

GEORREFERENCIACIÓN DE DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS HISTÓRICOS PARA EL ANÁLISIS DEL TRAZADO FLUVIAL DEL BAJO SEGURA, VEGA MEDIA (MURCIA, ESPAÑA)

YOLANDA ÁLVAREZ-ROGEL¹, CARMELO CONESA GARCÍA¹

¹Universidad de Murcia,

Calle Santo Cristo, 1. Facultad de Letras, Campus La Merced, 30.001 Murcia, España
yalvarez@um.es, cconesa@um.es

RESUMEN

El empleo de cartografía histórica en el seguimiento de cambios de morfología fluvial dentro de una llanura aluvial implica generalmente problemas asociados a la georreferenciación de mapas y planos de diferente escala y sistema de coordenadas. Para la Vega Media del Segura (VMS) se dispone de fuentes cartográficas de los siglos XIX y XX, que requieren un adecuado proceso de georreferenciación antes de proceder al análisis de su trazado fluvial en dicha época. Este trabajo adopta un método para la georreferenciación completa de series de planos y mapas antiguos de la VMS, basado en la Transformación Bidimensional Conforme de las imágenes (Transformación Helmert), con recorte individual de éstas y su posterior unión para generar mosaicos continuos.

Palabras clave: Georreferenciación; cartografía histórica; trazado del cauce, río Segura; Vega Media.

GEOREFERENCING HISTORICAL MAPS FOR THE MONITORING OF THE SEGURA RIVER CHANGES (VEGA MEDIA, MURCIA, SPAIN)

ABSTRACT

The use of historical maps for monitoring fluvial morphological adjustments within the river floodplain may experience some problems, most of them related to georeferencing documents with different scales and coordinate systems. For the Vega Media of the Segura River (VMS) there are cartographic sources from the 19th and 20th centuries that need an appropriate georeferencing process, prior to any fluvial pattern analysis. This contribution presents an approach for the complete georeferencing of series of antique VMS maps, based on the two-dimensional Helmert transformation. Subsequently, the images are individually cropped, and then merged in order to generate continuous mosaics.

Keywords: Georeferencing; historical cartography; channel pattern, Segura River

Recibido: 15/10/2016

Aceptada versión definitiva: 14/02/2018

Editor al cargo: Dr. Josep A. Gili

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

© Los autores
www.geofocus.org

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

1. Introducción.

La cartografía, herramienta esencial en el estudio de la información geográfica, ha experimentado una auténtica revolución en los últimos años. El incremento de la demanda de información en una sociedad como la actual, hiperconectada (Martín *et al.*, 2012), ha supuesto una reactivación en la utilización de los mapas, al aumentar el interés por ubicar en el espacio todos los fenómenos que ocurren en la superficie terrestre. Cualquier análisis espacial requiere, además, que los datos estén georreferenciados, es decir, que tengan asociadas unas coordenadas que permitan su localización exacta sobre el territorio.

La popularización del empleo de visores cartográficos y el incremento de la distribución de cartografía vía web mediante el desarrollo de Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEs), Centros de Descarga o servicios Web Map Service (WMS) o Web Feature Service (WFS) ha potenciado la difusión de la cartografía, necesaria para implementar los Sistemas de Información Geográfica (SIG), principales demandantes de información georreferenciada. El auge de los SIG ha contribuido en gran medida a la difusión del uso de la cartografía entre diferentes disciplinas científicas, que estudian la distribución espacial de hechos o fenómenos, cuya representación mediante mapas facilita su descripción, comprensión e interpretación. En la actualidad, el acceso a esta información resulta mucho más sencillo que hace algunos años, y suelen ser los mismos generadores de la información los que la ponen a disposición de los potenciales usuarios.

La rectificación espacial se ha visto favorecida también por la implantación masiva de tecnología relacionada con la digitalización de documentos en bibliotecas, archivos, cartotecas, etc., que ofrecen al usuario final un producto, generalmente en formato pdf, tif o jpg, que debe ser tratado previamente para su incorporación al SIG. España ha sido pionera en el desarrollo de iniciativas de digitalización de fuentes cartográficas (Cortés José, 1997) y participa en el proyecto de biblioteca digital europea, EUROPEANA iniciado en 2005. En relación con él, se ha desarrollado una adaptación española denominada Hispania (<http://hispania.mcu.es/>), dependiente del Ministerio de Cultura, Educación y Deporte, que reúne las colecciones digitales de archivos, bibliotecas y museos conformes a la Iniciativa de Archivos Abiertos que promueve la Unión Europea.

2. Estado de la cuestión.

La georreferenciación o rectificación espacial es un proceso que permite determinar la posición de un elemento en un sistema de coordenadas espacial diferente al que se encuentra. Se define como una función matemática del tipo $X = f(x, y)$ e $Y = f(x, y)$, donde la posición de cada entidad geográfica en el sistema de coordenadas destino (X,Y) es función de las coordenadas (x, y) que tiene ese mismo elemento en el sistema origen (Dávila y Camacho, 2012).

Para realizar este proceso se establecen una serie de puntos de control, que deben ser identificados en ambos sistemas (puntos homólogos) y, a partir de ellos, se determinan los parámetros de transformación. La exactitud y precisión de la georreferenciación está directamente relacionada con las características de estos puntos de control, que deben cumplir una serie de condiciones: i) ser "inequívocos" y claramente identificables en los documentos a georreferenciar, ii) pertenecer a elementos representados con exactitud, iii) corresponder a elementos considerados "invariables" en el tiempo, iv) presentar una distribución homogénea y uniforme en toda la superficie del área a estudiar.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

El desarrollo de estas técnicas se ha visto favorecido por el impulso generalizado de los Sistemas de Información Geográfica, tanto comerciales (ArcGis, MapInfo, etc.) como de código abierto (gvSIG o Qgis), que contienen herramientas específicas para llevar a cabo la georreferenciación. Propuestas recientes como la herramienta "Georeferencer" puesta en marcha en 2012 por el Instituto Cartográfico de Cataluña, plantean la georreferenciación con ayuda de usuarios o *crowdsourcing* (Ramos y Roset, 2012). En esta línea destaca la georreferenciación de cartografía histórica, cuya finalidad es situar en el espacio los elementos recogidos en mapas que, en muchas ocasiones, carecen de coordenadas, escala o proyección conocida. La fidelidad con la que aparecen representados estos elementos en los mapas históricos depende en gran medida de la tecnología utilizada en su elaboración. Por regla general, cuanto más antiguo es el mapa mayor distorsión presenta con respecto a la cartografía de referencia actual y mayor es el nivel de abstracción en la representación. Frecuentemente aparecen problemas asociados a la georreferenciación de mapas y planos de diferente escala y sistema de coordenadas (Uribelarra et al., 2003; Moreno y Cortés, 2011). La diversidad de técnicas requiere diversidad de métodos para conocer y valorar esta cartografía histórica.

3. Ámbito de estudio.

La Vega Media del Segura (VMS) ocupa la parte occidental del Bajo Valle del Segura, dentro del sector oriental del Sistema Bético. Se sitúa sobre el contacto entre la zona interna y externa de dicho sistema montañoso (Montenat, 1977), participando de los rasgos geotectónicos de ambos dominios. El borde meridional de la Vega Media (zona interna) está compuesto por materiales del Permotrias y Neógeno, y depósitos de ladera pleistocenos. En el borde septentrional (zona externa) predominan las rocas sedimentarias (margas, areniscas y conglomerados) pertenecientes al Mioceno Superior- Plioceno. La evolución de este amplio valle, orientado de ENE a OSO, está controlada por fallas activas, la prolongación de la falla de Alhama de Murcia al norte y la de Carrascoy al sur. Los frentes montañosos que lo flanquean fueron elevados por la reactivación de ambas fallas en el Mioceno final, y retocados por una actividad tectónica que todavía persiste en la actualidad (Rodríguez Estrella *et al.*, 1999). Desde el Plioceno, varias generaciones de abanicos aluviales se han desarrollado en la base de los frentes montañosos (Goy *et al.*, 1989), dando lugar a un extenso sistema aluvial cuyos frentes distales enlazan directamente con la llanura fluvial del Segura.

La zona de estudio (figura 1) se extiende desde el Azud de Contraparada (infraestructura hidráulica del siglo IX), en la pedanía de Javalí Nuevo, al oeste de la ciudad de Murcia, hasta el municipio de Beniel, al este, en el límite administrativo entre las provincias de Murcia y Alicante. El área de estudio comprende *buffers* de dos y diez kilómetros en torno al eje central del cauce, dependiendo de que se utilicen los mapas de escala 1:2.000 y 1:25.000 respectivamente. Dentro de dichos *buffers* queda encuadrado el cinturón de meandros del río Segura y su llanura de inundación activa adyacente.

3. Materiales, datos y métodos

La primera fase del trabajo se centra en la recopilación y análisis de la cartografía disponible sobre el área de estudio en diferentes organismos regionales y nacionales (Archivos y bibliotecas regionales y nacionales, Sede Regional del Catastro y Sede Regional del Instituto Geográfico Nacional en Murcia).

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

La cartografía antigua que finalmente ha sido manejada consta de dos tipos de documentos:

a) En primer lugar un total de veinte mapas a escala 1:25.000 realizados por Comisión Geográfica del Depósito de la Guerra de la Comisión de Estado Mayor del Ejército y por la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico, bajo la denominación de Trabajos Topográficos, entre los años 1889 y 1900, y una actualización posterior de 1930.

Esta cartografía forma parte de un proyecto inicial para la formación del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 y se corresponde con las denominadas minutas cartográficas, que engloban tres tipos de documentos: i) minutas planimétricas con información relativa a cubierta vegetal, hidrografía, vías de comunicación, construcciones y líneas administrativas; ii) minutas altimétricas, que incluyen curvas de nivel y puntos de cota; y iii) minutas conjuntas en las que se combina la información contenida en las dos anteriores. Aunque en origen se trata de documentos en formato papel, desde octubre de 2014 están disponibles en formato de imagen jpg a través del servicio de descargas que el Instituto Geográfico Nacional ofrece en su página web.

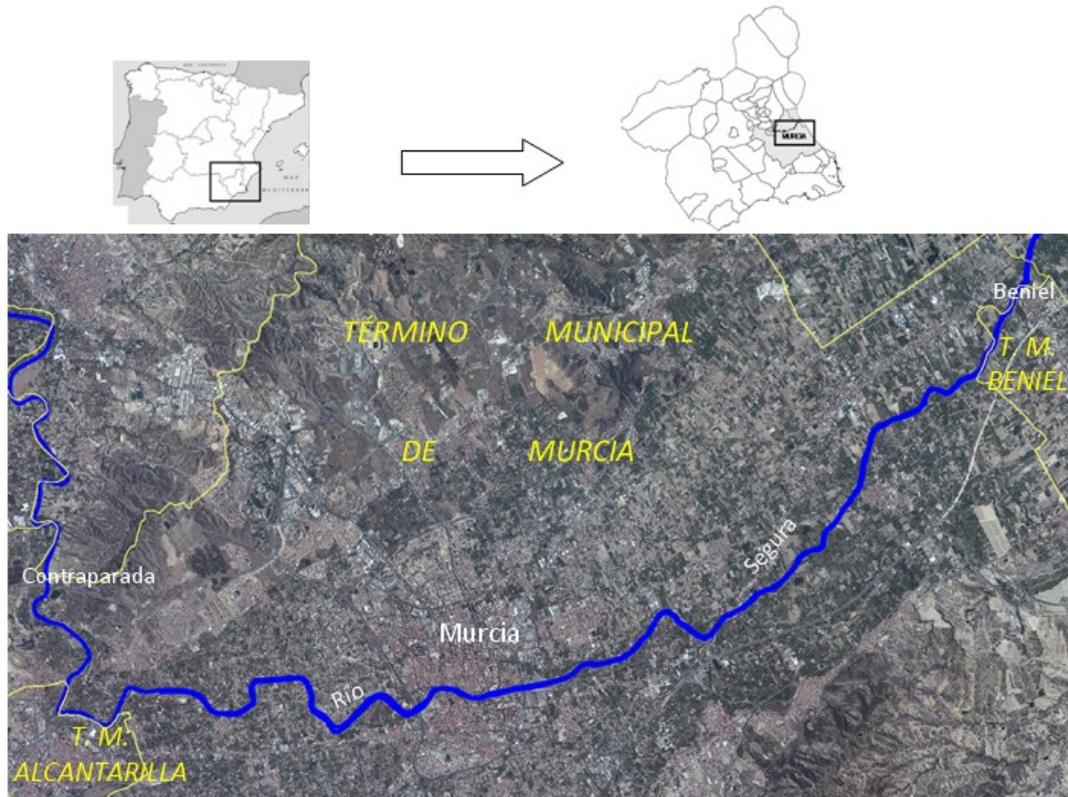


Figura 1: Localización del área de estudio.

Fte: Elaboración propia sobre ortofotografía aérea obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia (IDERM, 2011)

Esta cartografía 1:25.000 de finales del siglo XIX principios del XX, denominada genéricamente Mapa Topográfico Nacional Parcelario (MTNP), se presenta georreferenciada, pero no ha podido ser ensamblada en un mosaico continuo, ya que tiene importantes deformaciones que son patentes en el propio formato papel. En ocasiones son simples croquis o dibujos en los que el autor trata de plasmar la realidad del momento, de modo que su

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

ensamblado implicaría deformar artificialmente sin controles de referencia las imágenes para tratar de darles continuidad espacial.

b) Por otra parte, se ha georreferenciado un total de ochenta y siete planos en formato papel a escala 1:2.000 (algunos a 1:5.000) correspondientes al proyecto de Plano Parcelario elaborados por el Instituto Geográfico y Catastral, relativos al catastro de los términos municipales de Alcantarilla, Murcia y Beniel. Esta cartografía se organiza en polígonos catastrales que, en función de su extensión, aparecen representados en una o varias hojas tamaño A0 y que a su vez se subdividen en uno o varios documentos hasta completar las ochenta y siete imágenes que integran el área de estudio (apéndice 1).

Estos planos, que forman parte de los trabajos destinados a elaborar el primer catastro a nivel de parcela en España, muestran un continuo del término municipal formado por polígonos catastrales ("masa" en nomenclatura actual), que a su vez se dividen en parcelas catastrales. Contienen además información geográfica de referencia de gran interés, como caminos, acequias, pequeñas construcciones, topónimos y otros elementos geográficos. Para los dos primeros municipios citados, se dispone de dos ediciones, la primera realizada entre 1950 y 1958 y la segunda en los años ochenta (1982-1984). En el caso de Beniel sólo existe la edición de 1958. Esta documentación carece coordenadas y se accede a ella en formato papel.

La metodología adoptada para su incorporación al SIG difiere en función de la naturaleza de los datos. En el caso de los mapas 1:25.000 se procede a mejorar su georreferenciación, utilizando como cartografía de referencia la última edición del Mapa Topográfico Nacional de homóloga escala (MTN25).

En el tratamiento de la cartografía en formato papel se establece una fase previa de escaneado, destinada a obtener un fichero digital en formato TIF. En este sentido, es importante la resolución del escaneado, establecida en puntos por pulgada (ppp) y entendida como la densidad de píxeles por unidad de medida (una pulgada equivale a 2,54 cm), con que el original ha sido muestreado. Para la cartografía producida actualmente en los institutos cartográficos, se admite que la precisión planimétrica para cualquier escala es de 0,2 mm, por ser éste el límite de la percepción visual humana (Sánchez Menéndez, 2004), lo que supone un error máximo real de 0,4 m.

Para una correcta interpretación visual, el tamaño de la celda en formato papel debe ser la mitad del original, de manera que cada 0,2 mm corresponde a cuatro teselas de 0,1 mm cada una. Por tanto la resolución del escaneo debe ser al menos de 254 puntos por pulgada (ppp). Generalmente 300 ppp se considera una buena resolución para obtener la mejor calidad de reproducción, pero una resolución de 150 ppp en cartografía histórica hace que el archivo sea mucho más pequeño y fácil de manipular sin perder información relevante. La resolución ligada a la escala del documento original permitirá conocer las dimensiones reales en el terreno de cada pixel de la imagen, y por tanto conocer la precisión que es posible obtener durante la georreferenciación (Roset y Ramos, 2012). Otros autores (Romero Fernández, 2014) proponen una resolución de escaneo mínima de 400 ppp. En el caso de la Vega Media del Segura los documentos en formato papel se procesan con una resolución de 600 ppp con la finalidad de facilitar el proceso de digitalización, ya que se trata mapas en blanco y negro.

Teniendo en cuenta las consideraciones de Pérez y Ballell (2015) sobre transformación de coordenadas y considerando que las geometrías están contenidas dentro de las tolerancias gráficas, se asume que los errores derivados del escaneo se deben a la deformación del propio soporte papel, por su falta de estabilidad dimensional, y a la deformación introducida por el escáner debido a la falta de ortogonalidad entre sus ejes.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

La mayor parte de la cartografía histórica utilizada en este estudio carece de sistema de referencia y coordenadas, por lo que es preciso llevar a cabo su georreferenciación. Para ello se utiliza el módulo de georreferenciación del programa de uso libre y código abierto Quantum GIS, versión 1.8 Lisboa. Este software permite acceder a información remota mediante servidores Web Map Service definidos por el Open Geospatial Consortium (OGC), facilitando así el acceso a cartografía georreferenciada de la zona de estudio.

3.1.- Descripción del proceso de georreferenciación de mapas y planos antiguos

Una vez generado el fichero digital sobre el que identificar los puntos de control, éstos se cotejan con la documentación correspondiente a la cartografía catastral actual de la Vega Media del Río Segura, a la que se accede mediante el módulo de descarga masiva de datos en formato shape, disponible en la web de la Sede Electrónica del Catastro (SEC). La georreferenciación se lleva a cabo con el apoyo adicional de los ortofotogramas de la zona correspondientes al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) para el año 2011 a los que se accede mediante conexión al servicio Web Map Service (WMS) del Instituto Geográfico Nacional, dependiente del Ministerio de Fomento. También se utilizan como referencia las fotografías aéreas del conocido como Vuelo Americano de 1956, a las que se accede mediante conexión al servicio WMS disponible en la web de Infraestructuras Espaciales de la Región de Murcia (IDERM). Como complemento se utilizan los mapas georreferenciados con anterioridad, tratando de no emplearlos como puntos de apoyo para así evitar la concatenación de errores no deseados.

La elección de los puntos de control se realiza teniendo en cuenta las recomendaciones básicas generales para la georreferenciación de cartografía histórica. Para cada mapa se han seleccionado entre nueve y veinte puntos de control (el software requiere un mínimo de tres) todos ellos con una distribución homogénea sobre el territorio y que corresponden a elementos que permanecen sin cambios a lo largo del tiempo. Se ha procurado que se trate de elementos susceptibles de ser identificados directamente en las ortofotos y no sólo en la geometría del catastro actual, ya que se ha constatado que en muchas ocasiones los límites de las parcelas son más fáciles de identificar en las fotografías aéreas que en su representación sobre el papel.

El software empleado, Quantum GIS, permite controlar las deformaciones de cada uno de los puntos, el error medio de la transformación y generar informes pdf de la misma. Se estima que, por los niveles de escala, las deformaciones más significativas están relacionadas con la representación local en el espacio papel, por lo que en todos los casos se utiliza una transformación Helmert de seis parámetros. Es una transformación afin bidimensional incluida en el módulo "georreferenciación GDAL" de QGis, también llamada transformación polinomial de primer orden. Contempla la translación (T_x , T_y) y cambio de escala en ambos ejes "x" e "y" (λ_x , λ_y), y rotación de giro y falta de ortogonalidad (β). Al ser tres las incógnitas para cada una de las dos variables, su resolución requerirá, al menos, de un sistema de tres ecuaciones por lo que serán tres el número de puntos de control a emplear en el ajuste, disponiendo así de seis datos para seis incógnitas. En cualquier caso, la incorporación de más puntos repercutirá en la redundancia de los resultados globales, procurando su distribución homogénea sobre el territorio para mejorar su eficiencia.

Esta transformación es utilizada con frecuencia en fotogrametría durante el proceso de orientación interna, por la posible falta de estabilidad dimensional del soporte o incluso debido a la falta de ortogonalidad de los ejes, por lo que resulta idónea para usar en el caso de georreferenciación de documentos escaneados. Esta metodología se ajusta también a las

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

propuestas de otros autores (Moreno y Cortés, 2011), que señalan la conveniencia de utilizar polinomios de primer grado (transformaciones de cuatro a seis parámetros), ya que los propios puntos de apoyo poseen errores y emplear polinomios de mayor grado puede absorber mejor los errores en el entorno de los puntos de control, pero también introduce deformaciones en el resto del mapa. La utilización de otras proyecciones matemáticamente más complejas, podría depurar artificialmente los posibles errores y maquillar las diferencias reales entre las distintas cartografías.

Al generar la georreferenciación se debe eliminar estas deformaciones artificiales, y, como no se puede mejorar la calidad inicial geométrica de cada plano, al menos no han de añadirse artificialmente errores adicionales. Teniendo en cuenta que el valor estándar establecido para la percepción del ojo humano es 0,2 mm, el error máximo admisible resultará de multiplicar ese valor por el denominador de la escala del mapa con el que se está trabajando (Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, 2013). Se parte, por tanto, de la premisa de que los mapas no tienen errores geométricos superiores a estos (tabla 1). Sin embargo, al escanear los documentos en formato papel para convertirlos a formato digital, puede producirse una deformación de la imagen original, bien por deterioro del propio soporte papel o bien por el propio escaneo.

Tabla 1: Errores máximos de los mapas en formato papel en función de la escala del mapa.

Escala	Error máximo (m)
1 : 25.000	5,0
1 : 2.000	0,4

Fte: Elaboración propia.

Lo normal es que se estimen los errores máximos plasmados en papel, según la tabla anterior, así como el error propio de identificar el elemento/punto imagen y elemento/punto real. De ahí que el conjunto del error de la georreferenciación (E_g) incluya tanto el error máximo de la imagen de referencia llamada "realidad" (E_r) como el error máximo de la imagen escaneada (E_i). Este último parámetro deberá considerarse, por tanto, dos veces, primero para calcular el propio error del mapa inicial y en segundo lugar para determinar el error de posición del puntero al seleccionar. Su expresión matemática es:

$$E_g = \sqrt{E_r^2 + E_i^2 + E_i^2}$$

Y el error máximo:

$$E_{m\acute{a}x} = 2,54 \cdot E_g$$

Teniendo en cuenta que, en el caso de las imágenes utilizadas, se cumple que el tamaño del píxel es igual a la mitad del error máximo (tamaño píxel = $E_{m\acute{a}x}/2$) al georreferenciar las imágenes, los errores máximos teóricos en píxeles, en función de la escala, deberían ser los expresados en la tabla 2:

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

Tabla 2: Tabla síntesis de errores teóricos en función de la escala del mapa

Escala	E_i	E_r	E_g	$E_{m\acute{a}x}$	m/Px	E_{px}
1 : 25.000	5,0	5	8,66	22,0	2,5	8,8
1 : 2.000	0,4	1	1,15	2,92	0,2	14,6

E_i : Error máximo de la imagen escaneada; E_r : Error máximo de la imagen referenciada llamada "realidad"; E_g : Error de la georreferenciación; $E_{m\acute{a}x}$: Error máximo de la georreferenciación; m/Px: metros/pixel; E_{px} : Error teórico en píxeles

Fte: Elaboración propia

Sin embargo, la experiencia demuestra que este desarrollo teórico es inadecuado. Tras realizar multitud de georreferenciaciones para distintos propósitos, se ha llegado a la conclusión de que se debe incorporar un factor de corrección del doble a la hora de interpretación de imágenes, adoptando las ecuaciones de error medio (E_g) y error máximo ($E_{m\acute{a}x}$) las siguientes formas:

$$E_g = \sqrt{(2 \cdot E_r)^2 + (2 \cdot E_i)^2 + E_i^2} \qquad E_{m\acute{a}x} = 2,54 \cdot E_g$$

El escaneado de los planos 1:2.000 no responde a la relación teórica de 0,2 m/Px, sino que, realmente, el tamaño del píxel corresponde a valores que oscilan entre de 0,15 m a 0,13 m por píxel, por lo que se opta por utilizar el valor medio de 0,14 m/Px. Los ráster correspondientes a los croquis parcelarios 1:25.000 no están escaneados a 2,25 m/Px sino a 1,55 m/Px. En la tabla 3 se recogen los valores reales de errores esperados en píxeles.

Tabla 3: Tabla síntesis de errores ajustados en función de la escala del mapa o plano.

Escala	E_i	E_r	E_g	$E_{m\acute{a}x}$	m/Px	E_{px}
1 : 25.000	5,0	5,0	15,00	38,10	1,55	25,40
1 : 2.000	0,4	1,0	2,19	5,56	0,14	39,75

E_i : Error máximo de la imagen escaneada; E_r : Error máximo de la imagen referenciada llamada "realidad"; E_g : Error de la georreferenciación; $E_{m\acute{a}x}$: Error máximo de la georreferenciación; m/Px: metros/pixel; E_{px} : Error teórico en píxeles

Fte: Elaboración propia

En la última fase del procesado de la cartografía 1:2.000 se elabora un mosaico continuo para las dos ediciones del Plano Parcelario. Utilizando el software Global Mapper v.12 que posibilita recortes de imágenes en función de geometrías tipo área y permite el ensamblado correcto de teselas colindantes, se genera un solo fichero ráster para cada una de las ediciones de la serie utilizadas. El resultado son dos imágenes en formato ECW que muestran el trazado del río en el conjunto del área analizada.

4. Descripción y análisis de resultados

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se efectúa la georreferenciación de las imágenes escaneadas de los mapas en papel correspondientes a los Planos Parcelarios, primera y

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

segunda edición con fechas 1950-1957 y 1982-1984 respectivamente. La similitud de algunas parcelas, que no muestran diferencias en sus límites entre el antiguo y el actual catastro, justifica la utilización de la cartografía catastral actual como apoyo a la identificación de puntos homólogos. También se utilizan las fotografías aéreas del vuelo americano de 1956 por la proximidad en las fechas con los mapas de la primera edición y los ortofotomapas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), que pese a ser de 2009 tienen una escala 1:5.000 similar, y en ocasiones igual, a los documentos que se pretende georreferenciar, lo que facilita la identificación de puntos de control.

El software empleado, Quantum GIS, permite el control de deformaciones en cada uno de los puntos de georreferenciación, calculando en tiempo real el error de cada punto y el error cuadrático medio para el conjunto de la transformación. Todos los errores máximos en píxeles obtenidos ($E_{m\acute{a}x.(px)}$), apéndice 1, se sitúan por debajo del error teórico en píxeles calculado para el conjunto de la cartografía escala 1:2.000 ($E_{px} = 39,75$). La síntesis de los errores obtenidos se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Tabla síntesis de errores obtenidos en el proceso de georreferenciación.

Edición	Nº de imágenes	$E_{m\acute{i}n.(px)}$	$E_{m\acute{a}x.(px)}$	$E_{p(px)}$
Primera	52	8,9	37,1	20,2
Segunda	35	4,8	38,6	21,9

$E_{m\acute{i}n.(px)}$: Error mínimo obtenido (píxeles); $E_{m\acute{a}x.(px)}$: Error máximo obtenido (píxeles)
 $E_{p(px)}$: Error promedio mínimo (píxeles) Fte: Elaboración propia

De este modo se puede considerar en cada momento la idoneidad de la calidad del resultado obtenido y, si es necesario, rechazar el producto de la georreferenciación volviendo a realizar todo el proceso.

En la figura 2 se presenta un ejemplo de georreferenciación de una de las hojas escaneadas del MTNP. En la parte superior se muestra el etiquetado automático que realiza el programa al introducir secuencialmente los puntos de control utilizados para realizar la georreferenciación (valores de 0 a 10). La parte inferior corresponde a los residuos o errores planimétricos resultantes de la transformación donde las flechas señalan la dirección del error en cada uno de los puntos de control.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

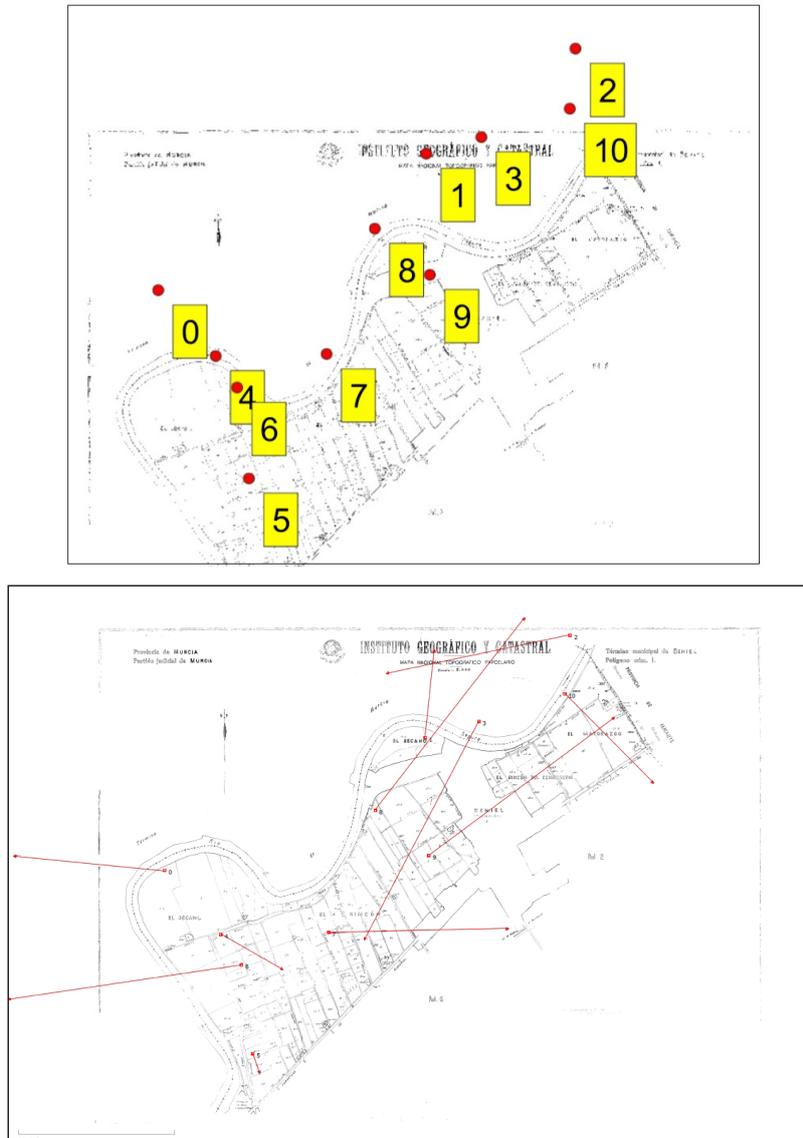


Figura 2: Ejemplo del resultado obtenido del proceso de georreferenciación de una imagen ráster procedente del escaneado del Mapa Topográfico Nacional Parcelario primera edición (1950-1957) de un sector de la Vega Media del Segura (Murcia)

Para cada imagen georreferenciada, el software genera automáticamente un informe (tabla 5) con la información correspondiente a cada uno de los puntos de control, así como un cuadro resumen con la traslación de los ejes, escala, rotación y error medio resultante para el conjunto de la imagen.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): “Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

Tabla 5: Valores resultantes del proceso de georreferenciación y cuadro resumen del proceso de gerreferenciación con Qgis para los puntos de control de la figura 2.

id	enabled	pixelX	pixelY	mapX	mapY	resX [píxeles]	resY [píxeles]	resTot [píxeles]
0	sí	2012	-6748	674408.174	4212723.652	-19.3191	-1.83274	19.4058
1	sí	8158	-3594	675186.880	4213124.744	1.16616	-11.2944	11.3544
2	sí	11580	-1167	675615.677	4213430.103	-23.5383	4.92326	24.0477
3	sí	9423	-3211	675344.632	4213168.324	-14.6492	28.1892	31.7684
4	sí	3331	-8267	674578.680	4212531.054	7.99602	4.5294	9.18977
5	sí	4093	-11096	674674.591	4212173.974	0.865069	2.56254	2.70461
6	sí	3823	-8997	674636.123	4212438.979	-29.8352	4.40629	30.1588
7	sí	5874	-8222	674901.976	4212537.949	23.0868	-0.466275	23.0915

Traslación X	Traslación Z	Escala X	Escala Y	Rotación (grados)	Error medio [píxeles]
674154.923	4213575.783	0.126382	0.126382	0.0942799	25.2694

La última fase del estudio consiste en la elaboración de una imagen única y continua, para cada una de las ediciones de la cartografía histórica manejada, que ofrece una visión global del área de estudio de gran interés para la realización de estudios del territorio. Para generar el mosaico continuo del Plano Parcelario se utiliza el software Globbal Mapper, v.12, con el que se recorta cada imagen de manera individual y se van “ensamblando” sucesivamente todas las imágenes, previamente georreferenciadas, hasta completar la extensión del área de estudio. La figura 3 muestra un ejemplo de la unión de dos de estos ficheros.

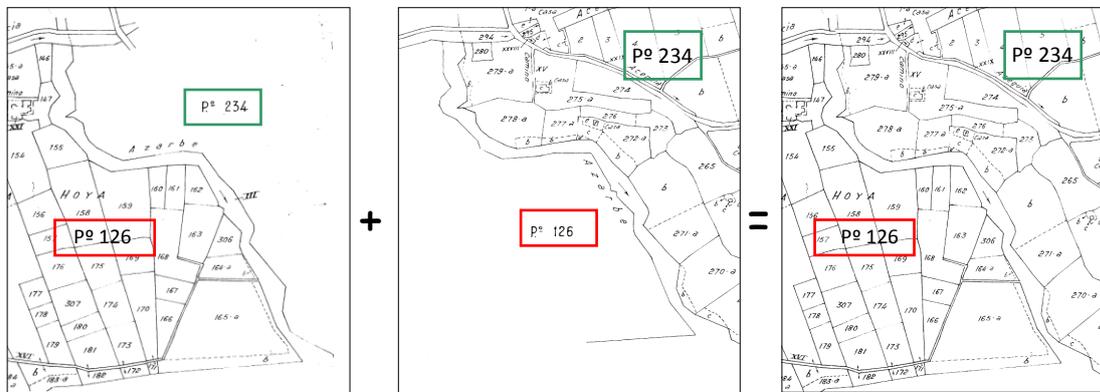


Figura 3: Unión de polígonos catastrales para generar un fichero único en un sector del trazado del cauce del río Segura.

Fte: Elaboración propia a partir del procesado de cartografía histórica.

La generación de una imagen única para cada edición sirve de base, en este caso, para la digitalización sobre pantalla del trazado del río Segura. Cada imagen ráster, en formato ECW, concentra en un sólo fichero toda la información, evitando la necesidad de abrir secuencialmente cada una de las imágenes que configuran la zona de estudio.

La comparación de las imágenes georreferenciadas así obtenidas para distintas fechas, hace posible un estudio más preciso de los cambios de geometría en planta del Bajo Segura. Un ejemplo de estas aplicaciones es la posibilidad de detectar con mayor precisión el trazado de posibles meandros abandonados (figura 3). Esta información se utilizó como apoyo para la

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

localización óptima de una batería de sondeos, realizados mediante técnicas de tomografía eléctrica, con la finalidad de confirmar el desplazamiento del cauce a lo largo del tiempo.

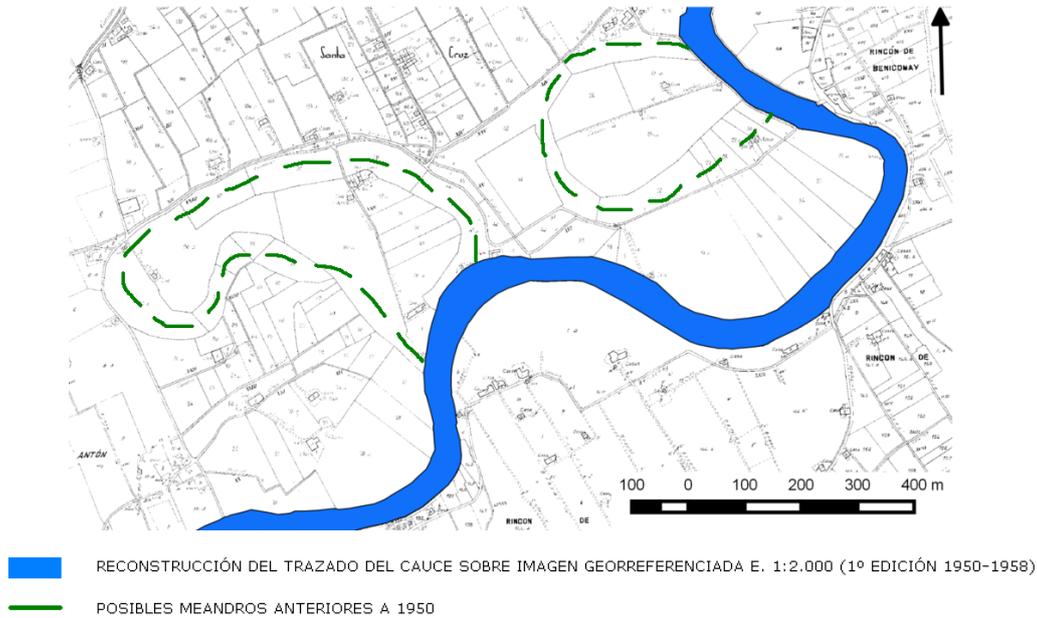


Figura 3: Fragmento de la reconstrucción del trazado del cauce del Río Segura a partir de la georreferenciación de imágenes históricas e identificación de posibles meandros abandonados anteriores a 1950-1958

La reconstrucción del trazado del río a partir de la imagen continua generada con la unión de las imágenes georreferenciadas correspondientes a la primera edición (1950-1958) y la superposición de ésta sobre la ortoimagen de 2009 obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia mediante conexión Web Map Service permite observar importantes modificaciones en algunos tramos del río Segura. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 4, que corresponde a las proximidades del núcleo de población "Alquerías" donde la "corta" de meandros se plantea como solución a los problemas derivados de las reiteradas inundaciones provocadas por el desbordamiento del Segura en algunas zonas de la Vega Media (Álvarez y García-Marín, 2015).

En relación a la cartografía histórica 1:25.000 correspondiente al Mapa Topográfico Nacional Parcelario, no ha sido posible realizar el mosaico debido a la imposibilidad de "encajar" adecuadamente sus límites por las características propias de las representaciones gráficas que contienen. Si se trataran de unir forzando la concordancia de puntos de control, se incrementaría la deformación que ya presentan y se producirían deformaciones artificiales que no corresponderían a la realidad.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

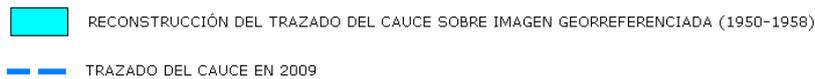
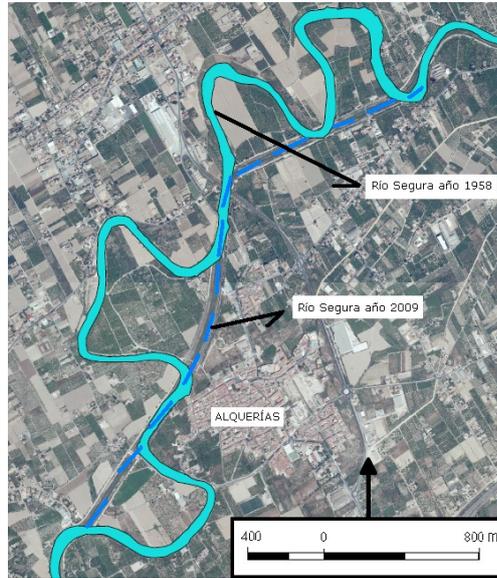


Figura 4: Comparación del trazado del río Segura en 1950-1958 y 2009 en las proximidades del núcleo de población Alquerías (Vega Media del Segura).

Fuente: elaboración propia sobre ortofografía obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia (IDERM)

6. Conclusiones

La georreferenciación de documentos de cartografía antigua es una tarea compleja que requiere gran esfuerzo y experiencia. Su principal finalidad es corregir los problemas que producen errores en la posición de los elementos geográficos, y ello exige tener en cuenta los errores y deformaciones en el papel original que hacen variar la escala en diferentes direcciones, los posibles errores geométricos debidos a los instrumentos y técnicas aplicados en su elaboración y el grado de idoneidad de los dispositivos de captura y aplicaciones informáticas.

El procedimiento propuesto en el presente estudio ha permitido obtener una excelente calidad en el producto cartográfico final, totalmente necesaria para cubrir uno de los principales objetivos iniciales: analizar la evolución de la geometría en planta del Bajo Segura en la VMRS en su época histórica reciente (siglos XIX y XX). Los resultados obtenidos con la aplicación de Quantum GIS, en relación al grado de deformación de cada uno de los puntos y el error medio de la transformación aplicada (Transformación Bidimensional Conforme de las imágenes, Transformación Helmert), demuestran que el ajuste geométrico en las series continuas de mapas y planos generados es bastante aceptable y que las deformaciones más significativas asociadas a la representación local en papel han podido ser corregidas, particularmente en el caso del Plano Parcelario del IGC (Instituto Geográfico Catastral), escalas 1/2.000 y 1/5.000, ediciones 1ª (1955) y 2ª (1980). Además, la alta resolución de escaneo dada a los documentos originales (600 ppp) no sólo ha facilitado el proceso de digitalización, sino que también ha logrado reducir sustancialmente la degradación de la calidad de los mapas finales.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

Otra importante ventaja de Quantum GIS, también aprovechada, es la posibilidad de acceder a información remota mediante servidores Web Map Service del OGC. En concreto, a través de WMS se ha accedido a ortofotogramas del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), 2011, que han servido de gran ayuda en el proceso de georreferenciación. Finalmente, con el ensamblado de todas las imágenes previamente georreferenciadas y la creación de un mosaico continuo del Plano Parcelario se aporta un material cartográfico más completo y preciso, con aplicaciones muy diversas para el área de estudio.

Agradecimientos

El presente artículo ha sido realizado en el marco del proyecto DYCAM-SEG, "Dinámica y cambios morfológicos recientes del Bajo Segura (Vega Media)", financiado por la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia, Referencia 15224/PI/10.

Referencias bibliográficas

Álvarez Rogel, Y. y García Marín, R. (2015): "Avenidas fluviales y obras de defensa y encauzamiento en la vega media del río Segura: la riada de 1948". En De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., Rodrigues, M. (Eds.) *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza-AGE. pp. 1515-1524.

Cortés José, J. (1997): "Cartografía Histórica de Andalucía. Asociación de imágenes a un gestor documental. Catalogo de cartografía histórica multimedia". *Congreso Internacional sobre Sistemas de Información Histórica*. 203-211.

Dávila Martínez, F. J. y Camacho Arranz, E.: (2012): "Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de archivos y cartotecas "Propuesta Metodológica". *Revista Catalana de Geografia. Revista digital de geografia, cartografia i ciències de la Terra IV època, Vol. XVII, núm. 46, 1-9*. <http://www.rcg.cat/articles.php?id=257> (fecha de consulta 16/12/2015)

Goy, J.L., Zazo, C., Somoza, L. and Dabrio, C.J. (1989): "The neotectonic behaviour of the Lower Segura River Basin during the Quaternary Palaogeographical meaning of the 'Conglomerates of the Segura'". *Bulletin of the INQUA Neotectonics Commission* 12, 14-17.

Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (2013): "Recomendaciones Técnicas para la Georreferenciación de Entidades Patrimoniales". En Recomendaciones Técnicas 06. Consejería de Cultura, Junta de Andalucía. http://www.iaph.es/export/sites/default/galerias/patrimonio-cultural/documentos/gestion_informacion/georreferenciacion_entidades_patrimoniales_IAPH.pdf (fecha de consulta 20/02/2016).

Martín Patino, J.M.; Blanco, A.; Chueca, A. Bombardieri, G. Herreros, T.; Manzanero, B. (2012): "Informe España, 2012. Una interpretación de su realidad social". Editorial: Fundación Encuentro. Madrid, 292 P.

Montenat, C. (1977): "Les bassins néogènes et quaternaires du Levant d' Alicante a Murcie (Cordilleres bétiques orientales, Espagne). Stratigraphie, paléontologie et évolution dynamique". *Docum. Lab. Géol. Univ. Lyon*, 63: 1-345.

Moreno Vergara, G. y Cortés José, J. (2011): "La exactitud posicional de la cartografía histórica". *Revista ph. núm 77*. 62-65

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): “Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

Pérez Álvarez, J.A y Ballell Caballero, JA. (2015): “*Transformaciones de coordenadas*”. Editorial Bellisco. Madrid. 250 P.

Ramos, N. y Roset, R.: (2012): “Georeferenciación de mapas antiguos con la ayuda de usuarios”. *Revista Catalana de Geografia. Revista digital de geografia, cartografia i ciències de la Terra IV època, vol. XVII, núm. 46*. <http://www.rcg.cat/articles.php?id=257> (fecha consulta 18/12/2015)

Rodríguez-Estrella, T., Hernández-Henrile, J.L. y Ibargüen, J. (1999): “Neotectónica y tectónica activa en la depresión pliocuaternaria del Segura (Murcia-Orihuela)”. *1er. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica: Murcia; vol. I, pp 53-63*.

Romero Fernández, M.: (2014) “*Proceso de georreferenciación de la Cartografía histórica*”. <http://www.expobus.us.es/cartografia/salas/sala12/georreferenciacion.html>. (fecha de consulta 18/01/2016).

Roset, Rafael y Ramos, Noelia: (2012): “Georeferenciación de mapas antiguos con herramientas de código abierto”. *Revista Catalana de Geografia, Revista digital de geografia, cartografia i ciències de la Terra IV època, Volum. XVII, núm. 45*. <http://www.rcg.cat/articles.php?id=237> (Fecha consulta 2/10/2015).

Sánchez Menéndez, F.J. (2004): “*Georreferenciación de cartografía: datos ráster y vectoriales*”. EOSGIS, S.L. 296 P.

Uribebarrea, D., Pérez González, A. y Benito, G. (2003): “Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (central Spain) over the past 500 years”. *Quaternary Science Reviews*, 22: 2209–2221.

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

APENDICE 1

Error, en pixeles, E(px), resultante del proceso de georreferenciación de las imágenes escaneadas correspondientes a los Planos Parcelarios escala 1:2.000

TM	Ed.	Políg.	Año	Hoja	Parte	E (px)
Murcia 30030	1	9	1951	1	Única	18,0
				2	Única	8,9
		36	1953	1	Única	21,8
				2	1	21,4
				2	2	16,8
		38	1950	1	1	21,8
				1	2	9,6
				2	1	25,8
		39	1954	1	Única	21,4
				2	Única	26,0
		40	1954	1	Única	20,9
		124	1951	1	Única	27,6
		125	1951	1	Única	18,5
		126	1952	1	Única	21,5
		148	1953	Única	1	17,2
					2	21,6
		149	1954	1	Única	31,9
		150	1954	Única	1	22,7
					2	17,4
					3	24,9
		233	1951	Única	1	28,2
					2	20,0
					3	10,9
		234	1951	Única	1	17,6
					2	17,1
		235	1951	1	Única	17,4
		248	1953	Única	1	17,9
					2	16,3
		249	1953	Única	1	15,2
					2	16,9
		250	1953	Única	1	18,4
					2	19,6
		252	1953	Única	1	13,2
2	36,7					
317	1951	1	Única	18,3		
318	1950	Única	1	11,6		
			2	22,3		
319	1951	1	Única	12,4		

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, nº 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

		332	1953	1	Única	27,2
				2	Única	37,1
		333	1953	1	Única	23,4
				2	Única	19,7
		351	1950	1	Única	20,0
		357	1957	1	Única	17,3
				2	Única	25,4
		358	1957	Única	1	14,5
					2	17,8

TM	Ed.	Políg.	Año	Hoja	Parte	E (px)	
Murcia 30030	2	5	1982	Única	Única	21,7	
		6	1982	Única	Única	11,4	
		7	1982	Única	1	17,5	
					2	22,3	
		9	1982	Única	Única	26,9	
		29	1983	Única	1	20,6	
					2	31,1	
		30	1983	Única	1	14,8	
					2	20,0	
		31	1983	Única	Única	32,9	
					1	Única	9,4
		32	1983	Única	2	Única	21,9
					Única	Única	22,7
		94	1982	Única	Única	17,6	
		97	1983	Única	Única	17,6	
		101	1983	Única	1	Única	18,3
					2	Única	24,0
		128	1983	Única	Única	22,3	
		129	1983	Única	Única	22,0	
		130	1983	Única	Única	21,3	
		132	1983	Única	1	Única	25,0
					2	Única	13,7
					3	Única	32,5
		201	1984	Única	1	Única	30,0
					2	Única	21,0
		206	1984	Única	1	Única	38,6
					2	Única	35,2
		213	1984	Única	1	Única	22,5
2	Única				29,1		
214	1984	Única	Única	23,4			
215	1984	Única	Única	20,8			
219	1984	Única	1	Única	31,4		
			2	Única	12,4		

Álvarez Rogel, Y. y Conesa García, C. (2018): "Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España)", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 101-118. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.536>

TM	Ed.	Políg.	Año	Hoja	Parte	E (px)
Alcantarilla 30005	1	1	1957	1	Única	12,7
		2	1957	2	Única	22,7
	2	1	1983	Única	1	4,8
					2	7,6
		2	1983	Única	Única	19,7

TM	Ed.	Políg.	Año	Hoja	Parte	E (px)
Beniel 30010	1	1	1958	1	Única	25,3
		6	1958	2	Única	24,5