

## Georreferenciación de cartografía antigua para los visores del SCUAM

*Carlos Almonacid Ramiro - SCUAM*

30-11-2016. Actualizado 18-06-2020.

---

La digitalización de los mapas antiguos permite su integración con las tecnologías de información geográfica actuales. Las herramientas propias de la cartografía digital facilitan el análisis comparativo de los mapas antiguos con otras fuentes cartográficas históricas o actuales y permiten rastrear los procesos de su construcción. Por otra parte, la comparación de los diversos mapas históricos aporta un valioso material para los análisis sobre la evolución del territorio y para la observación de los avances en el conocimiento de la tierra a lo largo de la historia. Además, desde el ámbito de la cartografía, interesa especialmente analizar la evolución histórica de los propios mapas, de los recursos gráficos utilizados para su trazado, los elementos representados en ellos, o la calidad de sus datos de posicionamiento.

Pero el manejo de la cartografía antigua digitalizada con las tecnologías cartográficas actuales no es inmediato. Las herramientas digitales adquieren todo su sentido cuando las imágenes digitales de los mapas pasan a estar georreferenciadas, es decir, posicionadas en un sistema de coordenadas expresamente legible por el software cartográfico.

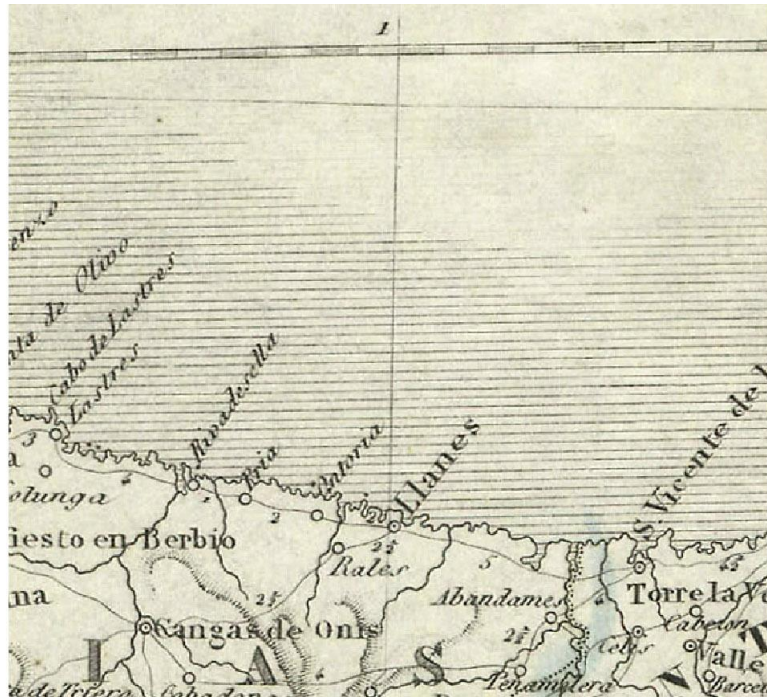
Todo documento cartográfico, por arcaica que sea su construcción, es susceptible de ser georreferenciado en algún sistema de coordenadas manejable por el software actual, pero se debe tratar de hacerlo manteniendo las transformaciones y deformaciones aplicadas dentro de un rango controlable. Cuando los mapas antiguos hayan sido construidos mediante técnicas basadas en la cartografía matemática, por simple que esta sea, podremos intentar reconstruir su sistema de referencia original en la nueva asignación de coordenadas digitales. De este modo, el documento original se mantendrá con su geometría intacta, o mínimamente deformada, tras el proceso de georreferenciación. Si, por el contrario, utilizáramos deformaciones incoherentes con el proceso cartográfico de creación del mapa,

impediríamos la realización de algunos de los análisis que más nos interesan desde el punto de vista de la historia de la cartografía, como el del desarrollo de los métodos de posicionamiento o la evolución de la precisión en la captura de datos.

Cuando se plantee el manejo de otros viejos mapas alejados de la cartografía científica, carentes de sistemas de proyección reconocibles o, incluso, de referencias a coordenadas geográficas, será prácticamente imposible la reconstrucción de su sistema de referencia original dentro de los cánones matemáticos manejados por la georreferenciación digital. En estos casos, se podría optar por una georreferenciación aproximada, que simplemente llegue a situar cada mapa en el espacio representado en él, manteniendo la geometría original del documento. También cabría intentar una georreferenciación más ajustada, deformando distintas partes del mapa para adaptarlo a una serie de puntos de control identificables en él y de los que se conozcan sus coordenadas actuales. Este último tipo de georreferenciación llevará los mapas a un sistema de referencia actual deformando su geometría inicial, forzando las coordenadas de los elementos representados a posiciones desconocidas en la época de redacción de los mapas, fijadas mucho tiempo después con tecnologías más avanzadas. Sea cual sea el procedimiento utilizado en la georreferenciación de los mapas antiguos que carezcan de sistemas de referencia matemáticos, quedará comprometido el estudio de su posicionamiento original.

En un primer momento, centraremos nuestro trabajo en el manejo de cartografía española de los siglos XVIII y XIX, época en la que se fueron generalizando los procedimientos de la geodesia y la cartografía matemática. Esto nos permitirá indagar sobre la evolución de las técnicas científicas que condujeron hacia la cartografía actual reconstruyendo los antiguos sistemas de referencia. Por tanto, el objetivo fundamental de la georreferenciación no será la obtención de un mapa absolutamente ajustado como si se hubiera construido en la actualidad. Todo lo contrario, se trata de situar el mapa tal y como se generó, para poner de relieve el conocimiento, las técnicas y los datos de su época.

Por ejemplo, observemos la posición de un punto con respecto a un mismo meridiano en una serie de mapas antiguos. Fijaremos la atención en la villa de Llanes y en el meridiano de  $1^{\circ}$  al oeste del observatorio de Madrid. En primer lugar, veamos un mapa de Pedro Martín López de 1852 a escala aproximada 1:1 860.000. En él encontramos Llanes a unos segundos al este del meridiano de  $1^{\circ}$ :



En el siguiente mapa de España y Portugal a escala 1:1 000.000 de 1860, obra de Francisco Coello, Llanes aparece exactamente sobre la línea del meridiano de 1º:



En el Mapa Itinerario Militar del Depósito de la Guerra de 1865 a escala 1:500.000, Llanes salta la línea y se sitúa más de un minuto al oeste del meridiano que estamos tomando como referencia:





En el de Ibáñez de Ibero del año 1884 a escala 1:1 500.000, encontramos la villa de Llanes a unos 4 minutos al oeste del meridiano de 1º. Esta posición es prácticamente equivalente a su longitud fijada en la actualidad a 4º45'10" W de Greenwich:



La evaluación de estas diferencias de posición se hace mucho más difícil a medida que nos alejamos de las líneas de los meridianos, a no ser que visualicemos todos estos mapas con un software cartográfico y que hayamos conservado sus sistemas de referencia originales durante el proceso de su georreferenciación. Obviamente, tales diferencias de posición quedarían completamente enmascaradas o, incluso, eliminadas en una georreferenciación que utilizase la villa de Llanes, o cualquier otro elemento cercano, como punto de control en el ajuste hacia un sistema de coordenadas actual.

Ahora bien, en todo proceso de georreferenciación digital es necesario introducir una serie de puntos de control, también si vamos a situar el mapa en su sistema de coordenadas original. Siempre hay que explicitar numéricamente cuáles son las coordenadas cartográficas de determinados puntos visibles en el mapa digitalizado. ¿Qué elementos debemos elegir? La respuesta es clara: los mismos que establecían el armazón geográfico del mapa original, su red de meridianos y paralelos. La red de círculos terrestres siempre ha sido una malla teórica, independiente de las técnicas de observación, de la exactitud de los métodos de posicionamiento utilizados para la captura de datos y del trazado de los objetos reales representados en los mapas<sup>1</sup>. Establece un sistema de referencia que ha pervivido durante siglos y que aún sigue y seguirá utilizándose. Ajustando los mapas a la red teórica de meridianos y paralelos tendremos la magnífica oportunidad de contar con un marco de comparación común para todos ellos.

En muchos casos, tendremos que realizar una traslación del origen de coordenadas geográficas, dando respuesta al problema de la multiplicidad de meridianos de referencia<sup>2</sup> hasta la generalización del meridiano de Greenwich como origen de longitudes universal. Pero esta elemental operación matemática, especialmente sencilla en el software cartográfico, no altera en absoluto el modelo de referencia básico de la cartografía, fundamentado en una red de paralelos y meridianos.

## Procedimiento de georreferenciación de mapas de los siglos XVIII y XIX

---

El procedimiento seguido incluye los siguientes pasos:

1. Descripción y análisis de las características generales del mapa y sus ficheros: fuente, formato, resolución, escala, división en hojas y sus características, malla de meridianos y paralelos, unidades, información sobre su proyección y sistema de referencia, contexto histórico y cartográfico, propósito del mapa, posibles medios empleados, estado de conservación, etcétera.

---

<sup>1</sup> SNYDER, John P. (1993). *Flattening the Earth. Two Thousand Years of Map Projections*. Chicago & London, The University of Chicago Press. 365 pp. p 2.

<sup>2</sup> ALMONACID, C. (2016). Longitudes de los Antiguos Meridianos en la Cartografía Española. Consultado en <http://guiadigital.uam.es> . Recoge las referencias y los cálculos en los que nos hemos basado para obtener los datos de estos viejos meridianos.

2. Evaluación de las deformaciones del papel y de su proceso de escaneado. Posibles ajustes. Mejora de la visualización del fichero digital.
3. Creación de ficheros digitales vectoriales que reconstruyan numéricamente la malla de meridianos y paralelos del mapa original.
4. Análisis e identificación del sistema de proyección y de referencia originales cuando no sean conocidos o no hayamos conseguido suficiente información sobre ellos en el primer paso de este procedimiento.
5. Georreferenciación de los ficheros de los mapas en el sistema de proyección y de referencia originales, o que hayamos identificado como más próximo a los originales, utilizando la malla de meridianos y paralelos.
6. Análisis de las deformaciones puestas en evidencia en el proceso de georreferenciación.
7. Ajuste de las deformaciones de la malla de meridianos y paralelos representada en el mapa a su posición teórica.
8. Transformación de los ficheros georreferenciados a un sistema de referencia actual para facilitar su manejo por las librerías de software cartográfico.

Una vez llevada a cabo esta georreferenciación, respetuosa con el documento cartográfico original, pueden plantearse las necesidades de otras aplicaciones en las que se requiera una adecuación mayor de los elementos representados en el mapa a sus posiciones reales. En estos casos, se podrá realizar sobre los ficheros ya georreferenciados un:

9. Ajuste irregular por triangulación basado en puntos de control identificados sobre las entidades cartografiadas en el mapa.

A continuación, comentaremos las operaciones de todo este procedimiento que pueden requerir de una explicación más detallada.

## **Descripción y análisis de las características generales del mapa y sus ficheros**

Entre toda la información a recopilar en este punto, ahora destacaremos los datos sobre la proyección y el sistema de referencia del mapa antiguo, incluyendo las características de su malla geográfica de meridianos y paralelos, básica para la reconstrucción del sistema de

georreferencia original. A veces, encontramos mapas que poseen marcos graduados pero carecen de malla geográfica, podemos plantearnos trazarla sobre la imagen del mapa a partir de su marco graduado cuando meridianos y paralelos sean rectilíneos. Esto llega a suceder con frecuencia, bien por la proyección empleada – como la de mercator, utilizada habitualmente en las cartas náuticas desde el s. XVII hasta nuestros días o en las antiguas proyecciones poliédricas – bien por las simplificaciones introducidas por algunos cartógrafos, como Tomás López que aplanaba ligeramente las amplias curvas sinusoidales de los meridianos de la proyección sinusoidal en nuestras latitudes para convertirlas en rectas y facilitar su trabajo. En las ocasiones en que seamos capaces de dibujar la malla geográfica sobre el mapa, tendremos la posibilidad de densificarla para llegar a obtener tantos puntos de cruce como necesitemos para el proceso de georreferenciación.

En la cartografía antigua, raramente se expresa cuál es su sistema de proyección pero éste será el momento de anotarlo, en el caso de que aparezca citado. A veces, este dato se puede obtener en las obras relacionadas con la publicación de los mapas, como ocurre en los Derroteros de las costas españolas que acompañaban al Atlas Marítimo de Tofiño. En otras ocasiones, puede aparecer en los estudios académicos y obras de referencia sobre los mapas o sus autores. Este es uno de los datos más valiosos para nuestro proceso de georreferenciación y no escatimaremos esfuerzos para conseguirlo. Aun así, en muchas ocasiones no llegaremos a conocer fehacientemente cuál fue la proyección cartográfica empleada en la confección del mapa. También, es muy habitual que, siendo conocido el sistema de proyección, nos falte alguno de sus datos clave, como los paralelos estándar empleados en las proyecciones cónicas. En un punto posterior del proceso, describiremos el método que hemos utilizado para llegar a deducir, con un grado de aproximación suficiente, el sistema de proyección de los mapas históricos cuando carecíamos de esta información.

Tampoco es habitual que los autores de los mapas antiguos informen sobre la figura de la tierra que utilizaban, si era una esfera o uno de los elipsoides que iban siendo propuestos y formulados por diferentes cartógrafos. En cualquier caso, este dato es de menor relevancia y modifica muy poco la geometría del mapa cuando se trata de cartografía regional a escalas pequeñas o medias. Las diferencias métricas debidas a los cambios de datum suelen estar por debajo de la precisión esperada en el trabajo con este tipo de mapas antiguos

Se han realizado comprobaciones sobre varios mapas antiguos de buena factura – el mapa de América Meridional del Juan de la Cruz o algunas cartas del Atlas Marítimo de Tofiño –

utilizando diversas figuras de la tierra, incluyendo antiguos elipsoides como el de Jorge Juan y esferas actuales basadas en los sistemas GRS80 y WGS84. Las diferencias de posición obtenidas sobre el mismo mapa georreferenciado sobre las distintas figuras de la tierra para conjuntos de puntos bien distribuidos se mantienen siempre a una distancia inferior a la precisión esperada, muy próximas a al error medio cuadrático obtenido en la georreferenciación de los mapas y siempre por debajo o muy cerca de la medida de dos píxeles del fichero. Es decir, diferencias de esa cuantía pueden deberse al propio proceso de introducción de los puntos homólogos en los trabajos de georreferenciación digital. La utilización de una u otra figura de la tierra carece de relevancia práctica, aunque para mantener la coherencia del procedimiento, es conveniente la utilización de esferas o elipsoides que los autores de los mapas hubieran podido manejar en su contexto histórico y cultural, cuya aplicación, finalmente, cotejaremos siguiendo el método que será descrito más adelante.

Otro dato fundamental para nuestro proceso de georreferenciación es el del origen de la malla de coordenadas geográficas. Tradicionalmente, el origen de latitudes se ha situado en el Ecuador como círculo máximo entre todos los paralelos, pero la longitud se podía contar desde cualquier meridiano origen, pues todos son segmentos de círculos máximos que unen ambos polos. En España, según avanzaba el siglo XIX, se fue generalizando el uso del meridiano del Observatorio Astronómico de Madrid, pero en el siglo XVIII y durante buena parte del XIX, podemos encontrar mapas referidos a los meridianos de El Hierro, del pico del Teide, de París, del seminario de nobles de Madrid y – en la cartografía hidrográfica – de Cádiz, Ferrol, Cartagena o de San Fernando, entre otros.

Es necesario saber cuál es la posición del meridiano origen del mapa con respecto al meridiano de Greenwich, que pasó a ser el meridiano universal a partir del siglo XX y es el estándar que se maneja en todo el software cartográfico. Algunos de estos viejos meridianos fueron muy utilizados hasta bien avanzado el siglo XX, especialmente los vinculados a la cartografía francesa, reacia a la adopción de un meridiano inglés. También la tradición española se mantuvo fiel al meridiano de Madrid, al de Cádiz o al de San Fernando, si bien nuestras cartas náuticas adoptaron el de Greenwich bastante antes que nuestros mapas terrestres. Gracias a esta tenacidad localista, algunos de estos meridianos tuvieron que ser tenidos en cuenta en la programación del software cartográfico y, así, en muchos programas, encontramos incluidos los meridianos de París, El Hierro – o *Ferro*, muy presente en la tradición francesa – y el del Observatorio de Madrid, con sus posiciones bien



fijadas respecto al de Greenwich. En el caso de otros meridianos cuyo uso decayó en fechas más tempranas – el Teide, Cádiz o Ferrol –, hemos acudido a la bibliografía, a las obras históricas en las que se recogían las observaciones de los propios cartógrafos, o a los datos recogidos en otros mapas históricos. Con todo ello, hemos podido calcular la posición de los antiguos meridianos respecto a Greenwich con suficiente precisión. El documento “Longitudes de los Antiguos Meridianos en la Cartografía Española”, incluido en esta misma web, recoge las referencias y los cálculos en los que nos hemos basado para obtener los datos de estos viejos meridianos.

### **Evaluación y posible corrección de las deformaciones y deterioros del papel**

La antigüedad de los documentos cartográficos históricos es fuente de alteraciones y de deformaciones. Los deterioros más frecuentes son fruto del plegado de las hojas durante decenios, de su entelado tras ser cortadas en cuarterones, o de su encuadernación en viejos volúmenes. La humedad o la presencia de dobleces también pueden haber deformado la geometría inicial de los mapas. Es raro encontrar ejemplares carentes de alguna de estas alteraciones, que pueden llegar, en los peores casos, a la pérdida de fragmentos de papel.

Por otro lado, el proceso de escaneado de los mapas también puede introducir deformaciones geométricas, frecuentemente micro-arrugas y pequeños pliegues.

Por último, las condiciones de almacenamiento, contando con la presencia de humedades o parásitos y el mero paso del tiempo, suelen haber modificado el color del papel y deteriorado la calidad de la tinta impresa.

Hemos acudido a la informática gráfica para corregir algunas de estas alteraciones. Se han utilizado herramientas de transformación geométrica y de retoque de color que pueden encontrarse en el software usual de tratamiento de imágenes. Los ajustes geométricos se han limitado a las herramientas más sencillas, menos agresivas, incluyendo los giros, los pequeños cambios de tamaño parciales y ligeros sesgados o distorsiones muy localizadas. No hemos utilizado las herramientas generales de ‘*rubbersheet*’ o ajuste por triangulación, muy poco precisas en los programas no geográficos de tratamiento de imágenes. Las hojas cartográficas sueltas raramente necesitan ajustes geométricos, que en buena medida deben ser aplicados para estirar dobleces de encuadernación y para eliminar entelados.

En lo que se refiere a los ajustes de color, se ha procurado recuperar el tono neutro del papel de fondo con herramientas de corrección selectiva y de limpieza de manchas. Se han vivificado y reforzado las partes impresas y, en su caso los colores, mediante ajustes sobre los histogramas de los canales de color, ajustes de saturación y, en raras ocasiones, filtros de enfoque.

En definitiva, se ha tratado de obtener ficheros digitales lo más cercanos a los originales primitivos antes de comenzar cualquier procedimiento de georreferenciación.

### **Creación de ficheros digitales vectoriales que reconstruyan numéricamente la malla de meridianos y paralelos del mapa original**

Este procedimiento de georreferenciación se fundamenta en hacer explícito digitalmente el sistema de coordenadas original de cada mapa. Para ello, es necesaria la introducción de puntos de control – o puntos homólogos – que identifiquen la posición de los meridianos y paralelos dibujados sobre el mapa con los de una malla teórica, generada mediante procedimientos matemáticos a partir de coordenadas numéricas en el mismo sistema de referencia original del mapa o, al menos, uno equivalente.

En primer lugar, acudiremos a la documentación recopilada en el primer punto de este procedimiento para conocer la longitud geográfica del meridiano origen de las coordenadas del mapa con respecto al de Greenwich. Recordemos que el software cartográfico utiliza el meridiano de Greenwich de forma estándar en todas sus operaciones y conviene que todas las mallas de meridianos estén referidas a él. También es conveniente anotar las siguientes características de la malla de meridianos y paralelos que aparece representada en el mapa:

- latitud de los paralelos situados en los extremos norte y sur de la malla,
- longitud de los meridianos que delimitan sus laterales este y oeste,
- paso de malla o intervalos de latitud y de longitud representados en la red de meridianos y paralelos del mapa,
- número de celdas de la malla en dirección norte-sur y en dirección este-oeste.

A partir de estos datos, y utilizando el software cartográfico del que dispongamos, construiremos numéricamente una malla ortogonal de meridianos y paralelos, empleando coordenadas geográficas en grados decimales referidas al meridiano de Greenwich. Este

fichero vectorial poseerá una estructura de datos propia del software cartográfico, incluyendo su georreferenciación directa e inmediata en un sistema de coordenadas geográficas que permitirá su transformación a cualquier sistema de proyección.

Será necesario que el fichero generado cumpla con algunos requerimientos que permitirán que la red de meridianos y paralelos adopte los trazados curvilíneos propios de muchos sistemas de proyección:

- Los segmentos de meridianos y paralelos limitados por los cruces de la malla serán líneas independientes conectadas en los puntos de cruce.
- Los segmentos entre los cruces deben estar definidos por múltiples vértices, no solo por las coordenadas de sus puntos inicial y final.
- Aunque no estrictamente necesario, es muy conveniente que los cruces de la malla estén marcados por entidades puntuales que puedan ser fácilmente etiquetadas con las mismas cifras de las coordenadas que aparecen escritas en el mapa. Esto facilitará mucho el trabajo posterior de identificación de puntos de control.

Transformaremos la malla vectorial así generada al sistema de referencia del mapa original con las herramientas de proyección del software que vengamos utilizando. La geometría de la malla una vez transformada deberá ser prácticamente igual a la representada en el mapa antiguo. Lo comprobaremos visualmente mediante una sencilla operación de superposición gráfica con cualquier software de manejo de imágenes. Para ello, exportaremos la representación de la malla numérica proyectada a un formato estándar de imágenes que podamos superponer fácilmente sobre el fichero escaneado del mapa antiguo. Si ambas mallas de meridianos y paralelos no resultan aparentemente coincidentes habrá que revisar los parámetros empleados en la transformación: el sistema de proyección utilizado, el meridiano central de la proyección (si esta lo requiere), paralelos estándar (cuando existan), datum, u otros.

### **Identificación del sistema de proyección y de referencia originales cuando no sean conocidos o no hayamos conseguido suficiente información sobre ellos**

A veces, no será posible obtener información sobre el sistema de referencia del mapa original. No era habitual que los cartógrafos de los siglos anteriores al XX incluyeran este tipo de datos en sus mapas, al menos de forma completa. Puede que lleguemos a conocer

la proyección empleada, pero rara vez se nos informará de los parámetros de esa proyección y prácticamente nunca de la figura de la tierra utilizada.

Como ya se ha anotado, las variaciones debidas al empleo de diferentes elipsoides o de distintos datum son irrelevantes cuando tratamos con mapas de escala regional y con un nivel de precisión aún muy bajo en la captura de sus datos. No obstante, conviene manejar figuras cuyo uso sea habitual para la época y el contexto cultural del autor.

Otros parámetros más significativos pueden ser fácilmente deducibles con la mera observación del mapa, por ejemplo, el meridiano central de las proyecciones cónicas o cilíndricas (o pseudocónicas y pseudocilíndricas). Pero cuando desconozcamos el propio sistema de proyección empleado o alguno de sus parámetros menos evidentes, tendremos que acudir a métodos de indagación que nos permitan identificarlos o llegar a aproximarnos a ellos suficientemente.

Si no tenemos ninguna información sobre la proyección empleada, analizaremos la configuración de la malla de meridianos y paralelos del mapa siguiendo las indicaciones descritas en alguna “Tabla para identificación de las proyecciones” como la incluida en el anexo D de la obra de Joaquim Alves Gaspar *Cartas e Projecções Cartográficas*<sup>3</sup>. Estas tablas permiten deducir con bastante aproximación el tipo de proyección a partir de la forma y la estructura de los meridianos y paralelos del mapa – si son rectilíneos, curvilíneos, circulares, el tipo de ángulo que forman, si son perpendiculares entre sí, la distancia que los separa, y otros parámetros geométricos –. También suele ser útil consultar algún buen catálogo gráfico de proyecciones cartográficas como el del U.S. Geological Survey<sup>4</sup>. La búsqueda puede afinarse acudiendo a la bibliografía sobre la historia de las proyecciones, entre la que resulta especialmente útil la obra ya citada de John P. Snyder<sup>5</sup>.

En algunos casos, llegaremos a deducir con seguridad cuál es la proyección del mapa original, pero en muchas ocasiones conseguiremos reducir nuestra búsqueda a unas pocas proyecciones o a un determinado tipo de ellas. Para llegar a alguna conclusión válida para nuestro trabajo pondremos a prueba los posibles resultados de la indagación utilizando el

---

<sup>3</sup> ALVES Gaspar, J. (2000). *Cartas e Projecções Cartográficas*. Lisboa, LIDEL, Coleção Geomática

<sup>4</sup> SNYDER, J.P. y VOXLAND, P. M. (1989). *An Album of Map Projections*. U.S. Geological Survey professional paper 1453. Denver. U.S. Government Printing Office

<sup>5</sup> SNYDER, John P. (1993), *op. cit.*

siguiente procedimiento: proyectaremos la malla de meridianos y paralelos que habíamos generado numéricamente a alguno de los probables sistemas de proyección que hemos deducido; exportaremos el resultado gráfico a algún formato de imagen estándar y lo superpondremos gráficamente, de forma manual, sobre el fichero escaneado del mapa original para comparar visualmente su ajuste con la malla de meridianos y paralelos representada en él. Elegiremos la opción más aproximada. Del mismo modo, iremos afinando los parámetros de la proyección mediante ensayos sucesivos. Es necesario que este procedimiento de proyección, superposición y comparación de imágenes sea rápido y ágil porque, en ocasiones, habrá que realizar varios ensayos hasta que lleguemos a seleccionar la proyección y los parámetros que más se aproximen a los del mapa original. Cualquiera de los programas actuales de software SIG, combinado con los programas más usuales de tratamiento digital de imágenes permiten un manejo sencillo de este flujo de gráficos.

### **Georreferenciación del fichero del mapa antiguo en el sistema de proyección y de referencia originales, o que hayamos identificado como más próximos a los originales, utilizando la malla de meridianos y paralelos**

Hasta que la georreferenciación no se produzca, el fichero digital del mapa antiguo solo tendrá un sistema de coordenadas gráficas basadas en su estructura de píxeles. Una vez se culmine el proceso, el fichero del mapa irá acompañado de los datos numéricos necesarios para que los programas y librerías cartográficas reconozcan sus coordenadas cartográficas y su sistema de referencia, incluyendo su proyección y un datum. En este proceso, se utilizan las herramientas de georreferenciación estándar del software cartográfico, basadas en la identificación expresa de puntos homólogos, también llamados puntos de control. Describiremos los procedimientos más usuales que se suelen llevar a cabo con este tipo de herramientas:

- En el programa de georreferenciación, se introducen el fichero de imagen del mapa antiguo que vamos a georreferenciar y el fichero vectorial de la malla generada numéricamente, que nos servirá de referencia en el proceso.
- Se proyecta el fichero vectorial de la malla en el sistema de referencia que hemos identificado como propio del mapa original. A partir de este momento, la malla numérica estará situada en el sistema de coordenadas definido según la proyección del mapa original.

- A continuación, se localiza y se marca la posición de un primer punto sobre uno de los cruces de la malla de meridianos y paralelos representada en el fichero del mapa a georreferenciar. De este modo, se obtiene un par de coordenadas gráficas, relativas, en el sistema de filas y columnas de los píxeles del fichero del mapa.
- Seguidamente, se localizará y se marcará la posición del mismo cruce de meridiano y paralelo sobre el fichero vectorial de la malla que se ha generado numéricamente y se ha proyectado en el sistema de referencia del mapa original. De este modo, se obtiene el par de coordenadas homólogo al del primer punto marcado sobre el fichero del mapa, pero en este caso, en el sistema de coordenadas cartográficas numéricas definido durante el proceso de proyección de la malla vectorial.
- Se opera del mismo modo para obtener una cantidad significativa de puntos homólogos bien distribuidos por toda la superficie del mapa. Son necesarios de seis a diez puntos para poder aplicar distintos métodos de ajuste de coordenadas. De todos modos, más importante que su número es su distribución por todo el ámbito del mapa. Cualquier software de georreferenciación permite ir evaluando el ajuste de las posiciones de los distintos puntos del mapa en su transformación hacia el sistema de coordenadas cartográficas, a medida que se van introduciendo los pares de puntos homólogos.

La geometría de la malla del mapa y la del fichero vectorial de meridianos y paralelos debe ser muy similar porque ambas han sido generadas – aunque con muchos años de diferencia – según el mismo sistema de proyección y de referencia o, al menos, con sistemas muy semejantes. De todos modos, siempre existirán diferencias entre ellas, incluso si hubiéramos llegado a identificar exactamente el sistema de proyección original con todos sus parámetros, hay que seguir contando con las deformaciones del papel y con los errores de dibujo de la malla de meridianos y paralelos en mapas contruidos, delineados y grabados hace muchos decenios.

Utilizaremos métodos de transformación de coordenadas que permitan evaluar esas diferencias. Las funciones lineales y cuadráticas de transformación son las más adecuadas. Con ellas obtendremos valores para el error medio cuadrático de todos los puntos introducidos, así como para los errores residuales de cada uno de ellos. Mediante estos valores analizaremos, ahora de forma cuantificable, el grado de adecuación del mapa original al sistema de referencia que hemos asumido como válido – haya sido obtenido por



deducción, o porque lo hubiera expresado el autor del mapa – también las probables deformaciones del documento original como arrugas, dobleces, dilataciones, grietas u otras.

Por encima de un determinado error, la georreferenciación no sería válida. Para fijar este margen de error, hemos utilizado la fórmula que estima el error lineal medio de los documentos cartográficos en un cuarto de milímetro:

$$0,00025 \cdot M = le$$

*Dónde M es el denominador de la escala y le el error lineal en metros*

Este error se ha situado, quizá con excesivo rigor, en 0,2 mm por parte de un grupo de trabajo dedicado al análisis de los mapas de Tomás López<sup>6</sup>. En nuestro caso, hemos acudido a obras de carácter general sobre SIG y cartografía para encontrar más argumentos sobre la precisión de los documentos cartográficos. Fisher<sup>7</sup>, siguiendo los estándares del *US Bureau of the Budget*, estima que cualquier punto situado sobre un mapa analógico de gran escala (hasta 1:20.000), no debe tener un error posicional mayor de 1/50 pulgadas (0,508 mm). Error que eleva hasta 1/30 pulgadas (0,8466 mm) en los mapas de escalas más pequeñas. En cuanto a los puntos de mayor precisión, siguiendo a Merchant<sup>8</sup>, establece que el error medio cuadrático de la desviación de los puntos de control debe limitarse a un máximo de 0,25 mm para mapas hasta la escala 1:20.000; lo que para mapas de menor escala podríamos llevar hasta 0,42 mm manteniendo la relación anterior. En el mismo artículo, Fisher, aporta una regla aplicable a todos los mapas impresos: “es imposible representar con precisión cualquier objeto que tenga unas dimensiones inferiores al ancho de una línea dibujada”<sup>9</sup>. Siguiendo a Tobler<sup>10</sup>, Fisher, estima que la resolución de un mapa impreso, es decir, el tamaño mínimo de un objeto puntual que sea discernible en el dibujo

---

<sup>6</sup> MANZANO-AGUGLIARO, F, MARTÍNEZ, J, SAN ANTONIO, C. (2012). Gis analysis of the accuracy of Tomas Lopez's historical cartography in the Canary Islands (1742-1746). *Scientific Research and Essays Vol. 7(1)*, pp. xxx-xxx, 9 January, 2012, p.6. También en MARTÍNEZ, J, MANZANO-AGUGLIARO, F, SAN ANTONIO, C (2012). El Atlas Geográfico de España de Tomás López: Análisis mediante SIG de las poblaciones del “Reyno de Jaén” (1787). En CT Revista Catastro, abril 2012, pp.111-138

<sup>7</sup> FISHER, P.F. (1991). Spatial data sources and data problems. En MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F. y RHIND, D.W. (Eds.) *Geographical information systems principles and applications*, England, Longman Scientific and Technical, 2 tomos, 175-189 pp. p. 179

<sup>8</sup> MERCHANT, D.C. (1987). Spatial accuracy specification for large scale topographic maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (7): 958-61

<sup>9</sup> FISHER, P.F. (1991), *op.cit.* p 175-176

<sup>10</sup> TOBLER, W.R. (1988). Resolution, resampling and all that. En: MOUNSEY H.M. (Ed.) *Building Databases for Global Science*. Taylor & Francis, London, pp.129-137

del mapa es de 0,5 mm. Teniendo todo esto en cuenta, aunque inicialmente limitemos el error esperado para nuestros puntos de control a 0,25 mm, podemos disponer de un margen bastante más amplio para estos trabajos.

Téngase en cuenta que la reflexión de Fisher se refiere a la lectura y a la construcción de mapas nuevos, actuales. En nuestro caso, la precisión previsible estaría en el entorno de esas cifras si solo dependiera de los errores atribuibles al trazado – dibujo, grabado e impresión – de la malla de meridianos y paralelos del mapa. A esos errores habrá que añadir los derivados de las operaciones de cálculo de esa malla con antiguas técnicas de cómputo y los debidos al estado de conservación de los documentos cartográficos históricos. Destacaremos la significativa incidencia del plegado y, sobre todo, del entelado de los mapas antiguos en el incremento del margen de error. De este modo, el umbral de error admisible fijado inicialmente en un muy estricto cuarto de milímetro se podría llegar a duplicar o, incluso, a triplicar en el caso de los mapas entelados o deficientemente conservados.

En definitiva, cuando se hayan introducido los puntos de control necesarios y se haya comprobado que los errores en su transformación se mantienen dentro de límites razonables, se aplicará esa transformación a todo el fichero del mapa antiguo. El resultado será un fichero de imagen ya georreferenciado de forma expresa en el mismo sistema de referencia que poseía el mapa original. Los cambios en la geometría de los píxeles del fichero han de ser pequeños puesto que solo hemos reconstruido digitalmente su georreferenciación original. Lo más importante de este proceso es que, a partir de ahora, el mapa antiguo poseerá todas las características de una capa cartográfica digital, incluido un sistema de coordenadas y de referencia manejable por el software de cartografía digital.

Aún se han introducido algunos ajustes posteriores para afinar los resultados del proceso. En el punto número 7, al que hemos llamado **ajuste de las deformaciones de la malla de meridianos y paralelos**, realizamos un ajuste por triangulación – a veces llamado ajuste elástico, transformación *spline* o *rubbersheet* – utilizando todos los cruces visibles en la malla de meridianos y paralelos. De este modo, una vez que estamos seguros de haber reconstruido el sistema de referencia original del mapa dentro de unos márgenes de error asumibles, obligamos a que los meridianos y los paralelos trazados en todos los mapas coincidan exactamente con los meridianos y paralelos definidos teóricamente. Así, todos ellos estarán ajustados a una referencia común que permitirá su correcta comparación.

Finalmente, como se indica en el punto número 8, todos los mapas se transforman a un sistema de referencia actual para facilitar su manejo en la web y para simplificar el trabajo de las herramientas de visualización. En cualquier caso, una vez que los ficheros originales ya han sido georreferenciados, los cambios de proyección se realizan con las herramientas más precisas del software cartográfico, manteniendo siempre la coherencia en los procesos de transformación de coordenadas y el control de las deformaciones. En esta transformación, los cambios de la geometría de los ficheros pueden ser muy apreciables porque algunas de las proyecciones originales pueden diferir sustancialmente de otras proyecciones actuales. Siempre se incluye en los visores una imagen reducida del mapa original que permita reconocer estas diferencias.

### **Ajuste irregular por triangulación basado en puntos de control identificados sobre las entidades cartografiadas en el mapa**

Una vez finalizado el proceso hasta aquí, frecuentemente encontramos que el ajuste de la malla geográfica de meridianos y paralelos del mapa es impecable, pero el posicionamiento de los elementos cartografiados difiere mucho de su localización real. Más allá de nuestro interés principal por el análisis cartográfico y la explicación de estas diferencias de posicionamiento, hay determinadas aplicaciones de vocación histórica en las que la cartografía antigua es utilizada como referencia o fuente de información y que necesitan de una georreferenciación que sitúe las entidades representadas en posiciones más próximas a su auténtica ubicación, sin darle tanta importancia a la deformación que sea necesario aplicar al mapa para conseguirlo. En la cartografía de gabinete – construida mediante la simple recopilación de informaciones muy dispares e imprecisas, sin levantamientos geométricos sobre el terreno – podemos encontrar desplazamientos de kilómetros o decenas de kilómetros en direcciones muy dispares, incluso divergentes para los distintos puntos del mapa.

En los casos en los que se estime necesario un ajuste del contenido del mapa, se introducirán nuevos puntos de control bien repartidos sobre la superficie de la imagen ya georreferenciada, utilizando elementos fijos representados en el mapa antiguo cuya pervivencia en la cartografía actual tenga un posicionamiento fuera de duda. Quedarán excluidos los ríos que discurren en valles de fondo plano y las costas bajas, los límites de masas de vegetación y de los usos del suelo serán puestos en duda, en los elementos de

construcción humana como las vías de comunicación o las construcciones deberá ser analizada su evolución y perdurabilidad. Los nuevos puntos de control serán el soporte de un ajuste irregular por triangulación (rubbersheet) como el que ya habíamos utilizado en el acoplamiento final de los mapas a la malla geográfica de meridianos y paralelos. Es posible la creación de una red de triángulos a partir de la introducción de 9 o 10 puntos homólogos que actúan como vértices inmóviles. Los vectores de deformación gradúan el desplazamiento de la imagen a través de las líneas de esa red según la distancia a los vértices fijos a los que el mapa quedará completamente acoplado. En la cartografía más imprecisa puede resultar imposible un ajuste completo. Puntos próximos pueden tener vectores de desplazamiento incompatibles y llegar a producir cizalladuras inadmisibles en la imagen resultante. Este tipo de ajuste puede resultar aberrante para la forma del mapa original y es frecuente que sea necesario añadir puntos de control auxiliares a lo largo de los márgenes de la hoja para mantenerla dentro de una apariencia razonable.

En definitiva, este procedimiento de georreferenciación de cartografía antigua es un proceso gradual que va generando ficheros sucesivos. Los primeros mantienen la geometría y el sistema de referencia del documento original para permitir su análisis cartográfico y posicional. En las versiones siguientes, se utilizan ajustes y deformaciones más intensas con las que adaptarse a las posiciones recogidas en la cartografía actual cuando otro tipo de aplicaciones así lo exigen.

## Bibliografía

---

ALVES GASPAR, J. (2000). *Cartas e Projecções Cartográficas*. Lisboa, LIDEL, Coleção Geomática.

ESPAÑA. Real Decreto 1545/2007, de 23 de noviembre, por el que se regula el Sistema Cartográfico Nacional. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de noviembre de 2007, núm. 287, pp. 49215-49229.

FISHER, P.F. (1991). Spatial data sources and data problems. En MAGUIRE, D.J., GOODCHILD, M.F. y RHIND, D.W. (Eds.) *Geographical information systems principles and applications*, England, Longman Scientific and Technical, 2 tomos, 175-189 pp.

MANZANO-AGUGLIARO, F, MARTÍNEZ, J, SAN ANTONIO, C (2012). Gis analysis of the accuracy of Tomas Lopez`s historical cartography in the Canary Islands (1742-1746). *Scientific Research and Essays* Vol. 7(1), pp. xxx-xxx, 9 January, 2012.

MARTÍNEZ, J, MANZANO-AGUGLIARO, F, SAN ANTONIO, C (2012). El Atlas Geográfico de España de Tomás López: Análisis mediante SIG de las poblaciones del `Reyno de Jaén` (1787). En *CT Revista Catastro*, abril 2012, pp.111-138.

MERCHANT, D.C. (1987). Spatial accuracy specification for large scale topographic maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (7): 958-61.

SNYDER, J.P. y Voxland, P. M. (1989). *An Album of Map Projections*. U.S. Geological Survey professional paper 1453. Denver. U.S. Government Printing Office.

SNYDER, John P. (1993). *Flattening the Earth. Two Thousand Years of Map Projections*. Chicago & London, The University of Chicago Press. 365 pp.

TOBLER, W.R. (1988). Resolution, resampling and all that. En: MOUNSEY H.M. (Ed.) *Building Databases for Global Science*. Taylor & Francis, London, pp.129-137.

---