

La realización de mapas de densidad para la investigación del poblamiento antiguo. El entorno del Bajo Guadalquivir (SO de España) entre los siglos II y IV d.C. como caso de análisis

Luis-Gethsemaní Pérez-Aguilar¹

Instituto de Arqueología-Mérida (CSIC-Junta de Extremadura)

Recibido el 17 de enero de 2021· Aceptado el 17 de mayo de 2021

RESUMEN

En este trabajo detallamos el procedimiento metodológico para la realización de mapas que nos permitan analizar la evolución de la densidad del poblamiento antiguo en un territorio. Nos centraremos concretamente en el cálculo basado en la estimación de la densidad de núcleo (KDE). En este tipo de análisis es muy importante seleccionar un ancho de banda (h) óptimo, para cuyo cálculo existen dos estrategias: una que baraja criterios cualitativos y otra centrada en procedimientos cuantitativos. Tras valorar los pros y los contras de cada una de estas estrategias, proponemos una tercera opción que consiste en combinar ambos criterios. Para ejemplificar esta propuesta metodológica hemos tomado como caso de estudio varias zonas del Bajo Guadalquivir (SO de España) en las que se han documentado yacimientos arqueológicos datados entre los siglos II y IV d.C.

PALABRAS CLAVE: Estimación de densidad de núcleo, mapa de densidades, poblamiento antiguo, arqueología espacial, Sistema de Información Geográfica (SIG), *Hispania*.

Creating density maps for research into ancient settlements. The surrounding area of the Lower Guadalquivir Basin (SW Spain) between the 2nd and 4th centuries AD as a case study

ABSTRACT

In this paper we reflect on the different concepts and issues required to make density maps that allow the ancient settlements in a territory to be studied. We will focus on the kernel density estimation (KDE). In this type of analysis, it is important to select an optimum bandwidth (h) and there are two strategies for this purpose: one that considers qualitative criteria and another that focuses on quantitative criteria. After evaluating each of these strategies, we propose a third option that consists of combining both criteria. Following a series of statistical calculations, a minimum and maximum value can be determined for the bandwidth, using this interval as a qualitative testing range. To exemplify this methodological proposal with a practical case, a series of density maps have been drawn up based on the known Roman sites in the Lower Guadalquivir Basin (SW Spain) between the 2nd and 4th centuries AD.

KEYWORDS: Kernel density estimation, density map, ancient settlements, spatial archaeology, geographical information system (GIS), Roman Spain.

1. Instituto de Arqueología-Mérida (CSIC-Junta de Extremadura). Plaza de España, 15, 06800, Mérida (Badajoz, España). Teléfono: (+34) 924315661. E-mail: Lgpa@iam.csic.es

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo vamos a detallar el procedimiento metodológico para la realización de mapas que nos permitan analizar la evolución de la densidad del poblamiento antiguo en un territorio. Nos centraremos concretamente en el cálculo basado en la estimación de la densidad de núcleo (KDE), para la cual haremos una propuesta procedimental para la determinación del ancho de banda, es decir, el valor numérico del radio del núcleo, y que en el modelo espacial de densidad actúa como parámetro de suavizado.

Para ilustrar esta propuesta metodológica con un caso práctico se ha elaborado una serie de mapas de densidades a partir de los yacimientos romanos conocidos en el Bajo Guadalquivir (en el SO de España) entre los siglos II y VI d.C. (Pérez-Aguilar, 2018), si bien aquí presentaremos solo los correspondientes al tránsito del periodo altoimperial al tardorromano (siglos II-IV d.C.) por razones de espacio.

Valga decir que el cuadrante SO de la Península ibérica fue durante el periodo altoimperial de gran relevancia económica para el Imperio romano, explotándose sectores tan importantes como el de la minería argentífera (Vidal y Campos, 2008; Garrido, 2011; Pérez Macías, 2014), la producción de aceite de oliva y vino (Reynolds, 2007), e incluso la producción de salazones y de salsas de pescado (García Vargas y Bernal, 2009). Todo ello potenciado por la existencia de un gran río, el Guadalquivir o *Baetis*, que en su tramo bajo era navegable para barcos de mediano y gran calado (Strab. III, 2.3), hecho que abarataba costes y beneficiaba las relaciones comerciales con otras zonas del Imperio (Chic, 2009).

Dicho auge económico coincide en el tiempo no solo con la monumentalización de los espacios urbanos (Padilla, 1999) sino también con un aumento general de los asentamientos rurales volcados a las distintas actividades productivas (Pérez-Aguilar, 2017 y 2018).

Los mencionados sectores económicos parecen entrar en crisis por distintas razones en el tránsito del periodo altoimperial al tardorromano (Chic, 2005; García Vargas, 2012 y 2014), hecho que influyó en el poblamiento humano de la zona (Pérez-Aguilar, 2017 y 2018). Son precisamente tales cambios poblacionales los que pre-

tendemos cartografiar en términos de densidad mediante un SIG.

Para ello hemos seleccionado 4 zonas de muestreo, distribuidas en torno a distintos tramos del Bajo Guadalquivir (Fig. 1). La superficie de estas 4 zonas equivale aproximadamente a 3699 km², lo que representa el 36% de la superficie del entorno del Bajo Guadalquivir. A partir de estas zonas de muestreo hemos elaborado una base de datos geoespacial con todos los yacimientos romanos claramente fechados entre los siglos II y VI d.C., y que equivalen a un total de 285 asentamientos², cuya inmensa mayoría son entidades rurales (Pérez-Aguilar, 2018). En la zona 4 hemos realizado incluso prospecciones arqueológicas en los términos municipales de Trebujena y El Cuervo para disponer de datos más actualizados (Pérez-Aguilar, 2018).

2. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

Estudiar el poblamiento humano implica necesariamente definir primeramente la unidad de análisis, que estará determinada en todo momento por la escala espacial definida previamente por el investigador. Una aproximación arqueológica al poblamiento de un territorio a escala macro difícilmente puede trabajar con el número de habitantes o pobladores como unidad de análisis ya que, actualmente, seguimos careciendo de un método efectivo que nos permita calcular con más o menos exactitud la cantidad de individuos que ocupaban los asentamientos y su evolución a lo largo del tiempo. Dicho lo cual, en nuestro estudio poblacional la unidad operativa no será el número de individuos que ocupa un territorio, sino el de asentamientos. Aunque no sea este el tema que aquí nos concierne, es evidente que cada uno de estos núcleos habitacionales debió tener un peso demográfico concreto y dinámico en el tiempo, y que esto debería contemplarse para que el análisis fuese más realista. Peso demográfico al que nos podríamos aproximar indirectamente mediante el cálculo de la entropía

2. La información referente a cada uno de estos sitios arqueológicos puede consultarse en el catálogo de yacimientos de nuestra tesis doctoral (Pérez-Aguilar, 2018), y en cada una de las entradas se detalla la bibliografía específica consultada.

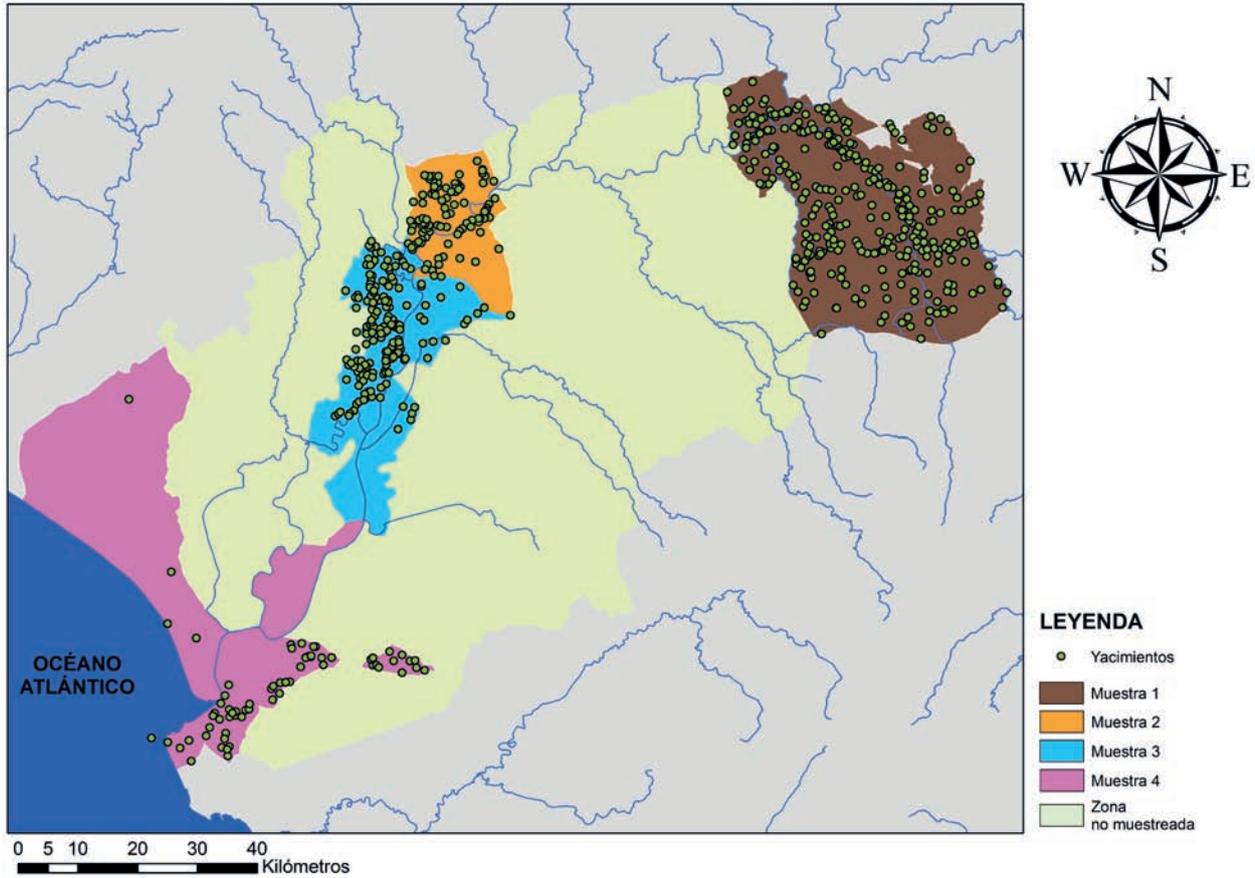


FIGURA 1. Localización de las distintas áreas de muestreo y de los yacimientos arqueológicos muestreados en el entorno del Bajo Guadalquivir (SO de España).

interna de cada sitio (Pérez-Aguilar, 2018, 1145-1163) y sobre la conceptualización teórica de que cada asentamiento ocupa un nicho ecológico (Pérez-Aguilar, 2021, 114-118), siendo una unidad disipativa de gradientes energéticos –compuesta a su vez por subunidades–, y que tiene un metabolismo exosomático cuantificable (Shawcross, 1972; Pérez-Aguilar, 2021, 35-36 y 46-47). Pero de momento este tipo de aproximaciones resultan inviables para el estudio de muchos yacimientos debido a la calidad de los datos disponibles, de ahí que en este trabajo otorguemos irrealmente a cada sitio el mismo valor disipativo.

Un cálculo en bruto de la densidad (d = unidad de poblamiento/unidad de superficie), sin tener en cuenta factores de distribución temporal ni geográfica, de poco o nada sirve para comprender las dinámicas geohistóricas del poblamiento humano. Para ello se hace necesario

inferir, en términos de probabilidad espacial, tanto patrones de asentamientos como su variabilidad distribucional a nivel espacio-temporal (cf. Barceló *et al.*, 2006, 37-38). De ahí la necesidad de cartografiar tales procesos.

Tratar de contemplar la totalidad de sitios estudiados permitiría sin duda percibir agrupaciones sobre el territorio, sin embargo la cantidad de sitios y la escala a la que se trabaja introducen borrosidad debido a la proximidad de los asentamientos, de forma que se producen solapamientos que impiden ver con claridad las fronteras entre distintas áreas de densidades (Fig. 1). Para evitar esto se requiere de un modelado espacial de análisis de densidad (Conolly y Lake, 2009, 232-234). El modelo que emplearemos es el de análisis de densidad de núcleo o *kernel density estimation* (KDE), y usaremos para ello ArcGIS 10.0.

La KDE es una técnica no paramétrica porque no parte de presunciones de patrones distribucionales, sino que hace análisis a partir de los datos mismos (Brunsdon, 1995, 878). Emplea una función de probabilidad de densidad que contempla dos dimensiones, el núcleo, a partir del conjunto de datos puntuales, con coordenadas X e Y , para generar una aproximación suavizada de su distribución centrífuga a partir del centro de los núcleos (Conolly y Lake, 2009, 234). De esta forma obtenemos un modelado basado en isolíneas de color que se generan a partir de la localización de los datos, y que permiten de un vistazo percibir las distribuciones probabilísticas de las densidades en la zona estudiada (Moreno, 1991, 156; Maximiano, 2013, 137).

Se puede llegar a pensar que hacer mapas de densidades basados en esta técnica no tiene mayor interés que el de presentar una cartografía visualmente más atractiva y moderna. Sin embargo, su uso no responde a una mera cuestión de estética. A diferencia de los mapas de densidad basados en cuadrantes, los mapas realizados por estimación de núcleos ofrecen resultados más atenuados que permiten interpretar de una forma más realista datos cuya naturaleza en términos de densidad no es discontinua sino continua, y que requieren de una mayor precisión en la estimación de las modas o tendencias de densidad (Wheatley y Gillings, 2002, 186-187; Prada, 2015, 79; Yin, 2020). Dicho de otro modo, en los mapas de densidad basados en cuadrantes la densidad permanece constante dentro de cada cuadrante, y no se perciben variaciones locales dentro de ellos ni en la transición entre cuadrantes (Baxter, 2017: 2; De Smith et al., 2020; Yin, 2020).

A la hora de hacer la estimación, el programa informático aplica la siguiente función matemática de forma automatizada para datos de naturaleza bivariada (tomada de Beardah y Baxter, 1996, 180); donde X e Y representan el punto bidimensional desde el que se estima la densidad, X_i e Y_i son los valores de las variables, K es el símbolo del tipo de *kernel* (véase apartado 2.1), y h_1 y h_2 son los anchos de banda para las direcciones de las coordenadas X e Y :

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{nh_1h_2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h_1}, \frac{y - Y_i}{h_2}\right)$$

Beardah y Baxter (1996, 180) recomiendan usar valores diferentes para h_1 y h_2 en el caso de las KDE bivariadas, ya que de utilizarse el mismo valor de suavizado ($h_1 = h_2$) se generarían baches (*bumps*) simétricamente esféricos en torno a los núcleos. De usarse valores distintos ($h_1 \neq h_2$), las protuberancias o baches generados en el modelo de densidad tendrían forma elíptica, e incluso se podría añadir un tercer valor (h_3) fuera de la diagonal de simetría para introducir una orientación arbitraria (Beardah, 1999, 5-6). Sin embargo, como recientemente se ha percatado Baxter (2017, 11-12), los SIG actuales trabajan con funciones de KDE bivariadas que proyectan el mismo ancho de banda en ambas direcciones ($h_1 = h_2$), lo que resulta excesivamente simplificador e incorrecto. No obstante, se trata de un problema que de momento no podemos evitar en el modelado espacial mediante el SIG utilizado, y que tendrán que corregir sus programadores en el futuro.

2.1. Tipos de *kernels*

Lejos de lo que pudiera pensarse, existen distintos tipos de *kernels* que en la función ocuparían el valor del símbolo K . En la Fig. 2 señalamos los más frecuentes, si bien la mayoría ofrecen resultados finales muy similares. La elección del tipo de *kernel*, por tanto, resulta casi irrelevante, y muchas veces depende del paquete informático utilizado (cf. Moreno, 1991, 158; Baxter *et al.*, 1997, 348; De Smith et al., 2020). En nuestro caso hemos usado la función K2 de Silverman.

2.2. Ancho de banda (h)

Más importante es la determinación óptima de la varianza del radio del núcleo, también llamada ancho de banda (*bandwidth*) (Moreno, 1991, 161; Brunsdon, 1995, 878-879; Conolly y Lake, 2009, 234; Yin, 2020). Este se define como la semiamplitud del núcleo para cada intervalo de interés, y controla el grado de suavidad del modelado espacial (Prada, 2015, 82). Existen dos clases de anchos de banda: el fijo, es decir, el que permanece constante para todo el conjunto de datos, y el adaptativo. En nuestro caso, tanto las unidades de análisis, que son yacimientos, como

TIPOS DE KERNELS	
KERNEL	K (u)
Uniforme	$\frac{1}{2}$, para $ u < 1$
Triangular	$(1 - u)$, para $ u \leq 1$
Epanechnikov	$\frac{3}{4} (1 - u^2)$, para $ u < 1$
Cuártico o Biweight de Tukey	$\frac{15}{16} (1 - u^2)^2$, para $ u \leq 1$
Triweight	$\frac{35}{32} (1 - u^2)^3$, para $ u \leq 1$
Gaussiano	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} u^2\right)$
Coseno	$\frac{\pi}{4} \cos\left(\frac{\pi}{2} u\right)$, para $ u \leq 1$
K_2 de Silverman	$\frac{3}{\pi} (1 - u^2)^2$, para $ u \leq 1$

Donde $u = (x-h_i)/h$

FIGURA 2. Cuadro-resumen con los tipos de *kernels* más frecuentes (Moreno, 1991, 157).

la escala macroespacial y el carácter bidimensional de los datos nos invitan a trabajar con un ancho de banda fijo (cf. Terrell y Scott, 1992; Baxter, 2017; Yin, 2020).

El procedimiento a partir del cual se calcula el ancho de banda como parámetro de suavizado ha estado sujeto a discusión, sobre todo entre matemáticos, y ha generado una importante cantidad de literatura (véanse en los siguientes párrafos algunos ejemplos). Aquí partiremos de la premisa de que $h_1 = h_2$ en la función de KDE bivariada debido a la problemática ya anotada al inicio del apartado 2.

En su aplicación al campo de la geografía y de la arqueología espacial podemos diferenciar dos grandes posturas. De un lado quedan aquellos autores que se inclinan a determinar el ancho de banda a partir de procedimientos estadísticos (p. ej. Moreno, 1991; Brunson, 1995; Baxter *et al.*, 1997), y de otro lado encontramos a autores que invitan a determinarlo de forma cualitativa, probando diferentes anchos de banda hasta encontrar uno que más o menos se perciba como óptimo visualmente hablando (p. ej. Gibin *et al.*, 2007; Conolly y Lake, 2009).

La estimación cualitativa tiene como ventaja el hecho de que es el analista el que determina el parámetro de suavizado en función de los resultados que percibe, ya que si el radio del núcleo es muy pequeño se formarán picos, es decir, se tiende a la rugosidad de los datos iniciales (Fig. 3A), mientras que si es muy grande la distribución de la densidad será excesivamente suavizada, lo que le resta realismo o utilidad al modelado espacial (Fig. 3B). Por tanto, el investigador puede ajustar el ancho de banda a la densidad verdadera de los datos con los que trabaja (Fig. 3C) (Conolly y Lake, 2009, 234).

Sin embargo, esto último puede ser un inconveniente importante, porque los investigadores rara vez tienen una idea realmente sólida o consistente sobre la densidad verdadera y su distribución, por lo que este tipo de estimaciones parte siempre de ideas preconcebidas que no tienen por qué coincidir con la realidad (Yin, 2020). Aun así, este procedimiento puede permitir generar modelos interesantes siempre y cuando se pruebe con múltiples valores de h y se vayan comparando los resultados unos con otros (Yin, 2020). Pero esto puede implicar invertir un exceso de tiempo y de

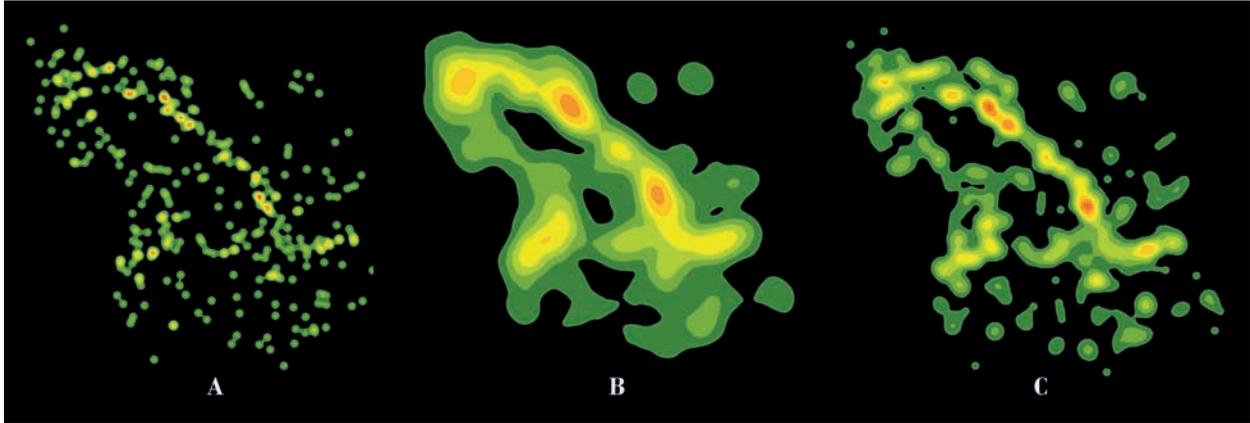


FIGURA 3. KDE de yacimientos romanos y tardoantiguos en la confluencia de los ríos Genil y Guadalquivir (Muestra 1) con diferentes valores para el ancho de banda: $h_a = 970.528003$ m; $h_b = 3951.2890799577$ m; y $h_c = 2084$ m.

esfuerzo dependiendo de la casuística, de los tipos de datos e incluso de la experiencia del analista.

Por ello otros investigadores optan directamente por emplear distintos criterios cuantitativos en la estimación del ancho de banda (para más detalles véanse entre otros a Moreno, 1991; Brunson, 1995; Baxter *et al.*, 1997; Beardah, 1999; Nakoinz y Knitter, 2016; Gonçalves *et al.*, 2018). El problema de usar estos criterios de forma automática es que podemos pecar de excesiva rigidez o de poca flexibilidad procedimental, derivando esta en unos resultados poco adecuados, con una salida gráfica excesivamente atomizada o, por el contrario, suavizada. Por esto mismo, M. Gibin *et al.* (2007, 275) han sostenido que «mathematical algorithms [...] can improve the selection process but are no complete substitute for personal experience and knowledge of the study area and of the attribute upon which density analysis is performed».

La propuesta que hacemos, y con la que hemos trabajado a escala macroespacial, consiste precisamente en combinar ambos criterios procedimentales. Para ello nos hemos inspirado en los trabajos de Beardah (1999), De Cos (2004) y Baxter (2017). De un lado acotamos mediante operaciones estadísticas los valores mínimo y máximo que puede adquirir el ancho de banda, y dentro de ese rango de tanteo probamos varios valores, seleccionando el resultado visualmente mejor. De esta forma damos solidez estadística al análisis a la par que discriminamos todos los valores que que-

dan fuera del rango de tanteo, agilizándose así el proceso, pero también descartamos la posibilidad de seleccionar un valor excesivamente rígido basado únicamente en un criterio estadístico. A esta forma de operar la hemos denominado *estimación del ancho de banda por rango de tanteo*.³

El valor mínimo se ha determinado a partir del algoritmo de análisis del vecino más próximo (*k-nearest neighbour*). Como valor máximo se ha respetado el que por defecto calcula el SIG empleado. Según ESRI, el algoritmo usado por ArcGIS ejecuta de forma automática los siguientes pasos⁴: 1) Cálculo del centro medio de los puntos de entrada; 2) cálculo de la distancia desde el centro medio ponderado para todos los puntos; 3) cálculo de la distancia media ponderada de esas distancias (D_m); 4) cálculo del valor de la distancia media estándar ponderada (SD); y 5) aplicación de la siguiente fórmula, donde n es el número de puntos:

$$h = 0.9 * \min \left(SD, \sqrt{\frac{1}{\ln(2)} * D_m} \right) * n^{-0.2}$$

3. Esta propuesta metodológica de momento parece no ofrecer tan buenos resultados a escala microespacial, aunque tenemos que seguir sometiéndola a prueba, modificando incluso los análisis espaciales que abajo proponemos para determinar el rango de tanteo.

4. La información sobre el algoritmo ha sido obtenida de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm> [consultada a 28/10/2021].

Normalmente al arqueólogo le suele interesar el análisis diacrónico de un fenómeno o caso de estudio, como es el caso que aquí presentaremos. Por tanto, el resultado cartográfico no se corresponderá con un mapa sino con varios. Durante el proceso de elaboración de cada uno de ellos puede surgir la siguiente pregunta: ¿debemos mantener constante el valor de h , calculado a partir del total de datos, o debemos recalcularlo a partir de los datos correspondientes a cada periodo? Proceder de esta última forma no sería incorrecto. Sería incluso más realista, ya que el valor de h dependerá en todo momento del grado de ocupación del territorio. Sin embargo, cuando lo que se desea hacer es un ejercicio comparativo recalcularlo el valor de h es menos operativo, ya que al alterar el valor del ancho de banda estamos en última instancia cambiando el patrón comparativo en términos de densidad. Por esta razón nosotros, al igual que otros colegas (p. ej. Bonnier *et al.*, 2019, 73), optamos por calcular el ancho de banda a partir de la totalidad de los datos y por mantener constante su valor para hacer mapas que permitan evaluar la diacronía del fenómeno analizado.

2.3. Tamaño del píxel

Otro elemento relevante a la hora de proyectar visualmente el análisis efectuado gira en torno al tamaño del píxel o de celda (*output cell size*). De Cos (2004, 143) emplea para su zona de

estudio –España– uno equivalente a 500 m de lado. En nuestro caso esta cantidad resulta insatisfactoria, ya que abordamos un área de estudio más reducida que la de esta autora. Tampoco recomendamos fiarnos demasiado del parámetro que el programa de SIG define por defecto, ya que dependiendo del proyecto en el que estemos trabajando este podría ser igualmente elevado.

Jugar con un tamaño de píxel excesivamente grande podría motivar que la salida gráfica obtenida esté muy pixelada, con lo que se corre el riesgo de que existan valores que queden indefinidos (Fig. 4A). De suceder esto, tendríamos que ir reduciendo el tamaño del píxel hasta lograr una nitidez y una definición gráfica óptimas (Fig. 4B) (Yin, 2020).

3. RESULTADOS

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se ha procedido a determinar el rango de tanteo para el cálculo del ancho de banda en el conjunto de las cuatro zonas de muestreo. El análisis del vecino más próximo nos ha devuelto un valor mínimo de 1248.348267 m; mientras que el valor que calcula ArcGIS por defecto para el ancho de banda es de 3951.2890799577 m. Por tanto, tales valores determinan el rango de tanteo. Dentro de dicho intervalo hemos tanteado con un ancho de banda de 1923, 2598 y de 3273 m, siendo el segundo de los valores el que ha ofrecido mejo-

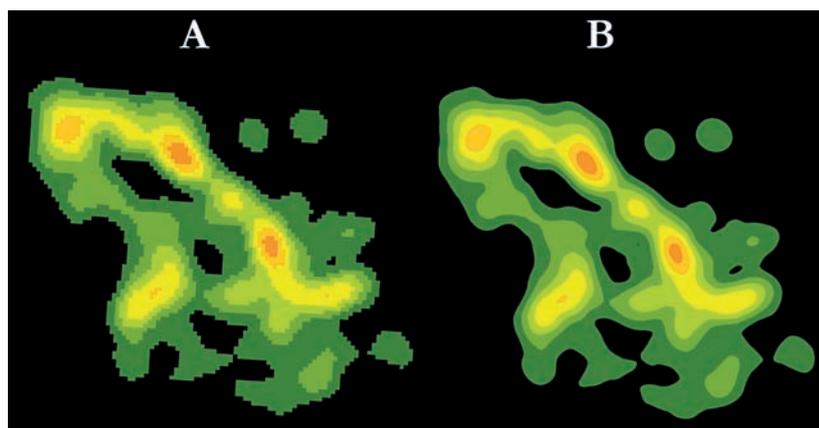


FIGURA 4. KDE de yacimientos romanos y tardoantiguos en la confluencia de los ríos Genil y Guadalquivir (Muestra 1) con diferentes valores para el tamaño de píxel: $h_a = 514.262972389728$ m; y $h_b = 10$ m.

res resultados, y el que finalmente se ha seleccionado. Por su parte, los análisis se han ejecutado con un tamaño de píxel de 10 m para tener una alta resolución gráfica. A partir de estos parámetros hemos realizado un total de 10 mapas por periodos de medio siglo que cubren la evolución de la densidad para estas zonas entre los siglos II y VI d.C. (Pérez-Aguilar, 2018, 1173-1182), si bien aquí solo presentamos los 6 mapas que cubren los siglos II y IV d.C. (Figs. 5-10).

Los mapas resultantes permiten inferir cómo la primera mitad del siglo II d.C. fue el periodo con una mayor tasa de ocupación del territorio, siendo la densidad de yacimientos la más alta de los mapas realizados, con picos de densidad máximos de hasta 0.92 yac./km² (Fig. 5A). En las tres primeras zonas de muestreo el poblamiento rural tiende a concentrarse en torno a ríos y arroyos, vías de comunicación, y en las inmediaciones de varias ciudades romanas (Fig. 5B). En la zona de muestreo 4 el poblamiento se distri-

buye especialmente en el reborde meridional de lo que quedaba del antiguo *lacus Ligustinus*, y llama especialmente la atención el vacío poblacional existente en las actuales marismas del Guadalquivir, probablemente debido a razones edáficas y topográficas (Fig. 5B).

Ya en la segunda mitad del siglo II d.C. se asiste a una contracción del sistema poblacional, tal y como se percibe en el mapa de densidad (Fig. 6); contracción que se acentuó durante la primera mitad del siglo III d.C., bajando la densidad máxima a 0.66 yac./km² (Fig. 7). Pocos cambios se aprecian en la segunda mitad del siglo III (Fig. 8), lo cual parece indicar el cese de la fase de decrecimiento poblacional y la estabilización de la red de asentamientos.

En el siglo IV d.C. se asiste a una nueva fase de crecimiento poblacional relevante, aun sin alcanzarse las tasas de ocupación del periodo altoimperial. La densidad poblacional vuelve a incrementarse, experimentándose máximos de

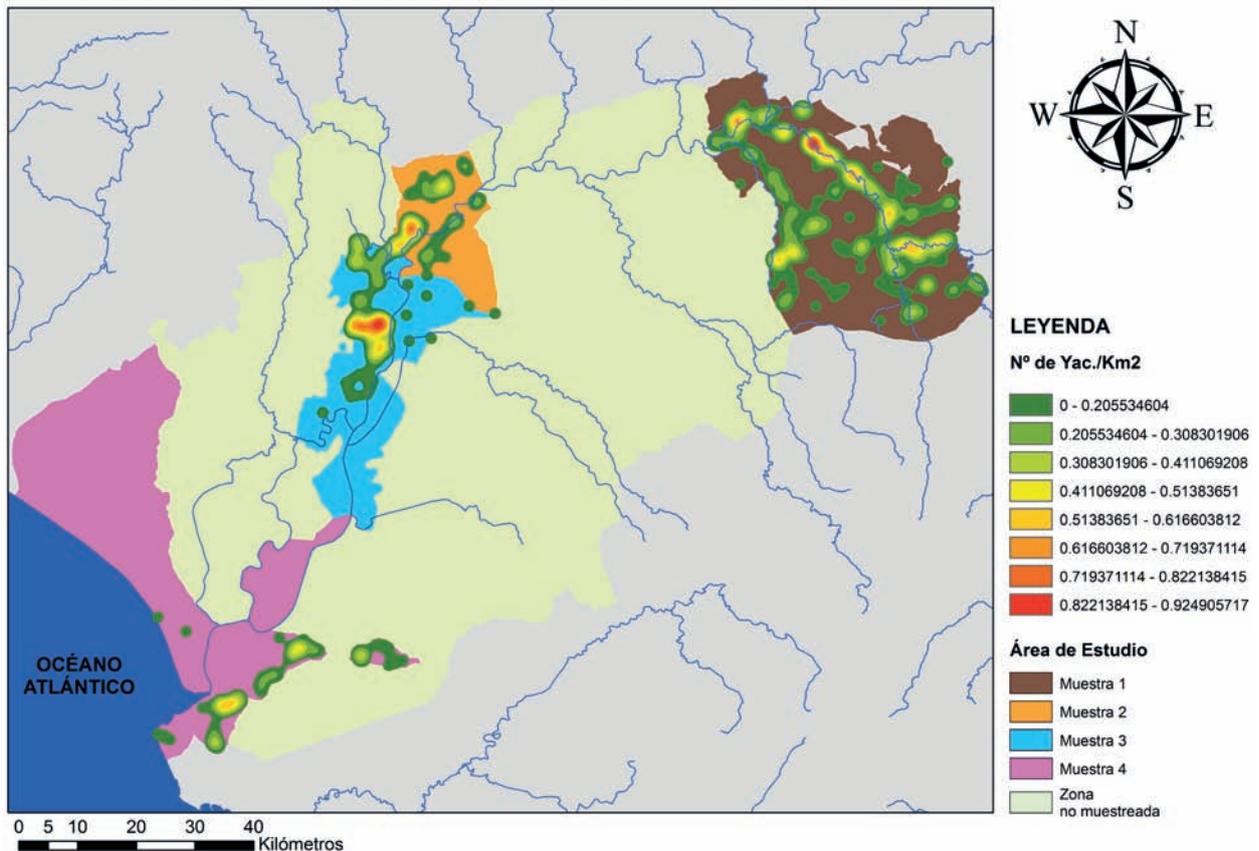


FIGURA 5A. Mapa de densidad de asentamientos para la primera mitad del siglo II d.C.

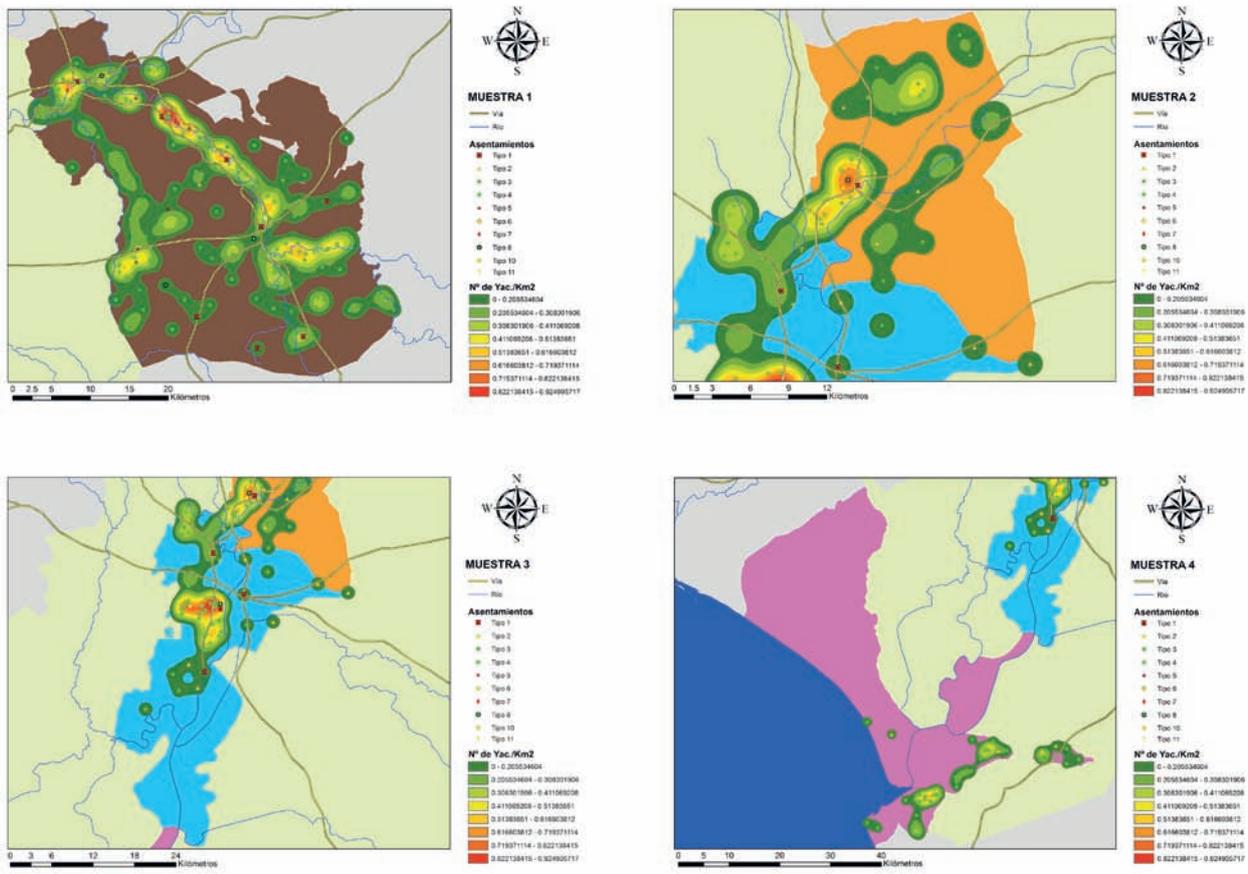


FIGURA 5B. Patrones de asentamiento en las distintas zonas de muestreo para la primera mitad del siglo II d.C. Los tipos de yacimientos se corresponden con: ciudades (tipo 1), poblados rurales o *vici* (tipo 2), villae suntuosas (tipo 3), *villae* no suntuosas (tipo 4), chozas (tipo 5), complejos religiosos (tipo 6), complejos productivos varios (tipo 7), necrópolis (tipo 8), infraestructuras varias (tipo 10) y sitios inciertos o indefinidos (tipo 11).

hasta 0.84 yac./km² en ciertas zonas del territorio (Fig. 9). Esta fase expansiva de la red de asentamientos se mantiene también en la segunda mitad de la centuria (Fig. 10).

4. DISCUSIÓN HISTÓRICA DE LOS RESULTADOS

El más alto índice de ocupación del territorio estudiado se corresponde con la primera mitad del siglo II d.C. El aumento del número de *villae* se relaciona con la consolidación de la *Baetica* occidental como una región fundamental en la economía imperial, tanto por la captación de metales amonedaables (Chic, 2005; Pérez Macías, 2014) como de recursos agropecuarios destina-

dos al comercio a distintas escalas (Chic, 2009). Comercio, minería y vida urbana requerían constantemente de suministros alimentarios. Fueron muchas las granjas (*villae*) y factorías pesqueras (*cetariae*) que emergieron para satisfacer tales demandas (Pérez-Aguilar, 2017), situación a su vez reforzada por la estabilidad en las condiciones de navegabilidad del bajo tramo del río *Baetis* (Borja, 2014) y por unos condicionantes climáticos bastante benignos para la producción agropecuaria (McCormick *et al.*, 2018).

Muchos de estos asentamientos rurales comenzaron a abandonarse a partir de la segunda mitad del siglo II d.C., tendencia que se mantuvo a lo largo de la centuria siguiente. Ni la navegabilidad del río *Baetis* —que parece no mermar, al

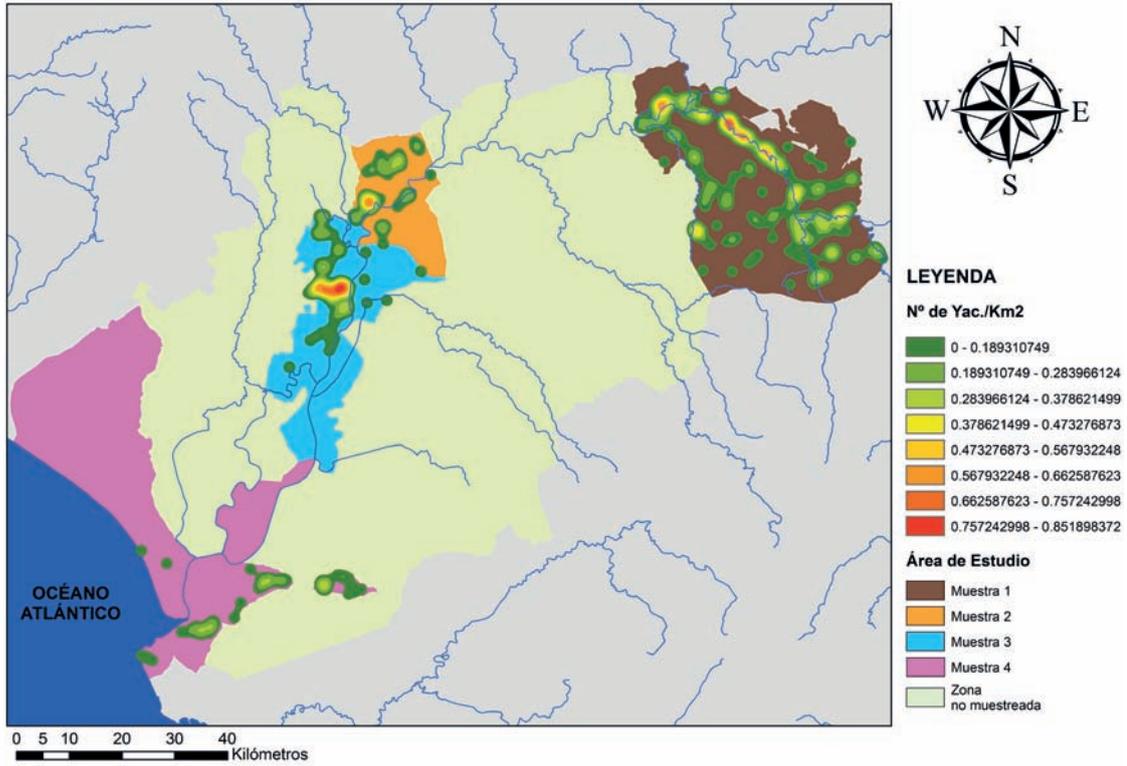


FIGURA 6. Mapa de densidad de asentamientos para la segunda mitad del siglo II d.C.

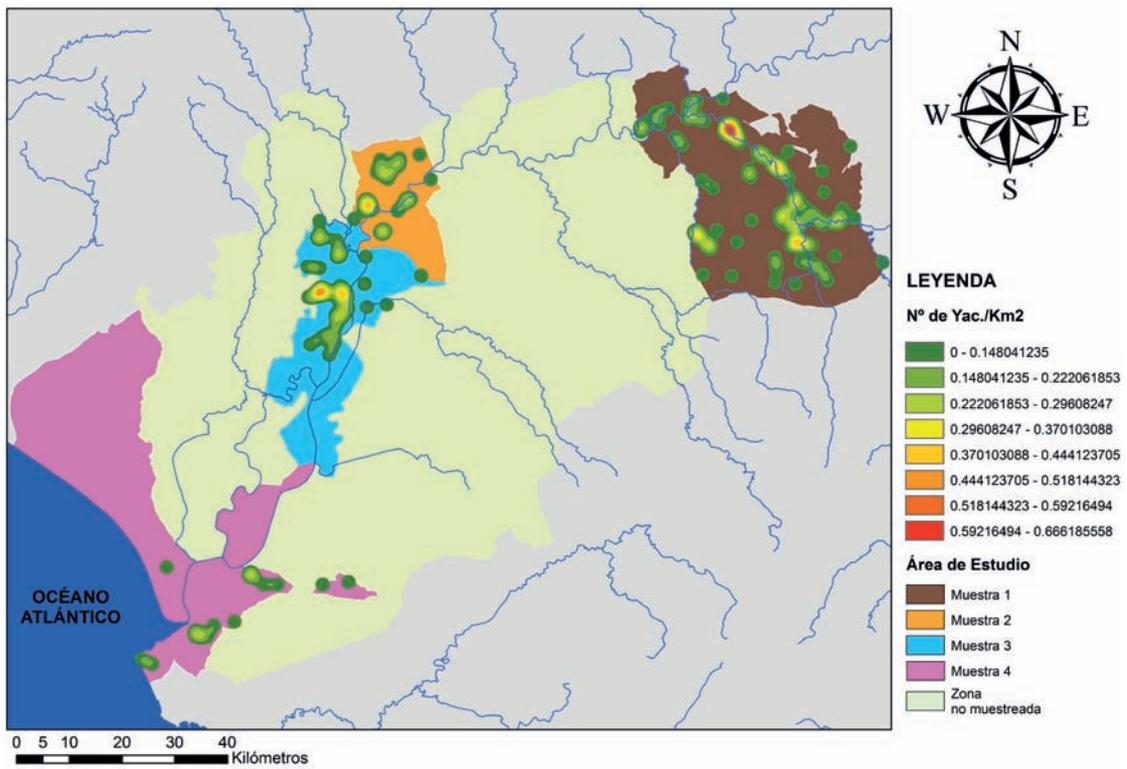


FIGURA 7. Mapa de densidad de asentamientos para la primera mitad del siglo III d.C.

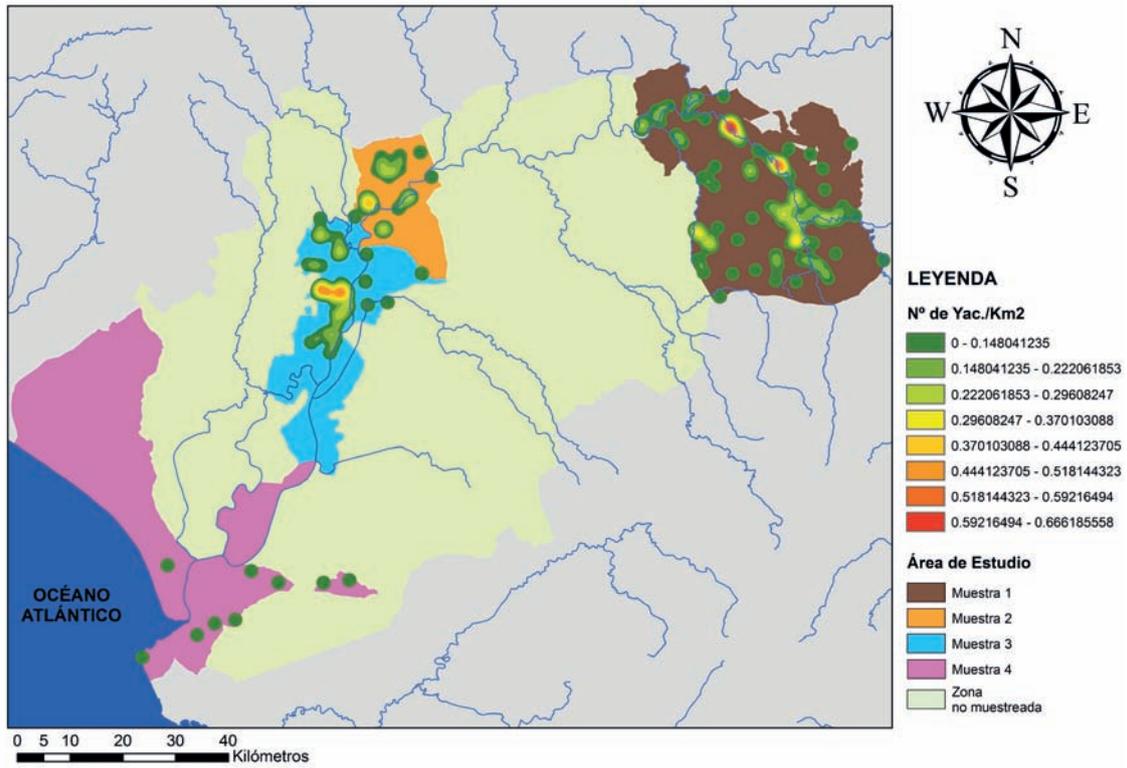


FIGURA 8. Mapa de densidad de asentamientos para la segunda mitad del siglo III d.C.

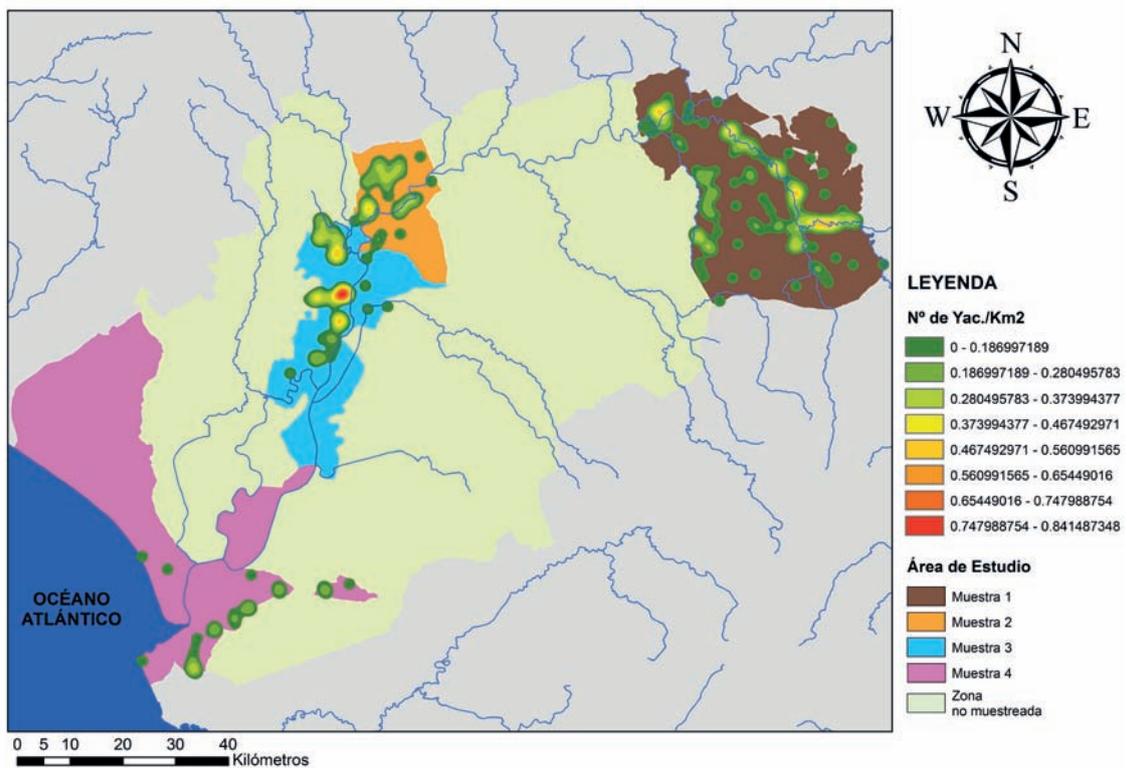


FIGURA 9. Mapa de densidad de asentamientos para la primera mitad del siglo IV d.C.

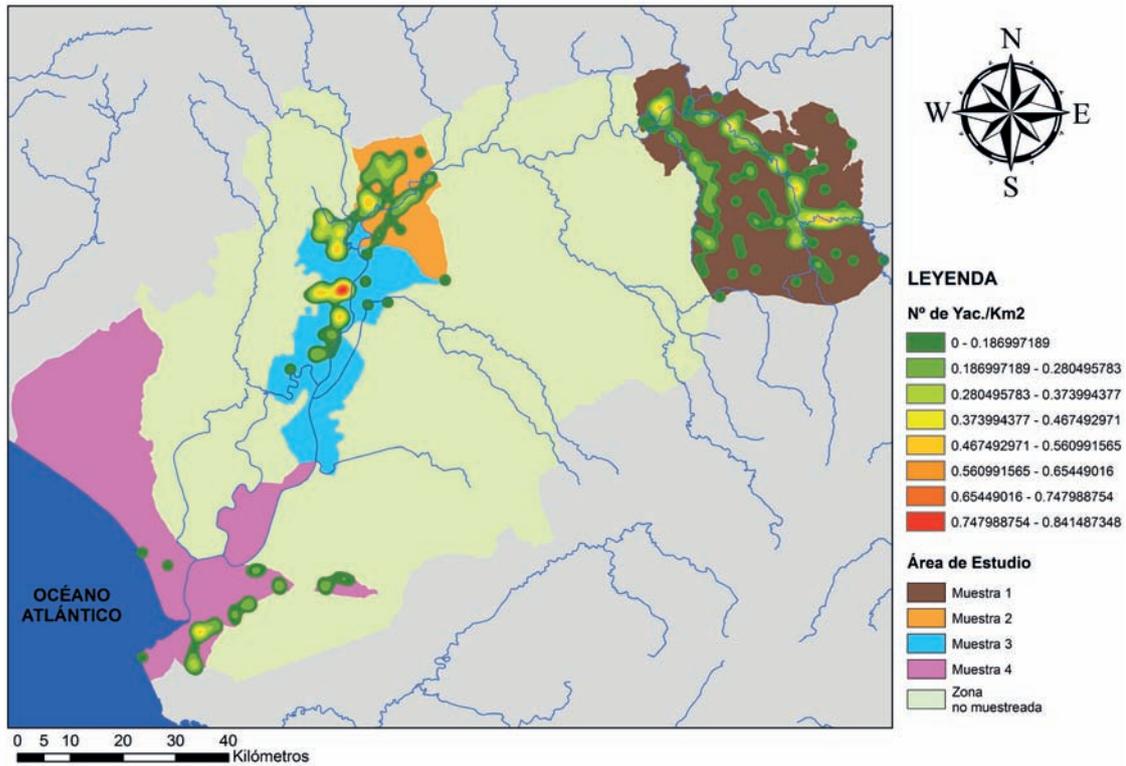


FIGURA 10. Mapa de densidad de asentamientos para la segunda mitad del siglo IV d.C.

coincidir con una fase de dinámica fluvial estable (Borja, 2014)– ni los condicionantes climáticos –en términos generales óptimos (McCormick *et al.*, 2018)– parecen haber sido factores decisivos en esta pérdida poblacional de los últimos 50 años del siglo II. Más relevantes debieron ser otros aspectos de índole sociocultural, como las dificultades de financiación de la actividad minera por parte del Estado romano tras la desastrosa y costosa campaña militar de Trajano en Mesopotamia junto a las guerras defensivas en la frontera del Imperio a partir del reinado de Marco Aurelio (García Vargas, 2012 y 2014).

Muchas minas del SO peninsular se cerraron debido a la infrafinanciación o disminuyeron de forma sustancial su explotación (Garrido, 2011; Pérez Macías, 2014). La consecuente devaluación de la moneda de plata y el proceso inflacionista frenó en las ciudades béticas el evergetismo de tendencia monumentalista, reorientándose ahora hacia la manutención de los espacios urbanos existentes y hacia la beneficencia y la caridad (García Vargas, 2014). Así, un buen número de

canteras de mármol del sur hispano entraron también en crisis (Padilla, 1999).

El aceite y el vino béticos fueron progresivamente desplazados en el mercado interprovincial por productos africanos y orientales, tendencia que se agudizó a partir de las políticas de Septimio Severo (Reynolds, 2007). También muchas *cetariae* de la bahía de Cádiz y de la desembocadura del Guadalquivir fueron abandonadas ante la imposibilidad de hacer negocio, debido a las injerencias y al control del Estado sobre actividades que anteriormente habían estado en manos de particulares (García Vargas y Bernal, 2009).

Todas estas dificultades económicas que atravesaba el Imperio, al menos en lo que al SO hispano se refiere, hicieron que un buen número de asentamientos rurales volcados a la captación de recursos perdieran su razón de ser y se abandonaran en el entorno del Bajo Guadalquivir, siempre bajo una concepción pragmática de la economía que tiempo después quedaría reflejada en el Panegírico Latino: «*Siquidem ager qui numquam respondet impendiis ex necessitate deseritur*» (Paneg.

Lat. VIII, 6), que puede traducirse como «Un campo en el que se invierte más de lo que se obtiene es necesariamente abandonado». Muchas de las *villae* y *cetariae* altoimperiales se habían construido al calor de un contexto de bonanza económica y de óptimos condicionantes geográficos y climáticos. Al verse ahora truncados los factores económicos que habían potenciado la eclosión de estos sitios, muchos fueron abandonados, pues mantenerlos activos resultaba más costoso que el rédito obtenido (Pérez-Aguilar, 2017).

La crisis económica y poblacional iniciada en el SO hispano en la segunda mitad del siglo II pudo agudizarse durante el siglo III por razones climáticas. En esta centuria se produjeron bruscos descensos en las temperaturas y un gran aumento de la aridez, situación denominada por los paleoclimatólogos como *Rapid Climate Change* (McCormick *et al.*, 2012). Este contexto climático debió impactar negativamente sobre el ciclo agrícola del que dependían buena parte de los asentamientos rurales, lo que desencadenó sequías y malas cosechas (Pérez-Aguilar, 2018; Pérez-Aguilar *et al.*, en prensa).

Los asentamientos supervivientes a todas estas vicisitudes y presiones económicas y climáticas se encontraban en la segunda mitad del siglo III perfectamente adaptados a tales circunstancias. Tanto es así que la red de asentamientos dejó de contraerse en este periodo en el entorno del Bajo Guadalquivir (Pérez-Aguilar, 2018). A partir del siglo IV d.C. hubo de nuevo un contexto de estabilidad política y de bonanza económica (Reynolds, 2007; Vidal y Campos, 2008; García Vargas, 2012 y 2014; Pérez Macías, 2014), acompañado de unas circunstancias climáticas que volvieron a resultar prolíferas para el ciclo agropecuario de la zona, con un aumento general de las temperaturas y de la humedad (McCormick *et al.*, 2018). Tales circunstancias, y pese a la merma de la navegabilidad del río *Baetis* (Borja, 2014), hicieron que la red de asentamientos experimentase una nueva fase de crecimiento que se prolongaría hasta comienzos del siglo V d.C. (Pérez-Aguilar, 2018).

5. CONCLUSIONES

Sintetizando todo lo dicho hasta el momento, podríamos decir que la realización de mapas

de densidad permite cartografiar, tomando como unidad operativa los asentamientos documentados arqueológicamente, la evolución de la ocupación de un territorio para luego tratar de explicar en clave histórica la misma. De optarse por llevar a cabo tales mapas mediante estimaciones de densidad de núcleo, debemos prestar gran atención tanto al uso de un tamaño de píxel como de un ancho de banda óptimos. Para determinar esto último hemos propuesto un método basado en el empleo de un rango de tanteo en el que se combinan tanto criterios cuantitativos como cualitativos.

A futuro, queremos seguir sometiendo a prueba esta forma de operar en el cálculo del ancho de banda en el proyecto de investigación posdoctoral que estamos desarrollando en la comarca de Tierra de Barros (Extremadura). Vemos necesario ensayar otros tipos de análisis que permitan acotar de una forma más exacta el rango de tanteo a distintas escalas espaciales, siempre con el afán de mejorar el realismo de los resultados y de su proyección cartográfica.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta aportación se ha realizado en el marco de la Ayuda FJC2018-037126-I financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Queremos dar las gracias igualmente a Jesús García Sánchez por habernos ofrecido algunas recomendaciones bibliográficas e impresiones sobre algunos aspectos del trabajo, así como a los evaluadores anónimos por haber enriquecido el texto original con sus comentarios y sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- BARCELÓ, J. A.; MAXIMIANO, A.; VICENTE, O. (2006). «La multidimensionalidad del espacio arqueológico: teoría, matemáticas y visualización». En: GRAU, I. (ed.). *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje*. Alicante: Universidad de Alicante, 29-40.
- BAXTER, M. J. (2017). «Kernel density estimation in Archaeology». *Online*: https://www.academia.edu/34849361/Kernel_density_es

- timation_in_archaeology [consultada a 11/01/2021].
- BAXTER, M. J.; BEARDAH, C. C.; WRIGHT, R. V. S. (1997). «Some archaeological applications of Kernel Density Estimates». *Journal of Archaeological Science*, 24(4), 347-354.
- BEARDAH, C. C. (1999). «Uses of multivariate kernel density estimates». En: DINGWALL, L.; EXON, S.; GAFFNEY, V.; LAFLIN, S.; LEUSEN, M. (eds.). *Archaeology in the Age of Internet: Computer, Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Oxford: Archaeopress, 107, 5-12.
- BEARDAH, C. C.; BAXTER, M. J. (1996). «MATLAB Routines for kernel density estimation and the graphical representation of archaeological data». En: KAMERMANS, H.; FENNEMA, K. (eds.). *Interfacing the Past. CAA95: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Vol. 1. Leiden: University of Leiden, 179-184.
- BONNIER, A.; FINNÉ, M.; WEIBERG, E. (2019). «Examining land-use through GIS-Based Kernel Density Estimation: A re-evaluation of legacy data from Berbati-Limes Survey». *Journal of Field Archaeology*, 44(2), 70-83.
- BORJA, F. (2014). «Geoarqueología urbana en Sevilla». En: BELTRÁN, J.; RODRÍGUEZ, O. (coords.). *Sevilla arqueológica. La ciudad en época protohistórica, antigua y andalusí*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 276-303.
- BRUNSDON, C. (1995). «Estimating probability surfaces for geographical point data: an adaptive kernel algorithm». *Computer & Geosciences*, 21(7), 877-894.
- CHIC, G. (2005). «Marco Aurelio y Cómodo. El hundimiento de un sistema económico». En: HERNÁNDEZ, L. (coord.). *La Hispania de los Antoninos (98-180)*. Actas del II Congreso Internacional de Historia Antigua (Valladolid, 10-12 de noviembre de 2004). Valladolid: Universidad de Valladolid, 567-586.
- CHIC, G. (2009). *El comercio y el Mediterráneo en la Antigüedad*. Madrid: Akal.
- CONOLLY, J.; LAKE, M. (2009). *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la arqueología*. Barcelona: Bellaterra.
- DE COS, O. (2004). «Valoración del método de densidades focales (Kernel) para la identificación de los patrones espaciales de crecimiento de la población de España». *GeoFocus*, 4, 136-165.
- DE SMITH, M. J.; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. A. (2020). *Geospatial analysis. A comprehensive guide to principles techniques and software tools*. En: <https://spatialanalysisonline.com> [Consultada a 01/12/2020].
- GARCÍA VARGAS, E. (2012). «Aspectos socioeconómicos de la Antigüedad Tardía en la Bética (siglos III-VII d.C.)». En: BELTRÁN, J.; RODRÍGUEZ, S. (coords.). *La arqueología romana de la provincia de Sevilla. Actualidad y perspectivas*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 235-253.
- GARCÍA VARGAS, E. (2014). «La Europa de época tardorromana (siglos III-V d.C.)». En: CHIC, G. (dir.). *Historia de Europa (ss. X a.C.-V d.C.)*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 613-756.
- GARCÍA VARGAS, E.; BERNAL, D. (2009). «Roma y la producción de *garvm* y *salsamenta* en la costa meridional de Hispania. Estado actual de la investigación». En: BERNAL, D. (ed.). *Arqueología de la pesca en el Estrecho de Gibraltar. De la Prehistoria al fin del Mundo Antiguo*. Cádiz: Universidad de Cádiz, 133-181.
- GARRIDO, P. (2011). *La ocupación romana del valle del Guadamar y la conexión minera*. Tesis doctoral. Sevilla: Universidad de Sevilla. URI: <http://hdl.handle.net/11441/15988>
- GIBIN, M.; LONGLEY, P.; ATKINSON, P. (2007). «Kernel density estimation and percent volume contours in general practice catchment area analysis in urban areas». En: WINSTANLEY, A. C. (ed.). *GISRUK 2007. Proceedings of the Geographical Information Science Research UK Conference*. Country Kildare: National University of Ireland Maynooth, 270-276.
- GONÇALVES, C.; CASCALHEIRA, J.; COSTA, C.; BÁRBARA, S.; MATIAS, R.; BICHO, N. (2018). «Detecting single events in large Shell mounds: A GIS approach to Cabeço da Amoreira, Muge, Central Portugal».

- Journal of Archaeological Science Reports*, 18, 1000-1010.
- MAXIMIANO, A. (2013). «Datos óptimos para la caracterización espacial y temporal de la variabilidad arqueológica a escala *intra-site*». *GeoFocus*, 13(1), 131-153.
- MCCORMICK, M.; BÜNTGEN, U.; CANE, M. A.; COOK, E. R.; HARPER, K.; HUYBERS, P.; LITT, T.; MANNING, S. W.; MAYEWSKY, P. A.; MORE, A. F. M.; NICOLUSSI, K.; TEGEL, W. (2012). «Climate change during and after the Roman Empire: reconstructing the past from scientific and historical evidence». *Journal of Interdisciplinary History*, 43(2), 169-220.
- MORENO, A. (1991). «Modelización cartográfica de densidades mediante estimadores Kernel». *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, 30, 155-170.
- NAKOINZ, O.; KNITTER, D. (2016). *Modelling human behaviour in landscapes. Basic concepts and modelling elements*. Suiza: Springer.
- PADILLA, A. (1999). «Consideraciones en torno a la explotación del mármol en la Bética durante los siglos I-II». *Habis*, 30, 271-281.
- PÉREZ-AGUILAR, L. G. (2017). «Termodinámica del No Equilibrio y evolución del poblamiento rural tardoantiguo. Reflexiones y casos de estudio de la Bética occidental». En: DIARTE, P. (ed.). *Cities, Lands and Ports in Late Antiquity and the Early Middle Ages: Archaeologies of Change*. Roma: BraDypUS: 133-146.
- PÉREZ-AGUILAR, L. G. (2018). *Termodinámica y poblamiento humano en el Bajo Guadalquivir durante la Antigüedad Tardía (siglos III-VI d.C.). Un enfoque darwiniano*. Tesis doctoral. Sevilla: Universidad de Sevilla. URI: <https://hdl.handle.net/11441/79400>
- PÉREZ-AGUILAR, L. G. (2021). *La arqueología como biología. Una introducción teórica a la arqueología darwiniana*. Sevilla: Editorial Universidad de Sevilla.
- PÉREZ-AGUILAR, L. G.; CABALLERO-MÁRQUEZ, P.; GORDILLO-SALGUERO, D.; NIETO-DOMÍNGUEZ, V. (en prensa). «Cambios climáticos, crisis de subsistencia y poblamiento humano en el SW hispano entre la Prehistoria Reciente y la Edad Media: las comarcas del Bajo Guadalquivir (Andalucía) y Tierra de Barros (Extremadura)». En: *Plagas, hambrunas, masacres y persecuciones desde la Antigüedad hasta los albores del Medievo*. Murcia: Universidad de Murcia.
- PÉREZ MACÍAS, J. A. (2014). «Agricultura y minería romanas en el suroeste ibérico». *Huelva Arqueológica*, 23, 117-146.
- PRADA, L. (2015). *Métodos estadísticos aplicados en Arqueología*. Trabajo Fin de Grado en Matemáticas. Sevilla: Universidad de Sevilla. URI: <http://hdl.handle.net/11441/40814>
- REYNOLDS, P. (2007). «Cerámica, comercio y el Imperio Romano (100-700 d.C.): Perspectivas desde Hispania, África y el Mediterráneo Oriental». En: MALPICA, A. y CARVAJAL, J. C. (eds.). *Estudios de cerámica tardorromana y altomedieval*. Granada: Alhulia, 13-82.
- SHAWCROSS, W. (1972). «Energy and Ecology: thermodynamic models in Archaeology». En: CLARKE, D. (ed.). *Models in Archaeology*. Londres: Methuen, 577-622.
- TERRELL, G.R.; SCOTT, D.W. (1992). «Variable kernel density estimation». *The Annals of Statistics*, 20(3), 1236-1265.
- VIDAL, N.O.; CAMPOS, J.M. (2008). «Relaciones costa-interior en el territorio onubense en época romana». *Mainake*, 30, 271-287.
- WHEATLEY, D.; GILLINGS, M. (2002). *Spatial Technology and Archaeology. The archaeological applications of GIS*. Londres: Taylor & Francis.
- YIN, P. (2020). «Kernels and density estimation». En: WILSON, J. P. (ed.). *The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*. Ithaca: University Consortium for Geographic Information Science. DOI: <https://doi.org/10.22224/gistbok/2020.1.12>