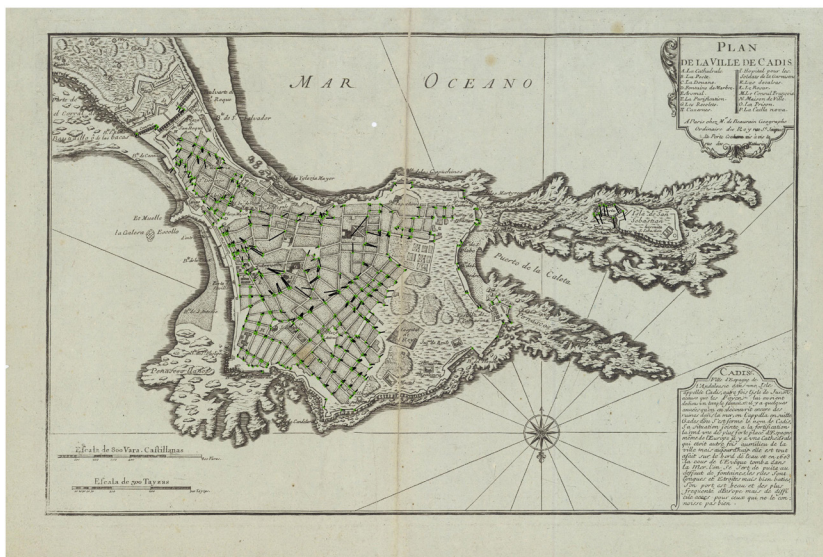
Table 3. Analysis of the length of the displacement vectors at 33 ground control points of the defensive perimeter of the city and at the 386 ground control points common to all maps (authors' own).



(a)



(b)



(c)

maximum angular deformation (2Ω).

The distortion grid shows how the reference map must be deformed to fit the historical map. It is generated with a *thin plate spline* interpolation and with a grid resolution of 20x20 metres.

The area factor (σ) and the maximum angular deformation (2Ω) show how the area and angles in the historical map are deformed. The resulting values, calculated in the control points and in the vertices of the grid, are visualized through a color map generated by a TIN interpolation [10].

The results confirm that maps 1, 2, and 3 present a highly heterogeneous local distribution of the distortion, which is mainly concentrated in the central part of the city's urban fabric. However, paradoxically, these are also the maps that more accurately represent the position of the defensive perimeter of the city: better even than maps 6 and 7, which represent those of greater overall accuracy.

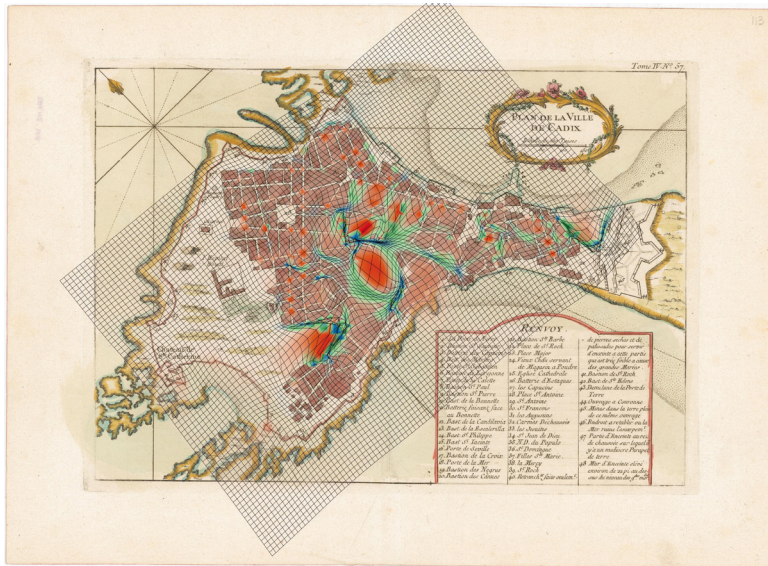
Finally, the legends and elements represented in maps 1 and 2 maintain a high level of coincidence. Furthermore, the global average RMSE and its local distribution are very similar in the two maps. Although it is probable that their traces are related, the analysis carried out fails to confirm this aspect.

5.3. Compass-rose alignment

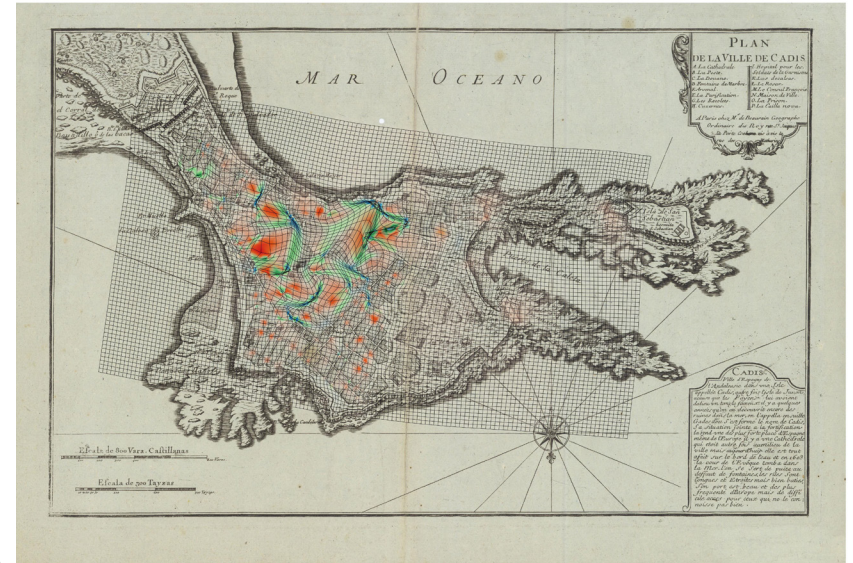
In every single map we have evaluated the north-south alignment of the compass rose with respect to the north of the UTM grid of the reference map. The goal is to ascertain whether it was orientated to the magnetic north, to the true north, or to another arbitrary direction.

The results obtained are shown in Figure 9. It is worth remembering that maps 1, 2, and 5 orientate the north of the city towards the upper edge of the format. The remaining maps do so towards the lower edge (southern orientation).

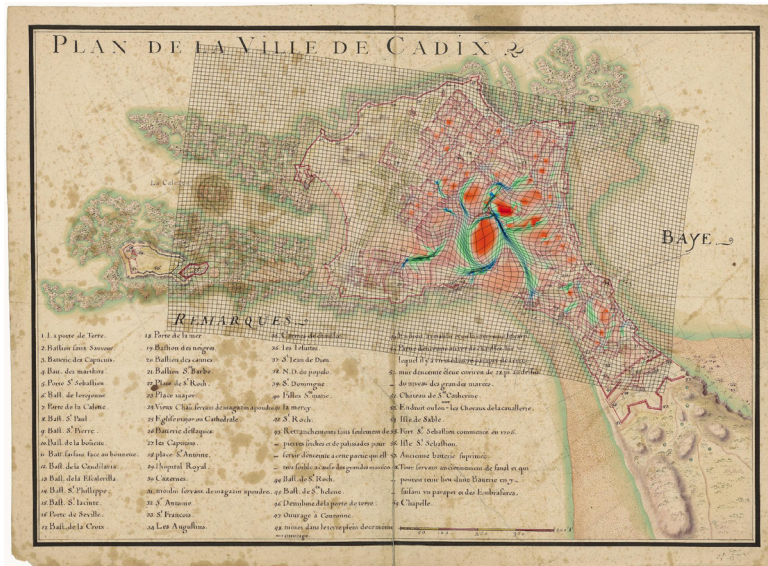
Figure 7. Displacement vectors and control points in maps 1, 2, and 3. The length of the vectors is shorter in the urban and walled perimeter of the city (authors' own).



(a)



(c)

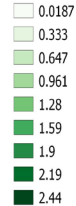


(b)

Base-2 logarithm of area scale factor (\log_2)



Maximum angular distortion [rad] (2θ)



(d)

Figure 8. Distortion mesh in maps 1, 2, and 3. Their deformation is due to discrepancies with respect to the reference map in the representation of angles and/or surfaces. (8d) The colour map, applied to visualize the results of the differential distortion analysis, shades the most representative distorted surfaces: enlarged (in red) and compressed (in blue). Areas with significant angular deformation are shown in green. Areas with little distortion are transparent (authors' own).

From among the seven maps analysed, five aligned the compass rose with the magnetic north (maps 1, 2, 3, 5, and 7), which include all the French maps. Map 2 stands out since it managed to align with the lowest margin of error. In map 6, the alignment took place to the true north [11]. In map 4, the least accurate of all the maps, the compass rose was added as a merely decorative element. This is confirmed by its major deviation from magnetic north and true north.

6. CONCLUSIONS

From the above study, we draw the following conclusions:

- We have verified that in the maps of Spanish origin, with the exception of map 4, the positional accuracy is better as a whole than in French maps. Nevertheless the results obtained at the local level inform us that the representation of the urban perimeter and fortified contour was performed with greater precision in the latter. This shows that the cartographic labor carried out in Cadiz by *Le Corps royal du Génie* was of a pragmatic nature, since those elements of great interest for military strategy were mapped with higher precision. For the remaining elements, these maps carried out very approximate mapping work and, in some cases, many elements were not even represented. This singularity is not observed in the Spanish maps analysed.
- Predomination was found of the alignment of the compass rose to the magnetic north, with the singularity of the southern composition in the Spanish maps.
- Among the French maps, small scales were used for the representation of the urban territory in order to adapt the maps to the format of the engravings that they published in edited series.

- Finally, it should be borne in mind that the War of Succession constituted a turning point in the urban representation of the city, in which both the style and the cartographic technique introduced by *Le Corps Royal du Génie* exerted a clear influence

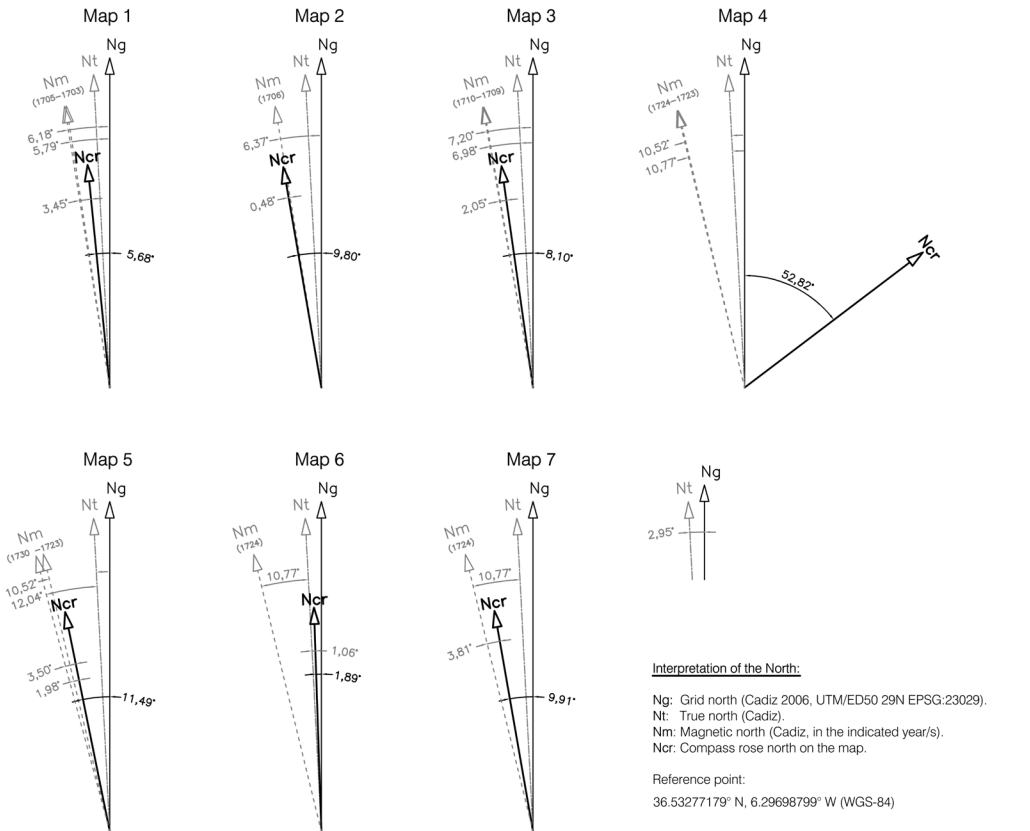


Figure 9. Alignment of the compass rose in each map with respect to the magnetic north, true north, and north of the grid (authors' own).

on the Cadiz maps produced by its Spanish counterpart during the eighteenth century.

NOTES

[1] The use of the French scales system was frequent in Spanish cartography during the Modern Age, particularly during the eighteenth century, due to the influence of the military engineers who arrived from Flanders and France in the wake of the War of the Spanish Succession.

[2] Historical values estimated according to the *International Geomagnetic Reference Field (IGRF12) model*, from the *Magnetic Field Calculators of the National Geophysical Data Center (National Centers for Environmental Information, NCEI)* of the *US Department of Commerce*. Accuracy for the magnetic declination generally lies within 30 minutes (0.5 degrees) of arc.

[3] In the Spanish scales system of that era (Bourdon, 1843; de Borbón y Borbón-Dos Sicilias, 1852): Castilian Vara (0.0835905 metres), Castilian Palma (0.2089763 metres), Castilian Dedo (0.0174147 m), and Castilian Pie or Pie de Burgos (0.278635 metres). In the French scales system at that time: French Toisa (1.94904 m), Pied de Roi or French Pied (0.32484 metres), French Pouce (0.02707 metres), and French Ligne (0.0022558 m).

[4] Deformations due to pleating or self-weight, folding and unfolding for handling and storage, as well as changes in humidity and temperature constitute the main factors responsible for the processes of paper dilation and contraction (Díaz & Seed, 2005, p. 100; Hermosín-Miranda, 2011, pp. 50–52). These factors can lead to changes in format dimensions of up to 1% of the original size (Nell, 2009, p. 3).

[5] The atlas is kept in the General

Military Archive (AT-194/28).

[6] On the left-hand side of the map, in the legend, it can be read: "C. Le Brun SL ". The *Bibliothèque nationale de France* attributes the authorship of the map to Charles Le Brun (1619-1690), but his death in the year 1690 makes this possibility unfeasible. The presence of a legend in perfect Castilian and the amplitude of the time period (1723-1730) of the plot and the various fortification works represented in the document cause us to believe that we are possibly faced with a reproduction made in the workshops of Le Brun after the year 1730, copied from various maps of the city that had been drawn up during the 1720s by other cartographers.

[7] Positional quality is employed for the evaluation of the planimetric accuracy of the geographic information represented in a cartographic product, in terms of its scale and purpose.

[8] Verboom, Engineer General of the Royal Castilian Armies, who was responsible for the creation of the corps (1711) and its training centres, worked actively in the works for the defence and fortification of Cadiz during the year 1724 (Capel-Sáez et al., 1983, p. 476; Muñoz-Corbalaán, 2015). Ignacio Sala, linked to Cadiz since 1718, with the rank of Chief Engineer, collaborated closely with Verboom and was appointed Engineer Director of the work in Cadiz, and in Andalucía in general, in 1724 (Gutiérrez Dacosta & Esteras Martín, 1991, p. 84).

[9] The differential distortion analysis models the deformation that the modern map must undergo to fit the old map by means of a *thin plate spline* interpolation. This analysis considers two main metrics for the evaluation of the

local error: the area scale factor (σ) and the maximum angular distortion (2Ω), which illustrate how the surfaces and angles, respectively, deform from one map to another.

[10] The area scale factor is plotted with the logarithm in base 2 of σ , which homogenizes the display size of the distortions by corresponding to equal increases or reductions in area.

[11] The phenomenon of magnetic declination had already appeared in a parchment map (1436) of Andrea Bianco (Cerezo Martínez, 1994: p. 12).

REFERENCES

Arévalo Rodríguez, F. (2003). *La representación de la ciudad en el Renacimiento. Levantamiento urbano y territorial*. Barcelona: La Fábrica.

Baiocchi, V., & Lelo, K. (2010). Accuracy of 1908 high to medium scale cartography of Rome and its surroundings and related georeferencing problems. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 45(1), 97–104. <https://doi.org/10.1556/AGEod.45.2010.1.14>

Beineke, D. (2001). *Verfahren zur Genauigkeitsanalyse für Altkarten* (Universität der Bundeswehr München). Retrieved from <http://www.unibw.de/ipk/karto/schriften/pubbeineke/buchwerke/index.html>

Bonet Correa, A. (1991). *Cartografía Militar de Plazas Fuertes y Ciudades Españolas. Siglos XVII-XIX. Planos del Archivo Militar Francés*. Madrid: Ministerio de Cultura, Dirección Gral. de Bellas Artes y Archivos. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.

Bourdon, M. (1843). *Elementos de Aritmética (traducción de la 19a edición francesa por Calisto Fernández Formentany)*. Madrid: Librería de los señores Viuda e Hijos de Calleja.

Cajthaml, J. (2011). Methods of georeferencing old maps on the example of Czech early maps. In A. Ruas (Ed.), *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference* (p. C0-314). Retrieved from https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/

Cano-Révora, M. G. (2017). *Las murallas de Cádiz en un tiempo*

de cambio (1693-1728). Cádiz: Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica.

Capel-Sáez, H., García-Lanceta, L., Moncada-Maya, J. O., Olivé-Olle, F., Quesada-Casajuana, S., Rodríguez-Baixeras, A., ... Tello-Robira, R. (1983). *Los Ingenieros militares en España, siglo XVIII: repertorio biográfico e inventario de su labor científica y espacial*. Barcelona: Universitat de Barcelona.

Capel Sáez, H., Eugeni Sánchez, J., & Moncada, O. (1988). *De Palas a Minerva. La formación científica y la estructura institucional de los ingenieros militares en el siglo XVIII*. Barcelona: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Cerezo Martínez, R. (1994). *La cartografía náutica española en los siglos XIV, XV y XVI*. Madrid: CSIC Press.

Chías-Navarro, P., & Abad-Balboa, T. (2011). *El Patrimonio fortificado. Cádiz y el Caribe: una relación transatlántica*. Madrid: Universidad de Alcalá. Servicio de Publicaciones.

Claeys Bouùuert, M., De Baets, B., Vervust, S., Neutens, T., De Maeyer, P., & Van de Weghe, N. (2016). Computation and visualisation of the accuracy of old maps using differential distortion analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(7), 1255–1280. <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1127377>

D'Orgeix, E. (2016). L'ingénieur, les académies royales et le dessin des cartes et plans en France (XVIIe-XVIIIe siècles). In A. Cámara Muñoz (Ed.), *El dibujante ingeniero al servicio de la monarquía hispánica. Siglos XVI-XVIII* (pp. 315–330). Retrieved from <http://www.juaneloturriano.com/>

noticias/2016/05/04/el-dibujante-ingeniero-al-servicio-de-la-monarquía-hispánica.-siglos-xvi-xviii.-nueva-publicación

de Borbón y Borbón-Dos Sicilias, M. I. L. (1852). Real Orden de 9 de diciembre de 1852, por la que se determinan las tablas de correspondencia recíproca entre las pesas y medidas métricas y las actualmente en uso (Medidas y pesas legales de Castilla). *Gaceta de Madrid*, 643–656. Retrieved from <http://www.cem.es/sites/default/files/00000458recurso.pdf>

de Navascués y de Palacio, J. (1996). *Cádiz a través de 1513: (apuntes para su arquitectura y urbanismo desde el Siglo XIII)*. Cádiz: Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Occidental, demarcación de Cádiz.

de Rojas, C. (1598). *Teoría y práctica de Fortificación, conforme las medidas y defensas destos tiempos reparadas en tres partes*. Retrieved from <http://fondosdigitales.us.es/fondos/libros/708/9/teorica-y-practica-de-fortificacion-conforme-las-medidas-y-defensas-destos-tiempos/>

Díaz, G., & Seed, P. (2005). Electronic restoration: Eliminating the ravages of time on historical maps. In E. A. Fox, E. Neuhold, P. Premsmit, & V. Wuwongse (Eds.), *8th International Conference on Asian Digital Libraries, ICADL 2005* (pp. 100–108). https://doi.org/10.1007/11599517_12

Fleet, C. (2007). Lewis Petit and his Plans of Scottish Fortifications and Towns, 1714–16. *The Cartographic Journal*, 44(4), 329–341. <https://doi.org/10.1179/000870407X241890>

Giordano, A., & Nolan, T. (2007). Civil War Maps of the Battle of Stones

River: History and the Modern Landscape. *The Cartographic Journal*, 44(1), 55–70. <https://doi.org/10.1179/000870407X173850>

Granado-Castro, G., & Aguilar-Camacho, J. (2019). Cartographic Style in the First Urban Maps of Cadiz, Spain: A Technique in Transition. *The Cartographic Journal*, 56(1), 18–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00087041.2018.1554372>

Gutiérrez Dacosta, R., & Esteras Martín, C. (1991). *Territorio y Fortificación. Vauban, Fernández de Medrano, Ignacio Sala y Félix Prósperi: influencia en España y América*. Madrid: Ediciones Tuero.

Hermosin-Miranda, R. (2011). Características de los distintos soportes sobre los que se reproducen planos y esferas. *Revista PH (Instituto Andaluz Del Patrimonio Histórico)*, (77), 47–53.

Jenny, B., & Hurni, L. (2011). Studying cartographic heritage: Analysis and visualization of geometric distortions. *Computers and Graphics*, 35(2), 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2011.01.005>

Jenny, B., Weber, A., & Hurni, L. (2007). Visualizing the Planimetric Accuracy of Historical Maps with MapAnalyst. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 42(1), 89–94. <https://doi.org/10.3138/carto-v42-1-089>

Jongepier, I., Soens, T., Temmerman, S., & Missiaen, T. (2016). Assessing the Planimetric Accuracy of Historical Maps (Sixteenth to Nineteenth Centuries): New Methods and Potential for Coastal Landscape Reconstruction. *The Cartographic Journal*, 53(2), 114–132.

Kagan, R. L. (1986). *Ciudades del Siglo de Oro: Las vistas españolas de Anton Van Den Wyngaerde*. Madrid: Editorial El Viso.

Krejčí, J. (2009). Methods for georeferencing early maps. *Bulletin of the Society of Cartographers*, 43(1–2), 45–48.

Mariátegui, E. de. (1985). *El capitán Cristóbal de Rojas, ingeniero militar del siglo XVI*. Madrid: CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Comisión de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo.

Muñoz-Corbalán, J. M. (2015). *Jorge Próspero Verboom: ingeniero militar flamenco de la monarquía hispánica*. Retrieved from <https://biblioteca.juaneloturriano.com/Record/Xebook1-9614>

Nell, D. (2009). *Methoden der Genauigkeitsanalyse historischer Karten: am Beispiel der Gradkartenblätter 1:25.000 Innsbruck und Lienz der Dritten Österreichischen Landesaufnahme* (Universität Wien). Retrieved from <http://othes.univie.ac.at/6882/>

Niederöst, J. (2005). *Das Relief der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer (1716-1802): 3DRekonstruktion, Analyse und Interpretation*. (Eidgenössischen Technischen Hochschule, ETH Zürich). Retrieved from http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/89.pdf

Vauban, S. L. P. (1714). *Instruction pour les ingénieurs et dessineurs qui levent les Plans des Places du Roy ou des Cartes*. Paris, France: Imprimerie Royale

Vervust, S., Claeys Bouuaert, M., De Baets, B., Van de Weghe, N., & De Maeyer, P. (2018). A Study of the Local Geometric Accuracy of Count de Ferraris's

Carte de cabinet (1770s) Using Differential Distortion Analysis. *The Cartographic Journal*, 55(1), 16–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00087041.2017.1323148>

Warmoes, I. (2008). La rationalisation de la production cartographique à grande échelle au temps de Vauban. *Bulletin Du Comité Français de Cartographie*, (195), 55–66.

La representación urbana de Cádiz durante la Guerra de Sucesión española: paradigma de la actividad cartográfica del Cuerpo de Ingenieros Militares

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha constatado la importancia que tiene el análisis de la cartografía histórica como herramienta para la investigación del territorio urbano y su evolución diacrónica. Además, cada vez son más numerosos los estudios relacionados con el análisis cartométrico de planos y mapas históricos, en los que determinando sus características métricas (escala, orientación, sistema de proyección, exactitud posicional, etc.) se puede obtener una información de gran valor sobre las técnicas de medición y representación que se emplearon en el momento de su elaboración. Dentro de la gran variedad de planos y mapas históricos conservados son de especial interés los elaborados por los ingenieros militares durante la Edad Moderna, dado su gran protagonismo en la fortificación del territorio y la representación del paisaje urbano. La Guerra

de Sucesión (1700-1713) supuso un antes y un después para el estado español que permitió deshacerse de las ataduras del Antiguo Régimen y construir el futuro con profundas renovaciones en todos los ámbitos de la sociedad. En las próximas páginas trataremos de constatar cómo estos cambios también afectaron de manera directa a la representación cartográfica.

2. OBJETIVOS

En primer lugar, el artículo trata de poner en valor la labor cartográfica realizada por los ingenieros militares en Cádiz con motivo de la Guerra de Sucesión, que marcó un punto de inflexión en la representación de su espacio urbano. Para ello se analizarán las plantas urbanas más representativas de Cádiz realizadas por ingenieros militares franceses y españoles a principios del siglo XVIII. Se describirán sus

rasgos más característicos (escala y orientación), así como su exactitud posicional, empleando las técnicas y herramientas más actuales de análisis cartométrico.

3. ANTECEDENTES

3.1. Las primeras representaciones de Cádiz en la Edad Moderna a través de las vistas corográficas del siglo XVI

Pese a que Cádiz es una de las ciudades españolas con mayor información gráfica conservada, no puede considerarse el siglo XVI un siglo prolífero al respecto. Destacamos casi la ausencia de plantas completa de la ciudad, solo algunas parciales, siendo las vistas corográficas, la representación gráfica más característica de Cádiz en esta centuria. Una de los dos plantas completas conservadas se

corresponde con la realizada por el ingeniero Francés de Álava y Beamonte, capitán general de Artillería, en 1578. En esta planta únicamente se representa el perímetro amurallado, no existiendo apenas información sobre su trama urbana. La otra planta debemos ubicarla en el tratado de Cristóbal de Rojas de 1598 titulado “*Teórica y practica de fortificacion, conforme las medidas y defensas destos tiempos: repartida en tres partes (año 1598)*” (de Rojas, 1598). En esta planta el célebre ingeniero utiliza Cádiz, donde desarrolla gran parte de su actividad (Mariátegui, 1985), como modelo de ciudad fortificada. A diferencia de la anterior, aquí sí se representa parte del interior del recinto amurallado (figura 1). Pero, como se ha adelantado anteriormente, debemos acudir a las vistas corográficas para encontrar una información gráfica de gran interés histórico, más por su riqueza expresiva que por su rigor geométrico, ausente por completo. La vista de 1513 conservada en el Archivo General de Simancas (figura 2) es considerada la vista más antigua de la ciudad y el estudio de la misma (de Navascués y de Palacio, 1996) desvela que estamos ante una panorámica bastante fiel de la ciudad de principios del siglo XVI, en la que destaca la representación de sus murallas, castillo, puertas, iglesias y demás elementos del entramado urbano. Las otras dos vistas conservadas (figura 3) se ubican en la segunda mitad del siglo XVI y se corresponden con las realizadas por los pintores flamencos Joris Höefnagel (1564) y Anton van den Wyngaerde (1567) (Kagan, 1986). La segunda de ellas es la que mayor nivel de detalle y rigor gráfico presenta, convirtiéndose en uno de los testimonios más interesantes para el estudio de la fisonomía de la ciudad antes de ser saqueada y destruida por una armada anglo-holandesa en 1596.

3.2. Estilo cartográfico y su evolución en la representación de Cádiz durante el siglo XVII

Desde el punto de vista de la representación cartográfica de la ciudad, el siglo XVII jugará

un papel muy importante en la búsqueda de una técnica estable que permita obtener una representación rigurosa del entorno urbano desde el punto de vista métrico pero sin perder la expresividad que dominaba las representaciones del siglo anterior (Arévalo Rodríguez, 2003), cuyo culmen se consigue en las vistas corográficas. En este sentido, a pesar de que no se conservan vistas de la ciudad pertenecientes a este siglo, en las plantas completas de Cádiz seguirán presente las representaciones tridimensionales de edificios o elementos del perímetro fortificado.

Estos dibujos tridimensionales irán perdiendo protagonismo a medida que avanza el siglo, llegando a finales del mismo con representaciones planimétricas en la que la presencia de perspectivas, si existen, son completamente residuales. Por otra parte, destacamos cómo en la primera mitad de siglo existirá una mayor preocupación en acentuar métricamente el contorno fortificado de la ciudad, siendo la representación del entramado urbano muy simbólica, limitándose en muchas ocasiones a la representación tridimensional de los edificios más emblemáticos. Este es el caso de la planta conservada en la *Bibliothèque nationale de France*, la cual situamos en la década de 1630. En ella el parcelario se representa en perspectiva sin ninguna base planimétrica.

Además, es especialmente interesante analizar el tipo de perspectiva empleada, intentando asemejar el conjunto de la planta al de una vista general (figura 4). En la segunda mitad de siglo, los planos conservados se liberan del uso de perspectivas y será la vista en planta la que dominará la totalidad de la representación de la ciudad (figura 5), apareciendo un mayor rigor métrico en el dibujo de la trama urbana (Granado-Castro & Aguilar-Camacho, 2019).

3.3. *Le Corps Royal du Génie*: un modelo de organización para la configuración del Real Cuerpo Español de Ingenieros Militares

No es casualidad que, tras la Guerra de Sucesión, y con la creación del Real Cuerpo de Ingenieros Militares, se produzca una importante

transformación en la cartografía urbana en España. La representación de la ciudad pasará a ser más rigurosa desde el punto de vista geométrico. Empleará una simbología más reconocible y estandarizada, fruto de unas nuevas normas establecidas por parte del cuerpo de ingenieros, verdaderos protagonistas de la representación urbana en el siglo XVIII.

Tras el conflicto bélico por la sucesión al trono, el Estado español siente la necesidad de modernizarse, reformando estructuras administrativas y renovando infraestructuras. La guerra había puesto en evidencia la delicada situación en la que se encontraba el país. Para esta complicada tarea fue necesario el desarrollo de una cartografía más precisa que respondiera a estas nuevas exigencias.

Cádiz fue una de las principales plazas fuertes del Reino y, por consiguiente, ciudad con una gran producción cartográfica (Chías-Navarro & Abad-Balboa, 2011).

Representa un caso ejemplar que permite ilustrar de manera clara estos cambios producidos en la cartografía urbana en los inicios del siglo XVIII.

No obstante, estos avances en la representación urbana no se producen de manera espontánea sino que se gestan a finales del siglo XVII dentro de *Le Corps Royal du Génie*, el cual se especializó desde sus inicios en la producción de cartografía militar. Perfeccionaron los instrumentos de medición y las técnicas de representación (Bonet Correa, 1991, pp. XXXVI–XL). El gran artífice de estos cambios fue el Mariscal Vauban, quién a partir de 1668, una vez designado Comisario General de Fortificaciones, se propuso codificar las reglas del dibujo realizado por los ingenieros, especializados en la elaboración de planos de fortificaciones (Warmoes, 2008, p. 55). Hasta la intervención de Vauban, existía una gran variedad de prácticas cartográficas, y cada ingeniero utilizaba un lenguaje gráfico particular. En esta nueva reglamentación se establecerá el color y el tipo de línea a utilizar en los planos y mapas con el fin de diferenciar las obras acabadas de las que están en ejecución o en proyecto. De igual manera se fijarán las escalas más adecuadas a

utilizar en los planos y los mapas.

Estas nuevas reglas empezarán a imponerse en la práctica cartográfica de los ingenieros durante las últimas décadas del siglo XVII y posteriormente, en 1714, verán la luz en una recopilación denominada *“Instruction pour les ingénieurs et dessineurs qui levent les Plans des Places du Roy ou des Cartes”*. (Vauban, 1714). El objetivo fue obtener una representación uniforme de todos los territorios militares del Reino.

Además de esta instrucción, en esta época de transición entre el siglo XVII y XVIII, se publican otros tratados donde se difunden estos nuevos códigos gráficos, cuya necesidad de implantación era patente. En este sentido, destacan los trabajos de los ingenieros militares Henri Gautier de Nimes, Nicolas Buchotte y Louis Charles Dupain de Montesson, quienes definen un conjunto de reglas que afectan tanto a la selección de materiales, técnicas y colores a emplear en planos y mapas (D’Orgeix, 2016).

Tal como se observará posteriormente, los planos de Cádiz elaborados por los ingenieros franceses durante la Guerra de Sucesión dispondrán de una codificación muy característica y propia, resultado de todos esos cambios que en Francia eran ya una realidad.

Su comparativa con los planos elaborados por los ingenieros españoles en la segunda mitad del siglo XVII no deja lugar a dudas.

Cuando en 1711 se crea en España el Cuerpo de Ingenieros Militares, dirigido por el Ingeniero General Jorge Próspero Verboom y con una gran presencia de ingenieros militares franceses y flamencos (Capel Sáez, Eugeni Sánchez, & Moncada, 1988, pp. 14–33), estos nuevos aires en la codificación cartográfica fueron conocidos por la mayor parte de ellos y serán puesto en práctica en las representaciones topográficas que se realizaron durante el siglo XVIII, particularmente en Cádiz. Incluso algunos de los ingenieros militares que trabajaron en la ciudad antes de la creación del cuerpo, tales como Pedro Borrás y Diego Luis Árias, habían trabajado en Flandes en contacto con Sebastián Fernández de Medrano y Verboom (Cano-Révora, 2017, pp. 329–355).

Finalmente es importante destacar que estos cambios en la representación de los planos y mapas que se desarrollan en Francia a finales del siglo XVII, no solo tuvieron influencia en la cartografía urbana española del siglo XVIII, sino también se ha constatado que incidió de manera directa en la cartografía militar británica.

Incluso se podría afirmar que en Francia se asientan las bases de unas nuevas teorías y prácticas militares en Europa, coincidiendo con el establecimiento de un cuerpo profesional de ingenieros militares en la mayoría de los países. Será durante el siglo XVIII cuando en Gran Bretaña se produzca también una “militarización de la cartografía”, introduciéndose nuevos estándares relacionados con el color, la escala y la terminología. Se desarrollará un cuerpo de ingenieros militares que emulará las nuevas prácticas francesas (Fleet, 2007).

4. METODOLOGÍA

4.1. Descripción de las plantas analizadas

A continuación, procedemos a aportar una descripción sucinta de las plantas más representativas de Cádiz de origen francés y español que datan de principios del siglo XVIII (Figura 6).

Plano 1.- *‘Plan de la Ville de Cadix’*. Colección D’Anville (Le Petit Atlas Maritime, Tomo IV, plan 57), Bibliothèque nationale de France (GE-DD-2987), 433,1 x 316,6 mm. Planta de origen francés, en el que el aspecto y elementos del perímetro de la ciudad representados nos permiten situar su elaboración en torno a 1703-1705. Plano no firmado, atribuido a Jacques Nicolas Bellin.

Plano 2.- *‘Plan de la Ville de Cadix’*. Bibliothèque nationale de France (GE-SH-PF-18-61-21-D-DIV 4 P), 519,8 x 380,6 mm. Planta de origen francés, en el que el aspecto del perímetro representado, además de la información que aparece reflejada en la leyenda nos hacen situar su elaboración en torno a 1706. Plano no firmado, anónimo.

Plano 3.- *‘Plan de la Ville de Cadix’*. Bibliothèque

nationale de France, Colección D’Anville (GE-DD-2987-1729), 454,9 x 289,9 mm.

Planta de origen francés, en el que el aspecto del perímetro y trama urbana representados, además de la información que aparece reflejada en la leyenda nos permiten situar su elaboración en torno a 1709-1710. Plano no firmado, atribuido a Jean de Beaurin.

Plano 4.- *‘Plano de Cadiz con la Explicacion de su Recynto...’*. Archivo General Militar de Madrid (AT-194/28), 585,7 x 407,8 mm. Planta de origen español, en el que el aspecto de la ciudad representada, además de la información que aparece reflejada en la leyenda nos hacen situar su elaboración en torno a 1723-1724. Plano no firmado, anónimo.

Plano 5.- *‘Mapa particular de la Plaza de Cadix’*. Bibliothèque nationale de France (GE-D-15954), 527,2 x 347,0 mm. Planta de origen francés, en el que el aspecto de la ciudad representada no nos permite en este caso concretar mucho la fecha de su elaboración, la cual creemos que está en torno a 1723-1730. Plano no firmado, atribuido a Charles Le Brun.

Plano 6.- *‘Plano General de la Plaza de Cadiz’*. Archivo General Militar de Madrid (CA-33/17), 1.046,2 x 622,1 mm. Planta de origen español fechada en el título del plano en el año 1724. Plano no firmado, anónimo.

Plano 7.- *‘Plano de la Plaza de Cadiz con sus Fuertes...’*. Archivo General Militar de Madrid (CA-30/7), 1.363,5 x 881,9 mm. Planta de origen español fechada en el título del plano en el año 1724. Plano no firmado, anónimo.

4.2. Análisis cartométrico

4.2.1. Escala promedio

En cartografía histórica es preciso distinguir entre la escala teórica (la pretendida por el autor del mapa) y la escala real (obtenida como el promedio de las distintas escalas presentes en el documento). Hemos determinado la escala teórica, para aquellos planos que contienen escala gráfica, mediante su conversión al sistema

español de escalas utilizado en la época (o al sistema francés cuando el español no ofrecía correspondencia) [1].

La escala real ha sido evaluada con el software MapAnalyst, una herramienta específica para este tipo de análisis (Jenny & Hurni, 2011; Jenny, Weber, & Hurni, 2007), y comprobada mediante un análisis de distorsión diferencial (Claeys Bouúaert et al., 2016), en ambos casos a partir de una transformación Helmert.

Esta escala real es un valor promedio del conjunto del plano, cuya representatividad depende del número de puntos de control utilizados y de su homogénea distribución.

4.2.2. Exactitud planimétrica

La exactitud posicional ha sido evaluada en términos del Root Mean Square Error (RMSE) y su desviación estándar, obtenido como el residuo de una transformación de ajuste entre puntos homólogos de control del plano histórico y de un plano reciente de la ciudad (Cádiz 2006, ED50/UTM zone 29N EPSG:23029).

Para su aplicación recurrimos al software MapAnalyst y a una transformación afin de seis parámetros. Esta transformación es la más indicada (Beineke, 2001, pp. 16-19; Cajthaml, 2011, p. 2; Krejčí, 2009, p. 46; Niederöst, 2005, pp. 70-73) cuando el estado de conservación del soporte cartográfico hace presumible la existencia de distorsiones diferenciales (de escala y ortogonalidad) que pueden enmascarar la exactitud original del plano. Diversos estudios (Baiocchi & Lelo, 2010, p. 101; Jenny & Hurni, 2011, p. 409; Jongepier, Soens, Temmerman, & Missiaen, 2016, p. 116) avalan la utilización de este tipo de transformación aun cuando los mapas comparados no utilicen la misma proyección cartográfica, sólo si se trata de una zona pequeña representada a gran escala y se utiliza una proyección conforme local (Claeys Bouúaert et al., 2016, p. 1260), como en el caso que nos ocupa.

La relevancia del RMSE como indicador de la

exactitud posicional de un mapa histórico resulta altamente dependiente del número de puntos de control empleados en su determinación y de su homogénea distribución (Giordano & Nolan, 2007, p. 62; Krejčí, 2009, p. 2). En este sentido, la favorable configuración de la trama urbana histórica de Cádiz, consolidada a finales del siglo XVIII y prácticamente intacta, ha permitido la identificación de un gran número de puntos de control (principalmente en las esquinas de los edificios y elementos defensivos de la ciudad) con una homogénea distribución espacial.

Por último, al objeto de confrontar la exactitud posicional entre los distintos planos, en términos del RMSE y su desviación estándar, hemos repetido el análisis utilizando una misma nube de puntos de control común a todos ellos.

4.2.3. Alineación de la rosa de los vientos

En los planos históricos orientados mediante una rosa de los vientos es posible conocer con relativa certeza cómo ésta fue alineada respecto a la trama urbana. En nuestro caso, la comprobación se reduce a determinar la rotación que experimenta el norte materializado por la rosa de los vientos respecto al norte de la cuadrícula UTM. Ésta se puede calcular con ayuda de una transformación Helmert entre el plano histórico y su referente actual. Con los valores de convergencia de cuadrícula y declinación magnética, determinados coetáneamente para la época del plano histórico en un punto central de la trama urbana de la ciudad, se puede establecer una hipótesis aproximada de cómo fue alineada la rosa de los vientos [2].

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Escala promedio

En la tabla 1 se detallan los resultados obtenidos en el sistema español y/o francés de escalas de la época [3], según proceda, y sus respectivas conversiones a escala decimal.

En general, los planos se encuentran trazados

en la proporción que indica su escala gráfica, con pequeñas oscilaciones alrededor del 1%. Éstas probablemente se deban al estado de conservación de los soportes (papel o papel entelado) [4]. Sin embargo, la proporción representada en las escalas gráficas de los planos 4 y 5 no es exacta. Ambos ejemplares se caracterizan por un evidente matiz artístico en sus respectivas traza y composición, no observado en los restantes planos analizados. El plano 4 forma parte de un atlas sobre plazas fuertes del Reino de España, la mayoría de ellas fechadas en la década de 1720 y rubricadas por el ingeniero marsellés Miguel Marín [5]. Por su parte, el plano 5 es una reproducción de la plaza de Cádiz realizada en los talleres del famoso pintor de cámara francés Charles Le Brun [6]. Posiblemente, la composición y la estética primaron sobre la exactitud cartométrica de estos ejemplares, destinados a formar parte de un atlas.

El plano 3 presenta una doble escala gráfica, expresada en toesas francesas y en varas castellanas, que no guardan la misma proporción. El análisis realizado permite confirmar que la escala correcta es la francesa. La escala castellana corresponde a una proporción algo mayor, seguramente por un error en su conversión.

5.2. Calidad y exactitud posicional

La exactitud posicional ha sido evaluada en dos escenarios diferentes. En el primero, hemos utilizado todos aquellos puntos de control identificados en cada plano (entre 534 y 724 puntos). En el segundo, sólo hemos considerado aquellos puntos de control vinculados a todos los planos (386 puntos).

Con este doble enfoque hemos logrado conocer la exactitud posicional y la escala promedio de cada plano con la mayor consistencia posible; también obtener valores RMSE homogéneos y comparables entre todos los planos.

En la tabla 2 detallamos los resultados obtenidos. Los planos están ordenados según el valor RMSE calculado para una misma muestra de puntos de

control (386 puntos). La última columna de la tabla muestra la calidad posicional [7] de cada ejemplar. En la última columna de la tabla 1 podemos observar que la mejor y peor calidad posicional corresponden, respectivamente, a los planos de menor y mayor escala (planos 5 y 7). En todos los planos los valores obtenidos se sitúan muy por encima del estándar de calidad más aplicado a la producción cartográfica actual (0.2 mm), el límite de la percepción visual (Baiocchi & Lelo, 2010, p. 98).

Los planos 6 y 7 resultan ser los de menor distorsión posicional. Ambos ejemplares, sin rubricar y fechados en el año 1724, debieron ser elaborados por miembros del Real Cuerpo Militar de Ingenieros destinados en las obras de fortificación de Cádiz durante esta etapa. Entre ellos, destacan las figuras de Jorge Próspero Verboom e Ignacio Sala Garrigo [8].

En el lado opuesto, la menor exactitud posicional corresponde a los planos 4 y 5, que ilustran el estado de las obras de la ciudad en una fecha próxima al año 1725. El aludido cariz artístico de estos ejemplares podría explicar un menor rigor posicional en sus trazados.

Los planos 1, 2 y 3, de origen francés, datan de la primera década del siglo XVIII y muestran la configuración defensiva de la plaza durante la Guerra de Sucesión española (1701-1713). Presentan un valor promedio RMSE ligeramente inferior al de los planos 4 y 5, aunque su distribución espacial resulta singularmente heterogénea. La visualización de la distribución local de las deformaciones presentes en estos tres ejemplares de origen francés permitirá explicar mejor su relativa exactitud posicional.

Para este estudio hemos empleado el método de análisis de distorsión diferencial (Claeys Bouuaert et al., 2016; Vervust, Claeys Bouuaert, De Baets, Van de Weghe, & De Maeyer, 2018), una versión mejorada respecto al enfoque utilizado por MapAnalyst para la visualización e interpretación local de la distorsión presente en un plano histórico [9]. Los cálculos y sus visualizaciones gráficas se han generado, respectivamente, con el software Matlab R2018a y QGIS 3.4.8.

En la figura 7 se muestran los vectores de desplazamiento de los puntos de control en los planos 1, 2 y 3, obtenidos con una transformación Helmert. En estos planos la longitud de los vectores es mayor en la zona central de la trama urbana, aunque disminuye en su contorno y en el perímetro fortificado de la ciudad (ver tabla 3). En la figura 8 las deformaciones locales de estos planos se visualizan mediante la malla de distorsión, el logaritmo en base 2 del factor de escala de área (σ) y la deformación máxima angular (2Ω). La malla de distorsión muestra cómo debe deformarse el plano de referencia para ajustarse al plano histórico. Está generada con una interpolación *thin plate spline* y con una resolución de cuadrícula de 20x20 metros.

El factor de escala de área (σ) y la deformación máxima angular (2Ω) muestran, respectivamente, cómo se deforman el área y los ángulos en el plano histórico. Los valores resultantes, calculados en los puntos de control y en los vértices de la malla, se visualizan a través de un mapa de colores generado mediante una interpolación TIN [10]. Los resultados confirman que los planos 1, 2 y 3 presentan una distribución local de la distorsión muy heterogénea, que fundamentalmente se concentra en la parte central de la trama urbana de la ciudad. Sin embargo, paradójicamente, también son los planos que con mayor exactitud representan la posición del perímetro defensivo de la ciudad, mejor incluso que los planos 6 y 7, los de mayor exactitud global.

Por último, las leyendas y los elementos representados en los planos 1 y 2 guardan un gran nivel de coincidencia. También el RMSE promedio global y su distribución local resultan muy similares en ambos planos.

Aunque es probable que sus trazas estuvieran relacionadas, el análisis realizado no permite confirmar este aspecto.

5.3. Alineación de la rosa de los vientos

Por último, en cada plano hemos evaluado la alineación norte-sur de la rosa de los vientos respecto al norte de la cuadrícula UTM del plano

de referencia. El objeto es conocer si fue orientada al norte magnético, al norte verdadero o a otra dirección arbitraria.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9. Conviene recordar que los planos 1, 2 y 5 orientan el norte de la ciudad hacia el borde superior del formato. El resto lo hacen hacia el borde inferior (orientación sureada).

De los siete planos analizados, cinco alinearon la rosa de los vientos con el norte magnético (planos 1, 2, 3, 5 y 7), entre ellos todos los planos franceses. Destaca el plano 2, que logró hacerlo con el margen de error más bajo. En el plano 6 la alineación tuvo lugar al norte verdadero [11]. En el plano 4, el menos exacto, la rosa de los vientos se añadió como un elemento meramente decorativo. Así lo confirma su gran desviación respecto al norte magnético y al norte verdadero.

6. CONCLUSIONES

Del estudio realizado anteriormente destacamos las siguientes conclusiones:

- Aunque hemos constatado que en los planos de origen español, a excepción del plano 4, la exactitud posicional en su conjunto es mejor a la de los planos de origen francés, los resultados obtenidos a nivel local nos informan que la representación del perímetro urbano y fortificado de la ciudad se realizó con mayor precisión en estos últimos. Esto pone de manifiesto que la labor cartográfica desarrollada en Cádiz por *Le Corps royal du Génie* tuvo un carácter pragmático, cartografiando con mejor precisión aquellos elementos de mayor interés para la estrategia militar. Para el resto de elementos realizaban una labor de relleno muy aproximada y, en algunos casos, ni siquiera se representaban. Esta singularidad no se observa en los planos españoles analizados.

- Predominio de la alineación de la rosa de los vientos al norte magnético, con la singularidad de la composición sureada en las plantas españolas.

- Entre las plantas francesas destacamos el uso de escalas pequeñas para la representación del territorio urbano, con objeto de adaptar los

planos al formato de los grabados que difundían en series editadas.

- Por último, destacar que la Guerra de Sucesión supuso un punto de inflexión en la representación urbana de la ciudad en la que, tanto el estilo como la técnica cartográfica introducida por *Le Corps Royal du Génie* tuvo una clara influencia en los planos de Cádiz producidos por el cuerpo homólogo español durante el siglo XVIII.

NOTAS

[1] El uso del sistema francés de escalas fue frecuente en la cartografía española durante la Edad Moderna, particularmente durante el siglo XVIII, debido a la influencia de los ingenieros militares llegados desde Flandes y Francia a raíz de la Guerra de Sucesión española.

[2] Valores históricos estimados de acuerdo al *International Geomagnetic Reference Field (IGRF12) model*, obtenidos a través de la *Magnetic Field Calculators of the National Geophysical Data Center (National Centers for Environmental Information, NCEI)* del *US Department of Commerce*. La exactitud de la declinación magnética generalmente es inferior a 30 minutos (0.5 grados) de arco.

[3] En el sistema español de escalas de la época: vara castellana (0.0835905 metros), palmo (0.2089763 metros) y dedo (0,0174147 m). En el sistema francés de escalas de la época: toesa (1,94904 m), pie de Rei (0.32484 metros), pulgada (0.02707 metros) y línea (0.0022558 m). (Bourdon, 1843; de Borbón y Borbón-Dos Sicilias, 1852).

[4] La aparición de deformaciones debidas al plisado o al peso propio, el plegado y desplegado para su manipulación y almacenamiento, así como los cambios de humedad y temperatura son los principales responsables de los procesos de dilatación y contracción del papel (Díaz & Seed, 2005, p. 100; Hermosín-Miranda, 2011, pp. 50-52). Estos pueden dar lugar a cambios en las dimensiones del formato de hasta el 1% del tamaño original (Nell, 2009, p. 3).

[5] El atlas se conserva en el

Archivo General Militar (AT-194/28).

[6] En el margen izquierdo del plano, sobre la leyenda, puede leerse: "C. Le Brun SL". La *Bibliothèque nationale de France* atribuye la autoría del plano a Charles Le Brun (1619-1690), pero su muerte en el año 1690 hace inviable esta posibilidad. La presencia de una leyenda en perfecto castellano y la amplitud del período temporal (1723-1730) de la trama y las diversas obras de fortificación representadas en el documento, hacen pensar en la posibilidad de que nos encontremos ante una reproducción realizada en los talleres de Le Brun con posterioridad al año 1730, a partir de diversas plantas de la ciudad levantadas durante la década de 1720 por otros cartógrafos.

[7] La calidad posicional se emplea para evaluar la exactitud planimétrica de la información geográfica representada en un producto cartográfico, atendiendo a su escala y finalidad.

[8] Verboom, Ingeniero General de los Reales Ejércitos castellanos, máximo responsable de la creación del cuerpo (año 1711) y de sus centros de formación, trabajó activamente en las obras para defensa y fortificación de Cádiz durante el año 1724 (Capel-Sáez et al., 1983, p. 476; Muñoz-Corbalán, 2015). En cuanto a Ignacio Sala, vinculado a Cádiz desde el año 1718 con el rango de Ingeniero en Jefe, colaboró estrechamente con Verboom y fue designado Ingeniero Director de las obras de Cádiz y de Andalucía en general, en el año 1724 (Gutiérrez Dacosta & Esteras Martín, 1991, p. 84).

[9] El análisis de distorsión diferencial modela la deformación que debe experimentar el mapa moderno para encajar en el

mapa antiguo mediante una interpolación *thin plate spline*. Este análisis considera dos métricas principales para evaluar el error local: el factor de escala de área (σ) y la máxima distorsión angular (2Ω), que ilustran cómo se deforman las superficies y los ángulos, respectivamente, entre uno y otro mapa.

[10] El factor de escala de área se traza con el logaritmo en base 2 de σ , que homogeneiza el tamaño de visualización de las distorsiones que corresponden a iguales incrementos o reducciones de superficie.

[11] La declinación magnética ya era un fenómeno conocido en 1436, como consta en una carta portulana de Andrea Bianco (1436) (Cerezo Martínez, 1994: p. 12).