

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

VNIVERSITAT Đ VALÈNCIA

**REDES, COMPLEJIDAD Y
ARQUEOLOGÍA:
OTRA FORMA DE VER EL PASADO**

Joaquín Jiménez Puerto

**TRABAJO FIN DE MASTER
MASTER EN ARQUEOLOGÍA
CURSO 2016-17
TUTOR: JOAN BERNABEU AUBÁN**

Índice

| | |
|---|----|
| 1.INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 2.ESFERA TEÓRICA..... | 5 |
| 2.1 TEORÍA EVOLUTIVA CULTURAL..... | 10 |
| 2.2 SISTEMAS COMPLEJOS..... | 13 |
| 2.3 REDES COMPLEJAS..... | 17 |
| 2.4 ANÁLISIS DE REDES SOCIALES (SOCIAL NETWORK ANALYSIS O SNA)..... | 32 |
| 2.4.1 DEFINICIONES BÁSICAS..... | 34 |
| 2.4.2 SNA EN ARQUEOLOGÍA..... | 40 |
| 2.4.3 ALGUNAS APLICACIONES DEL SNA EN ARQUEOLOGÍA..... | 45 |
| 2.4.3.1 REDES SOCIALES EN EL SO. PREHISPÁNICO DE E.E.U.U..... | 50 |
| 2.4.3.2 REDES DE INTERCAMBIO DE OBSIDIANA EN O. PRÓXIMO..... | 55 |
| 2.4.3.3 REDES NEOLÍTICAS EN IBERIA: MUNDO CARDIAL..... | 59 |
| 3. APLICACIÓN PRÁCTICA: NEOLÍTICO EN IBERIA..... | 67 |
| 3.1 METODOLOGÍA..... | 68 |
| 3.2 RESULTADOS..... | 72 |
| 4. CONCLUSIONES..... | 82 |
| 5. GLOSARIO..... | 86 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 93 |

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia moderna se ha beneficiado de los intentos del positivismo y neopositivismo por explicar el mundo sensible, que han generando grandes avances en el mundo de la ciencia, pero que han tenido problemas a la hora de plantear una “Teoría del Todo”. Hay que destacar el hecho de que toda explicación de la realidad es siempre un modelo simplificado, que se basa en alguna teoría. Durante los años 90, con el fin de avanzar en la comprensión de la realidad empírica, comenzaron su andadura lo que se conoce como Ciencias de la Complejidad. A través de ellas se pretende explicar una serie de fenómenos comunes a todos los sistemas formados por elementos interrelacionados, que como un conjunto exhiben propiedades y comportamientos no evidentes a partir de la suma de las partes individuales.

La definición de tiempo histórico de Braudel (Braudel 1976), proponía una división temporal en tres categorías: tiempo corto (lo más visible de la historia y lo más estudiado), tiempo largo (nivel de las estructuras, el más estable) y tiempo medio (la coyuntura en que el cambio es perceptible). Este punto de partida que compartían estructuralismo y el materialismo histórico, presentaba algunos problemas, entre los que se encuentra el de agencia vs estructura (nivel micro vs nivel macro). De este modo quedaba confrontado el reduccionismo vs el holismo en un estéril debate de difícil resolución. Gracias a la aplicación de los postulados de los Sistemas Complejos este debate ya no es necesario. Aplicando los postulados de los Sistemas Complejos se pretende entender un sistema a través del modelado, tema en el que se profundizará en este trabajo.

Sin embargo, la aplicación de los Sistemas Complejos a la Arqueología no está exenta de dificultades. Sin ir más lejos, los datos que proporciona el registro arqueológico, y que por tanto maneja la arqueología son de carácter estático: no reflejan las interacciones entre los objetos, lugares y las personas, que manifiestan un carácter dinámico. Un enfoque alternativo para entender la evolución de la complejidad social, deriva del estudio de los sistemas complejos, que proporcionan

una serie de herramientas conceptuales para estudiar los procesos sociales. Los sistemas complejos están compuestos de muchos componentes que interactúan, que pueden ser representados como redes. Lo que determina el comportamiento de los sistemas complejos es el carácter de las interacciones entre los componentes, más que las características inherentes de éstos. Un subconjunto de éstos son los sistemas complejos adaptativos (de ahora en adelante CAS), en los que las interacciones pueden cambiar dramáticamente a través de procesos internos, así como transmitir información acerca del estado del sistema, a los componentes, permitiendo que éstos se auto-gestionen. Considerar los sistemas humanos como CAS posiciona el foco en el flujo de la información, la toma de decisiones, en las interacciones a múltiples escalas de organización y en dinámicas no lineales. El problema estriba en que no es posible observar las dinámicas de las sociedades antiguas. Además el registro material es desorganizado, fragmentario y una amalgama de objetos producidos por diversos actores, durante largos periodos de tiempo. Así pues podemos beneficiarnos de procesos de “reconstrucción” inductiva de un pasado incognoscible, a partir de un escaso registro arqueológico, recurriendo a la experimentación sistemática y prueba de hipótesis. Por supuesto, es imposible realizar experimentos sobre sistemas humanos antiguos reales. Sin embargo, la simulación computacional por medio de modelos, ofrece un protocolo valioso para crear entornos experimentales con los que generar resultados que puedan evaluarse sobre los exiguos datos que poseemos, del registro arqueológico (Bernabeu *et al.* 2012: 24–25).

Existen diversos tipos de modelos. El presente trabajo se centrará en la creación de modelos siguiendo una metodología basada en la teoría de redes y más concretamente en el análisis de redes sociales, conocida como Análisis de Redes Sociales. Es la intención de este trabajo, en primer lugar, crear un marco teórico y metodológico sobre el que sustentar la aplicación de estas técnicas analíticas. En segundo lugar, mostrar algunos ejemplos reales de análisis arqueológico utilizando esta metodología, para finalizar con una aplicación de Análisis de Redes

Sociales. Concretamente se trabajará sobre las medidas de similitud que permiten dar estructura relacional a los datos arqueológicos, aspecto que se desarrollará en profundidad en las siguientes páginas.

A lo largo del trabajo se irán introduciendo gran cantidad de conceptos técnicos. Con la finalidad de que sea más fácil al lector seguir la explicación, se ha añadido al final un glosario con dicha terminología. Aquellas palabras que se vean en negrita en el texto tendrán una entrada explicativa en este glosario.

2. ESFERA TEÓRICA

La arqueología se basa fundamentalmente en el estudio y análisis de los restos materiales del pasado. Con mucha frecuencia este registro material es escaso y no representa más que una pequeña parte, de las sociedades que los produjeron. El sesgo que presenta hace que nunca tengamos el total de las actividades del pasado. El interés de la arqueología a la hora de entender y reconstruir las dinámicas humanas pasadas debe fundamentarse en el estudio y análisis de este registro material (por fragmentario que sea), es el producto de las actividades y relaciones humanas, ya sean individuales o grupales. No obstante estas actividades y relaciones no muestran un carácter estático, sino que son dinámicas y cambian con el paso del tiempo.

El arqueólogo debe intentar descubrir patrones a través de sus análisis siguiendo el método científico (Fig. 1), para intentar garantizar el máximo de objetividad posible en sus hipótesis, así como la replicabilidad de sus experimentaciones. En este contexto la modelización virtual o computacional se revela como una herramienta de primer orden para el arqueólogo, ya que los modelos son una proyección de la realidad que permite ser modificada, observada y medida sin afectar al proceso real que representa, dando información sobre la causa y el efecto de dicha realidad (Pardo 2015: 87). Un modelo es por tanto, una representación simplificada de la realidad que permite estudiar la forma en que funciona un sistema o una parte del mismo.

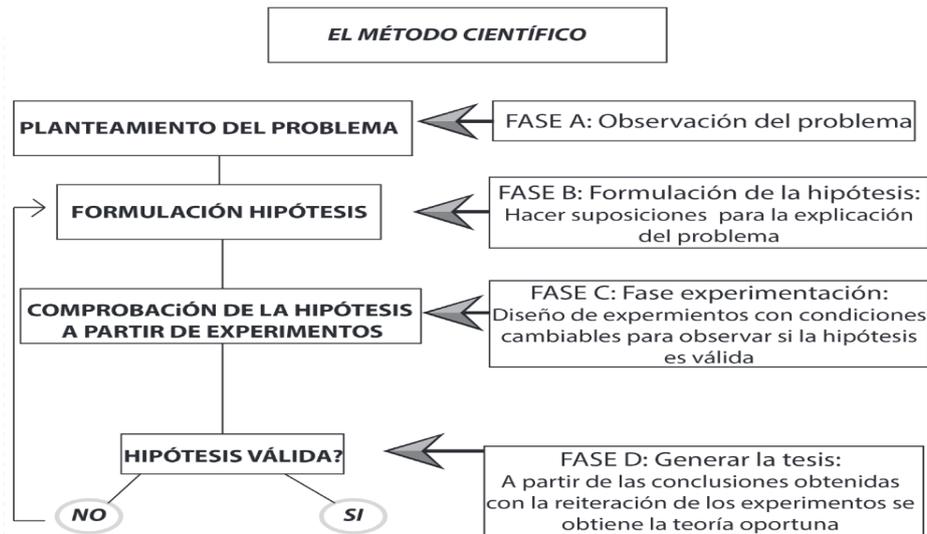


Figura 1: El método científico: proceso de investigación científica (Pardo 2015: 87)

Existen varios tipos de modelos (Pardo 2015: 89):

- **Narrativos:** son, básicamente, un discurso ordenado de una serie de eventos significativos para el investigador.
- **Matemáticos:** se caracterizan por la utilización de la formulación matemática para su elaboración. Son experimentos destinados a comprender las relaciones causales que subyacen bajo fenómenos naturales o culturales.
- **Computacionales:** Son modelos representados por ordenador y el software empleado en su elaboración pretende representar algún aspecto específico del mundo. Los hay de tres tipos:
 - **Modelos basados en agentes:** sirven para crear una serie de instancias individuales que interactúan con el medio y entre sí, para llevar a cabo experimentos virtuales.
 - **Modelos dinámicos:** se desarrollan dentro de la Teoría de Sistemas formulada para explicar y predecir el comportamiento evolutivo que muestra dicho sistema a nivel macroscópico.
 - **Modelos de redes:** son el objeto de interés de este trabajo. Estos modelos han sido desarrollados en el ámbito de las matemáticas y la física,

aunque en la actualidad se enmarcan dentro de la ciencia de las redes complejas. Se centran en la premisa de que muchos sistemas pueden ser descritos mediante las redes complejas. Resultan útiles para investigar las relaciones entre los componentes de un sistema mediante el estudio de la red. Son especialmente útiles para la comprensión de entidades culturales amplias.

¿De qué forma es posible representar todo esto en forma de modelo? Una forma en la que las relaciones (o interacciones dinámicas) entre individuos y grupos humanos pueden ser representados es a través de redes, en las que los nodos son agentes sociales y las conexiones entre ellos son interacciones entre agentes.

Dentro de estos modelos de redes se encuentran el análisis de redes y más concretamente el Análisis de Redes Sociales o *Social Network Analysis* (en adelante SNA). El objetivo principal del análisis de redes es detectar e interpretar patrones de relaciones entre sujetos de interés. Este conjunto de técnicas analíticas tiene sus raíces en una rama de las matemáticas denominada teoría de grafos y en los sistemas complejos. La ciencia de los sistemas complejos aparece en muchos foros como el contexto natural para abordar los problemas de las sociedades humanas. Las estructuras de estas sociedades humanas tienen como componentes elementales a los individuos, que están conectados unos a otros a través de enlaces sociales, que en su conjunto constituyen una red social. En estas entidades el comportamiento global no es reducible a la suma de las partes. Se puede afirmar que las redes sociales son fenómenos emergentes¹, que se ven influenciados, y al mismo tiempo están producidos, por el comportamiento de los individuos que las constituyen. Además de canalizar información, gente, genes y recursos, pueden utilizarse para definir el alcance de un sistema social. La importancia de las redes sociales para todas las sociedades humanas las convierte en un tema fundamental y recurrente en Antropología, Sociología y Arqueología.

¹ La cuestión de la “emergencia” no es nueva y ya fue descrita por Platón en el Libro de la Ciencia, en el que plantea la cuestión de la diferencia entre el todo como suma de las partes y el todo como una entidad única que emerge de las partes y es diferente a la agregación de las mismas (San Miguel *et al.* 2005: 129).

Las redes sociales están relacionadas directamente con la cultura material debido a que el aprendizaje se sitúa fundamentalmente en contextos sociales. Las personas que tienen un alto grado de parentesco o de proximidad física, suelen ser los responsables de la transmisión generacional de las tradiciones artesanas. La alta densidad de vínculos en el seno de los grupos locales permite la transmisión rápida de información, relacionada con innovaciones tecnológicas o mejoras. Estas interacciones entre individuos están arbitradas por los vínculos sociales. Además, la transmisión de cualquier tipo de información está sujeta a error humano, lo que es una fuente de variabilidad en la cultura material. De este modo, se puede considerar que los artefactos arqueológicos son los residuos materiales de sistemas de redes espaciales, de aprendizaje social e intercambio de información (White 2013: 1).

Los cambios en los patrones de variabilidad de la cultura material que son observables desde la arqueología, suelen estar atribuidos a cambios estructurales, al nivel de las redes sociales. Las relaciones entre la estructura de la red y los patrones de variabilidad de la cultura material, no siempre se pueden determinar. Esto es así porque es imposible observar directamente la emergencia de los patrones espacio-temporales a gran escala, a partir de las reglas de transmisión cultural y de la formación de redes sociales, que guían el comportamiento de los individuos o grupos. Tanto los estudios etnográficos realizados, como los estudios de modelos abstractos de sistemas de redes con componentes espaciales, sugieren que estas relaciones probablemente no sean simples, ni intuitivas, ni obvias. Las aproximaciones actuales al estudio de la transmisión cultural, así como de sus derivados materiales, suele desembocar en un *continuum* de escalas espacio-temporales de análisis, micro o macro. La transmisión cultural entre poblaciones vivas se estudia en escalas espacio-temporales pequeñas, utilizando métodos etnográficos. Mientras que los análisis arqueológicos están dominados por la utilización de modelos basados en ecuaciones, que interpretan los cambios a largo plazo en la variabilidad de los artefactos (White 2013: 2).

El hueco entre ambas clases de escala de análisis es grande ya que los resultados macro (visibles en el registro arqueológico) de la transmisión cultural de comportamientos a escala micro, quedan afectados por las interacciones típicas de los sistemas humanos. Múltiples estudios han mostrado que las diferencias en la estructura de red afectan tanto a los modelos, como a los sistemas del mundo real (Watts & Strogatz 1998). Pequeñas alteraciones en la estructura de la red pueden tener un efecto grande en el modo en que se transmite la información por la red. Suele ser la estructura de la conectividad la que determina el comportamiento. Esto sugiere que la estructura de interacción puede tener efectos importantes en los patrones de variabilidad de los artefactos producidos por los procesos de transmisión cultural, mostrados por las redes (White 2013: 2).

Un elemento de gran relevancia para entender la evolución de las sociedades es la red de interacciones sociales que da soporte y determina las interacciones entre individuos que participan de un fenómeno colectivo (San Miguel *et al.* 2005: 130). La ciencia de las redes complejas desarrollada por científicos procedentes del campo de la física, tiene por objeto el estudio de las estructuras sociales. Estas redes presentan una serie de propiedades topológicas y éstas a su vez condicionan los fenómenos colectivos emergentes. De este modo, analizar la estructura de las redes puede resultar una herramienta valiosa, a la hora de estudiar las sociedades del pasado. Convertir nuestros datos arqueológicos en datos relacionales, nos permite utilizar una serie de métricas, sobre las que se pueden utilizar una gran batería de herramientas matemáticas.

Así pues el problema sociológico radica en comprender cómo los patrones globales emergen de las motivaciones individuales de las personas. Estos aspectos han sido estudiados ampliamente desde otras disciplinas, como la sociología o la antropología, en el marco de la teoría evolutiva, aplicada a la evolución cultural, el cambio cultural y a la transmisión cultural, todos ellos aspectos de gran relevancia para la arqueología y que se abordarán en los siguientes puntos.

2.1 TEORÍA EVOLUTIVA CULTURAL

Dentro del mundo científico actual, la teoría de la evolución sigue constituyendo la postura epistemológica que reúne más valores científicos. Este paradigma evolutivo permite poner en relación multitud de áreas de conocimiento, enlazando enfoques y métodos de áreas de estudio como la Antropología, Arqueología, Biología, Genética, Lingüística, Medicina, Psicología, Sociología, entre otras. En esencia, el darwinismo plantea que el soporte génico de la vida (genotipo) y todas sus expresiones posibles (fenotipo) son elementos mutables, que cambian a lo largo del tiempo y del espacio. Toda expresión de la vida, sea somática (cuerpos fisiológicos) o extrasomática (pautas de comportamiento, cultura material, etc.), es una modificación de algo preexistente. Los factores fundamentales para que cualquier sistema pueda analizarse pues desde un punto de vista darwinista son: 1) herencia, es decir, que los rasgos que se replican, hereden información codificada genética y/o culturalmente; 2) variación, es decir, que durante esos procesos de reproducción o replicación de rasgos (somáticos o de conducta) se produzca modificación; y 3) competencia entre rasgos, o lo que es lo mismo, que entre las posibles variantes (poblaciones, individuos, estados somáticos o culturales) se produzca (provocada por una presión selectiva) una reproducción diferencial. Si bien este esquema del cambio se había pensado en estos mismos términos desde hace mucho tiempo, los arqueólogos e historiadores, normalmente, le han prestado poca atención, creyendo erróneamente que el comportamiento y la cultura material humanos, no tienen apenas que ver con el conocimiento de otras áreas científicas (García 2013: 69–70).

En el caso de la cultura, hemos de entender como genotipo toda la información que se almacena y transmite culturalmente, como por ejemplo las instrucciones alfareras que se codifican en las mentes de los artesanos; éstas se expresan fenotípicamente en los recipientes cerámicos, sobre los cuales opera la selección. Por tanto, los comportamientos y la cultura material son fenotipos expresados a

partir de las mentes. La traslación del modelo de la transmisión genética al estudio de la transmisión cultural no implica pensar que necesariamente las transmisiones de información genética y cultural hayan de producirse de forma independiente, ya que ambas forman parte de un mismo sistema: un organismo y, a un nivel superior, una población. Así pues, el “genotipo cultural” englobaría información cultural y genética. Además, la importación de dicho modelo al estudio de la cultura, tampoco implica que la estructura y transmisión de la información cultural haya de producirse igual al caso genético (García 2013: 71–73).

El estudio de la evolución de los rasgos culturales es antiguo. Estudiando los patrones de la colección de Copenhague, C.J. Thomsen estableció un sistema de tres edades, que más tarde fue corroborado por la estratigrafía gracias a J.J. Worsaae. Bajo la denominación de arqueología evolutiva existen cuatro grandes líneas evolutivas (Fig. 2): la seleccionista, la psicológica, la ecológica y la genética, a las que se sumó recientemente la teoría de la triple herencia (Odling-Smee *et al.* 2003). Todas estas escuelas hacen uso de la misma teoría, aplicando un enfoque diferente, por lo que más que mutuamente excluyentes podrían considerarse complementarias.

| | Arqueología Psicológica | Ecología Comportamiento Humano | Teoría de la doble herencia | Seleccionismo | Teoría del nicho cultural |
|--|---|---------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Que explica | <i>Mecanismos psicológicos</i> | <i>Estrategias comportamiento</i> | <i>Evolución cultural</i> | <i>Variabilidad del registro</i> | <i>Construcción del nicho ecológico</i> |
| Principales limitaciones | <i>Cognición y genética</i> | <i>Ecología y material</i> | <i>Estructural y material</i> | <i>Selección natural</i> | <i>Ecología y cultural</i> |
| Escala temporal del cambio | <i>A largo plazo (Genética)</i> | <i>A corto plazo (Fenotipo)</i> | <i>A plazo medio (Cultural)</i> | <i>A plazo medio (Cultural)</i> | <i>A plazo medio (Cultural)</i> |
| Adaptación | <i>Baja</i> | <i>Alta</i> | <i>Intermedia</i> | <i>Intermedia</i> | <i>Intermedia</i> |
| Generación de la hipótesis | <i>Inferencia informal</i> | <i>Modelos óptimos</i> | <i>Modelos a escala poblacional</i> | <i>Modelos a escala poblacional</i> | <i>Modelos a escala poblacional</i> |
| Métodos de testeo de la hipótesis | <i>Experimentos en laboratorio</i> | <i>Observación etnográfica</i> | <i>Modelización computacional</i> | <i>Seriación, Cladística y Filogénesis</i> | <i>Modelización y Filogénesis</i> |
| Tópicos | <i>Apareamiento y diferencias de sexo</i> | <i>Estrategias de reproducción</i> | <i>Cooperación y maladaptación</i> | <i>Explicación de linajes y éxito replicativo</i> | <i>Cooperación</i> |

Figura 2 .Características de las principales escuelas evolutivas (Pardo 2015: 83).

Se puede definir la transmisión cultural (Fig. 3) como un conjunto de procesos microevolutivos que conllevan la variación de los rasgos en el tiempo (Mesoudi 2011: 55). Constituyen una serie de procesos a escala individual por el que determinados mecanismos influyen en el flujo de información no genética. Dicha transmisión cultural no es exclusiva de los seres humanos y también puede observarse en el reino animal. Además esta transmisión ha quedado definida desde los trabajos de Cavalli-Sforza y Feldman (Cavalli-Sforza & Feldman 1981), en una serie de rutas: vertical, horizontal y oblicua.

| | Transmisión vertical [Padres a hijos] | Transmisión horizontal [Contagiosa] | Transmisión de uno a muchos | Transmisión concertada [Muchos a uno] |
|---|--|--|------------------------------------|--|
| Transmisor | <i>Padres</i> | <i>Individuo</i> | <i>Profesor, líder etc...</i> | <i>Los mayores de un grupo</i> |
| Beneficiario mecanismo | <i>Hijos</i> | <i>Individuo (no)relacionado</i> | <i>Alumnos, ciudadanos etc...</i> | <i>Los más jóvenes del grupo</i> |
| Aceptación innovación | <i>Intermedia ó difícil</i> | <i>Fácil</i> | <i>Fácil</i> | <i>Muy complicada</i> |
| Variación individual respecto a la población | <i>Alta</i> | <i>Puede ser alta</i> | <i>Baja</i> | <i>Muy baja</i> |
| Variación entre grupos | <i>Alta</i> | <i>Puede ser alta</i> | <i>Puede ser alta</i> | <i>Muy pequeña</i> |
| Evolución cultural | <i>Lenta</i> | <i>Puede ser rápida</i> | <i>Muy rápida</i> | <i>Muy conservadora</i> |

Figura 3. Principales rutas de trasmisión cultural y sus implicaciones (Pardo 2015: 75).

Las expresiones culturales incluyen un gran abanico de rasgos: ideas, creencias, valores, patrones de conducta, lenguajes, objetos y utensilios materiales de diversa índole, etc. Estos rasgos culturales no permanecen constantes a lo largo del tiempo, y tampoco a lo largo del espacio entre diversos grupos y sociedades. La diversidad que muestra el registro antropológico y arqueológico es el producto de la evolución de los rasgos culturales a lo largo del tiempo y espacio, los cuales cambian en ambas dimensiones mediante diversos mecanismos como la variación, la herencia, procesos de sesgos como la selección natural, la difusión, la transferencia horizontal, etc. Si en nuestros análisis pensamos en términos de poblaciones y creamos unidades culturales plausibles de ser medidas, bien ajustadas a nuestras hipótesis y herramientas metodológicas, podremos ver cómo esas variantes culturales se distribuyen en las poblaciones a lo largo del tiempo. Las distintas

frecuencias relativas nos permitirán lanzar y contrastar hipótesis que permitirán explicar los motivos de la proliferación y declive de los objetos arqueológicos. En definitiva nos permitirán explicar el cambio cultural (García 2013: 69–92). En esa línea, el modelado de redes y concretamente el SNA, puede constituir una herramienta de primer orden para el arqueólogo, a la hora de analizar e interpretar, bajo una nueva luz, los datos del registro arqueológico, como veremos en apartados posteriores.

2.2 SISTEMAS COMPLEJOS

Según Mitchell, un sistema complejo “es un sistema en el que extensas redes de componentes sin un control central y con simples reglas de operación, da lugar a un comportamiento colectivo complejo, un procesado complejo de la información y una adaptación por medio del aprendizaje o la evolución” (Mitchell 2009: 13). Muchos arqueólogos asocian inmediatamente el término complejidad con la literatura evolucionista-cultural de mediados del s. XX. Sin embargo, el alcance de la teoría de la complejidad es mucho más amplio y abarca incluso a las sociedades humanas más simples (Kohler 2011: 2).

Hoy en día la única posición teórica disponible para los arqueólogos que tiene el potencial de integrar la historia cultural, el procesualismo y el post-procesualismo es el estudio de la complejidad y los sistemas complejos. La teoría de la complejidad es el estudio de cómo emergen una serie de propiedades de las interacciones de muchos agentes que se relacionan, muchas veces, de forma simple. Pero las propiedades que emergen de esas interacciones simples son complejas, no lineales y no predecibles, a partir del estudio de los mismos agentes individuales (Bentley *et al.* 2009: 245).

Un tema recurrente para el post-procesualismo, en la década de 1980, era el hecho de que hay demasiadas explicaciones posibles para el registro arqueológico, como para considerar cualquiera de ellas como buena y las otras como incorrectas. Los investigadores que propusieron el uso de la teoría de sistemas en arqueología,

señalaron que las causas explicativas de los eventos prehistóricos siempre son múltiples (no existe una relación matemática simple). Debido a la insuficiente potencia computacional para considerar las diferentes posibilidades a la hora de solucionar un problema multivariante, la teoría de sistemas se fundamentaba en la creencia de que el equilibrio es el estado natural de reposo de los sistemas sociales y económicos. Se suponía que si un sistema humano no estaba en equilibrio, debía tender a él. Un sistema en equilibrio es un sistema cerrado, mientras que un sistema desequilibrado requiere apertura. La crítica planteó la incongruencia de que ocurrieran cambios a partir de estados de equilibrio, ya que éste es por definición un estado estable. Los sistemas sociales, a distintas escalas, siempre se comportan de forma abierta: la gente va y viene, los cultivos crecen y son cosechados, nuevos artefactos son creados continuamente y luego son descartados, etc (Bentley *et al.* 2009: 246).

Se dice que los sistemas complejos abiertos, que no están en equilibrio, exhiben una serie de **propiedades emergentes**. Éstas no son otra cosa que patrones generales, más amplios que la suma de las partes, y que permiten que el sistema pueda actuar con coherencia sin el dominio de una instancia central. Así pues, el objeto de estudio de la teoría de la complejidad es el estudio de las propiedades emergentes de los sistemas con componentes que interactúan. La organización emergente de un sistema puede referirse a un aspecto superficial, como por ejemplo la “ola mejicana” realizada en los estadios de fútbol, que se ve desde fuera, pero que los propios individuos que la componen, no pueden observar, o puede referirse a un aspecto tan profundo como la habilidad de un grupo de individuos para generar una inteligencia colectiva mayor que cualquiera de sus componentes (Bentley & Maschner 2003: 247).

Los componentes en los CAS se organizan en grupos anidados que pueden representarse como redes estructuradas. Desde una perspectiva social, ejemplos de esta organización anidada pueden ser: las familias dentro de las bandas de

caza-recolectores, y estas bandas dentro de macro-bandas; o individuos dentro de gremios de artesanos, que están dentro de pueblos, que están dentro de estados. Esta estructura tiene varias consecuencias importantes. Las interacciones entre componentes, en el seno de los grupos anidados, tienden a ser más frecuentes y fuertes que las interacciones entre grupos. Como resultado los grupos que componen estos grupos anidados pueden continuar funcionando, incluso cuando sus enlaces a otros grupos se han roto. Otra consecuencia, es que los CAS tienden a crecer de forma “orgánica”, a medida que los componentes básicos se unen a grupos, de alguna manera se crea una *estructura organizativa*. Este proceso ayuda a explicar porqué las sociedades antiguas parecían evolucionar hacia niveles de complejidad creciente. Además debido a que los componentes de los CAS interactúan con otros componentes de muchas formas, la escala y dirección del cambio, al nivel del sistema, no tiene porque ser proporcional a la escala del fenómeno que lo desencadena. Es más bien el carácter de las interacciones, como se avanzó previamente, lo que determina el comportamiento del sistema. Esta causalidad no-lineal puede hacer que sea muy complicado predecir el funcionamiento del sistema, a partir de las propiedades de los componentes. Así pues, los sistemas complejos exhiben comportamientos a nivel de sistema que son muy diferentes de cualquier cosa que muestren los componentes. Esto es el fenómeno llamado *emergencia*. Una de estas propiedades emergentes de los CAS es su capacidad para la *computación*. Es decir: para recibir y transmitir información. Entre los componentes se transmite y recibe información. Éstos pueden obtener datos acerca de la situación en las cercanías, alterar su conducta y transmitir información acerca de su estado. Esto significa que tienen *agencia*.

Esta habilidad permite a los CAS adaptarse, cambiar y mantener la integridad del sistema, en entornos inestables. Finalmente, la estructura organizativa, las interacciones, computación y emergencia que caracterizan los CAS no son impuestas por fuerzas externas, sino que se desarrollan como consecuencia de reglas internas. Esta tendencia se denomina *auto gestión*. Así pues se puede concluir que los CAS

y sus propiedades particulares son las consecuencias emergentes de la *agencia* individual (Barton 2014: 307–309).

Uno de los elementos que puede describir los cambios en cascada que se producen en un CAS (en respuesta a las perturbaciones, las relaciones entre la escala y la complejidad y las conexiones entre los componentes que interactúan, todos ellos fenómenos relevantes para la evolución de los sistemas sociales humanos) es la **ley de potencia**. (Bernabeu *et al.* 2012: 24). En ocasiones, una propiedad emergente, en concreto, es cuantitativa y corresponde a una distribución matemática de cantidades que siguen una ley de potencia. Una de las cualidades de la ley de potencia es que su representación gráfica (Fig. 4) sigue teniendo el mismo aspecto sin importar la escala a la que se represente. Por este motivo a las distribuciones según la ley de potencia se las denomina *Scale-free networks* o “redes libres de escala”, ya que aunque se aumente o disminuya el zoom con el que se la contempla, la relación entre las escalas sigue siendo la misma. La distribución según la ley de potencia difiere de otras distribuciones que se atribuyen habitualmente a fenómenos naturales, como la distribución normal (que implica la existencia de un valor medio) o la de Poisson (que tiene un límite exterior y se aplica si los resultados previos no tienen efecto en el futuro). Una ley de potencia auténtica no tiene un valor medio característico, ni es limitada, lo que implica que son posibles fenómenos de cualquier tamaño.

La ley de potencia tiene lugar en fenómenos tan diversos como las fluctuaciones

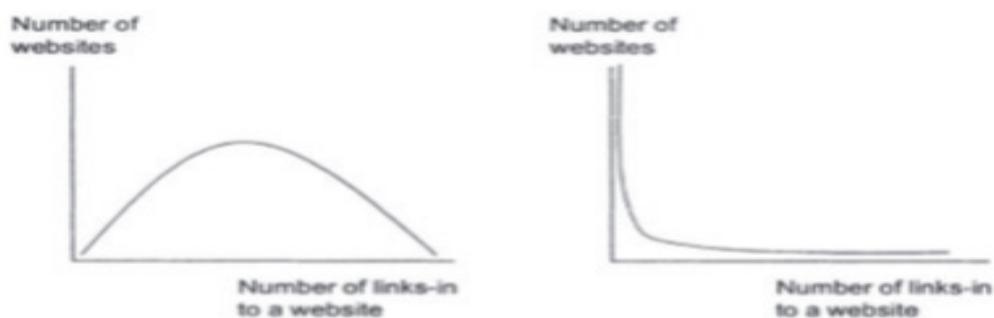


Figura 4. Ejemplo de las diferencias entre distribuciones normales – ley de potencia. Izquierda: distribución normal. Derecha: distribución ley de potencia.(Benkler 2006)

de mercado de valores, el crecimiento de las compañías modernas, el World Wide Web, las redes de actores de Hollywood, o el tamaño de las guerras en la historia. Todas tienen en común una cosa: son procesos multiplicativos. Uno de los procesos multiplicativos más habituales en las sociedades humanas es el de que el rico se hace más rico, también llamado efecto Mateo. Según este principio, el que tiene mucho de algo, tiene más posibilidades de tener más, y viceversa. El tamaño de las ciudades modernas también sigue una distribución por ley de potencia, ya que cuanto más grande es una ciudad, más gente atrae. Además, se ha observado como, mientras los grupos igualitarios muestran distribuciones exponenciales, los grupos competitivos tienden a la ley de potencia, lo cual puede resultar útil a la hora de caracterizar diferentes tipos de grupos (Bentley *et al.* 2009: 247–250).

Muchos ven la ubicuidad de estas distribuciones como algo profundo, mientras que otros lo califican de mera casualidad matemática. Sea como fuere, para muchos propósitos esto no importa realmente, lo único que importa es la dificultad de identificar el proceso o procesos que dan lugar a a estas distribuciones (Kohler 2011: 10).

Las distribuciones según la ley de potencia, suelen ser propias de la adquisición competitiva de propiedades en las sociedades humanas, como riqueza, o cantidad de gente bajo el liderazgo de un líder. Una distribución según la ley de potencia puede ser el resultado de un proceso de crecimiento en el que los agentes que tienen más probabilidades de adquirir más de algo, son aquellos que ya lo poseen. Para los arqueólogos, el reconocimiento de este proceso potencial cuantificable puede proporcionar revelaciones en el estudio de las transiciones a nuevas formas de sociedad, especialmente aquellas que se producen a través del contacto con otros grupos (Bentley & Maschner 2003: 252).

2.3 REDES COMPLEJAS

La teoría de la complejidad ha provocado una explosión de interés acerca de las redes, que cubre cualquier cosa que pueda ser representada de forma abstracta

por puntos y líneas. Los teóricos de redes han intentado modelar un gran abanico de fenómenos, desde reacciones atómicas, interacción de genes, ecosistemas, relaciones humanas e incluso lenguaje.

A lo largo de la historia, el ser humano ha intentado comprender el misterio de la existencia y el por qué de las cosas. La forma de intentar acercarse a este enigma ha ido variando con el transcurrir de los siglos. Primero el pensamiento mágico dio paso al mítico, que a su vez desembocó en el pensamiento lógico y analítico. La visión analítica aspira a alcanzar la comprensión de un sistema por medio de la descomposición de éste en sus partes mínimas. Este método, denominado reduccionista, propone la idea de entender un sistema a través de una disección meticulosa de sus partes como entidades aislables. Este reduccionismo dominó la visión científica durante la mayor parte de la historia de la ciencia y alcanzó su culmen en el s. XX, con la aparición de la biología molecular y la física de partículas. El papel que ha desempeñado en el desarrollo de ciencias como la física es innegable, así como el grado de precisión que ésta ha alcanzado en la descripción matemática de la realidad, tanto a nivel atómico como subatómico. Además los nuevos desarrollos en el campo de la Teoría de Cuerdas, ofrecen la posibilidad de alcanzar el sueño de obtener una Teoría Unificada de todas las interacciones fundamentales. No obstante este enfoque reduccionista falla por completo a la hora de enfrentar la complejidad. Al intentar entender fenómenos a escalas superiores, desde las escalas inferiores, se topa con una realidad en la que las interacciones entre elementos crean nuevos fenómenos. Lo que define esta complejidad es la presencia de una serie de características. De un lado la presencia de propiedades emergentes, que no pueden explicarse estudiando las propiedades de los componentes. Por otra parte, la existencia de cierta permanencia del todo pese a los cambios y fluctuaciones en sus partes. Así pues, se puede afirmar que lo que define estos sistemas complejos no es la ausencia o presencia de ciertos elementos, sino algo que las trasciende, en un nivel superior a ellas mismas. Este orden superior irreductible es la esencia de lo complejo y su origen se encuentra en la presencia de

interacciones entre elementos, que de algún modo intercambian información. Este flujo de información es generado por los elementos constituyentes y altera el estado del nivel superior. Así se puede concluir que, en estos sistemas, el todo es más que la suma de las partes. La forma de representar estos sistemas es a través de una red que relaciona en el espacio los componentes dispersos. Esta red nos enseña quién está en contacto con quién, proporcionando sentido al sistema, debido a que los sistemas complejos tienen más que ver con la naturaleza de las interacciones que con la naturaleza de los objetos que interaccionan. De este modo se puede afirmar que para comprender la complejidad es necesario abandonar el enfoque analítico y trazar un mapa de conexiones entre elementos (Solé 2008: 18–21).

En ciencias sociales existe un debate continuo sobre la primacía de las estructuras o la agencia a la hora de explicar el comportamiento humano. La agencia es la capacidad de los individuos para actuar con libertad e independencia, mientras que las estructuras son las pautas estables y recurrentes que influyen o limitan las elecciones disponibles. Es decir, si los individuos se comportan como agentes libres o como peones de la estructura social: socialización *vs* autonomía. La respuesta a cual de estas dos formas de entender la historia es más adecuada podría extraerse del análisis de la estructura de la complejidad social. Las relaciones cotidianas limitan la percepción que tenemos acerca del tejido de la sociedad. Éstas conforman el segmento de la sociedad con el que estamos relacionados y definen nuestro entorno social. Estas relaciones se pueden representar como conexiones dentro de una **red**, en la que los **nodos**, de esa red son individuos y las **conexiones** entre dos nodos, indican que existe entre ellos un vínculo social. Aquellos elementos con los que no tenemos conexión alguna son extraños. La pregunta que surge es ¿Cómo de lejos están unos nodos de otros en la red? Los primeros indicios que condujeron al descubrimiento de la existencia de **redes de mundo pequeño** fueron realizados por S. Milgram, en los años 60 (Milgram 1967: 60–67). En el experimento que este autor llevó a término, se pedía a una serie de personas que entregaran una carta a alguien de su entorno que pudiera “acercar” dicha misiva a su objetivo.

Este sería el primer salto en la red. El nuevo receptor debería pasarla a otra persona y así sucesivamente. Se demostró que como máximo son necesarios seis saltos para conectarnos con cualquier persona del planeta, y concluía que nadie estaba muy lejos de nadie en un “mundo pequeño”, en el que la información se transmite con enorme velocidad (Watts 2003: 131–136). Otra de las conclusiones que se derivaron de este estudio, es que las redes del mundo real ni están completamente ordenadas ni son aleatorias del todo, sino que muestran propiedades de ambas.

Las **redes o grafos**, han sido un campo de investigación durante siglos. Un grafo es una representación abstracta de un sistema cualquiera, en el que los elementos del sistema o “nodos” se relacionan entre sí a través de una conexiones que indican la presencia de una interacción. Existen diferentes tipos de grafos. Uno de ellos es el **grafo aleatorio**, en el que las conexiones entre elementos se han realizado de forma aleatoria. El estudio de Erdős y Renyi (Erdős & Renyi 1959: 290–97) muestra una serie de características de los grafos, tales como la **homogeneidad**, que viene a indicar que todos sus elementos tienden a estar conectados con un número muy similar de conexiones. En su investigación descubrieron que en este tipo de grafos existe un número crítico de conexiones por debajo del cual el sistema se halla fragmentado en pequeños subgrafos, mientras que superado cierto umbral, estos subsistemas tienden a estar ligados entre sí formando una gran red. Este índice, llamado “**umbral de percolación**”, marca la transición entre un mundo aislado, formado por pequeñas comunidades, y un mundo conectado formado por una gran sociedad de elementos bien conectados entre sí. Para que se de un grafo bien conectado es suficiente con que cada elemento tenga algo más de una conexión con otro.

El experimento que realizó Milgram citado anteriormente, demuestra la realidad del fenómeno del mundo pequeño, pero no lo explica. En el mundo real nos relacionamos con personas de forma no aleatoria. Por ello se debió recurrir a un nuevo modelo. Con este fin, los matemáticos estudiaron dos tipos de redes.

Por un lado, las **redes regulares**, que tienen que ver con el orden debido a algún tipo de restricción geométrica natural, que exige recorrer la geografía de la red para llegar de un punto a otro. O lo que es lo mismo, la distancia que se debe recorrer, es comparable al tamaño total de la red. Por otro lado las **redes aleatorias** (Fig. 5), muestran una gran cantidad de triángulos (los amigos de mis amigos son mis amigos o transitividad). Watts y Strogatz (Watts & Strogatz 1998: 440–42) descubrieron un criterio para saber si una red es un mundo pequeño: se requería que la distancia entre dos elementos fuera similar a la que esperaríamos en una red aleatoria como la de Erdős y Renyi, unido al hecho de que la frecuencia de triángulos fuera mucho mayor que la que esperaríamos de la misma red aleatoria. Además se hizo evidente que la existencia del mundo pequeño tiene consecuencias positivas y negativas, ya que los cambios en un elemento del sistema pueden afectar a cualquier otro elemento, y por lo tanto las acciones de un elemento pueden afectar a todo el sistema. No obstante, este modelo de Watts y Strogatz no deja de ser una simplificación del mundo real. La arquitectura de las redes reales es la de una **red heterogénea**: la mayoría de los elementos están apenas conectados mientras que unos pocos elementos muestran una gran cantidad de conexiones.

A finales del s. XX surgió una red de conexiones a través del ordenador: Internet. Supone una innovación tecnológica revolucionaria que ha reducido las distancias a nivel global, por lo que a información se refiere. Sin embargo, esta

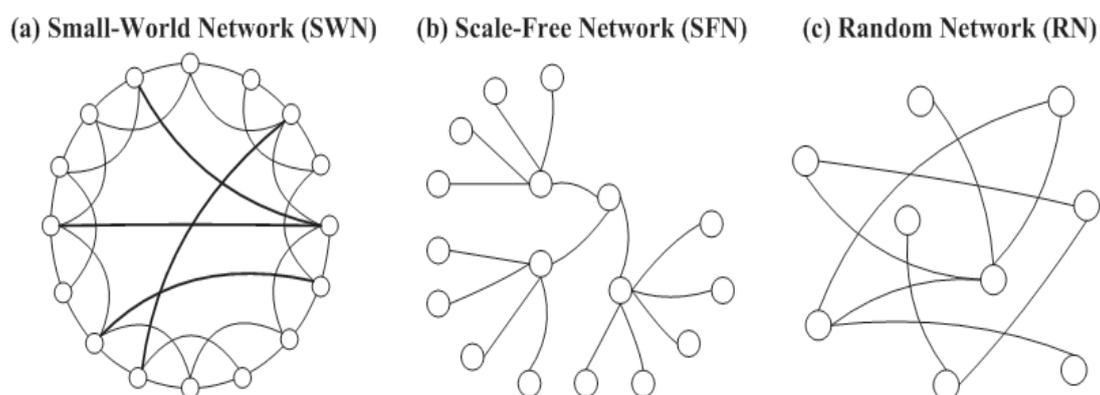


Figura 5. Diferentes topologías de red. Redes regulares, de Mundo pequeño y Aleatorias (Brughmans 2013: 22).

revolución digital tiene precedentes en el s. XIX, con la invención del telégrafo, que cambió las comunicaciones y las relaciones económicas. O ya en el s. XX el teléfono, que desbancó al primero como medio de comunicación principal. Estos avances tecnológicos no estaban carentes de desafíos técnicos, y junto con ellos aparecieron una serie de problemas, como es la congestión y la seguridad en los mensajes. Internet surgió como parte de un proyecto del gobierno de Estados Unidos (ARPANET) en 1972, que servía para estudiar el flujo de paquetes de información entre ordenadores y permitía desarrollar formas de enviar estos paquetes con seguridad y eficiencia, por medio de una serie de protocolos de comunicación. Algo más tarde en el CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas), se creó el lenguaje que permitió desarrollar los servidores y dar paso al World Wide Web, o red virtual de información, y que fue distribuido de forma gratuita. La red resultante no está dirigida por una autoridad central sino que está distribuida. Además la estructura de esta red permite realizar búsquedas con una eficiencia enorme, fruto de su estructura. Sobre esta estructura se pueden realizar rastreos automáticos que permiten generar un mapa sistemático de la red. Estos mapas son complejos y muestran dos características: la mayoría de los nodos poseen sólo una conexión, y unos pocos están conectados a muchos nodos. Las redes que presentan este tipo de morfología se llaman **redes libres de escala** (Fig. 6 y 7), y la ley matemática que las describe se llama **ley de potencia**, descrita anteriormente. En estas redes los nodos con un gran número de conexiones, son los responsables de

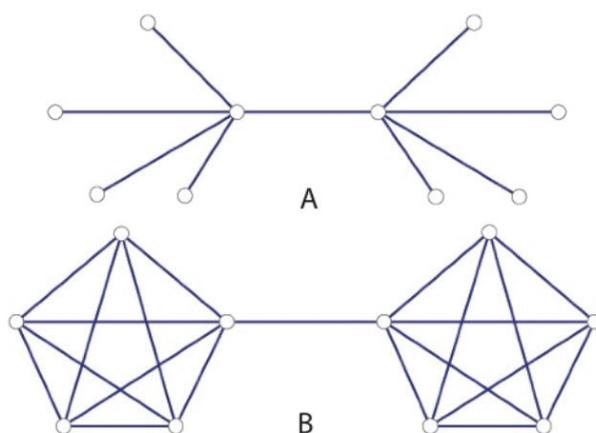


Figura 6. Esquema de redes libres de escala (A) y redes de mundo pequeño (B) (Brughmans 2010: 36).

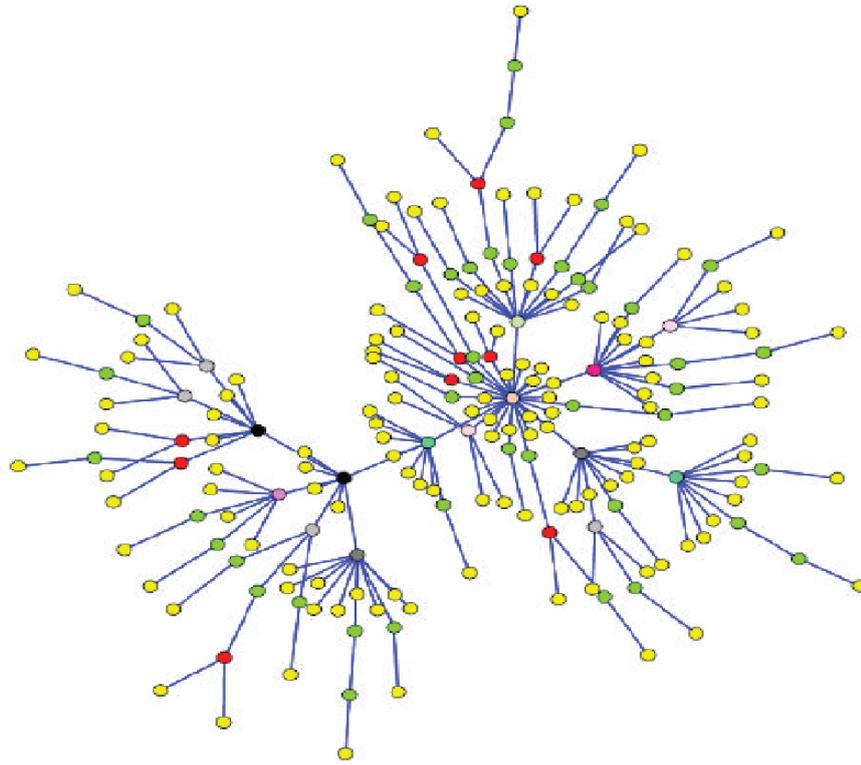


Figura 7. Aspecto de red libre de escala. (San Miguel *et al.* 2005: 132)

su gran eficiencia y también los responsables de la estructura de mundo pequeño. En una red libre de escala, todos los caminos no llevan a Roma, pero algunos atajos nos acercan a nuestro destino, con gran celeridad (Solé 2008: 53–59).

En 2000 Barabási y Albert propusieron un mecanismo de crecimiento de la red basado en la dinámica “el rico se hace más rico”: si un elemento tiene mayor número de conexiones que otro, será más popular y atraerá más atención. Este mecanismo que afecta a Internet, produce redes libres de escala, es decir que a medida que el tiempo pasa, la red crece y los elementos más conectados se convierten en los **conectores principales** (Fig. 8) del sistema o **hubs**, debido a que ganan nuevas conexiones con rapidez. Este mecanismo amplificador crea redes complejas a partir de reglas muy simples. No obstante, estas redes altamente eficientes, también tienen inconvenientes. P. Baran en la década de 1950, bajo el espíritu de la Guerra Fría, estudió detenidamente el problema de la seguridad en las redes de comunicación, con la intención de evaluar hasta qué punto la destrucción de parte de la red, podría comprometer la seguridad nacional.

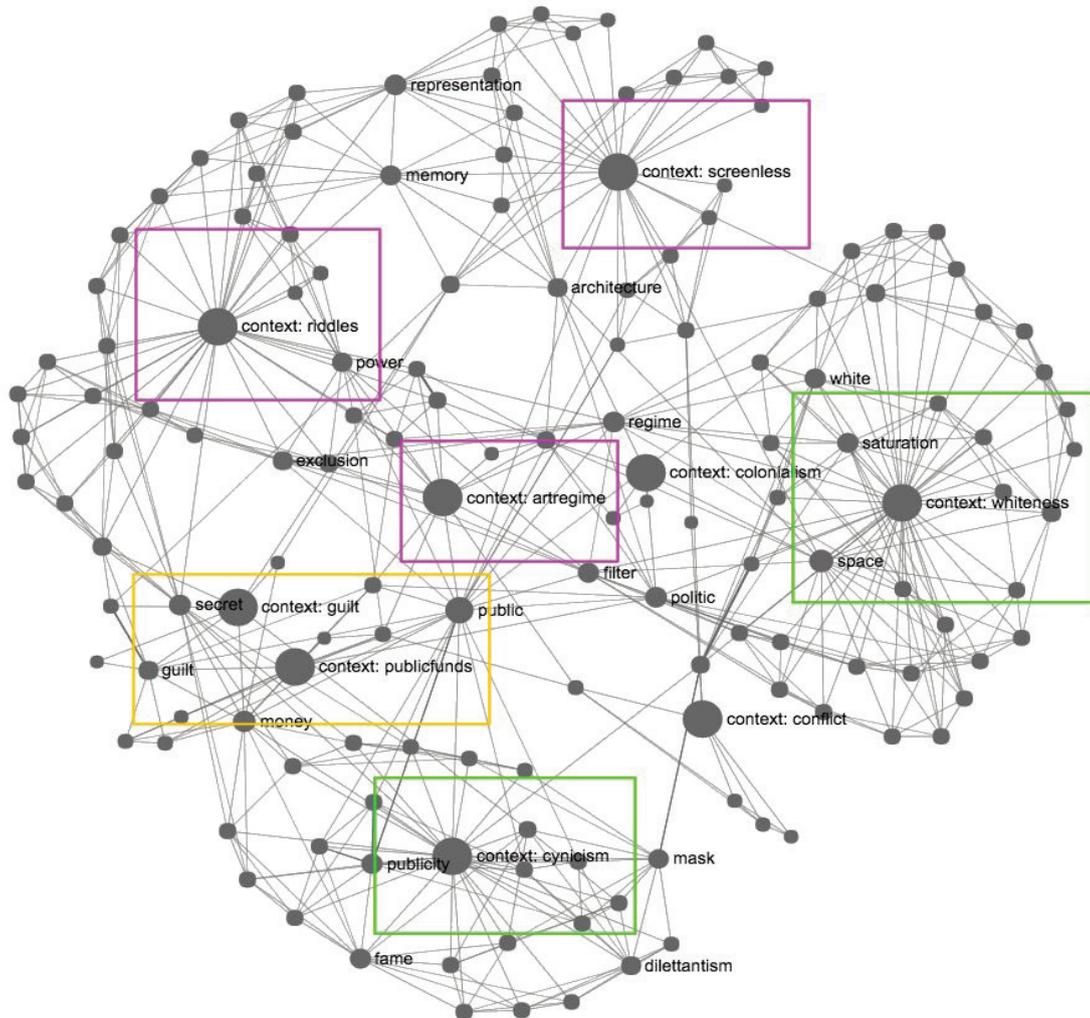


Figura 8. Ejemplo de concentradores o hubs (recuadros de colores) en una red (Nodus Labs 2015).

Se observó que la pérdida de algunos elementos en **redes jerarquizadas**, dependientes de elementos especialmente conectados entre sí (hubs), serían frágiles. En cambio una **red distribuida** sería la más estable, ya que la destrucción de un nodo no alteraba el funcionamiento del sistema. Sin embargo estas redes son mucho más lentas que las anteriores. A medio camino entre ambas se diseñó la **red descentralizada** (Fig. 9), que combina ingredientes de ambas y que está expuesta a la posibilidad de colapso, pero no de forma directa. Los estudios posteriores de Barabasi demostraron que las redes como internet, que dependen de los hubs, quedan fragmentadas si desaparecen éstos. Es decir, que la caída de uno de estos hubs puede dejar amplias zonas de la red sin conectividad con el resto. Internet, o como se la conoce: la red, es aún un sistema a nuestro servicio y tiene poco que decir como sistema autónomo, ya que hoy somos nosotros los que tomamos las

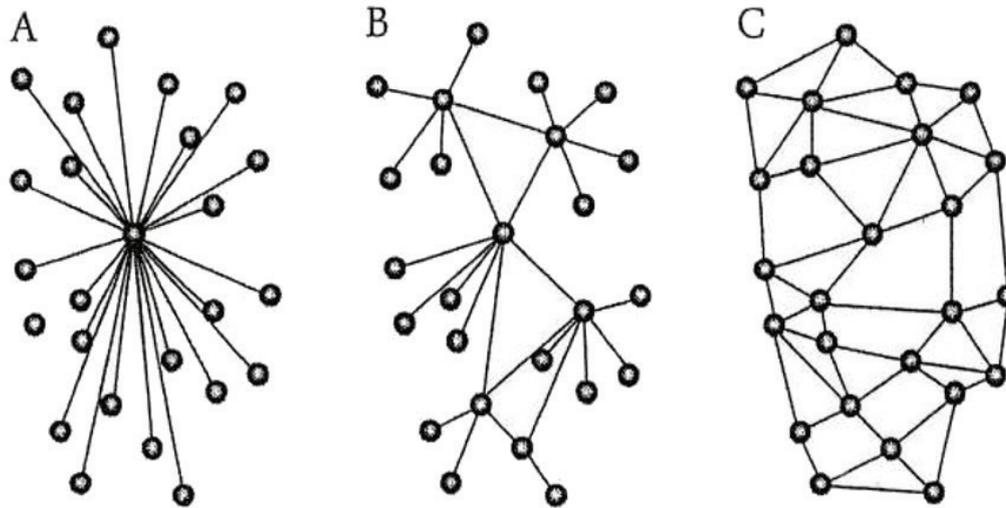


Figura 9. De izquierda a derecha, tenemos (a) una red totalmente centralizada, con un único nodo conectado con todos los demás, (b) una red descentralizada con cierto número de nodos centrales y muchos periféricos y (c) una red distribuida en la que ningún elemento posee un número especialmente grande de conexiones. Cada elemento está conectado con un número limitado de nodos (Solé 2008: 64).

decisiones. Pero, en cierto modo, es un organismo que está en desarrollo y que atraviesa fases de complejidad creciente. Igual que un embrión en crecimiento. La pregunta es, si como el animal que acaba su desarrollo, cambiará de forma inesperada y despertará (Barabasi & Albert 1999: 509–512).

Un aspecto del análisis de redes, que es relevante para la arqueología, aborda la forma en que se difunden las ideas. Los estudios realizados acerca del contagio de enfermedades han sido útiles para aproximarse a ello. La humanidad se ha visto afectada por grandes y pequeñas epidemias. Nada parece indicar que estemos libres de que esto pase de nuevo, pero ahora las cosas son más complicadas. Nuestro mundo ya no tiene fronteras entre países y ciudades. En un mundo pequeño, un virus o bacteria puede abrirse camino con gran facilidad a través de la red de comunicaciones, que permite que una persona esté en el otro extremo del planeta en unas horas. Para predecir los escenarios futuros de infección se debe mirar hacia un mundo sin geografía. Una epidemia requiere dos condiciones para prosperar: la presencia de un organismo patógeno simple y una población de portadores. Los patógenos han desarrollado complejas estrategias para burlar las defensas e infectar poblaciones enteras. Sin embargo, resultar demasiado eficiente a la hora de contagiar puede también ser poco adecuado, porque limita enormemente el alcance

de sus efectos. El caso del ébola es paradigmático por su facilidad de contagio, pero da muerte al portador demasiado rápido y no le da tiempo a infectar a una población mayor, por lo que la infección no prolifera. El proceso de aparición de una infección incorpora varios aspectos al azar, entre los que se encuentra la generación de una mutación en el genoma que permita infectar con mayor eficacia. A menudo estos cambios tienen un impacto negativo en el patógeno, pero en ocasiones, lo hacen más estable o mortífero (Solé 2008: 78–82).

Pero ¿Qué es lo que hace que un brote se convierta en epidemia? En primer lugar supongamos que los contagios son al azar, y que cada individuo puede contagiar a unos pocos. Si la densidad de infectados al principio, sobrepasa cierto umbral crítico, se inicia la fase de crecimiento explosivo, y con ella la fase de mayor virulencia. Luego de sobrepasado este momento la tasa de infecciosidad decrece hasta desaparecer, ya que es muy difícil encontrar nuevas víctimas. Es ahí cuando se entra en la fase de extinción. Por tanto por debajo de cierta tasa mínima de infección la epidemia siempre desaparecerá. Esto además tiene una implicación práctica: si se vacuna a una cantidad suficiente de individuos, éstos harán de barrera a la propagación. Si el número de inmunizados es lo bastante grande, el umbral crítico aumentará, por lo que la eficiencia del patógeno deberá aumentar si quiere proliferar y esto es complicado. Es por este motivo que los procesos de vacunación pueden incluso eliminar un patógeno a escala mundial. Un caso especial de transmisión en el que la estructura de la red de contactos es clave, son las enfermedades de transmisión sexual. Su éxito se debe a su efectividad en el momento de la infección, pero también a la topología de la red social. Dentro de esta red existe un subconjunto de interacciones que implican sexo. La estructura de este subconjunto tiene puntos en común con internet y otras redes. Al igual que ocurre con las redes informáticas, estas redes sociales facilitan la propagación de epidemias, dado que las personas que mantienen numerosos contactos sexuales (las que están más conectadas dentro de la red) actúan como concentradores o hubs, para la propagación de la enfermedad. El sexo del grupo que está altamente

conectado, no es relevante. La teoría muestra con toda claridad que, a menos que los esfuerzos de inmunización afecten a los elementos especialmente sensibles dentro de la red social, la propagación puede tener un éxito considerable. Por tanto las redes de contactos humanos poseen una estructura que facilita la propagación de enfermedades, agravado por la explosión demográfica de los últimos siglos. También es necesario tener en cuenta que, en un caso de red de mundo pequeño, la propagación de las enfermedades puede actuar de un modo diferente, tal es el caso de los virus digitales (Solé 2008: 83–95).

Las similitudes entre los virus informáticos y los biológicos son notables. Estos virus son fragmentos de código, elaborados por humanos. En 1983 F. Cohen, ingeniero electrónico, generó el primer virus digital: un programa simple que se transmitía a sí mismo y se replicaba en distintos ordenadores, fue el primer parásito digital. Demostró que en presencia de un ambiente y recursos adecuados, la aparición de un sistema de información parásito (virus) era inevitable, como ocurre en el mundo natural. Cualquier sistema complejo que posea un contenido de información lo bastante elevado y la capacidad de explotar recursos externos para sobrevivir, será susceptible de ser parasitado por alguna entidad de menor complejidad, incapaz de emplear eficientemente los mismos recursos, pero capaz de extraerlos de su sistema huésped. En 1988 un estudiante de Cornell liberó el “gusano de internet” que afectó a miles de ordenadores y escapó a cualquier tipo de control. Era el inicio del desarrollo de contramedidas y sistemas de protección: los antivirus. Había comenzado una escalada armamentística digital. Algo nuevo que se descubrió gracias a los trabajos de Pastor-Satorras y Vespignani es que si el nodo infectado es uno de los nodos más conectados de la red, el umbral de infección desciende y por tanto, se produce infección, independientemente de la eficiencia del virus (Pastor-Satorras & Vespignani 2001: 3200–3203). No obstante, también es cierto que si se consigue proteger de forma efectiva esos pocos nodos principales, la infección queda contenida. Como conclusión, podemos decir que en redes de mundo pequeño, como internet, es necesario actuar teniendo en cuenta la

topología de la red y no sólo los dispositivos de contagio, ya que los atajos propios de estas redes introducen un elemento de aleatoriedad, que hay que considerar (Watts 2003: 162–70).

Los análisis de redes también han arrojado resultados sorprendentes en estudios ecológicos. La arquitectura de las redes ecológicas es diversa y ha sido estudiada para analizar cómo afectan las perturbaciones, o desapariciones de una especie, al equilibrio del sistema. En estos ejemplos los nodos de la red corresponden a las diferentes especies, mientras que las aristas son las relaciones entre especies. Existen muchos casos en los que estas redes ecológicas presentan efectos de mundo pequeño, indicando que los ecosistemas se encuentran muy bien comunicados y que cualquier alteración se propaga rápidamente. Para llevar a cabo estos estudios, se elaboraron una serie de modelos de ecosistemas. Al analizar la pérdida fortuita de especies (Fig. 10), se comprobó que las redes estudiadas son notablemente estables. Siempre solía ser alguna especie especialista que no alteraba mucho el sistema. Esta estabilidad estructural hace difícil que se produzcan extinciones secundarias.

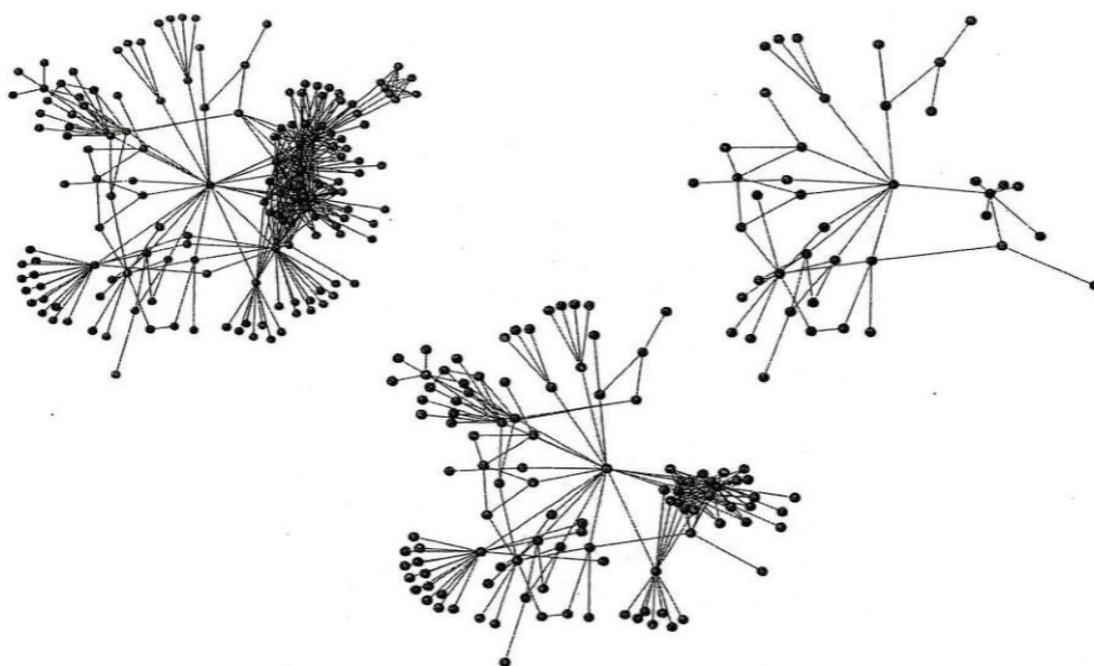


Figura 10. Ejemplo del colapso de una red ecológica compleja (a la izquierda), en la que las especies se indican mediante círculos y sus interacciones mediante flechas. Las conexiones entre círculos indican relaciones de presa a depredador. En la red intermedia se han eliminado cuatro especies, en la de la derecha catorce (Solé 2008: 114).

Sin embargo al introducir la eliminación selectiva, seleccionando las especies clave del sistema, se producía un colapso rápido de la diversidad. De lo que se desprende que la eliminación aleatoria es un proceso gradual, mientras que la eliminación selectiva genera rápidas extinciones masivas. Este estudio sugiere la importancia de realizar estudios, no sólo de las especies de un ecosistema, sino también de sus interacciones, de cara a determinar la pérdida de diversidad asociada a la extinción de una especie (Solé 2008: 110–113).

Al intentar aplicar el análisis de redes al contagio de ideas, se observa que éste responde a normas distintas a las del contagio de un virus. La difusión de ideas viene determinada por la cantidad de vecinos que sean portadores de esa idea. Es decir, es directamente proporcional a esa cantidad. El contagio social es un proceso mucho más dependiente de la vecindad. En la década de los años 60 del pasado siglo, Rogers desarrolló el modelo de difusión de innovaciones. Este modelo establece distinciones entre los distintos umbrales de resistencia al cambio que los nodos de una red ofrecen (Rogers 1983). En este trabajo Rogers distingue entre innovadores, adoptadores tempranos y nodos estables, atendiendo a la factibilidad de difusión del contagio que cada nodo de la red ofrece. Por tanto la dinámica en la difusión de innovaciones es muy parecida a la ofrecida por los modelos de percolación (utilizados en química) (Watts 2003: 171–89).

Otro campo al que se han aplicado con éxito los paradigmas de redes complejas, es el del lenguaje. El origen del lenguaje humano es uno de los mayores desafíos del estudio de la evolución. Su emergencia tuvo que influir enormemente en el curso de los cambios que definieron el éxito del género Homo. Y tal vez subyace a la aparición de la conciencia. El lenguaje humano es un sistema que permite formas de evolución rápidas que no requieren la selección natural. Es un sistema de gran singularidad. La potencia y dimensiones del lenguaje residen en su capacidad de generación infinita. Esa propiedad implica la capacidad de generar estructuras correctas y de complejidad arbitraria mediante la inserción de nuevas

palabras o frases en el interior de una frase cualquiera. Lo más importante del lenguaje y de su propia complejidad es la existencia de reglas de combinación entre palabras. Sin esas reglas, el resultado serían cadenas de palabras sin ningún sentido. La habilidad especial de los seres humanos es su rápida capacidad para asociar palabras entre sí. Alrededor de esta capacidad de asociación subyace la semántica, es decir, el significado de las palabras y las frases. El proceso de asociación tiene lugar con gran velocidad y sin demasiada dificultad. Un fenómeno interesante es la presencia de ciertos tipos de ambigüedades aparentemente universales. Existen palabras diferentes que poseen el mismo significado (sinónimos) y palabras que pueden poseer muchos significados (polisemia). Se podría pensar que un lenguaje debería tender a minimizar las palabras ambiguas. Pero al estudiar la estructura de las redes semánticas, se observó que las ambigüedades son las responsables de la estructura de mundo pequeño que éstas presentan. Por tanto la polisemia resulta ser una propiedad útil ya que hace la asociación semántica mucho más fácil y fluida, además dan una gran coherencia a la red, haciendo fácil su navegación (Hofstadter 1999).

En el núcleo de las capacidades de combinar palabras de forma recursiva se halla la sintaxis, definida como el conjunto de reglas que deciden cuando una frase está o no correctamente construida. Lo sorprendente del fenómeno de la adquisición del lenguaje sugirió a algunos estudiosos la posibilidad de un componente interno del cerebro (un hardware mental) que habría aparecido a lo largo de la evolución. Noam Chomsky propuso esta idea, según la cual existe lo que él denomina “el órgano del lenguaje”, un dispositivo neuronal que permite al niño aprender con rapidez a llevar a cabo generalizaciones y adquirir las reglas gramaticales. Es una idea controvertida, ya que las evidencias apuntan a que existe un elemento innato, pero tampoco cabe duda de que el lenguaje implica un elemento cultural de gran importancia. Otros lingüistas como Kirby o Hurford, piensan que el lenguaje evoluciona para sobrevivir en un ambiente dado, como si fuera un virus que infecta la mente de los niños y que actuaría como una entidad parásita. De cualquier

forma, dado que la sintaxis es un sistema de reglas, parece razonable pensar que un enfoque adecuado al problema de cómo se adquiere semejante sistema debería considerar las reglas en su totalidad. Lo que es más importante: debería analizar la forma en que las palabras se relacionan entre sí a medida que el niño aprende. De este modo se han generado una serie de modelos que relacionan las palabras (nodos) que van aprendiendo los niños (Fig. 11). En el estudio se pudo ver como al principio la estructura corresponde a una red poco conectada, con topología de árbol, con unas relaciones sintácticas débiles en las que la recursividad aún no ha aparecido. Al pasar los dos años, la organización de las relaciones experimenta un cambio enorme y aparece una estructura de redes libres de escala. Las palabras están todas conectadas, estando algunas muy conectadas, permitiendo encontrar fácilmente la relación sintáctica deseada. La presencia de patrones de organización generales sugieren que el lenguaje humano es una solución única al problema de la comunicación, segura pero a la vez flexible (Solé 2008: 209–213).

A modo de conclusión se puede decir que la ciencia de las redes, no es unicamente un subconjunto de teorías ya existentes, sino que es algo totalmente

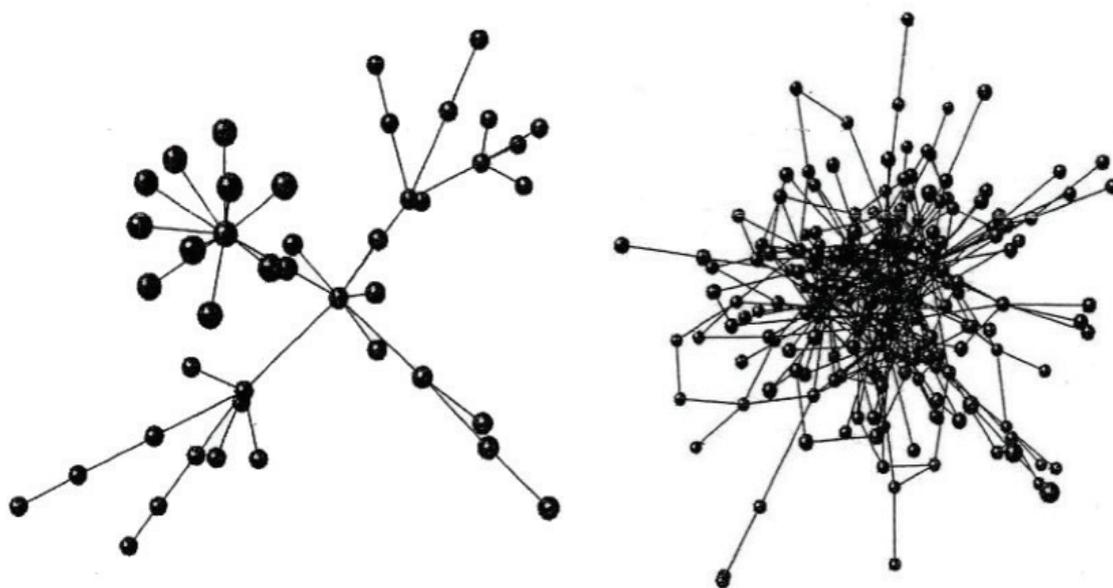


Figura 11. Las redes que relacionan palabras en el lenguaje de los niños experimentan un cambio profundo y rápido al llegar a los dos años de edad. La red de la izquierda representa las palabras asociadas antes de la transición. A la derecha, se observa la explosión de complejidad que se produce en la red a los dos años, cambiando la estructura de la red por completo (Solé 2008: 211).

nuevo. En ella confluyen las teorías matemáticas acerca de la teoría de grafos aleatorios, los modelos de percolación de la química o las transiciones de fase de la física. Todos los procesos son susceptibles de ser abordados por esta disciplina, dotada de dispositivos y técnicas de validación con un sólido apoyo teórico y grandes perspectivas de futuro, que además muestra una gran capacidad de adaptación a las distintas ciencias ya existentes. Una de las múltiples aplicación particulares de la teoría de redes es el SNA.

2.4 ANÁLISIS DE REDES SOCIALES (SOCIAL NETWORK ANALYSIS O SNA)

El SNA es la ciencia que se ocupa de estudiar las relaciones sociales entre un grupo de actores, desde el enfoque de teoría de redes. Proporciona un amplio abanico de métricas sobre grafos que permiten detectar distintas características de las relaciones sociales, representadas como una red. Dos de los objetivos principales del SNA son la detección de actores influyentes dentro de la red social y la detección de asociaciones de actores por intereses comunes. Para ello se centra en las relaciones entre estos actores, en vez de en sus atributos. Además el SNA permite observar los efectos emergentes del sistema. El flujo natural del uso de estas métricas suele seguir unos pasos: se obtienen datos de una red social, se interpreta la red social como grafo, se analizan las métricas de SNA en el grafo y se interpretan los resultados que aportan información nueva sobre la red social inicial.

Los desarrollos en SNA, han ejercido una gran influencia sobre los arqueólogos. En Arqueología, los métodos formales de redes han sido aplicados para explorar gran cantidad de temas de investigación: la transmisión de ideas, el movimiento de gente y objetos, la identificación de límites culturales y sociales, la interacción regional y la conectividad marítima. Estas aplicaciones han conducido al desarrollo de diversas tradiciones de investigación que, sin embargo, comparten una serie de conceptos y aproximaciones relacionadas con las redes, tales como el enfoque en las relaciones entre entidades y en los patrones que emergen de

ellos. Los científicos expertos en redes afirman que las relaciones entre entidades deberían examinarse si aspiramos a entender el comportamiento de estas entidades. El mensaje es simple: las relaciones están en todas partes, influyen las decisiones de la gente y a través de ellas la información y los objetos evolucionan (Brughmans 2013)

Una cuestión fundamental que surge es: ¿Cómo afecta el comportamiento individual al colectivo? Todas las aplicaciones de redes se preocupan por el estudio de las entidades y las interacciones que forman una estructura compleja. Esto proporciona a las redes algunas ventajas metodológicas que no ofrecen otros métodos: obligan a considerar las relaciones entre entidades; son inherentemente espaciales, con la flexibilidad de ser tanto físicas como sociales; son un método sólido para articular escalas; pueden incorporar tanto gente como objetos y los SNA más recientes incorporan también una dimensión temporal. La mayoría de métodos formales de redes comparten otras características, relacionadas con el modo en que se representan visualmente las redes. Esta representación suele venir en forma de un conjunto de puntos conectados por unas líneas. Los puntos son las entidades objeto de investigación, mientras que las líneas representan los enlaces que las relacionan. La forma de la conexión puede ser de naturaleza direccional o no y puede tener asociado un valor que se refiera a un atributo de la conexión. Seleccionar la mejor representación de la red depende de las preguntas que quieran responderse en la investigación. Definir bien la naturaleza de la red, de los datos, así como los límites de la red, y también evaluar de forma crítica la muestra para que no haya interferencias, son los pasos más importantes de cualquier análisis formal de redes. Ello requiere de un meditado proceso de abstracción a partir de los datos que se quieren procesar (Brughmans 2013).

La Teoría de redes se construye sobre la asunción de que una causa, un efecto o una asociación entre cualquier elemento puede ser concebido como una red. Un modelo de red debería contemplarse únicamente como una representación de un

fenómeno. Esta representación se obtiene a través de un proceso de abstracción que se realiza a partir de la observación de un evento. Mientras que la abstracción proporciona el formato en el que los fenómenos serán representados, finalmente su representación se realiza en términos de datos que se obtienen a través de una observación empírica. La Teoría de redes puede servir en el proceso de abstracción, que convierte el fenómeno en una red. Las características de una abstracción de redes incluyen una serie de elementos: elementos individuales, relaciones entre esos elementos y un patrón o estructura para ese grafo. En última instancia de lo que se trata es de que la abstracción que conduzca a una red sea útil para la inferencia científica, permitiendo el desarrollo del conocimiento (Brandes *et al.* 2013: 1–8).

2.4.1 DEFINICIONES BÁSICAS

Existen una gran cantidad de variables que se pueden cuantificar en SNA y que nos proporcionarán datos acerca de la forma en que se estructura la red. A continuación realizaremos un pequeño repaso por algunas de estas definiciones básicas, que resultarán de gran interés en los casos prácticos.

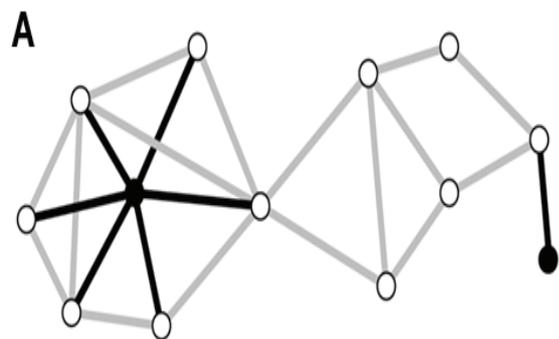
La primera es la de **grado** de un nodo: es el número de conexiones asociadas a un nodo. A veces se le llama conectividad. Si es un grafo dirigido se hablará de grados de entrada y de salida. Si se hiciera un recuento en una red del número de nodos por cada grado, obtendríamos una **distribución de grado**, que se entendería como la distribución de probabilidad de que se de un grado determinado en la red (Albert & Barabási 2002: 47–97).

Un **camino** de un nodo a otro es una secuencia de nodos conectados por aristas, en la que no figura ningún nodo repetido. Por otro lado un **camino mínimo** entre dos nodos es aquel de menor longitud de entre todos los posibles caminos entre ambos. La **distancia** entre dos nodos se define como el número de enlaces del camino más corto que los conecta, mientras que el **diámetro** es la máxima distancia entre dos nodos cualesquiera de la red. Otra variable útil, que se puede cuantificar es la **longitud promedio del camino, o longitud de camino media**, que no es

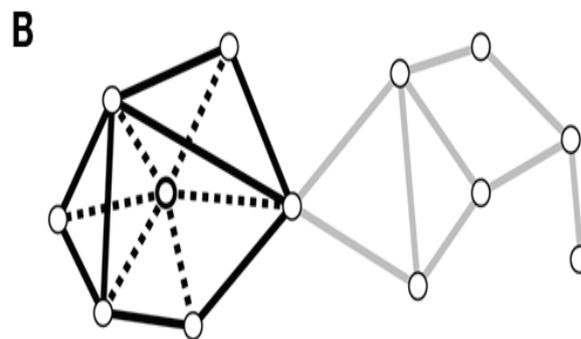
otra cosa que la cantidad media de conexiones que hay que atravesar para llegar de un nodo cualquiera de la red a otro, a través del camino más corto, para todos los posibles pares de la red (Fig. 12a). Da una medida de la eficiencia en el transporte de información a través de una red. Es, junto al coeficiente de agrupamiento y la distribución de grado, una de las medidas que indican la robustez de una red. Un ejemplo sería con cuantas personas se tiene que hablar para contactar con un desconocido (Brughmans 2013). Un **motivo** dentro de un grafo es una estructura (o sub-grafo) que se repite dentro de ese grafo. Pueden ser patrones estadísticamente relevantes porque pueden revelar propiedades funcionales. Existen multitud de algoritmos para detectar estos motivos o patrones en una red.

Una de las propiedades de algunos tipos de redes, es que presentan zonas de agregación o **clusters**. Estos clusters son zonas de gran densidad, o agrupación, de nodos. El **coeficiente de agrupamiento** (clustering coefficient) o transitividad es una variable que nos indica la magnitud del agrupamiento (clustering) de un nodo con sus vecinos. Calcula la probabilidad media de que dos vecinos de un nodo, sean ellos mismos vecinos. Un valor alto indica un alto grado de agrupamiento elevado para un nodo dado. El coeficiente de agrupamiento de la red se calcula como la media de los coeficientes de agrupamiento de todos los vértices de la red (Watts & Strogatz 1998). La evidencia sugiere que en la mayoría de las redes sociales del mundo real, los nodos tienden a crear grupos muy unidos caracterizados por una densidad relativamente alta de enlaces.

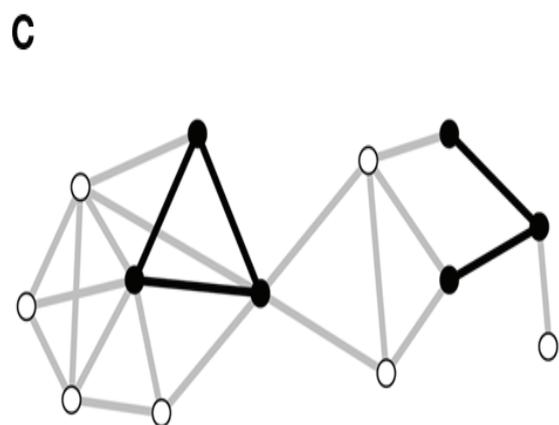
Tampoco hay que olvidar el concepto de **centralidad** en un grafo. Esta medida de centralidad referida a un nodo, nos indica su importancia relativa en la red, de la que forma parte (Fig. 12b y 13). Esta variable puede ayudar a determinar el impacto/influencia/importancia que tiene ese nodo en el resto de la red. Es uno de los conceptos más estudiados en SNA. La centralidad no es un atributo intrínseco de los nodos, sino que depende estrictamente de su localización en la red. Las medidas de centralidad se pueden agrupar en dos categorías:



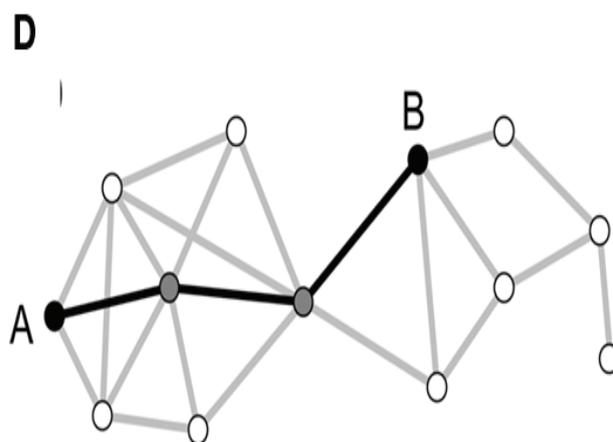
node degree



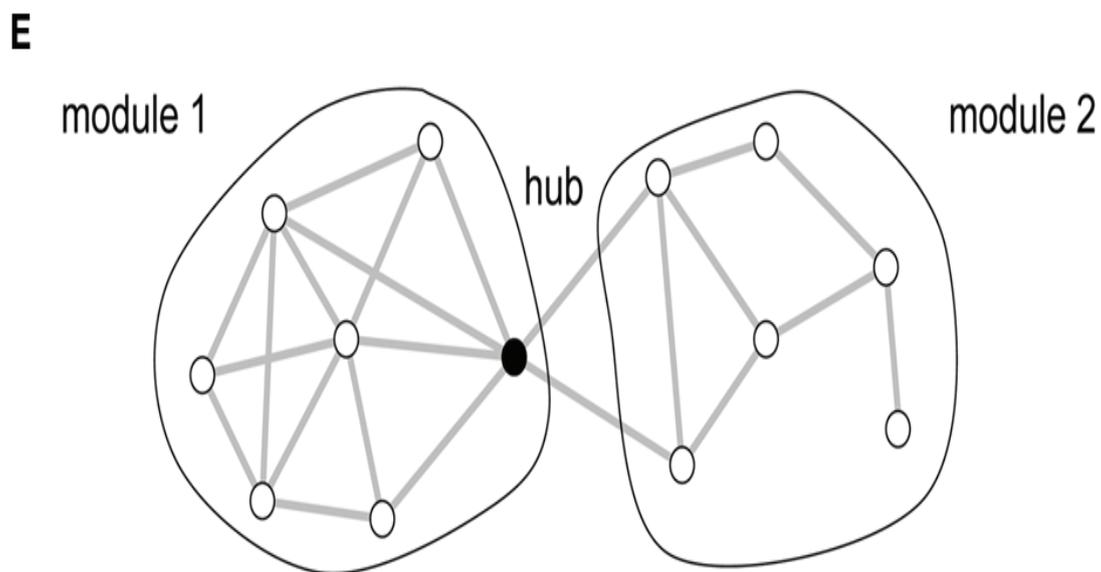
clustering coefficient



motifs



path length and distance



community structure – modules and hubs

Figura 12a. Algunas medidas de grafos y sus definiciones: A) Grado de nodo B) coeficiente de agrupamiento (clustering) C) Motivos de nodos D) La distancia entre dos nodos es la longitud del camino más corto entre ellos. La media de todos los caminos finitos del grafo es la distancia de camino del grafo. E) En negro un nodo con función de hub (Sporns 2011: 2)



Figura 12b. Ejemplo aleatorio de red compleja. En blanco, nodos con una centralidad de grado mayor. En azul oscuro, centralidad de grado menor. (Grandjean 2015)

Las medidas radiales toman como punto de referencia un nodo dado que inicia o termina recorridos por la red. Además éstas pueden medir el volumen (o número de recorridos limitados a dicha longitud prefijada), o la longitud (el tamaño de los recorridos necesarios para alcanzar un volumen prefijado).

Las medidas mediales toman como referencia los recorridos que pasan a través de un nodo dado. Se han propuesto diversas medidas de centralidad de un nodo. Cuatro de ellas son de uso extendido en SNA (Borgatti 2005: 55–71):

- **Centralidad de Grado:** mide el número de enlaces que posee un nodo con los demás. La interpretación de esta medida puede ser diversa. En una red de infección puede medir el grado de riesgo de contraer una enfermedad, en una red social puede medir el número de amistades que tiene un individuo o en la difusión de un rumor puede indicar la posibilidad de recibir información. Es una medida radial de volumen.
- **Cercanía (“closeness”):** calcula la suma o el promedio de las distancias más cortas desde un nodo hacia todos los demás. Mide la accesibilidad de un nodo en la red. Es una medida radial de longitud.

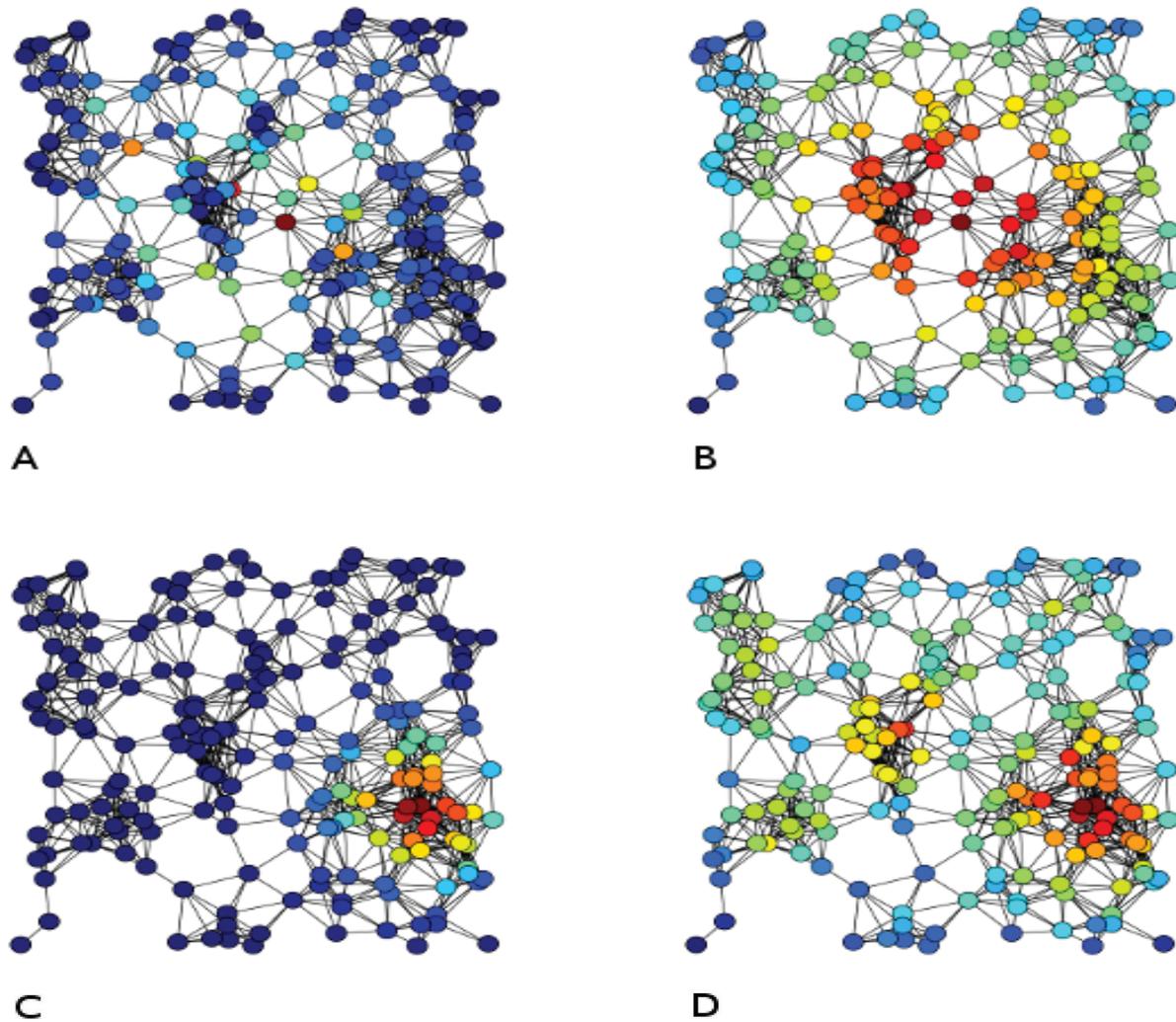


Figura 13. Distintas medidas de centralidad, proyectadas sobre un mismo gráfico: A) intermediación B) cercanía C) valor propio D) grado. En rojo los valores de centralidad más altos, en azul los más bajos (Tineye 2017)

- **Intermediación (“betweenness”)**: esta medida cuantifica el número de veces que un nodo actúa como puente a lo largo del camino más corto entre otros nodos. Es una medida medial.
- **Centralidad del vector propio**: mide la influencia de un nodo en la red. Los nodos que tienen un valor alto en esta variable de centralidad, están conectados a muchos nodos que a su vez están bien conectados, por lo que son buenos candidatos para difundir información. Es una medida radial de volumen.

Otro concepto importante, dentro del análisis de redes, es el concepto de **homofilia** (“amor por lo semejante”). Es la tendencia que tienen los individuos a asociarse y relacionarse con otros similares. La presencia de homofilia se ha

descubierto en gran cantidad de estudios de redes. Es muy útil, ya que las personas con relaciones homofílicas comparten características comunes (educación, creencias, valores, posición social), por lo que las interacciones entre ellas son mucho más fluidas. Con frecuencia la homofilia provoca homogamia: matrimonio entre personas con características similares (McPherson *et al.* 2001).

Cuando se realiza un SNA, la visualización final de los resultados no es una necesidad en absoluto. Estas representaciones en grafo fueron adoptadas de la teoría de grafos y en SNA suelen denominarse diagramas enlace-nodo. Sin embargo, no suponen el único modo de visualizar la red. Otro modo son las **matrices de adyacencia**, que permiten además observar tanto las relaciones presentes (Fig. 14), como las ausentes y son mucho más útiles cuando se quiere representar un gran volumen de datos. Este modo de representar los datos proporcionados por los nodos y las conexiones, además ofrecen al SNA un sistema descriptivo y matemático, en el que se incluyen un vocabulario de conceptos que pueden utilizarse para describir las propiedades de la estructura social. También proporciona una serie de operaciones matemáticas para cuantificar y medir estas propiedades y permite probar teoremas acerca de las estructuras sociales representadas como grafos (Brughmans 2013).

| | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 |
|----|----|----|----|----|----|
| V1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| V2 | | 0 | 1 | 0 | 1 |
| V3 | | | 0 | 1 | 0 |
| V4 | | | | 0 | 1 |
| V5 | | | | | 0 |

Figura 14. Ejemplo de matriz de adyacencia. Nótese que la diagonal está a cero, ya que en nuestro contexto, es poco probable que un nodo se relacione consigo mismo.

Las técnicas teóricas de grafos han sido utilizadas en la investigación arqueológica desde la década de 1960, aunque en la mayor parte de estos análisis de redes arqueológicas, el grafo se utilizaba únicamente para visualizar las relaciones y no para analizarlas. La mayoría de estas aplicaciones teóricas de grafos muestran muchos puntos en común con el SNA, al poner el acento en la importancia de

asociar una serie de supuestos sociales explícitos a los conceptos teóricos de grafos. No obstante ninguna de estas aplicaciones arqueológicas tempranas parecen haber tenido un impacto significativo en la investigación posterior relacionada con redes. SNA se desarrolló como una potencial herramienta real de investigación en las ciencias sociales, a través de su precursora la sociometría. La sociometría implica la medida de las relaciones interpersonales de pequeños grupos y fue desarrollada en la década de 1930, con la intención de describir la estructura interpersonal de grupos, como puntos y líneas, en una estructura bidimensional (Brughmans 2013). Wasserman y Faust formularon a finales del siglo XX una lista de principios que deberían ser compartidos por las aplicaciones de SNA, y que especificaban con claridad el alcance social de los supuestos de partida en SNA:

- Los actores y sus acciones son vistos más como unidades interdependientes, que como unidades autónomas.
- Los enlaces relacionales entre actores son canales para la transmisión o “flujo” de recursos, tanto materiales como inmateriales.
- Los modelos de redes que se centran en individuos, consideran el entorno estructural de la red como un conjunto de oportunidades, o impedimentos, para la acción individual.
- Los modelos de redes conciben la estructura como un conjunto de patrones duraderos de relaciones entre actores.

El enfoque en las entidades sociales, desde la perspectiva de las redes, se ha demostrado útil a la hora de realizar aproximaciones a una gran cantidad de temas de investigación en ciencias sociales (Wasserman & Faust 1994).

2.4.2 SNA EN ARQUEOLOGÍA

Como todas las disciplinas, la Arqueología tiene sus propias problemáticas. El proceso de recogida de datos arqueológicos es una de ellas. Por un lado, no deja de ser subjetivo en cierto modo, ya que es el arqueólogo el que decide qué

debe recoger, en función de su propia investigación, afectando por ello a lectura de las muestras (Van Der Leeuw 2004: 118–120). Por ello, estos materiales tan sólo pueden ayudarnos a realizar una aproximación a las dinámicas pretéritas. Esto hace que la naturaleza de las técnicas analíticas empleadas para tratar estos datos sea especialmente relevante.

Los métodos formales de SNA, tienen un largo recorrido, desde los años 30 hasta los años 70, en que adquirieron un cuerpo coherente. A pesar de ello, la arqueología ha comenzado a interesarse en este tipo de análisis, de forma extensiva, recientemente. El potencial de SNA hacia la arqueología no se reconoció con claridad hasta 1977, con los trabajos de C. Irwin-Williams y su modelo de redes para el análisis del comercio prehistórico (Irwin-William 1977: 141–151). Limitó su modelo a las relaciones comerciales de intercambio que conectaban asentamientos. Algunos de los tipos de relaciones que este autor menciona han conformado la base del posterior análisis de redes en arqueología y las aproximaciones que propuso para el análisis son parte de las técnicas básicas utilizadas por los analistas de redes arqueológicos. Muchas de las técnicas de redes revelan su potencia analítica cuando son aplicadas a grandes volúmenes de datos, por lo que un posible motivo para que la adopción de estas técnicas de análisis fueran adoptadas de forma amplia, fue el desarrollo de una amplia y suficiente capacidad de computación. Pero otro motivo que se antoja de más peso, ha sido la renuencia de la Nueva Arqueología a adoptar los métodos analíticos de redes, debido a que la conectividad era concebida como una serie de interacciones en las áreas marginales de los asentamientos, y no como una conexión geográfica concreta entre sitios. Por ello, a pesar de que el potencial para la utilización de los métodos basados en redes fue descubierto hace décadas, sólo una porción limitada de este potencial ha sido explorado hasta el momento (Brughmans 2013).

Algunas de las temáticas y técnicas analíticas utilizadas en investigaciones realizadas mediante SNA, son:

Difusión de material y recursos inmateriales: la difusión de recursos materiales e información han sido un tema de interés específico de la arqueología. De acuerdo a la perspectiva de las redes sociales, las relaciones sociales son canales de contagio social y de persuasión y han sido instrumentos para los procesos de difusión. El enfoque de este tipo de estudio se centra en explorar las relaciones entre las posiciones estructurales de los actores y el momento en el que adoptan una innovación. La estructura de la difusión de innovaciones muestra similitudes con la difusión de una enfermedad. En un primer momento los que adoptan el cambio son pocos, entonces este número aumenta y finalmente el índice de crecimiento mengua. Un caso concreto de aplicación de este paradigma ha estudiado la cerámica romana distribuida desde el lugar de producción al lugar de deposición (Brughmans & Poblome 2012). En otro caso ha permitido realizar un análisis de los itinerarios romanos, en el que se ha creado una red de pueblos conectados por las rutas mencionadas en los itinerarios Antoninos (Graham 2006b: 45–64).

Centralidad en la red: las medidas de centralidad son probablemente una de las herramientas más populares en el arsenal del analista como hemos visto anteriormente. Permiten la identificación de los nodos que han tenido mejor acceso a la información y mejores oportunidades para difundir la información debido a su posición central o papel como intermediario necesario en una red social. Ha sido usado en investigaciones arqueológicas relacionadas con la exploración de redes antiguas de transporte o para determinar la emergencia de una jerarquía centralizada (Mizoguchi 2009: 14–26).

Redes de afiliación: una parte significativa de los contextos sociales en los que los individuos están inmersos está modelada por su afiliación. SNA asume que la pertenencia a una organización o participación en un evento es un foco de vínculos sociales. Este tipo de aplicación tiene gran potencial para lidiar con la complejidad de las interacciones sociales pretéritas, gracias al mapeo genérico extensivo de contextos amplios (para entidades sociales, geográficas o políticas)

o para pequeños contextos (tipologías o contextos estratigráficos), en el que éstos son tratados como afiliaciones. En el estudio anterior de las cerámicas romanas fue aplicado también este tipo de análisis (Brughmans & Poblome 2012).

Redes Egocéntricas: es una técnica que estudia el entorno social que rodea a los individuos. Una aproximación basada en el estudio de las redes egocéntricas se centra en la posición que tiene una persona en la red y sus oportunidades de mediar entre otras personas. Es una representación de la idea de que el individuo sólo tiene un conocimiento local de las redes sociales de las que forma parte. Las redes egocéntricas han sido muy poco utilizadas en arqueología, pero tienen un gran potencial a la hora de interpretar patrones específicos de procesos hipotéticos desde la base. Es un hecho probado que la estructura de muchas redes sociales complejas muestra un grado no aleatorio de distribución, un patrón que se hace visible al nivel de la red completa (Albert & Barabási 200: 47–97). Explorar estructuras que varían de las redes egocéntricas en el seno de una red mayor, pueden proporcionar una indicación del patrón que manifiesta la red extensa (Brughmans 2013).

En estos ejemplos los investigadores han realizado una serie de abstracciones a partir de los datos en bruto, para convertirlos al lenguaje de redes: **nodos** y **arcos**. Una abstracción habitual es la de considerar los yacimientos como los nodos, debido a que son discretos, estables y persistentes en las escalas de tiempo arqueológico. No obstante otras investigaciones han llevado a cabo un nivel de análisis más sutil, en el que se han considerado enterramientos o estructuras de habitación como nodos, dentro de los yacimientos. Este tipo de análisis se realiza utilizando las **redes bimodales**, que ofrece mayores oportunidades para incorporar múltiples tipos de nodo en una misma red. Estas redes se centran en dos tipos de actores diferentes, en lugar de sólo uno como las **redes unimodales** (las más habituales). La otra cuestión importante tiene que ver con el significado que les asociamos a los arcos. En la mayoría de los casos se han asignado a los arcos valores relacionados con la cultura material (p.ej. materiales utilizados y desechados/utilizados), pero también se han

utilizado otro tipo de conceptos, como la visibilidad entre yacimientos. Dentro de los arcos, una de las decisiones que debe tomar el analista es la de asignar un **peso** a sus arcos para indicar la fuerza de las relaciones entre nodos, o incluso la **direccionalidad**. Estas redes pueden ser presentadas para su visualización, ya que nos brinda una oportunidad para evaluar los datos. Son fáciles de elaborar y suelen resultar atractivas. A las visualizaciones se les puede añadir información geográfica, que ubica nuestros datos en un contexto arqueológico reconocible. También se puede dotar estas visualizaciones de una serie de elementos comparativos que permiten mostrar nuestros nodos y arcos que sobrepasen unos determinados **valores umbral**, o se pueden escalar los arcos y los nodos para proporcionar una guía visual de la potencia de nuestras **redes ponderadas** (Collar *et al.* 2015: 12-17).

Estos ejemplos de aplicación están restringidos a la visualización de redes y a la exploración de la estructura estática de los datos arqueológicos. La dificultad estriba en el salto interpretativo de la identificación de patrones en estructuras estáticas, utilizando SNA, a explicarlas en términos de procesos sociales pasados. Sin embargo, en muchos casos las unidades de análisis no son entidades sociales, por lo que las explicaciones sociales tradicionales se vuelven problemáticas. Además es importante destacar que los datos que se manejan en arqueología siempre son muestras parciales de la verdadera complejidad que mostraban las sociedades pasadas. En segundo lugar, el uso de SNA como herramienta explicativa es limitado. De cualquier manera, ni SNA ni las técnicas de redes complejas están diseñadas para desentrañar la totalidad de la complejidad que muestran las interacciones sociales, y los arqueólogos no deberían utilizarlas como si lo estuvieran. Sólo con una combinación de SNA y técnicas de simulación de redes complejas, se podrá alcanzar la aplicación del potencial real que suponen las redes en arqueología (Collar *et al.* 2015: 12-17).

2.4.3 ALGUNAS APLICACIONES DEL SNA EN ARQUEOLOGÍA

En arqueología los métodos formales de redes se han utilizado para explorar aspectos tan dispares como la transmisión de ideas, el movimiento de personas y objetos, la identificación de fronteras sociales y culturales, la interacción entre regiones o la conectividad marítima. Estas aplicaciones diversas han conducido a una serie de distintas tradiciones de investigación, que, a pesar de las diferencias, comparten el hincapié que hacen en las relaciones entre entidades y en los patrones que emergen de ellas (Brughmans 2013: 2–3). Los analistas de redes afirman que las relaciones entre entidades deberían examinarse explícitamente si queremos entender el comportamiento de esas entidades. Las relaciones están presentes en todas partes, influyen las decisiones de la gente y a través de ellas evolucionan y se transmiten los objetos y la información. Las aplicaciones de redes se ocupan de estudiar las entidades en interacción que, de forma colectiva conforman una estructura compleja. Esto proporciona a la red algunas ventajas metodológicas:

- Obliga a considerar las relaciones entre entidades.
- Son inherentemente espaciales, con la flexibilidad de ser tanto sociales como físicas.
- Proporcionan un método sólido para articular la escala.
- Pueden incorporar tanto objetos como personas.
- Los más recientes análisis de redes sociales incorporan una dimensión temporal (Brughmans 2013: 4).

Los dos modelos complejos más aplicados en arqueología son los relacionados con las redes de mundo pequeño y las redes libres de escala. Una aplicación del empleo de las redes libres de escala y de mundo pequeño, para el estudio de distribuciones de artefactos fue llevado a cabo por Sindbaek. En su trabajo se estudiaron los yacimientos de inicios de la era vikinga en el sur de Escandinavia (Sindbæk 2007: 66). Éstos eran los nodos, mientras que las conexiones entre ellos se realizaron cuando unos tipos determinados de artefactos estaban presentes en ambos extremos. El autor sugirió la existencia de un pequeño número de *hubs* o

concentradores con un alto grado, que indican que el asentamiento habría estado comunicado como una red libre de escala. También identificó un alto grado de *clustering* geográfico, según el cual, cada región mostraba una serie de yacimientos estrechamente asociados con el núcleo de mayor densidad de la red, lo que interpretó como una posible estructura de mundo pequeño. Por ello, consideró que las comunicaciones de larga distancia se conseguían a través de una combinación de hubs y enlaces débiles. Con ello esta estructura resultaba muy vulnerable a la desaparición de ciertos nodos (Sindbæk 2007: 70). El hecho de que sólo se analizara una fase hace que los resultados deban ser tomados con cautela y sólo aportan un destello de como se estructuraba la red real.

Un ejemplo de uso más descriptivo de la modelización con redes complejas fue llevado a cabo por A. Collar en su estudio acerca de las innovaciones religiosas en el Imperio Romano. Su trabajo pretendía explorar por qué algunos movimientos religiosos tuvieron éxito en su difusión mientras que otros fracasaron (Collar 2007). Para ello adoptó un enfoque ascendente, partiendo de las bases, al explorar las redes sociales que enlazaban a los individuos. Collar examinó tres tipos de redes sociales: las militares (fundamentales para la difusión del culto a Júpiter Dolichenus) el culto la red étnica de los judíos de la Diáspora y la red religiosa del culto a Theos Hypsistos. Analizó para ello una combinación de datos epigráficos e inscripciones con las que generó una distribución espacial. Para crear sus redes utilizó una técnica llamada análisis de puntos proximales (*proximal points analysis* o PPA). Para los tres casos de estudio creó una red PPA en la que los yacimientos con evidencias epigráficas estaban conectados a sus tres vecinos geográficos más próximos (Brughmans 2013). La autora manifestó que esas redes no eran un reflejo de las conexiones reales entre los yacimientos, que existieron. Su utilidad radicaba en que a través de su análisis, permitían visualizar y explorar la asunción de que las comunidades interactuaban más intensamente con sus vecinos geográficos más próximos. Además en su trabajo, Collar ilustra como pueden usarse las redes para explorar la distribución de los datos arqueológicos.

Otra aplicación basada en una utilización de los modelos de redes complejas, con un enfoque más cuantitativo es el de Bentley y Maschner, en su libro *Complex Systems and Archaeology*. En él se centran en las redes libres de escala para ilustrar la emergencia de desigualdades sociales en las sociedades prehistóricas. En su aproximación se pone el acento en la competencia y el crecimiento demográfico, razón por la que escogieron las redes libres de escala. Las tendencias en las distribuciones de frecuencia, en los tamaños de las casas, fueron interpretados en la línea del efecto “el rico se hace más rico”, característico de las redes libres de escala (Bentley & Maschner 2003: 52–53). Al igual que en los ejemplos anteriores, consideran patrones estáticos del registro arqueológico como indicación de la estructura de los modelos, sin embargo los autores también exploran la posibilidad de la simulación dinámica.

Pocos arqueólogos han combinado técnicas de SNA y modelado de redes complejas en su investigación. Un ejemplo es el estudio de S. Graham acerca de los individuos activos en la industria romana del ladrillo, dentro del valle del Tiber. Para ello el autor creó dos tipos de redes. En primer lugar estudió las redes clientelares de la industria del ladrillo, evidenciada en los nombres de individuos que aparecían en las estampas de los ladrillos. Entonces examinó las redes de manufactura de ladrillos, en las que se consideraba conectados a los artífices de ladrillos si compartían las mismas fuentes de arcilla. Para ello se basó en análisis arqueométricos (Fig. 15). Consideró que estas redes representaban las relaciones sociales entre individuos que fueron analizados en cuatro periodos cronológicos (Julio-Claudios, Flavios, Nerva-Antoninos, Severos). Graham combinó SNA y modelado de redes complejas en un método que está a caballo entre la escala global y local.

Para evaluar los resultados utilizó medidas de centralidad, para identificar los *hubs* y los puentes, mientras que para explorar los patrones a un nivel global, calculó las longitudes medias de los caminos, los grados de las distribuciones y

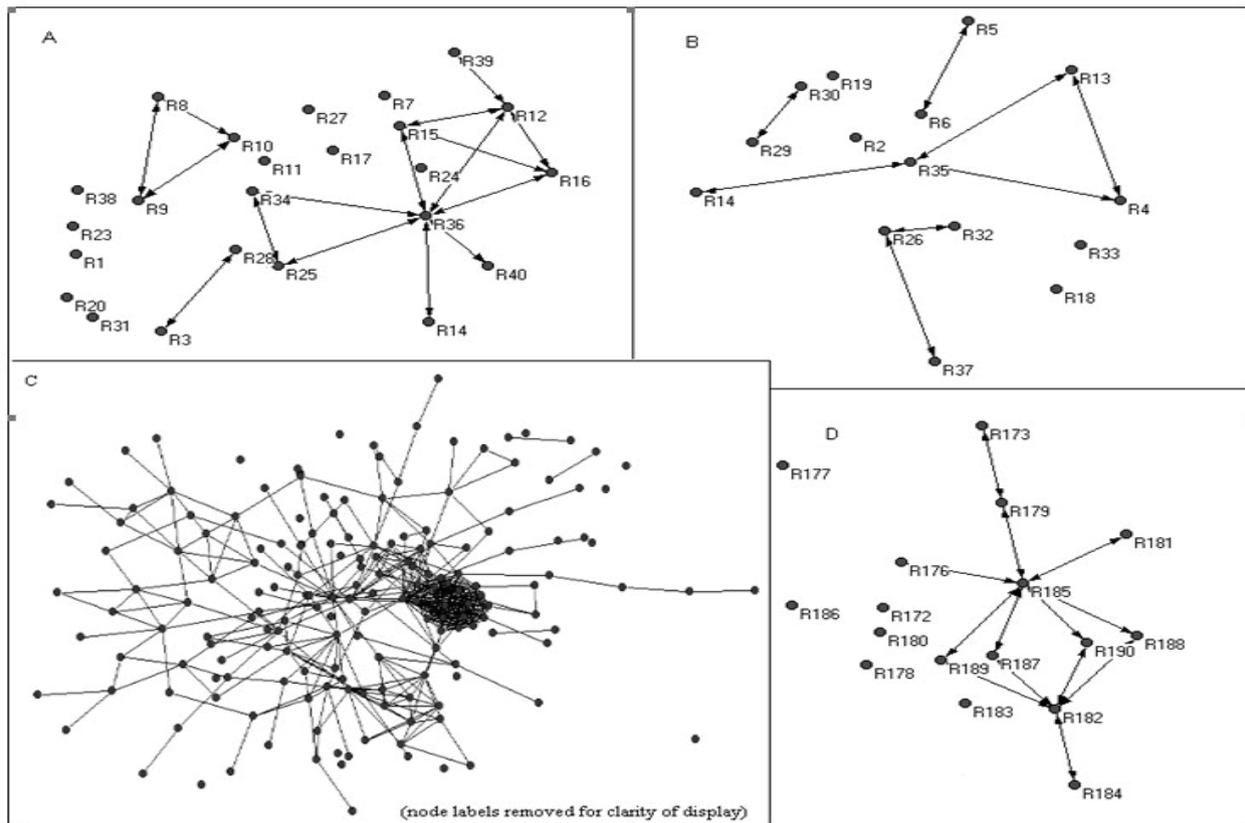


Figura 15. Redes de patronazgo por periodos. A) Julio-Claudios B) Flavios C) Nerva-Comodo D) Severos (Graham 2006a: 98).

los coeficientes de *clustering* (Graham 2006a: 103). Los resultados llevaron al autor a concluir que las redes de patronazgo y manufactura mostraban una serie de estructuras jerárquicas caracterizadas por la presencia de una distribución que siguen las leyes de la potencia, y otras estructuras igualitarias caracterizadas por nodos que presentan un grado similar. Todas ellas muestran rasgos estructurales propios de redes de mundo pequeño, en distintos periodos. Aunque sus redes reflejan fotos fijas de una industria en evolución, sus modelos permiten explorar el cómo y el por qué la industria asumió diferentes formas en distintos momentos. Permite ir de lo estático a lo dinámico (Graham 2006a: 97).

Tampoco hay que olvidar el hecho de que la mera identificación de propiedades emergentes no explica como estos comportamientos surgieron y lo que significaron para los individuos que los crearon. El hecho de caracterizar una propiedad como emergente es, en el mejor de los casos, una descripción general, nunca una explicación. Siempre hay que tener en cuenta que, aunque estos modelos suponen que los cambios en el sistema se desplazan a través de interacciones a

todos los niveles (individuos, comunidades, sistema), las propiedades que nos permiten identificar no nos dicen nada acerca de las acciones humanas a nivel local. Además los arqueólogos no deberían esperar que las redes complejas abarquen la complejidad de un sistema en toda su magnitud y el hecho de que las investigaciones se centren en unos pocos modelos complejos populares limita enormemente el potencial descriptivo del modelado de redes, a la vez que representa el peligro de introducir una serie de procesos explicativos rutinarios (Brughmans 2013).

Un ejemplo único de modelo de redes complejas dedicado a una investigación arqueológica concreta es el de Knappett y Evans, que estudia las interacciones marítimas en la Edad del Bronce del Egeo. El modelo fue formulado como una reacción a los métodos de redes determinadas geográficamente. En esos estudios acerca de la Edad del Bronce temprana en las Cícladas, se examinaban redes que consistían en yacimientos arqueológicos confirmados, además de yacimientos hipotéticos añadidos a las islas, basados en estimaciones demográficas, derivadas de prospecciones. En ellos se utilizó el método **PPA (proximal point analysis)** para enlazar cada sitio con los vecinos geográficos más cercanos. Proporciona un modelo nulo que es implícitamente geográfico. En lugar de buscar el grado de agrupamiento, el objetivo de PPA radica en decidir que ubicaciones tienen un papel más destacado en las interacciones locales. Se determina por la conectividad, es decir el número de enlaces que un yacimiento tiene con sus vecinos. Los yacimientos no tienen “peso”, son todos iguales, y las conexiones no son direccionales. La premisa inicial con este modelo PPA es que las comunidades necesitan interactuar, pero que no pueden mantener más que unas pocas conexiones importantes. (Knappett *et al.* 2008: 4–5). Evans y Knappett eligieron treinta y nueve yacimientos, arqueológicamente comprobados, que forman el núcleo de nodos con una capacidad de carga fija, que refleja sus recursos y otra variable que indica la importancia relativa de cada yacimiento. Los enlaces entre dos nodos daban la medida de la distancia física entre ellos y una variable que representa el esfuerzo que un yacimiento pone en la interacción con el otro nodo. El modelo se utilizó para explorar el efecto de

la destrucción catastrófica de Thera, en la civilización minóica tardía. Para el periodo previo a la erupción el modelo reveló un alto grado de concentración (*clustering*), con una serie de enlaces fuertes y débiles conectando los clusters. El periodo inmediato a la erupción volcánica fue modelado con la eliminación de Akrotiri, en Thera. Los autores sugirieron que la eliminación de un nodo clave de la red quizá no ocasionara grandes cambios al principio, pero que de forma inevitable incrementaría el coste de las relaciones. Este cambio hipotético llevó a menor cantidad de enlaces fuertes, provocando que los yacimientos más grandes se centraran en mantener unos pocos enlaces. Una situación considerada insostenible y que conduciría al colapso, dejando a los *clusters* regionales desconectados de la red principal. El problema principal del modelo es que se basa en el registro arqueológico de forma relativa y sus resultados no se han validado empíricamente. El valor de este modelo radica en su habilidad para explicitar una hipótesis arqueológica de interacción, modelándola como proceso en una red, lo que puede proporcionar nuevas maneras de analizar los datos que ya se poseen, con vistas a profundizar en futuras investigaciones (Brughmans 2013).

Después de esta somera presentación de algunos ejemplos paradigmáticos y pertenecientes a diversos marcos cronológicos, vamos a realizar un recorrido pormenorizado de una serie de trabajos considerados como referentes, dentro del SNA en arqueología, con el fin de extraer una idea más concreta de esta herramienta metodológica.

2.4.3.1 REDES SOCIALES EN EL SUROESTE PREHISPÁNICO DE E.E.U.U.

Este modelo de Mills, Clark y otros (Mills *et al.* 2013) combina datos acerca del registro material con datos de los propios yacimientos, para abordar la problemática del turbulento periodo prehispánico (1200-1450 d.C.), en el suroeste de Estados Unidos. El análisis utiliza SNA y SIG, sobre una base de datos de cerámicas y obsidiana para dicho periodo. La base de datos cerámica contiene información de más de 4.3 millones de artefactos cerámicos, de más de 700

yacimientos, y unos 4800 artefactos de obsidiana, correspondientes a unos 140 yacimientos. El análisis de redes se centra en las relaciones entre nodos, y no en sus atributos como se ha venido haciendo en arqueología tradicional. La combinación de SNA con GIS permite, además, probar hasta qué punto la distancia geográfica está correlacionada con las relaciones sociales entre poblados (Mills *et al.* 2013: 5785).

En primer lugar se definen unas redes de intercambio cerámico, utilizando para su clasificación más de 800000 cerámicas decoradas. Los estudios en transmisión cultural sugieren que las similitudes entre artefactos se generan a través de procesos diversos (producción, emulación, migración, definición de fronteras, intercambio, etc). Sea como fuere, estas semblanzas capturan el efecto de estos procesos y proporcionan un índice general acerca de las relaciones sociales entre asentamientos, comunidades u otras entidades sociales. Además los estudios sugieren que las similitudes en las frecuencias de los artefactos cerámicos, tienden a corresponder con el volumen real de cerámicas que circulan entre los poblados. En este trabajo se han elaborado grafos, a intervalos de 50 años, siendo los poblados los nodos, mientras que los enlaces indican las similitudes en las decoraciones cerámicas definidas sobre un umbral de similitud del 75% (Mills *et al.* 2013: 5786).

Como se ha visto anteriormente, una forma de examinar las redes sociales arqueológicas es a través del estudio de la centralidad de los nodos. En este caso el tamaño de los nodos es proporcional a la centralidad de vector propio, basada en la similitud cerámica ponderada. La centralidad es una medida robusta que toma en cuenta las conexiones a los nodos cercanos y también aquellas conexiones a otros nodos conectados más lejanos en la red (aquellos nodos con mayor grado de separación tendrán menor peso). En el primer intervalo temporal 1250 -1300 d.C., (Fig. 16), el yacimiento con la mayor centralidad de vector propio estaba localizado en el mayor componente de la red, ocupando la posición superior-central en el grafo. Dos subregiones quedaron parcial o totalmente despobladas,

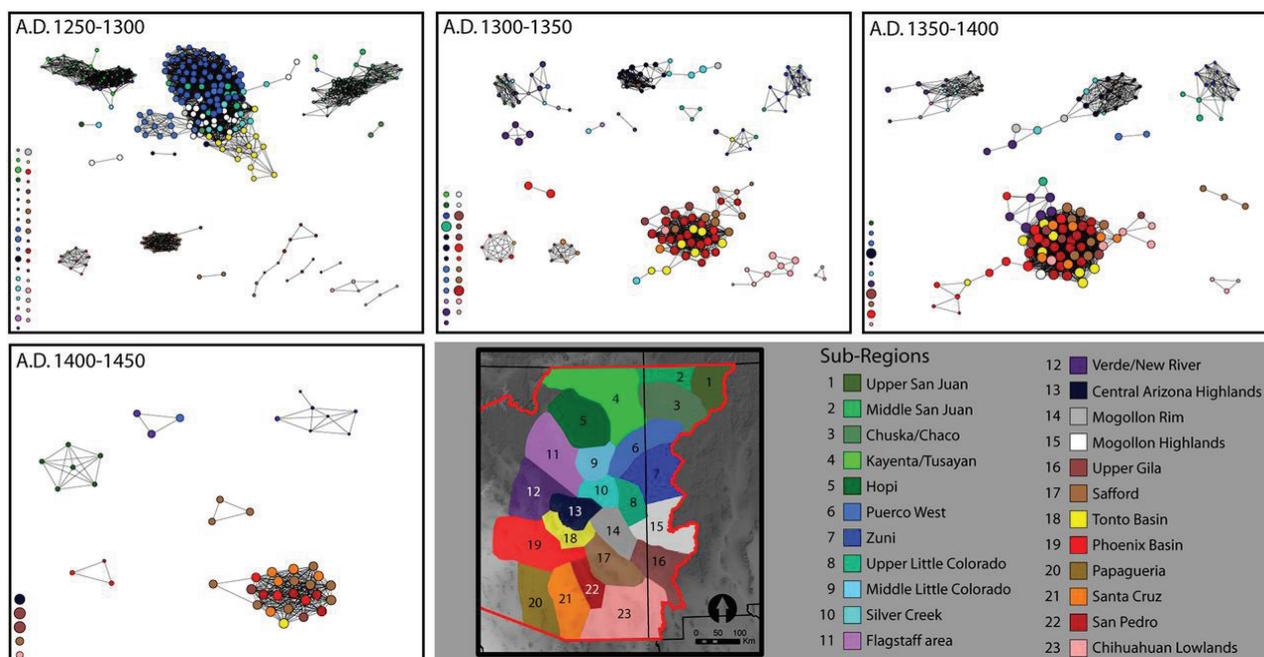


Figura 16. Redes de similitud cerámica a través del tiempo, utilizando un código de colores que indica las subregiones (Mills *et al.* 2013: 5786).

separadas de las redes principales, lo que habría contribuido probablemente a la despoblación. Tras 1300 d.C. emerge un nuevo subgrupo en el sur que aglutinó a una serie de yacimientos, produciendo un incremento de las medidas de centralidad de vector propio, en los poblados del sur. En el norte del área estudiada, las redes cerámicas se fragmentaron, mostrando una estructura similar a la parte sur en la fase anterior. Este momento parece ser un intervalo transicional, con el menor grado de centralidad de los poblados de toda la serie. En los periodos siguientes la tendencia se acentúa, quedando el sur y el norte desconectados. Finalmente, llegando ya a 1450 d.C., el sur y norte se colapsan, quedando unos pocos *clusters*, cada uno con sus cerámicas distintivas.

Se muestran las mismas dinámicas de red, con la variable geográfica, mostrando las diferencias en la similitud cerámica a través de conexiones ponderadas (Fig. 17). En el s. XIII d.C., se pueden observar más conexiones de larga distancia. Para saber si la distribución espacial y densidad de poblados nos hablan del grado de conectividad social, necesitamos comparar variables que caractericen dicha conectividad social y la conectividad espacial potencial, al nivel de poblado. Se ha asumido que la mayoría de las interacciones sociales tendrían lugar dentro del

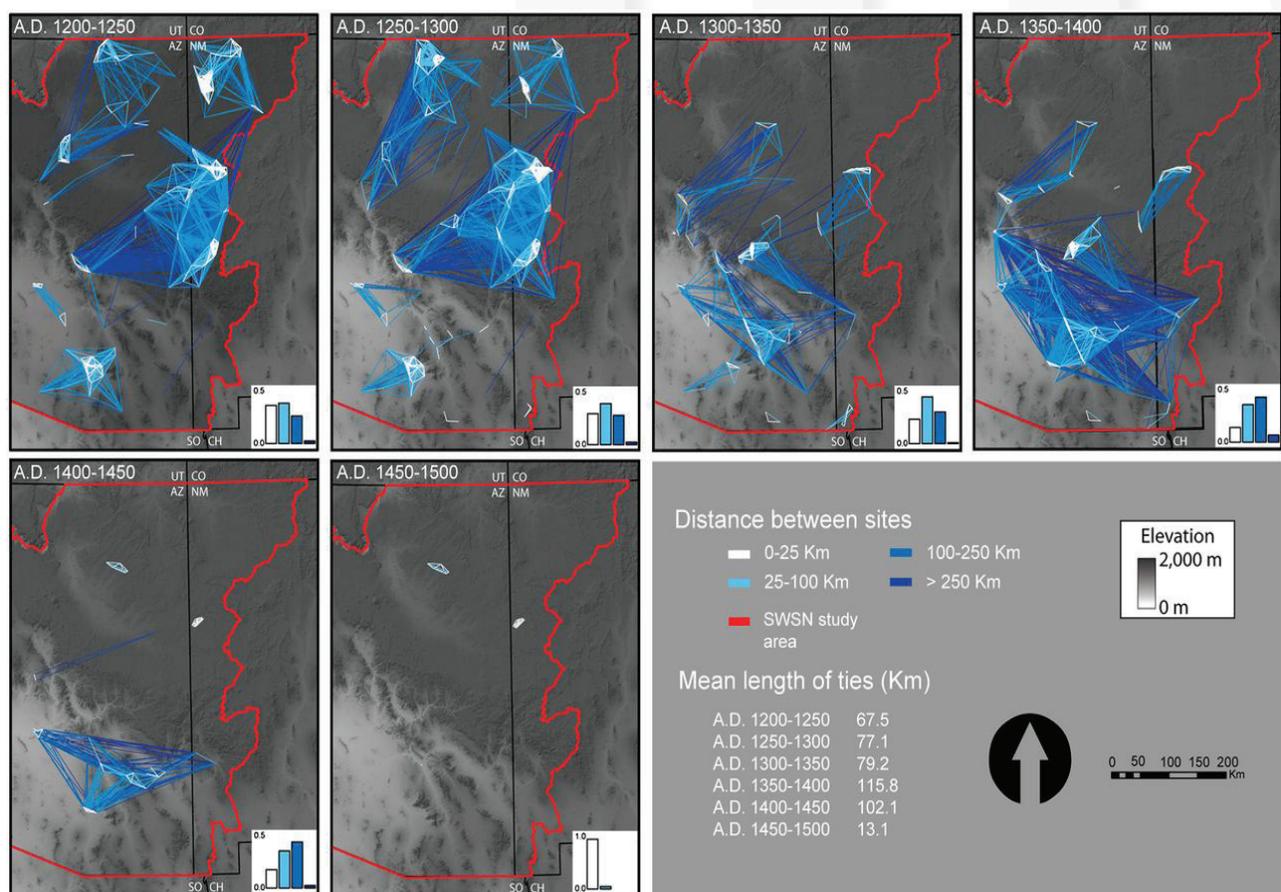


Figura 17. Redes a escala regional de similitud cerámica, a lo largo del tiempo (Mills *et al.* 2013: 5787).

radio de un día de camino (18 km). Los resultados revelan unas distancias medias para las conexiones sociales fuertes sorprendentemente elevadas (70-120 km) en todos los periodos, excepto el último (Mills *et al.* 2013: 5787–5788).

Por lo que a la circulación de obsidiana se refiere, se puede afirmar que para los autores del artículo el análisis de la circulación muestra las relaciones entre las distancias sociales y las espaciales. La obsidiana era una materia prima valorada por sus afilados filos y por su valor simbólico. Además, la obsidiana puede ser rastreada hasta su lugar de origen. En nuestro caso, si la proximidad geográfica fuera la consideración primaria a la hora de extraerla e intercambiarla, cabría esperar un modelo en el que la densidad decayera a medida que se aleja uno del origen del material, lo que servirá como modelo nulo. En este análisis se simuló lugares de recolección de obsidiana, con las proporciones esperadas de materia prima no local, calculando los orígenes de ésta utilizando un modelo basado en el coste del terreno. Se compararon las minas de obsidiana simuladas con las concentraciones

observadas para identificar yacimientos que se salieran del modelo. Para esos yacimientos se identificaron las minas de obsidiana. En la mayoría de yacimientos, no se observó desviación del modelo propuesto (Fig. 18). Algunas excepciones en el noroeste, en unos poblados que presentan similitudes cerámicas, lo que sugiere que este exceso podría ser debido al flujo de las redes sociales. A partir de 1300 d.C. se observa un cambio dramático en la adquisición de obsidiana. La proporción de poblados que se desvían del modelo se dobla. La mayoría de ellos se localizan en el sur, lo que sugiere una fuerte relación entre la circulación de obsidiana y las redes cerámicas, en este caso concreto (Mills *et al.* 2013: 5788–5789).

Estos análisis muestran como cambiaron dramáticamente las redes sociales en un periodo de 250 años, además de revelar la complejidad de las interacciones. Los análisis de redes pueden aplicarse a la investigación de cómo cambian las relaciones sociales y espaciales, sobre todo bajo conocidos cambios demográficos.

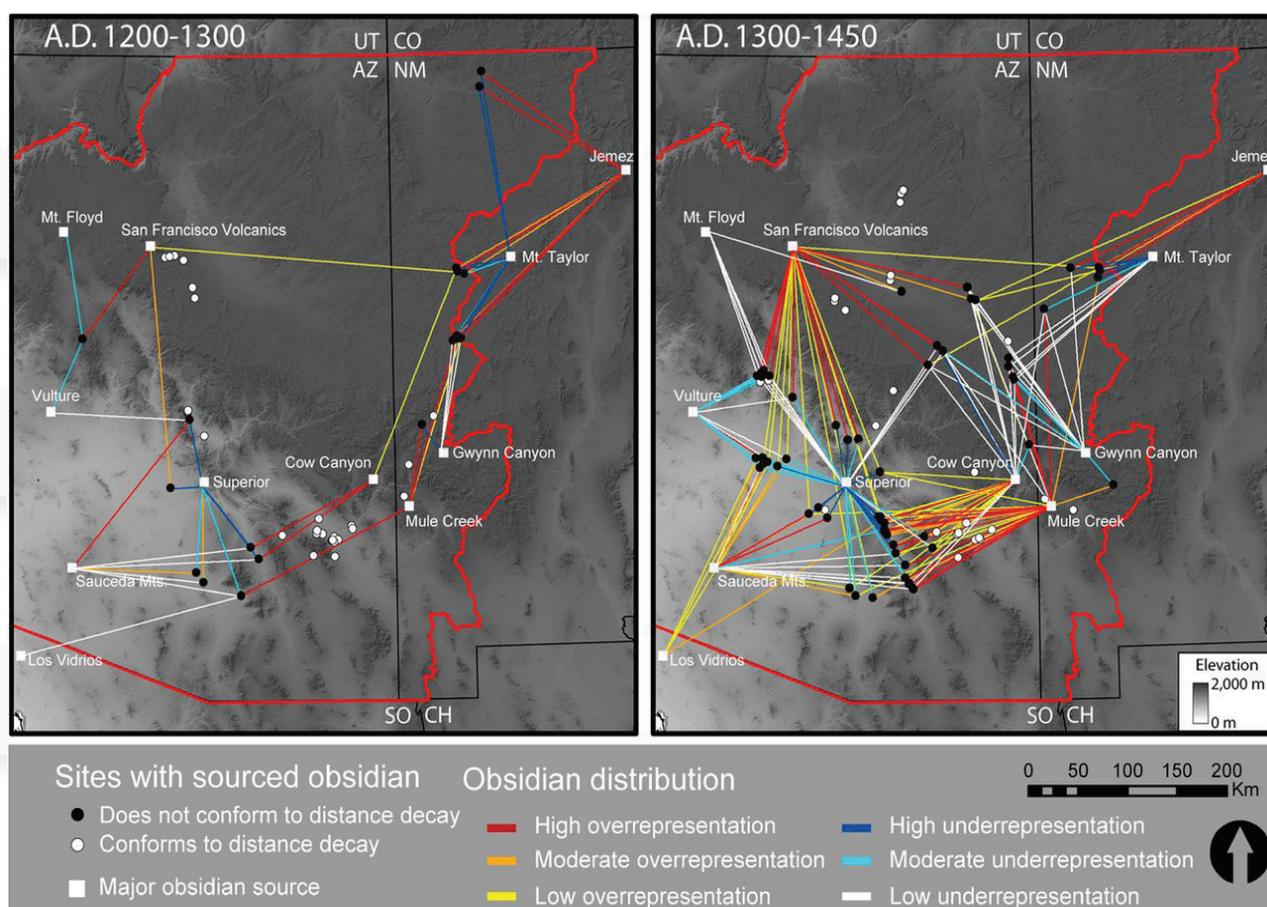


Figura 18. Mapas de poblados que se desvían o no de los patrones de adquisición de obsidiana, esperados (Mills *et al.* 2013: 5789).

2.4.3.2 REDES DE INTERCAMBIO DE OBSIDIANA EN ORIENTE PRÓXIMO

En dos trabajos recientes de J.J. Ibáñez (Ibanez *et al.* 2015) (Arranz-Otegui *et al.* 2017), pretende explorar las condiciones que llevaron a los orígenes y desarrollo del Neolítico en Oriente Próximo, mediante SNA del intercambio de obsidiana. Para los autores, las redes sociales fueron especialmente relevantes durante el Neolítico. La interacción social entre grupos suele asociarse con el intercambio de objetos exóticos. El análisis de este tipo de objetos permite estudiar cuantitativamente estas relaciones. En concreto la obsidiana era un elemento intercambiado a largas distancias en Oriente Próximo durante el Neolítico. Durante el PPNA (Pre Pottery Neolithic A) fue utilizado para realizar herramientas. Durante el PPNB (Pre Pottery Neolithic B) se utilizaba para hacer herramientas en áreas donde era abundante, mientras que en las que no lo era se usaba para elaborar láminas, talladas por presión, empleadas para cortar tejidos blandos. Su valor de uso era de gran importancia. La caracterización de las áreas de origen de obsidiana permite vincular los objetos encontrados con sus fuentes (Fig. 19). La mayoría de los modelos solían explicar los mecanismos de intercambio de obsidiana basándose en el modelo “don-the-line” de Renfrew, realizado en 1960 (Renfrew *et al.* 1969). En él, el autor observó que había una disminución monotonía con la distancia de la fuente de origen en

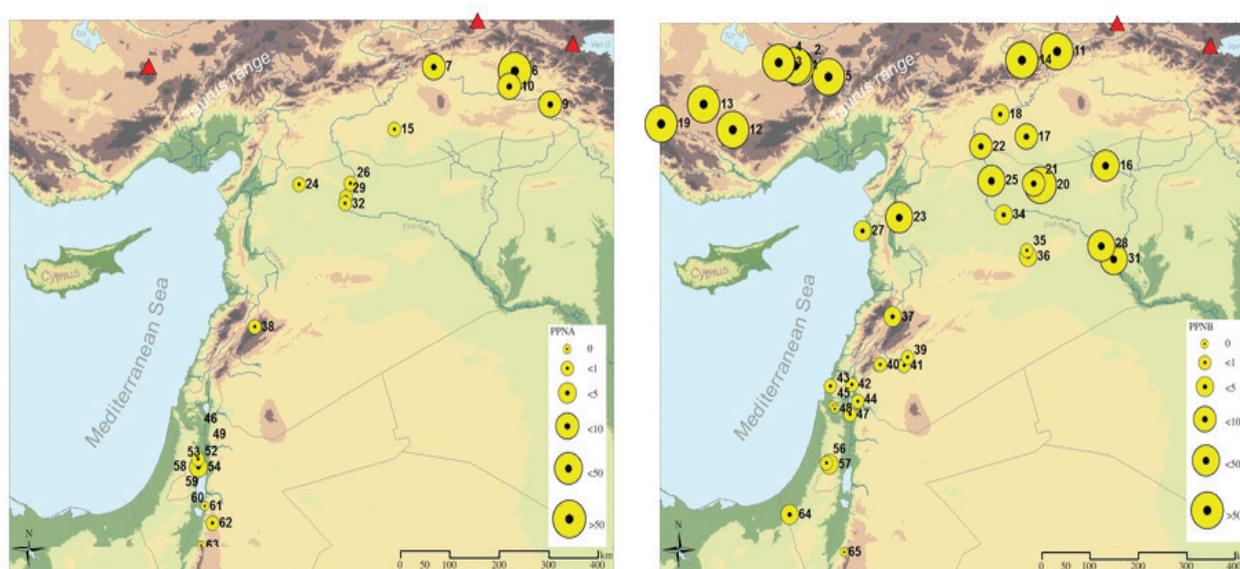


Fig. 19. Distribución de obsidiana. Los triángulos son las fuentes Iqz.) PPNA der.) PPNB. (Ibanez *et al.* 2015: 2–3)

la cantidad de obsidiana. Esto llevó a la formulación de un modelo en el que parte de la obsidiana, presente en un yacimiento se utilizaba en el mismo, mientras que el resto se transfería a la villa vecina. Aunque su teoría aún se usa para explicar las distribuciones de obsidiana en Oriente Próximo, su capacidad para explicar toda la complejidad presente en el registro arqueológico, es limitada. Así pues este modelo “donw-the-line” se hace imposible de aplicar al caso de estudio de este artículo cuando se incluyen variables más realistas. Por lo que se necesita un nuevo modelo. Aquí es donde entra el SNA. Como el intercambio de obsidiana puede ser estudiado como una red, donde los nodos son los poblados, mientras que los enlaces vendrán determinados por las cantidades de obsidiana presentes en los yacimientos. La idea es crear un modelo con estas variables y ver si concuerda con el registro material. Para ello, sobre las redes resultantes, se calculan una serie de métricas: las longitudes de camino (separación entre nodos) y el coeficiente de agrupamiento (mide el grado de agregación de los nodos vecinos)(Ibañez *et al.* 2015: 1–3).

El propósito de estudiar estas métricas es poder determinar con ellas el tipo de red que se crea. En función del valor de las métricas estudiadas las hay de varios tipos. En primer lugar, las redes regulares, en las que cada nodo conecta con todos los vecinos, muestran un coeficiente de agrupación y un camino promedio altos. Esto significa que la cantidad de obsidiana decrece con cada paso entre nodos, con lo que ésta no llegaría a los nodos más distantes, por lo que no son apropiadas para el modelo que se busca. En las redes aleatorias cualquier nodo puede conectar con cualquier otro de la red, lo que supone un camino promedio y un coeficiente de agrupamiento bajos, por lo que la obsidiana llegaría a todos los rincones, pero los bajos coeficientes de agregación son incoherentes con el registro. Las redes complejas están a medio camino entre las anteriores: los nodos se relacionan con los vecinos formando clusters locales, mientras algunos interactúan con nodos distantes estableciendo atajos, por lo que la obsidiana llegaría a todas partes y además la distribución se ajusta más al registro. La organización resultante está

completamente descentralizada y es muy robusta, por lo que la desaparición de un nodo no alteraría el funcionamiento de la red, lo que encaja con las características de las sociedades neolíticas (Ibañez *et al.* 2015: 4).

En el siguiente paso se construyó un modelo de intercambio de obsidiana sobre diversos escenarios y se comparó con los datos arqueológicos: un primero que presenta una red regular, otro al que los autores llaman DL (distant links) y otro ODL (optimized distant links). Se dividió el proceso en 3000 pasos, cada uno correspondiente a un año y se consideró vecinos a los nodos que estaban a 50 km y el enlace distante a 120 km (Fig. 20). A algunos nodos al azar se les permitió establecer contactos con nodos distantes, mientras que la obsidiana circuló a un ratio establecido de 50% consumo/transferencia, para cada poblado. Para el primer escenario los resultados de intercambio de obsidiana son muy pobres. El modelo DL presenta un ajuste bueno para la curva de decrecimiento de obsidiana y los datos arqueológicos para el PPNA. También se observa diversidad del grado de los nodos, lo que sugiere la existencia de una incipiente jerarquía de poblados,

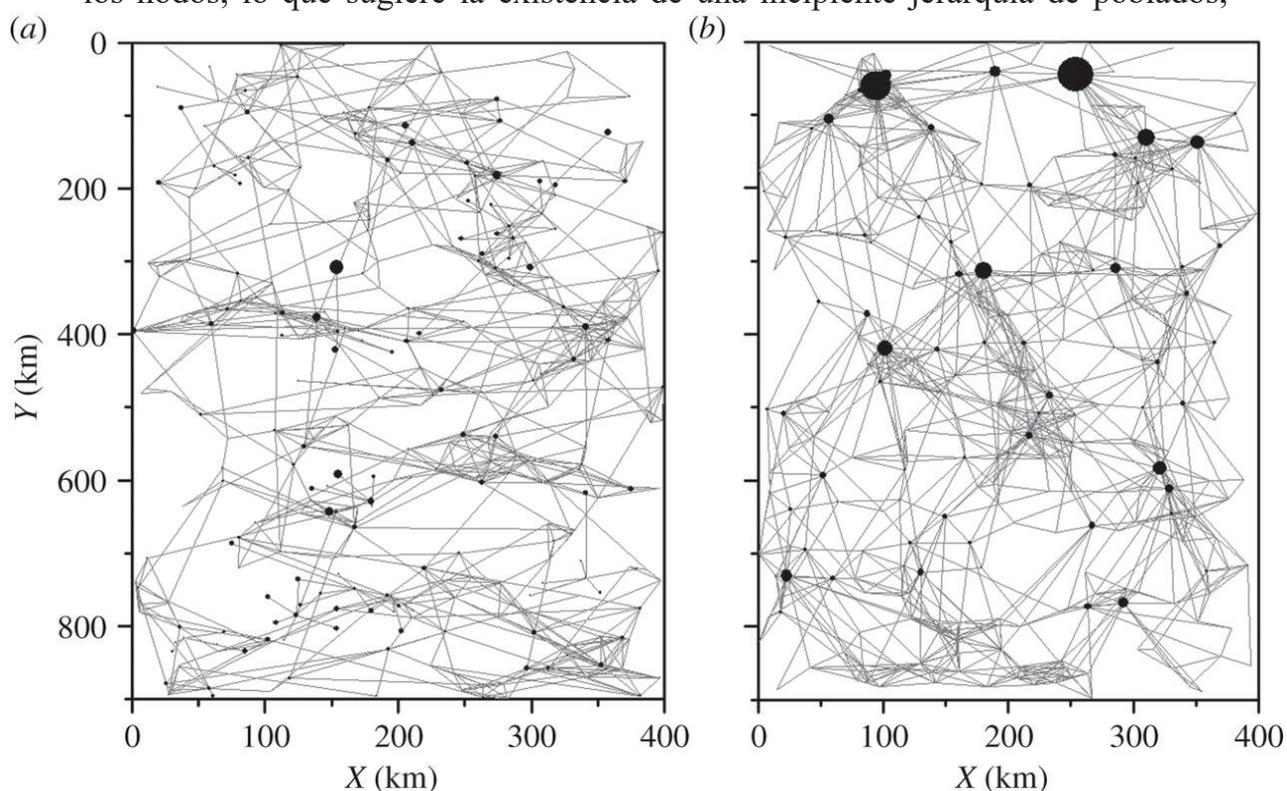


Fig. 20. Configuraciones de red que emergen de la simulación en DL (izq.) y del ODL (der.) (Ibañez *et al.* 2015: 7).

en la distribución de obsidiana (Fig. 21). Es un fenómeno típico de estructuras comunitarias. Sin embargo para el PPNB el modelo DL no se ajusta (Ibañez *et al.* 2015: 5–6).

Lo que se hizo para ajustar el modelo DL es permitir que los nodos mejoren la calidad de sus enlaces, rechazando compañeros que aporten poca cantidad de obsidiana, para beneficiar los enlaces con vecinos que proporcionen más cantidad, provocando así un enlace preferencial. Esto crea una dinámica en la que aparecen mega-poblados (en cuanto a contenido en obsidiana), que tienden a conectarse entre sí. Este modelo mejorado ODL permite mayores distancias de enlace y encaja con el registro arqueológico para el PPNB. En el modelo ODL el coeficiente de agrupamiento es similar al DL, pero el camino promedio disminuye. Además la variabilidad en la cantidad de obsidiana por poblado durante el PPNB es incluso mayor que en nuestro modelo ODL (Fig. 22). Esto sugiere que otras variables están produciendo esta variabilidad, como por ejemplo que en las zonas próximas a las fuentes de obsidiana, ésta se podía conseguir con mayor facilidad.

Durante el PPNA se desarrolló una red compleja de intercambio de obsidiana, establecida entre poblados vecinos (DL). Durante el PPNB esta red se hizo más compleja e incluyó a pequeños grupos de sitios bien conectados o hubs, que

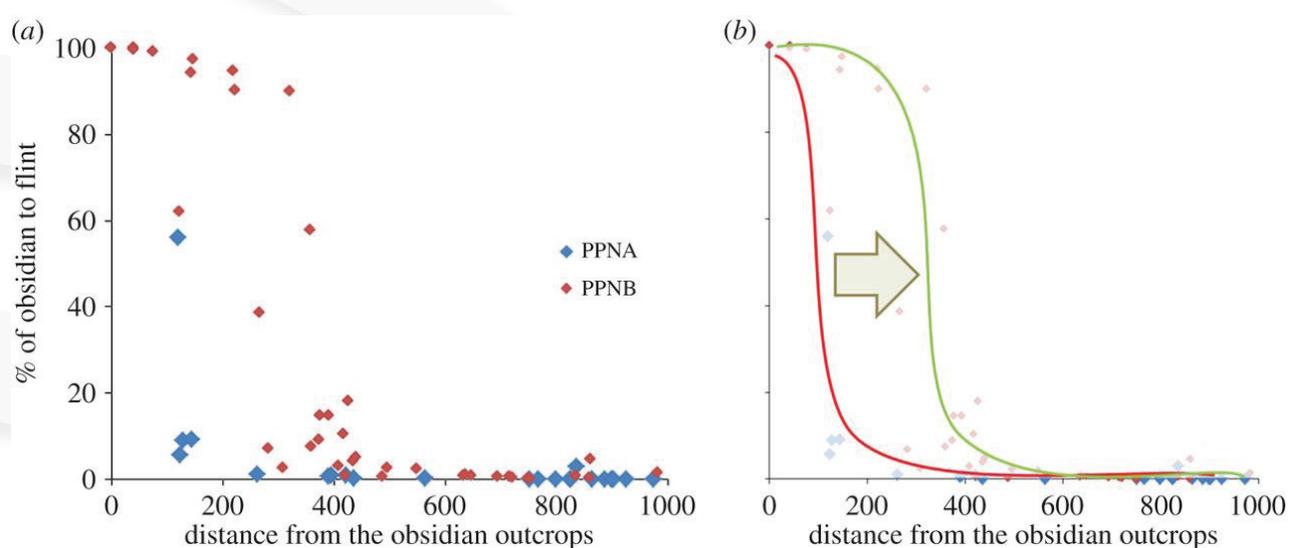


Figura 21. Distribución de datos arqueológicos PPNA y PPNB. (Ibañez *et al.* 2015: 6)

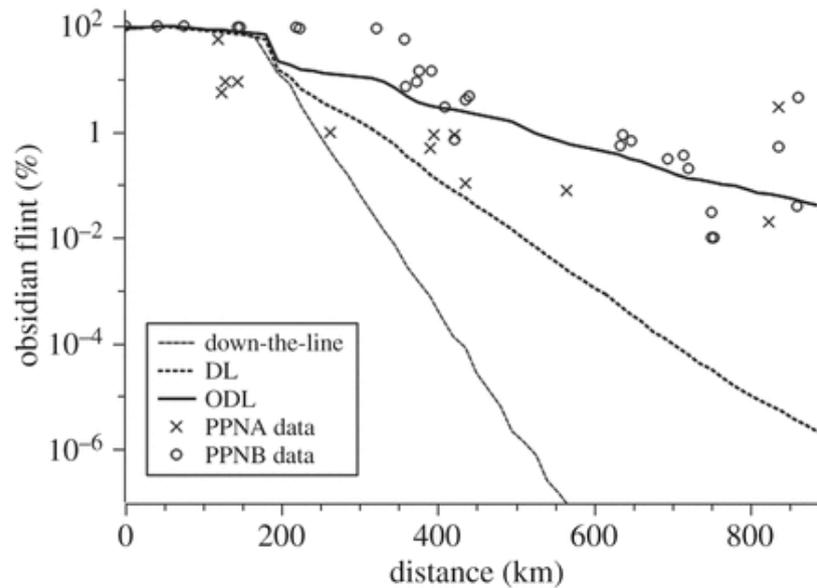


Figura 22. Modelo de redes resultado de los distintos modelos: down-the-line (regular), DL y ODL (Ibanez *et al.* 2015: 6).

controlaron el comercio de obsidiana a larga distancia (ODL). Los agentes que se encargaran de llevar la obsidiana lejos en el circuito, pudieron ser los mismos miembros de estas comunidades, o bien unos grupos móviles que interaccionaran con las comunidades sedentarias (Ibañez *et al.* 2015: 7–8).

Grupos caza-recolectores estaban en proceso de sedentarización en 12000 a.C., proceso que culminaría en torno a 10000 a.C.. El hecho de vivir en poblados estables suponía un riesgo de aislamiento, debido a una movilidad restringida. Así pues, el comercio y las relaciones matrimoniales entre grupos, vendrían a intentar paliar esta situación en el Neolítico. Finalmente, los autores destacan la viabilidad de la existencia de redes sociales complejas en las sociedades prehistóricas, así como de la necesidad de analizar estos modelos complejos para entender el comportamiento social del pasado (Ibañez *et al.* 2015: 8–9).

2.4.3.3 REDES NEOLÍTICAS EN IBERIA: MUNDO CARDIAL

El artículo de Bernabeu *et al.* titulado “Iberian Neolithic Networks: The Rise and Fall of the Cardial World”, es la primera aproximación que aplica análisis de redes a esta fase de la Prehistoria Reciente europea. Este artículo además servirá como preludeo del análisis práctico que se llevará a cabo en el presente trabajo, utilizando para ello metodologías propias del SNA.

Las características del Neolítico Inicial en el Mediterráneo Occidental muestran rasgos comunes, de modo que se puede considerar una unidad arqueológica. Una de las características centrales de este momento es la difusión de la cerámica impresa Cardial. La Península Ibérica es una región clave a la hora de analizar el proceso de neolitización, debido a su ubicación, en el final de la expansión Mediterránea. La transformación de los sistemas de subsistencia desde la caza-recolección a la agricultura supuso un cambio de gran magnitud, para las relaciones de los humanos con el medio. Además los cambios ambientales, resultado de eventos climáticos de escala global, siempre han tenido un gran impacto en las sociedades humanas. Algunos estudios han sugerido que eventos climáticos como el de 8.2 ka BP, jugaron un papel principal en la expansión del Neolítico por Europa. Otras fluctuaciones, como la de 7.1 ka cal BP, se han asociado a episodios de caída demográfica o a la desaparición de ciertos rasgos como la cultura LBK en Europa central (Bernabeu *et al.* 2014: 214–217).

En otros trabajos se han estudiado las dinámicas socioecológicas del Neolítico Inicial en Iberia (Bernabeu *et al.* 2016), para explorar la vinculación entre variaciones en los patrones de población y las fluctuaciones climáticas. Con este fin se analizaron las curvas de probabilidad temporal, elaboradas a partir de yacimientos datados, como proxy demográfico. Estos estudios concluyeron que, aunque la influencia de dichos episodios climáticos es importante a la hora de estudiar las dinámicas socio-ecológicas, el impacto no fue decisivo en los cambios culturales que se produjeron en Neolítico Inicial peninsular. Más bien estas consecuencias para las sociedades neolíticas fueron regionalmente variables (Bernabeu *et al.* 2014: 223). Recientes investigaciones se han centrado en el estudio de las dinámicas de uso del territorio, por parte de estos grupos neolíticos, para intentar explicar estos procesos de caída demográfica de las sociedades del Neolítico Inicial (Barton *et al.* 2012). Los resultados de este proyecto sugieren que ciertos tipos de prácticas agrarias podrían haber tenido un efecto nocivo sobre el paisaje. Esto dejaría dos posibles estrategias a estos grupos: reducir el tamaño de la comunidad por emigración o

fisión, o incrementar las tierras de pastoreo sobre las dedicadas a cultivo (Bernabeu *et al.* 2016: 205–207). En líneas generales, los datos analizados de la Península Ibérica, coinciden con los observados en otras secuencias neolíticas europeas, en cuanto al incremento poblacional inicial, con la llegada de la agricultura. Esta fase viene seguida por una caída a finales del Neolítico Inicial. Sin embargo existe una gran variabilidad en las diferentes regiones peninsulares analizadas, por lo que estudios posteriores deberán investigar los factores internos, para entender los procesos locales (Bernabeu *et al.* 2016: 208).

En Iberia (Fig. 23) los grupos neolíticos más tempranos no van más allá de ca. 7700 cal BP y a su llegada les sigue la aparición de una serie de grandes transformaciones, tanto a nivel organizativo y demográfico, como económico (Bernabeu *et al.* 2014: 2). Estas dinámicas tienen correlación con un desarrollo inicial de entidades arqueológicas o culturas, que cubren grandes áreas, seguidas

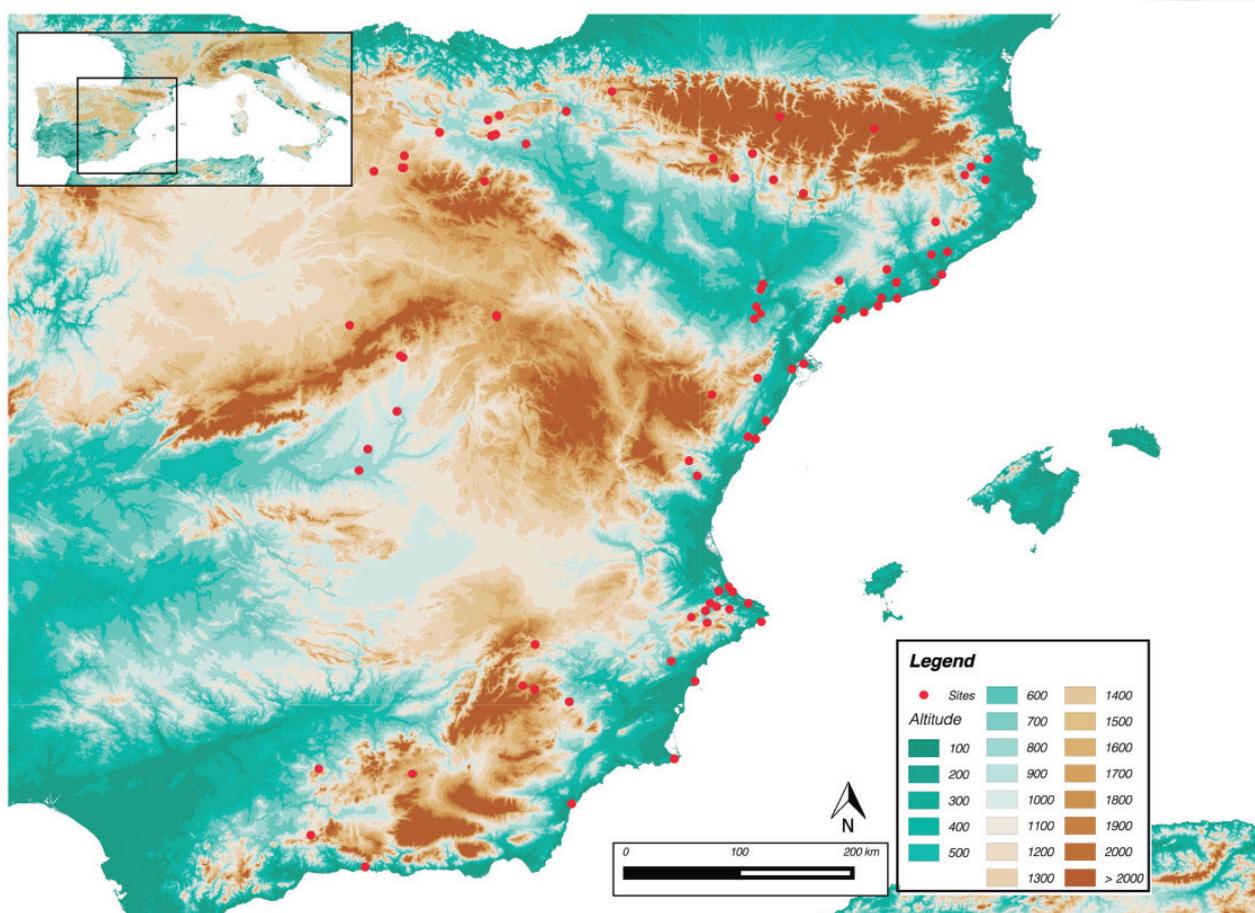


Figura 23. Área de estudio y yacimientos utilizados en este trabajo (Bernabeu *et al.* 2017: 6).

por una fase de “fragmentación cultural” a finales del Neolítico inicial (7000-6800 cal BP). Este proceso desemboca en una imagen de “culturas” más regionales, lo cual es especialmente evidente en la distribución geográfica de estilos cerámicos. Las causas de este proceso son difíciles de evaluar. Se necesita un nuevo registro de alta calidad tanto de las condiciones ambientales como de las humanas. También es necesaria una nueva forma de interpretar las dinámicas locales, y cómo éstas podrían desembocar en la emergencia de unos patrones globales de cambio. La forma propuesta por el artículo es la relacionada con la teoría de redes, útil a la hora de identificar patrones geográficos de interacción. La meta de los autores es abordar este escenario utilizando técnicas de SNA, para evaluar si estos fenómenos macroscópicos podrían ser explicados a partir de relaciones locales/regionales (Bernabeu *et al.* 2017). El aparato metodológico se abordará con detalle en el siguiente apartado, por lo que aquí sólo realizaremos una exposición de los aspectos más relevantes del artículo.

Como ya se ha explicado, para aplicar la metodología de análisis SNA se necesita disponer de datos relacionales. En este caso el elemento de la cultura material que se utilizó fue la decoración cerámica, utilizando un índice de similitud para establecer relaciones entre nodos. Para analizar los datos se optó por estudiar una serie de métricas como la densidad de enlaces y el coeficiente de agrupamiento (*clustering*), métricas que en SNA están relacionadas con la cohesión social y estabilidad (Wasserman & Faust 1994). Se observó un comportamiento similar para las dos métricas (densidad y agrupamiento), pero mostrando una tendencia diferente: mientras la densidad decrece, el agrupamiento crece de forma sostenida (Fig. 24). Desde el inicio hasta el 7400-7300 BP la densidad y el agrupamiento decrecen, pero mientras que la densidad cae dramáticamente, el agrupamiento lo hace lentamente. Posteriormente se observan dos fases de estabilidad en torno a 7300-7200 BP y 7200-7100 BP y en las dos ventanas finales. Entre ellas se encuentra una fase que muestra una clara inestabilidad, de 7100-6900 BP, momento en que la densidad oscila. Durante todo ese tiempo el agrupamiento es inestable, con una

Temporal evolution of the density, clustering and size of network

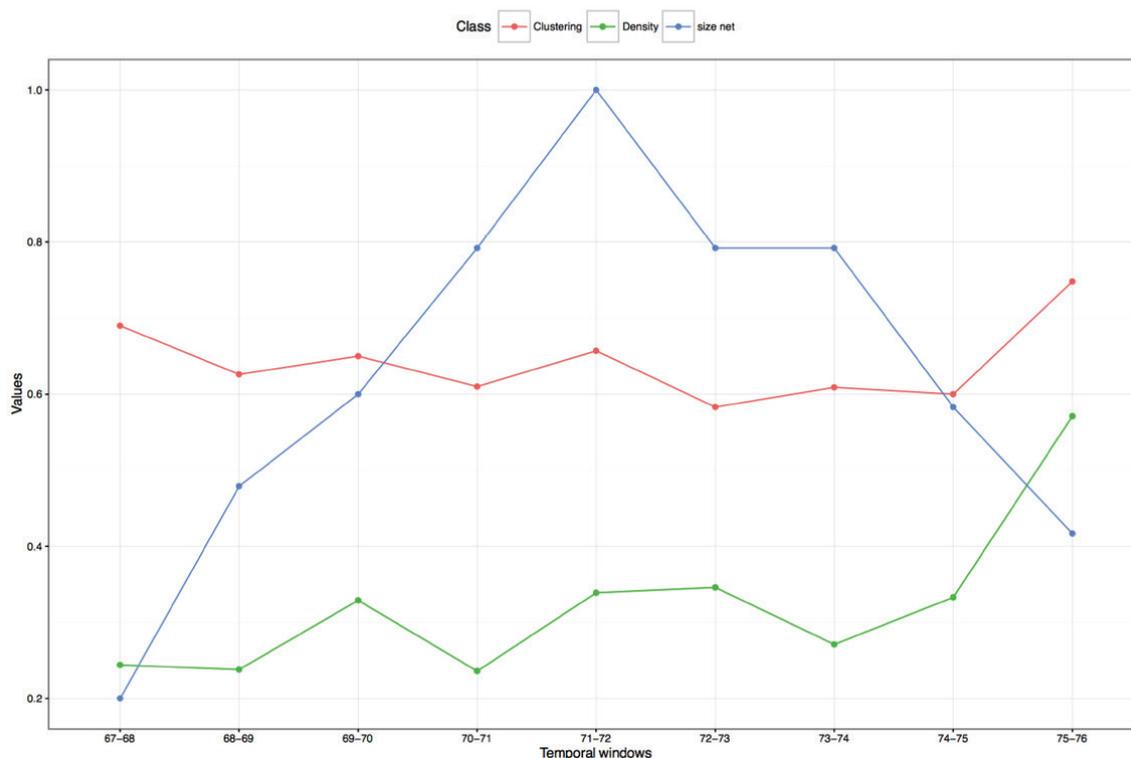


Figura 24. Evolución temporal de la densidad, agrupamiento y tamaño de la red, en el tiempo (Bernabeu *et al.* 2017: 9).

tendencia creciente. El punto de inflexión entre ambos patrones, se sitúa alrededor de 7400-7300 BP (Bernabeu *et al.* 2017: 8).

Al observar el número de nodos, se observaron tres fases claramente diferenciadas: 7400-7300 BP crecimiento sostenido de la red, 7300-6900 BP estabilización y 6900-6800 BP decrecimiento en las últimas dos ventanas. La evolución de la densidad y el agrupamiento están relacionadas con los cambios demográficos. No obstante, el número de nodos únicamente no explica el comportamiento de estas dos métricas. Por ello se buscó una metodología para cuantificar el reemplazo de nodos, o lo que es lo mismo, medir la cantidad de nodos que aparecen-desaparecen de una ventana a la siguiente. Es importante identificar cuando el sistema experimenta una reducción de tamaño, o un reemplazo completo de todos los nodos de la red, para caracterizar la evolución del sistema, ya que la desaparición de nodos clave en la red puede causar una interrupción, en la forma en que se transmite la información por la red. Así pues se optó por proponer un indicador creado al efecto (*Node Turnover* o NTR):

$$NTR = (N_{ap} - N_{dis}) / N_{tot}$$

Donde N_{ap} es la cantidad de nodos que aparecen en la red, N_{dis} corresponde a la cantidad de nodos que estaban presentes en la ventana anterior, pero no en la presente y N_{tot} es el número total de nodos en la ventana actual. El indicador está construido de tal modo que un valor positivo indica aparición de nuevos nodos, mientras que negativo indica desaparición de los mismos. Este indicador proporciona información, acerca de la evolución de la red, cuando se comparan ventanas sucesivas entre sí. Lo que intenta medir este índice es la diferencia entre sustitución y reemplazo de nodos, de una ventana a otra. Su rango de valores está entre +1 y -1. Este índice muestra un descenso progresivo durante el periodo, con caídas significativas en 7400-7300 BP y 7100-7000 BP. La segunda caída coincide con una transición en la tendencia de crecimiento de la red. Se constata un aumento en la desaparición de nodos en todo el periodo excepto en un intervalo de estabilidad alrededor de 7400-7300 BP y 6900-6700 BP (Bernabeu *et al.* 2017: 8–9).

En el artículo se han analizado también medidas de centralidad como la intermediación (*betweenness*). La medida de intermediación es una medida de la importancia global de un nodo en la red. Para cada ventana se midieron la intermediación de todos los nodos, sobre los que se calcularon sus **puntuaciones z**. Sobre éstas se tomaron los valores de los nodos que iban a desaparecer en la siguiente ventana temporal. Con ellas se puede comparar una ventana temporal con la siguiente. Los signos de los valores (positivo o negativo) muestran dos situaciones: Hasta 7200-7100 los nodos que desaparecen presentan un valor negativo en su centralidad (ocupaban, por tanto, regiones periféricas en la red). Por contra, desde 7100-7000 en adelante, los positivos y negativos no muestran comportamientos diferenciados. Un ratio más elevado de valores positivos indicaría que los lugares que ocupaban posiciones de intermediación entre estilos, fueron abandonados conduciendo progresivamente a una situación de menor contacto entre grupos culturales. Al sumar las puntuaciones-z se obtiene una panorámica similar. En

general, se esperaba encontrar correlaciones entre la desaparición de nodos con alta intermediación y los cambios en las señales de agrupamiento y densidad. En la mayoría de casos se cumple, existiendo algunas excepciones, lo que sugiere que la aproximación global no es suficiente para comprender los mecanismos subyacentes, por lo que se pasó a introducir ciertas variables geográficas (Fig. 25). Así pues, se agruparon los nodos en 11 regiones y se calculó la intermediación media para

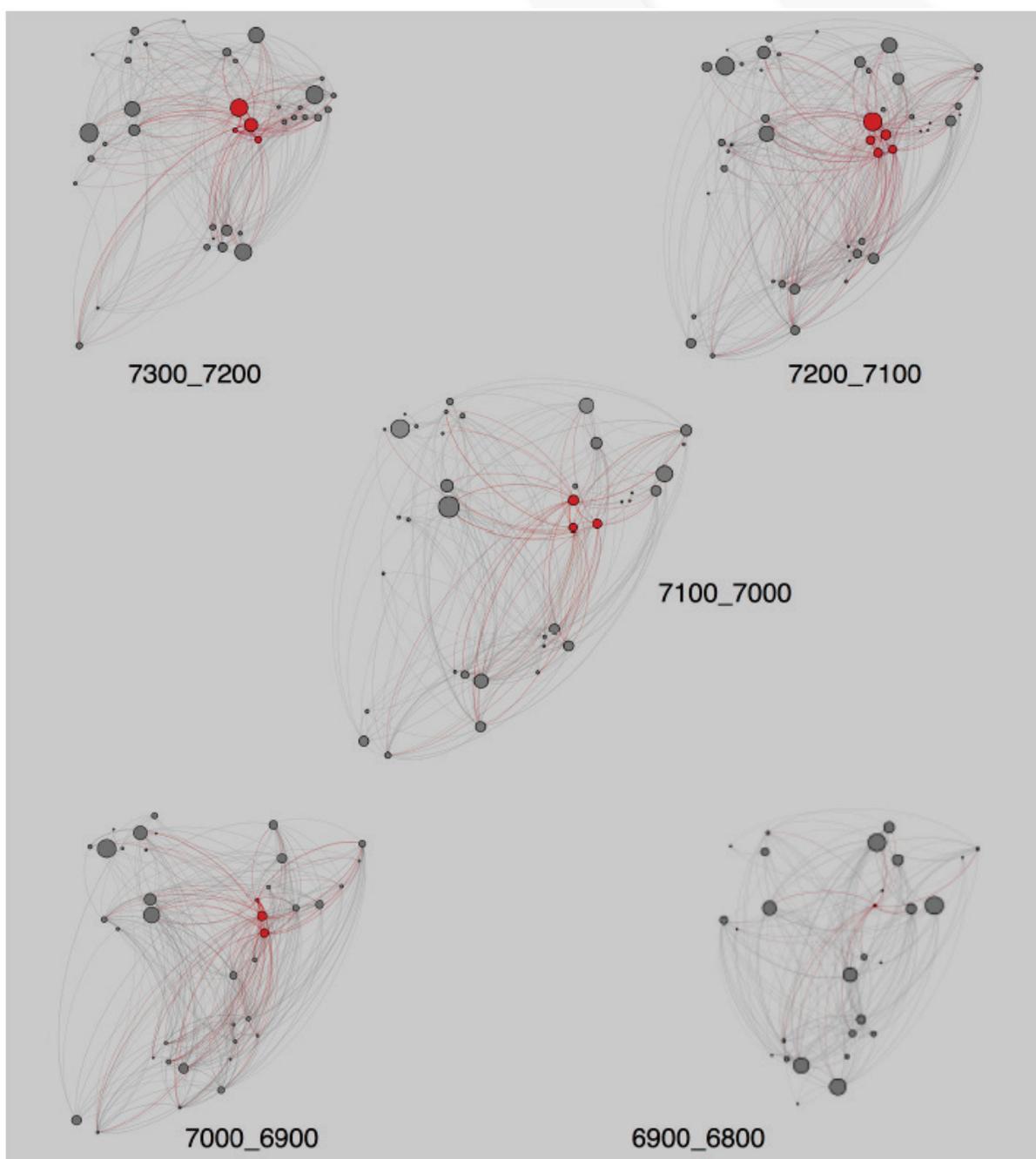


Figura 25. Grafos de la red desde 7300-7200 a 6900-6800. El tamaño de los nodos representa su intermediación. En rojo, están los nodos que pertenecen a la región del Bajo Ebro. (Bernabeu *et al.* 2017: 12)

cada región, en cada ventana temporal, lo que proporcionó la importancia de las distintas regiones en cada ventana temporal. Se observó que el tamaño de la red mostraba una tendencia al crecimiento que alcanza su máximo en la ventana de 7200-7100 BP, y una decreciente desde este momento hasta el final. Este fenómeno no se refleja de forma homogénea a nivel regional. El Bajo Ebro muestra uno de los comportamientos más interesantes. Comenzando en 7500-7400 BP, la intermediación media crece alcanzando su máximo en 7300-7200 BP. Tras ello sufre dos caídas importantes en 7100 y 6900, que definen su decadencia hasta que al final no parece jugar ningún papel significativo en la red.

En este trabajo se han podido identificar el gran boom inicial, coincidente con la llegada del Neolítico, que viene seguido de una rápida caída a finales del VIII milenio BP. Este patrón demográfico coincide a grandes rasgos con la evolución del tamaño de la red. Se pueden observar tres fases:

- Expansión de la red Cardial (7600-7300 BP): la distribución de nodos es irregular, concentrándose en la costa. El N. de Cataluña y el Cabo de la Nao son las regiones centrales de la red y las regiones costeras juegan un papel fundamental en la difusión de los estilos Cardiales. A finales de esta fase, regiones interiores como el Bajo Ebro, ganan en relevancia, adquiriendo un papel de intermediador.
- La red Cardial-Epicardial (7300-7200 BP y 7200-7100 BP): esta fase de estabilidad viene marcada por los valores más altos en el tamaño de la red y está caracterizada por el papel de intermediación que juega el Bajo Ebro. Los estilos Cardial y Epicardial se desarrollan por separado en la costa y en el interior, respectivamente. En la costa hay estancamiento mientras el interior se muestra más dinámico.
- La descomposición (7100 BP- hasta el final): se caracteriza por una disminución de la red, en las que la densidad baja y el agrupamiento tiende a aumentar. Las medidas sugieren una progresiva división de la red en clusters,

que restringirán el acceso a los flujos de información, favoreciendo la aparición de patrones regionales. El estilo cardial desaparece, sobreviviendo el Epicardial. El Boquique queda restringido a las regiones del norte, lo que podría explicarse como el efecto de la fragmentación en la red, que afectaría a la forma en que fluyese la información, favoreciendo así la aparición de un patrón más regional.

Este escenario marca el fin del Neolítico Inicial, en el que algunos han querido ver una correlación entre el cambio climático y el cambio cultural. Sin embargo se antoja pertinente estudiar otras variables, debido a que los efectos no son homogéneos regionalmente. Los autores sugieren estudiar las prácticas agrícolas, que habrían podido ocasionar un empobrecimiento de los recursos del suelo y una caída de la productividad, provocando así la fisión de los grupos o el incremento del área de pastoreo. Lo que en última instancia habría ocasionado la desaparición de grupos-nodos clave, con el potencial resultado de una mayor fragmentación en la red social (Bernabeu *et al.* 2017: 12–16).

3. APLICACIÓN PRÁCTICA: NEOLÍTICO EN IBERIA

Como ya se planteó previamente en la revisión del trabajo de Bernabeu *et al.*, el Neolítico Inicial en Iberia sería un periodo en el que los mismos elementos de cultura material se expandieron por grandes áreas, formando unas extensas entidades arqueológicas. A esta fase la habría seguido otra de fragmentación y diferenciación cultural. Por este motivo se antoja especialmente útil el análisis de las redes de intercambio cultural, basado en el estudio de la decoración cerámica. Como elemento final de este trabajo fin de master se va a realizar un aplicación práctica de esta metodología de análisis. El paquete de datos escogido será el mismo que el utilizado en el artículo anterior (Bernabeu *et al.* 2017) sobre los que, en primer lugar, se recorrerá el camino propuesto por los autores, para familiarizarse con las herramientas metodológicas. Después de esto se realizarán otra batería de análisis distintos a los utilizados en el artículo para observar el efecto de la

aplicación de diferentes medidas de similitud sobre un mismo conjunto de datos. El establecimiento del criterio de similitud y el modo de calcularlo es un aspecto sensible en cualquier análisis de redes y es una problemática que está siendo tratada por otros investigadores, en la actualidad (Mills *et al.* 2017). Por todo ello en este trabajo se pretende realizar una aproximación inicial a esta problemática.

3.1 METODOLOGÍA

Para este trabajo, se van a utilizar los mismos datos que se han utilizado en el artículo de Bernabeu *et al.*: “The Rise and Fall of the Cardial World”. Los autores determinaron, en primer lugar, los estilos tecnológicos observados en el registro. En segundo lugar registraron la presencia/ausencia de estos estilos en cada yacimiento, utilizando solamente aquellos datados adecuadamente. Para poder aumentar la muestra disponible, también añadieron algunos yacimientos sin datación, de los que se puede obtener información cronológica fiable, gracias a la estadística Bayesiana. Este análisis estadístico se limitó a yacimientos localizados al sur del río Ebro. El modelo cronológico se produjo utilizando *Oxcal*, a partir de fechas radiocarbónicas. La cronología radiocarbónica se convirtió en una probabilidad a priori. Para ello primero se calculó la frecuencia de cada estilo cerámico, en relación con el resto de estilos y se calculó la media de la frecuencia relativa de cada estilo cerámico para cada ventana temporal. Tras ello se computaron las probabilidades a posteriori para cada fase, sobre la base de las cantidades de cada estilo, en cada yacimiento sin datación radiocarbónica, utilizando las ecuaciones propuestas por Fernandez-López y Barton (Fernández-López & Barton 2015: 559–583). Después de aplicar el enfoque Bayesiano, la base de datos disponía de 86 yacimientos y 128 estratos con los que realizar el análisis.

El siguiente paso fue observar las dinámicas evolutivas de la red, para lo que se definieron ventanas de 100 años, entre 7700 y 6700 cal BP. Para asignar cada yacimiento arqueológico a una de las ventanas temporales, se tomó como referencia el intervalo de probabilidad a 2 sigmas para cada fecha calibrada. Se

asignó un yacimiento a una ventana temporal determinada si al menos el 25% del intervalo cronológico caía en esa ventana (Bernabeu *et al.* 2017: 2–5).

Se definieron ventanas temporales de 100 años, quedando establecidas 10 ventanas temporales entre 7700 y 6700 cal BP. Los nodos fueron definidos por los yacimientos, mientras que para los enlaces se utilizaron las similitudes en las técnicas decorativas cerámicas como el principal criterio de conectividad. Teniendo en cuenta la naturaleza de los datos los autores decidieron utilizar el índice de similitud de Jaccard, que permite compensar posibles sesgos introducidos por el gran índice de cambio registrado en los estilos cerámicos, entre las distintas ventanas temporales, aspecto sobre el que se profundizará más adelante. En el siguiente paso, realizaron experimentos preliminares contruyendo redes con distintos valores umbral y concluyeron que para valores umbral sobre 0.25 la densidad de enlaces tendía a caer drásticamente (Bernabeu *et al.* 2017: 7).

Para definir las relaciones entre los nodos se utilizó como criterio la similitud en las técnicas cerámicas encontradas en los distintos yacimientos. (Bernabeu *et al.* 2017: 5). Existen diversas maneras de medir el índice de similitud. En el caso de la arqueología, casi siempre se funciona con tablas o matrices de muchos elementos, que presentan cada uno de ellos múltiples atributos. Para poder plasmar nuestros datos en forma de grafo, necesitamos convertir estas tablas de atributos en matrices relacionales, y es por medio de las medidas de similitud que lo hacemos. Algunos de estos índices son:

- Brainerd-Robinson: compara las diferencias analizadas en función de la diversidad de atributos de una entidad. Esta medida fue desarrollada específicamente en arqueología para comparar las semejanzas arqueológicas en términos de proporciones de tipos de objetos o datos. Normalmente cuantifica la similitud en un valor que va entre 0 y 2 (Brainerd 1951). Tiene en cuenta la cantidad de items existentes en cada categoría a la hora de generar un valor para el peso de la relación.

- Jaccard: es el ratio del número de coincidencias respecto al número de atributos (que no sean cero) comunes a todos, para un par de entidades dado. Compara el tamaño del grupo de atributos comunes entre dos entidades, con el tamaño del grupo de atributos totales. Suele ser el método más popular para comparar entidades que tienen valores binarios en sus atributos. Los datos arqueológicos que normalmente son escasos respecto a la muestra original, el coeficiente de Jaccard es especialmente útil ya que ignora todos los atributos que son nulos, entre dos entidades comparadas (Jaccard 1912). Genera un valor de peso para la relación entre 0 y 1.
- Simple coincidencia: indica el ratio del número de coincidencias de todos los atributos. Entre dos entidades dadas, muestra cuantos atributos están presentes en ambas (Segaran 2007). Se puede establecer un umbral mínimo de coincidencias para establecer una relación entre dos entidades. Tampoco tiene en cuenta el número de items en cada categoría.

En el artículo, la medida de similitud que se utilizó fue el Jaccard, con un umbral de 25. En el entorno de este valor la red presenta una estructura interesante: ni demasiado conectada, ni demasiado desconectada, siendo estos extremos no deseables pues no aportan información relevante. Así pues el primer paso que se ha dado en este trabajo ha sido el de recrear todo el proceso y calcular sobre los mismos datos el índice de Jaccard 25. Después, se ha calculado también el Brainerd-Robinson con diferentes umbrales (50 y 75) y la simple coincidencia, con el fin de comparar los resultados que arrojan los distintos índices y ver la conveniencia de utilizar uno u otro en función del paquete de datos que se posea. Hay que tener en cuenta que las medida de similitud como Brainerd-Robinson y la simple coincidencia son muy adecuadas para datos basados en frecuencias absolutas (no porcentajes). El número total de estilos de decoración registrados muestran una gran variabilidad en las distintas ventanas temporales, lo que podría introducir sesgos al comparar características estructurales de las redes en las diferentes ventanas.

Una baja variabilidad de estilos en algunas ventanas podría facilitar altos valores de similitud, mientras que una gran variabilidad de estilos podría (a priori) impedir valores de similitud altos. Por ello, en el artículo se introdujo un mecanismo de compensación en el que se multiplicaba el valor de Jaccard por el ratio del número de estilos presentes en cada ventana, entre el número máximo de estilos (Bernabeu *et al.* 2017: 5–6).

$$J_i^* = J_i \times N_{\text{subestilos}} / \text{Max}(N_{\text{subestilos}})$$

Esto permitió a los autores normalizar los datos del Jaccard para poder comparar las distintas ventanas temporales. En nuestro caso este paso no se llevará a cabo, ya que sólo realizaremos una aproximación al problema, por lo que nos quedaremos con los valores sin normalizar.

En primer lugar se han procesado los datos del artículo con scripts de Matt Peppels para calcular el Brainerd-Robinson (Peeples 2011) y de Agustín Díez (Díez Castillo 2017) para el Jaccard. Estos scripts utilizan los paquetes *ade4* (Dray & Dufour 2007) y *statnet* (Handcock *et al.* 2008) Todo ello dentro del programa de software libre *R 3.4.0*. (R Core Team 2013), que los ha convertido en matrices relacionales, correspondientes a las distintas ventanas temporales y utilizando las medidas de similitud de Jaccard y Brainerd-Robinson. A continuación se ha procedido a importar los datos al programa *GEPHI 0.9.1*. (Bastian *et al.* 2009), que permite la visualización de las matrices relacionales en forma de grafo, así como el análisis de los mismos a través del cálculo de métricas estadísticas. Este programa es de software libre (*GNU General Public License v.3*), lo que permite mayor flexibilidad. En nuestro caso se ha optado por estudiar estas métricas:

- N.º de nodos.
- N.º de aristas.
- Coeficiente de Clustering.
- Densidad de Grafo.

- Longitud de camino medio
- Intermediación media, para la región del Bajo Ebro.

El motivo principal por el que se han escogido estas métricas estriba en la relación que tienen con la cohesión social y estabilidad, en los análisis de redes sociales, especialmente el coeficiente de clustering (Wasserman & Faust 1994). Además se ha puesto el foco en el comportamiento de los nodos, que tienen información geográfica, comparando los valores de NTR obtenidos en el artículo, con los de clustering y densidad calculados en este trabajo.

3.2 RESULTADOS

El primero de los datos que analizaremos es el tamaño de la red, o cantidad de nodos. Hay tres fases claramente diferenciadas: 7600-7300 BP crecimiento sostenido de la red, 7300-6900 BP estabilización y 6900-6800 BP decrecimiento. Se observa una tendencia ascendente en el tamaño de la red desde el momento inicial, que tiene su máximo en la ventana 7200-7100, momento a partir del cual comienza a decrecer, hasta el momento final. El tamaño de la red (nº de nodos) es el mismo para todas las medidas de similitud, lo que varía es el número de aristas, o relaciones generadas.

Los cálculos sobre las diferentes medidas de similitud (Figuras 26, 27 y 28) y 30) muestran cierta homogeneidad entre ellas, especialmente en la densidad, siendo el clustering el que presenta más variabilidad. La densidad nos indica la proporción del número de relaciones en la red relativas al total y depende del tamaño de la red. Se puede comprobar que la densidad muestra un comportamiento similar con las tres medidas (Jaccard, Brainerd-Robinson y Simple coincidencia), con una fuerte caída entre las dos primeras ventanas 7600-7500 y 7500-7400. En la tercera ventana repunta y comienza una tendencia creciente, aunque oscilante, para acabar decreciendo de forma tímida en la última ventana temporal (6800-6700). Sus líneas de tendencia muestran comportamientos similares, con un descenso más acusado en el Jaccard 25.

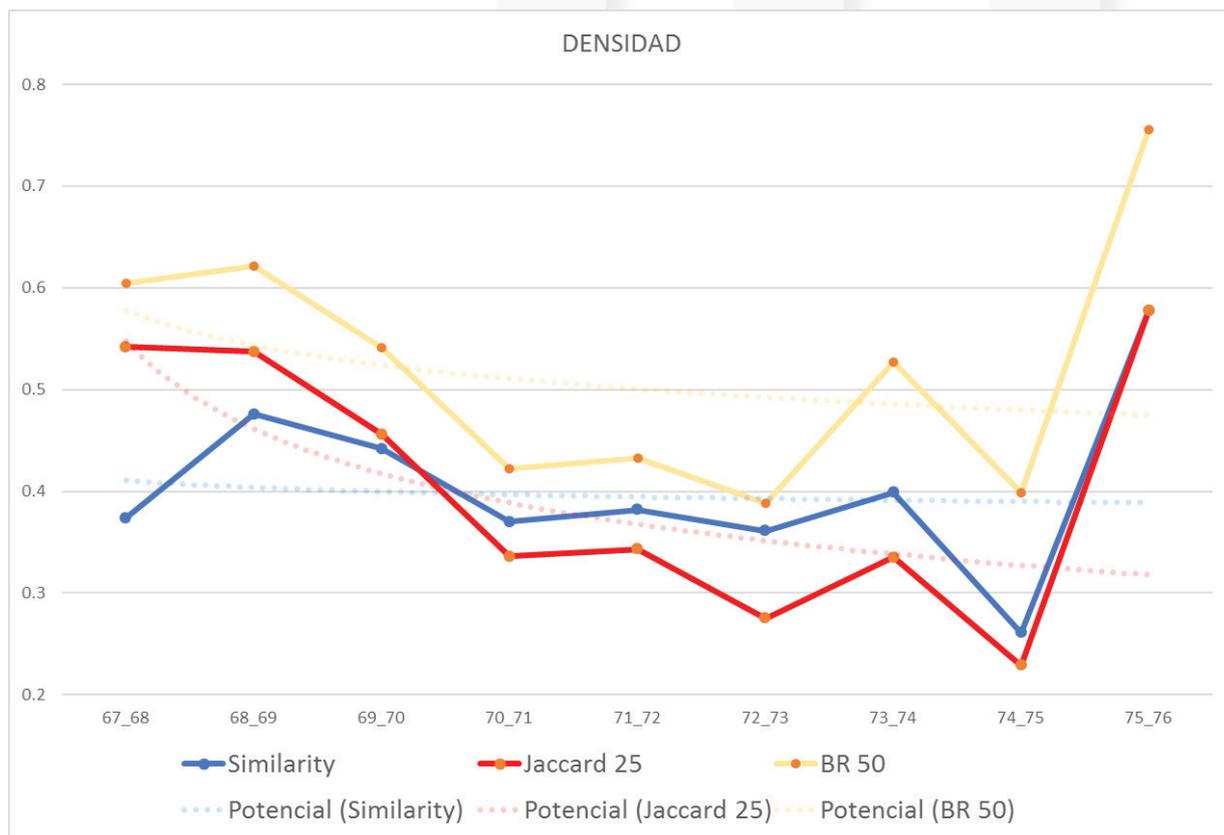


Figura 26. Valores de densidad para las tres medidas de similitud en las distintas ventanas temporales, con su línea de tendencia (Elaboración propia)

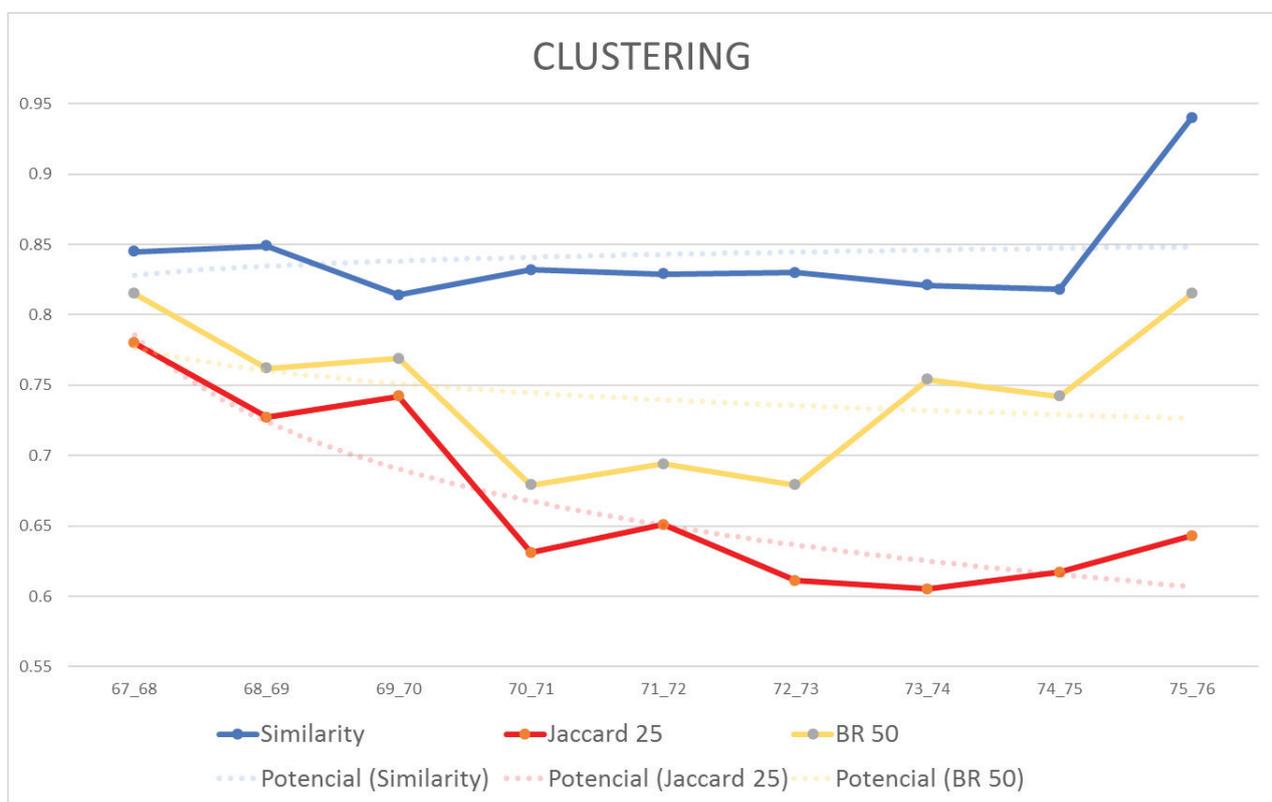


Figura 27. Valores de clustering para las tres medidas de similitud en las distintas ventanas temporales, con sus líneas de tendencia (Elaboración propia)

El clustering mide la densidad de conexiones entre los vecinos directos de un usuario. Las redes de mundo pequeño suelen tener un clustering más alto. En el caso que nos ocupa, la simple coincidencia es la que difiere más respecto a las otras, reflejando unos valores de mayor magnitud que Jaccard y Brainerd-Robinson. Por otra parte Jaccard y Brainerd-Robinson muestran unos valores semejantes, con poca variación entre ellos y en los que se aprecia una primera tendencia descendente, que cambia en la ventana 7200-7100, momento a partir del cual comienza un crecimiento sostenido aunque irregular, hasta el final. La única discrepancia entre estas dos medidas de similitud se produce en la ventana 7400-7300, que en el Jaccard 25 presenta el mínimo, mientras que en Brainerd-Robinson repunta.

SIMPLE COINCIDENCIA

| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Nodos</i> | 20 | 28 | 38 | 38 | 48 | 38 | 29 | 23 | 10 |
| <i>Aristas</i> | 71 | 180 | 311 | 260 | 431 | 254 | 162 | 66 | 26 |
| <i>Density</i> | 0.374 | 0.476 | 0.442 | 0.37 | 0.382 | 0.361 | 0.399 | 0.261 | 0.578 |
| <i>Clustering</i> | 0.845 | 0.849 | 0.814 | 0.832 | 0.829 | 0.83 | 0.821 | 0.818 | 0.94 |

JACCARD 25

| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Nodos</i> | 20 | 28 | 38 | 38 | 48 | 38 | 29 | 23 | 10 |
| <i>Aristas</i> | 103 | 203 | 338 | 236 | 387 | 193 | 136 | 58 | 26 |
| <i>Density</i> | 0.542 | 0.537 | 0.456 | 0.336 | 0.343 | 0.275 | 0.335 | 0.229 | 0.578 |
| <i>Clustering</i> | 0.78 | 0.727 | 0.742 | 0.631 | 0.651 | 0.611 | 0.605 | 0.617 | 0.64 |

BRAINERD-ROBINSON 50

| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Nodos</i> | 20 | 28 | 38 | 38 | 48 | 38 | 29 | 23 | 10 |
| <i>Aristas</i> | 115 | 235 | 380 | 297 | 488 | 273 | 214 | 101 | 34 |
| <i>Density</i> | 0.605 | 0.622 | 0.541 | 0.422 | 0.433 | 0.388 | 0.527 | 0.399 | 0.756 |
| <i>Clustering</i> | 0.815 | 0.762 | 0.769 | 0.679 | 0.694 | 0.679 | 0.754 | 0.742 | 0.815 |

Figura 28. Datos calculados con **Simple coincidencia**, **Jaccard 25** y **Brainerd-Robinson 50** (Elaboración propia)

Las líneas de tendencia de Jaccard y Brainerd-Robinson muestran comportamientos similares, aunque nuevamente el Jaccard sufre un descenso más acusado, pero lo más destacable es el comportamiento con tendencia creciente que refleja la simple coincidencia. Esto puede deberse a que ésta sólo refleja el número de estilos que dos nodos tienen en común en términos absolutos, no cuantos items en cada uno de ellos ni la proporción, por lo que, en este caso la definición en los resultados para esta medida de similitud es menor.

Estos resultados reflejan la menor definición que nos proporciona en nuestro caso la simple coincidencia a la hora de evaluar métricas tales como el clustering, ya que únicamente tiene en cuenta el número total de estilos presentes en cada nodo. Debido a ello, se antoja menos preciso que las otras medidas para paquetes de datos de este tipo. Así pues nos centraremos en las otras dos medidas de similitud: Jaccard 25, utilizado en el artículo y el Brainerd-Robinson 50. Se eligió el valor umbral de 50 para Brainerd-Robinson de forma empírica. Se probó para varios valores umbral, pero los valores diferían de los obtenidos con Jaccard 25, creando muchas menos aristas y con ello una red mucho menos conectada, con varios componentes inconexos entre sí, por lo que se decidió usar el BR 50, que sólo difiere en mayor medida en las ventanas 72-74 y 74-73 (Figura 29). Hay que destacar que el BR 75 proporciona unos valores más similares al Jaccard 25 en las ventanas temporales iniciales y finales, mientras que se desvía mucho en las centrales.

| BR 50 | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
| <i>Nodos</i> | 20 | 28 | 38 | 38 | 48 | 38 | 29 | 23 | 10 |
| <i>Aristas</i> | 115 | 235 | 380 | 297 | 488 | 273 | 214 | 101 | 34 |

| BR 75 | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
| <i>Nodos</i> | 20 | 28 | 38 | 38 | 48 | 38 | 29 | 23 | 10 |
| <i>Aristas</i> | 69 | 139 | 229 | 151 | 242 | 128 | 109 | 46 | 22 |

| JACCARD 25 | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
| <i>Nodos</i> | 20 | 28 | 38 | 38 | 48 | 38 | 29 | 23 | 10 |
| <i>Aristas</i> | 103 | 203 | 338 | 236 | 387 | 193 | 136 | 58 | 26 |

Figura 29. Comparación de nodos y aristas entre valores umbral, BR 50-75 y Jaccard 25 (Elaboración propia).

En la siguiente parte se ha procedido a analizar los valores de NTR (Fig. 30) obtenidos en el artículo. Los valores de NTR presentan un descenso progresivo, con caídas significativas en dos hitos: 7400 -7300 y 7100- 7000. Se puede ver que hay un incremento progresivo en la desaparición de nodos, a medida que pasa el tiempo, con un periodo central de cierta estabilidad (Bernabeu *et al.* 2017, pp. 8–9).

NTR

| | 67_68 | 68_69 | 69_70 | 70_71 | 71_72 | 72_73 | 73_74 | 74_75 | 75_76 |
|-----|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| NTR | -0.4500 | -0.3210 | 0.0000 | -0.2370 | 0.2080 | 0.2110 | 0.2410 | 0.5220 | 0.6000 |

Figura 30. Datos de NTR extraídos del artículo para su comparación con los datos obtenidos en el trabajo (Bernabeu *et al.* 2017: 9)

La longitud de camino media (Fig. 31) es la otra medida, junto al clustering, que se debe observar para analizar la posibilidad de una estructura de mundo pequeño (Albert & Barabási 2002). Esta nos habla del crecimiento en complejidad de la red, ya que a mayor conectividad y complejidad, mayor longitud de camino media. Se observa un fuerte ascenso entre 7600-7500 y 7500-7400, una caída en 7400-7300, que repunta en 7300-7200. A partir de aquí se mantiene relativamente estable hasta

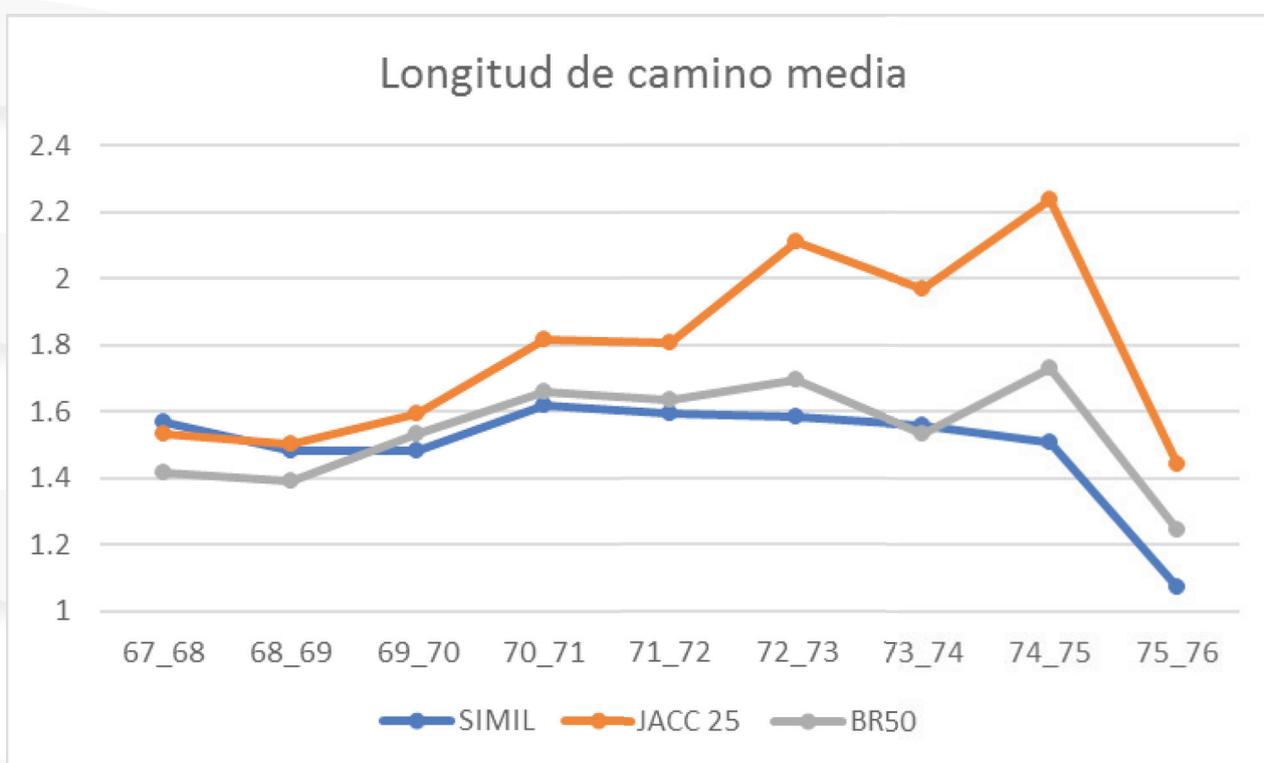


Figura 31. Datos de Longitud de camino media, calculada con **Brainerd-Robinson 50** para todas las ventanas. (Elaboración propia).

que en 7100-7000 comienza de nuevo a caer, a pesar de tener un pequeño repunte en la ventana final. Tanto BR 50 como Jaccard 25 tienen comportamientos similares y nuevamente es la simple coincidencia la que diverge ligeramente.

| Longitud de camino media | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 67-68 | 68-69 | 69-70 | 70-71 | 71-72 | 72-73 | 73-74 | 74-75 | 75-76 |
| SIMIL | 1.566 | 1.483 | 1.482 | 1.62 | 1.596 | 1.585 | 1.56 | 1.508 | 1.071 |
| JACC 25 | 1.532 | 1.505 | 1.592 | 1.818 | 1.804 | 2.111 | 1.968 | 2.234 | 1.444 |
| BR 50 | 1.416 | 1.389 | 1.531 | 1.66 | 1.636 | 1.697 | 1.534 | 1.732 | 1.244 |

El siguiente paso es estudiar la posición en la red y la localización geográfica. Para ello se procede a crear los grafos con los resultados del Brainerd-Robinson 50, Jaccard 25 y simple coincidencia (filtro 3), todos ellos sin normalizar y compararlos. En estos grafos, las aristas están representadas con tonos de gris, de más claro a más oscuro, en función del peso (asignado por cada medida de similitud). Además los nodos están localizados geográficamente, con lo que se pueden exportar para su uso en programas *SIG* o en visores tipo *Google Earth* (Fig. 32). El tamaño de los nodos indica su valor de intermediación, que ha sido calculada para cada nodo y medida de similitud, mientras que el color rojo identifica los nodos de la región del Bajo Ebro, para su comparación con los grafos del artículo (Fig. 33, 34 y 35).

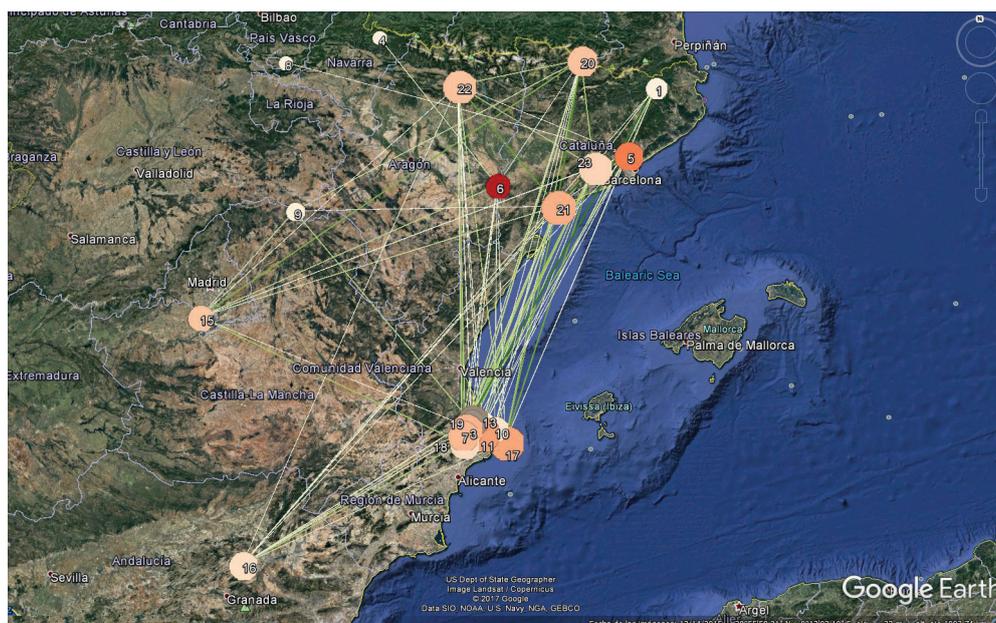


Figura 32. Geolocalización del grafo correspondiente a la ventana 7500-7500 con el programa *Google Earth*. (Elaboración propia).

SIMPLE SIMILITUD

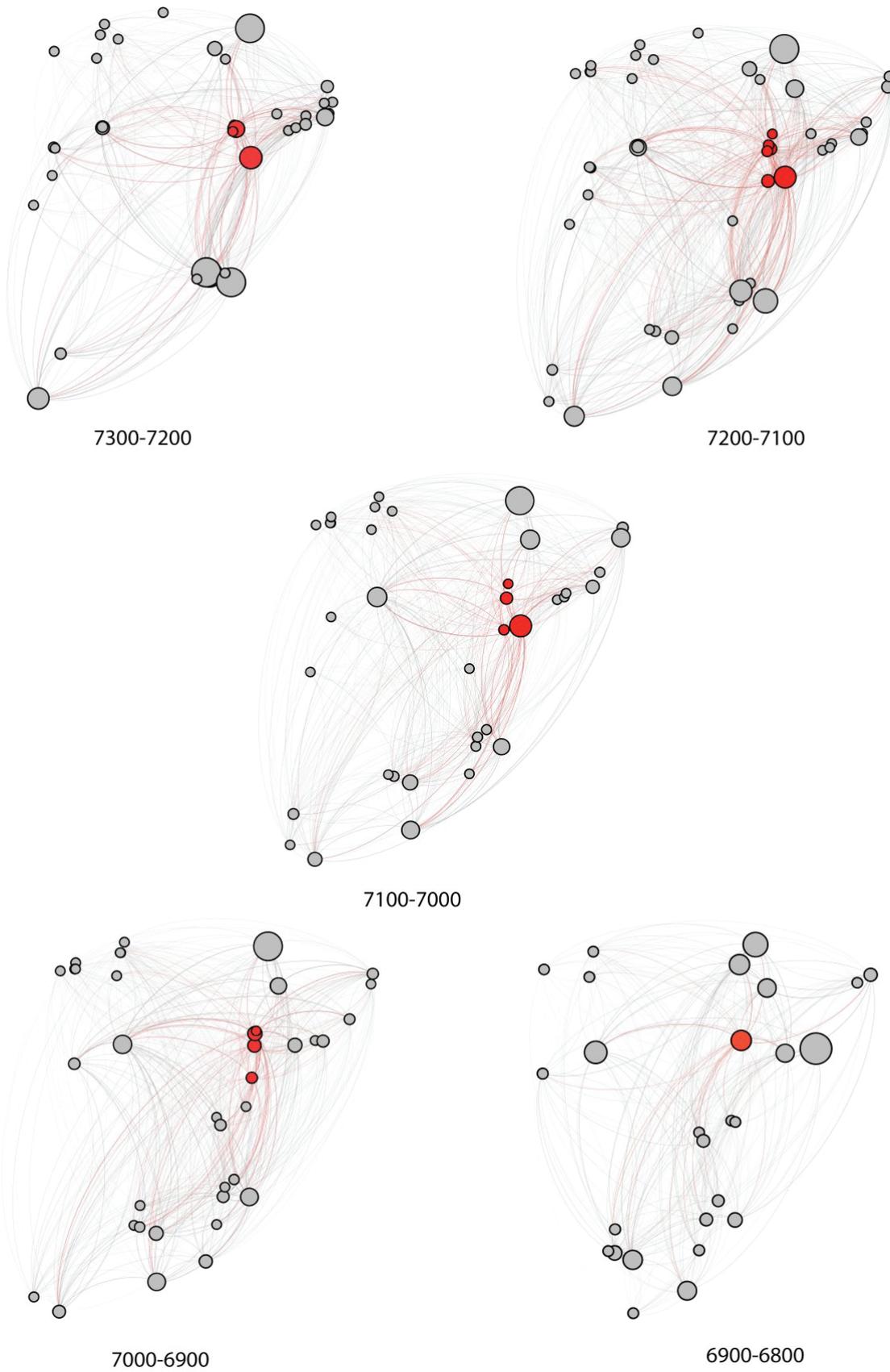


Figura 33. Grafo calculado con la simple similitud para las ventanas entre el 7300 y el 6800. El color rojo indica los nodos de la región del Bajo Ebro. El tamaño de los nodos indica la intermediación. La intensidad de las aristas indica el peso de la similitud entre dos nodos. (Elaboración propia).

JACCARD 25

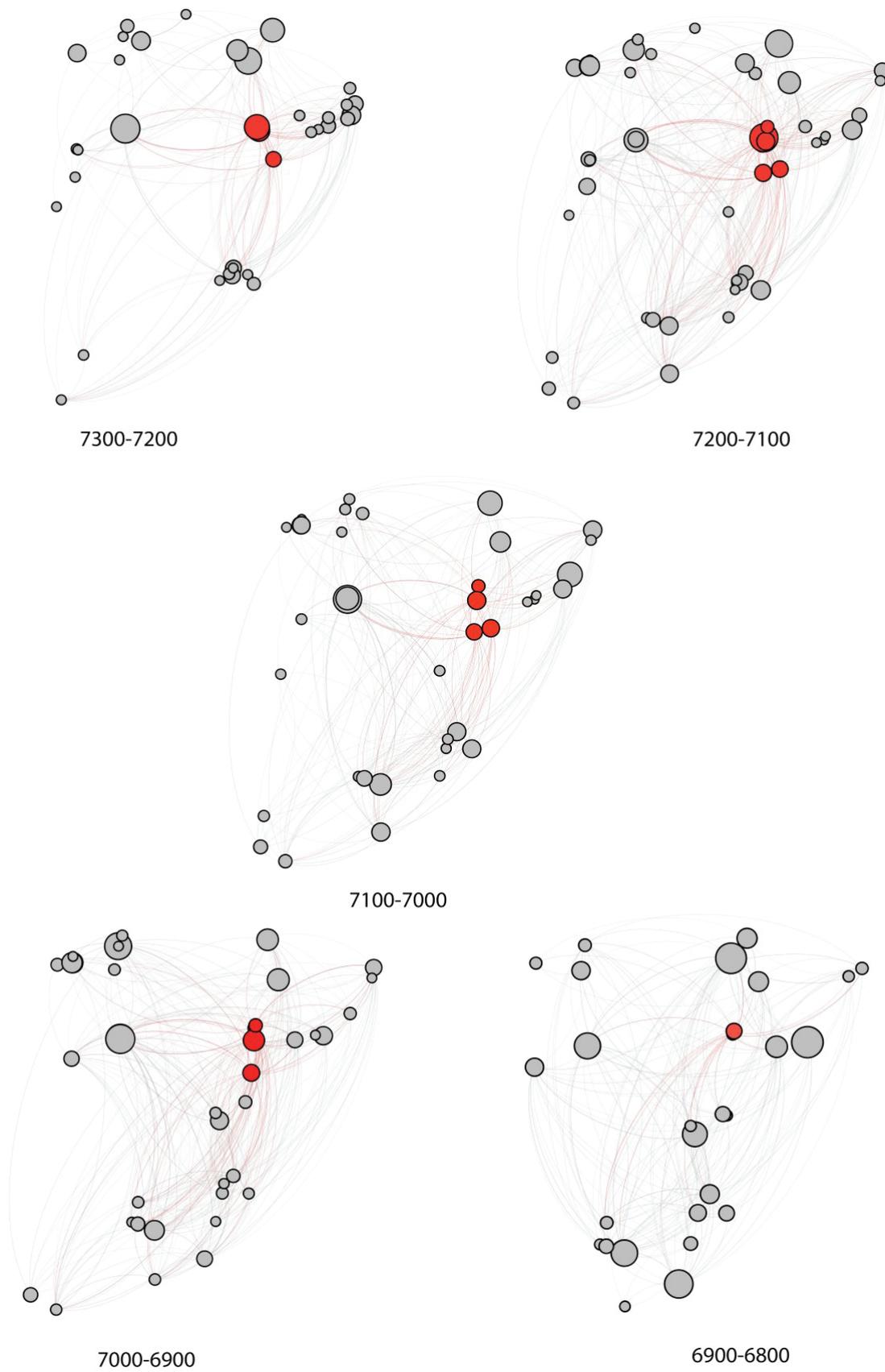


Figura 34. Grafo calculado con Jaccard 25 para las ventanas entre el 7300 y el 6800. El color rojo indica los nodos de la región del Bajo Ebro. El tamaño de los nodos indica la intermedicación. La intensidad de las aristas indica el peso de la similitud entre dos nodos. (Elaboración propia).

BRAINERD-ROBINSON
50

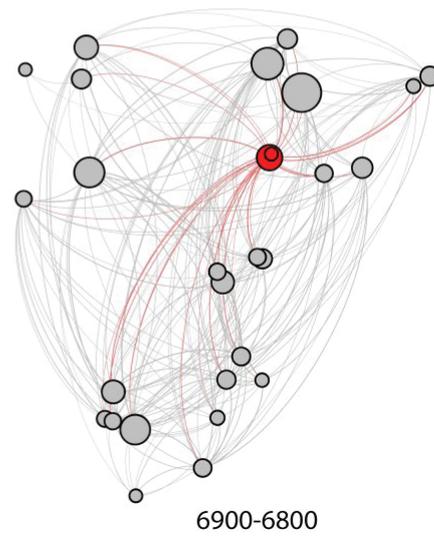
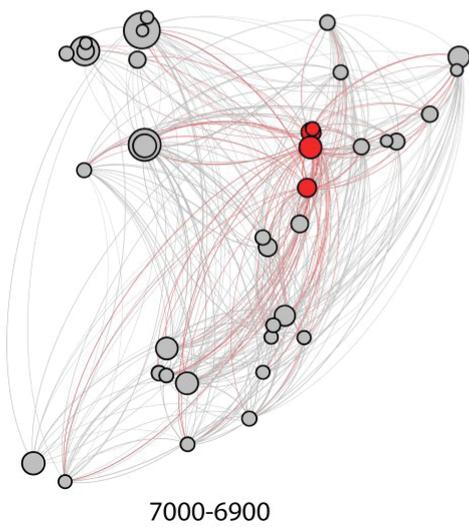
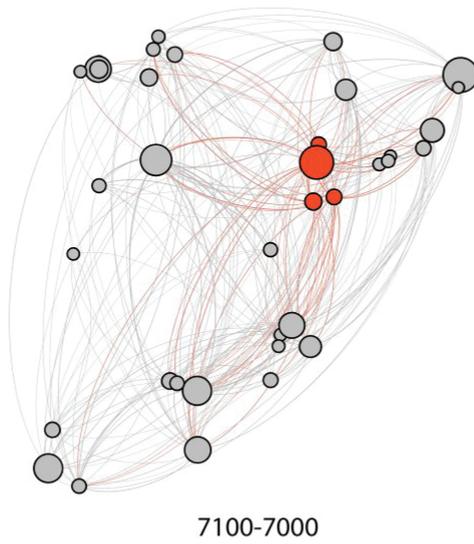
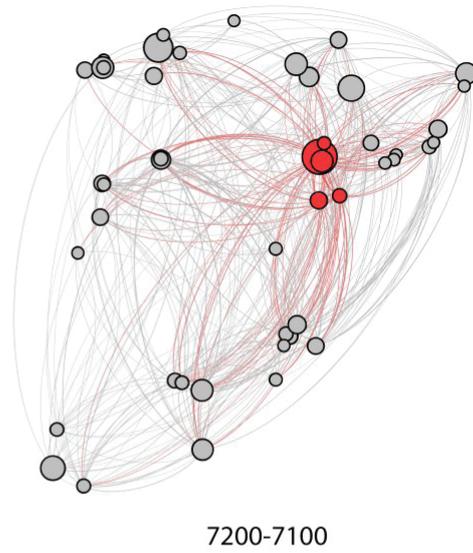
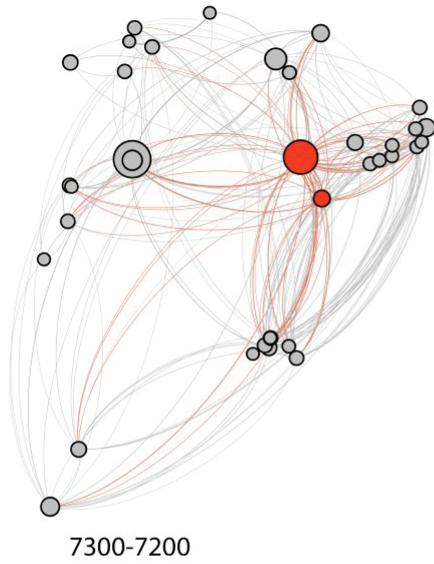


Figura 35. Grafo calculado con Brainerd-Robinson 50 para las ventanas entre el 7300 y el 6800. El color rojo indica los nodos de la región del Bajo Ebro. El tamaño de los nodos indica la intermediación. La intensidad de las aristas indica el peso de la similitud entre dos nodos. (Elaboración propia).

En los grafos se puede observar como la simple similitud crea unos grafos más densamente conectados que el Jaccard, y con unas intermediaciones para la región del bajo Ebro ligeramente divergentes. Por el contrario Brainerd-Robinson, dibuja unos grafos ligeramente más densos que Jaccard, pero con valores muy similares en la intermediación, especialmente en el Bajo Ebro.

Se ha escogido para su estudio la región del Bajo Ebro por el interesante comportamiento que muestra y por el papel de intermediación que desempeña, según los datos del artículo. Para los datos normalizados del artículo, la intermediación comienza en 7600-7500 con una tendencia creciente que alcanza su máximo en 7300-7200. A continuación hay dos caídas importantes en 7100-7000 y 6900-6800, tras las que el Ebro no parece jugar ningún papel significativo. Con nuestros datos sin normalizar, hemos calculado esta medida de intermediación media regional, para todas las medidas de similitud, en las ventanas del 7300 al 6800 (Fig. 36). Todas ellas presentan una caída continua, que indica la pérdida de intermediación de la región. Como se puede observar Jaccard y Brainerd-Robinson muestran valores muy similares, mientras que la simple coincidencia con filtro 3, a pesar de mantener una tendencia similar, difiere ligeramente de las otras dos.

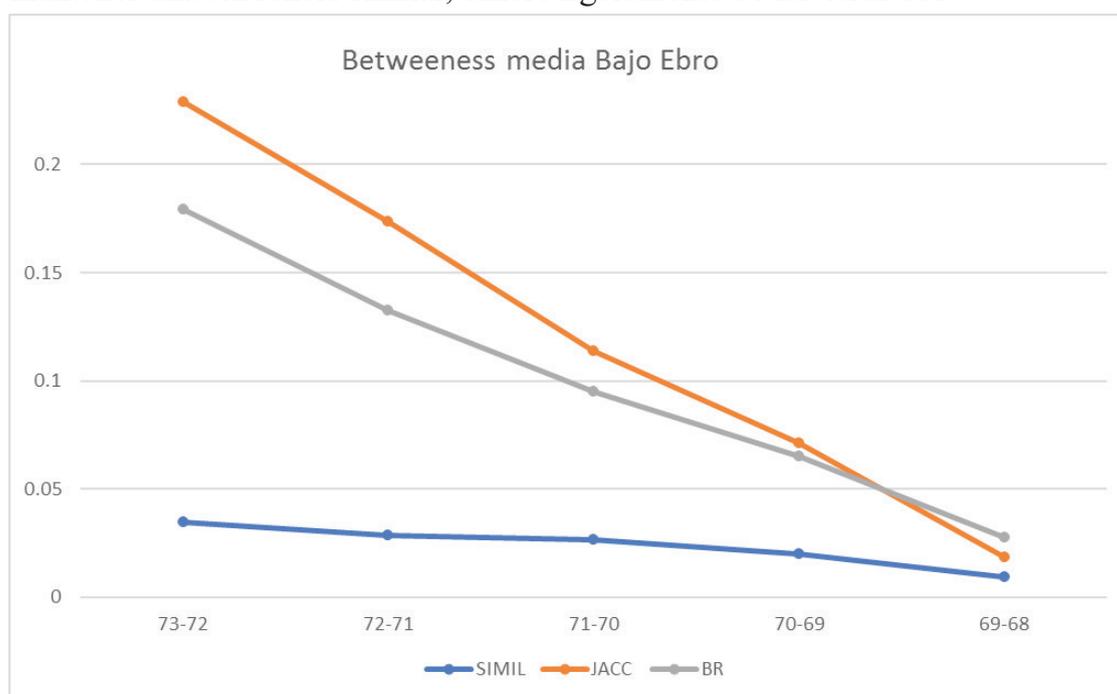


Figura 36. Datos de Intermediación media, calculada con todas las medidas de similitud para las ventanas entre el 7300 y el 6800, en la región del Bajo Ebro. (Elaboración propia).

BETWEENESS MEDIA BAJO EBRO

| | 73-72 | 72-71 | 71-70 | 70-69 | 69-68 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SIMIL | 0.03433 | 0.02848 | 0.02635 | 0.01998 | 0.00899 |
| JACC | 0.22873 | 0.17346 | 0.11385 | 0.07128 | 0.01842 |
| BR | 0.17939 | 0.13246 | 0.09484 | 0.06525 | 0.02733 |

4. CONCLUSIONES

La aproximación a las redes del pasado a partir de evidencias arqueológicas presentan varias dificultades. En el estudio de la difusión de una innovación tecnológica o un rasgo cultural los nodos, generalmente, representan lugares físicos, mientras que los enlaces muestran interacciones que vienen definidas por procesos específicos. En principio debería ser sencillo determinar si una conexión existe o no y estimar así la fuerza de esta relación. Sin embargo, en la práctica, recopilar información acerca de un tipo de interacción determinado, no siempre es viable. Una posible opción es confiar en la estadística para determinar la probabilidad asociada a la existencia de cada enlace. En este caso se tienen una serie de datos de yacimientos, a lo largo de un periodo temporal. Los trabajos previos de creación de tipologías cerámicas permiten deducir el grado de similitud cultural a lo largo del tiempo, mediante el análisis del registro arqueológico. No obstante, los enlaces establecidos a través de la evaluación de la afinidad cultural no se derivan de ninguna definición operacional. O dicho de otro modo, la similitud en sentido amplio no es fácilmente cuantificable. Existen diversas maneras de hacerlo, pero el proceso contiene una serie ineludible de decisiones subjetivas. Así pues es necesario demostrar o apuntalar con argumentos heurísticos, las decisiones tomadas de este modo (Lozano *et al.* 2017: 131–132)

El análisis de la Simple coincidencia permite obtener con facilidad una medida de similitud, que indica la cantidad absoluta de atributos coincidentes. Sin embargo esta medida no tiene en cuenta el número total de estilos presentes en cada nodo, ni la cantidad de items en cada categoría, sólo la presencia-ausencia. Esta

medida de similitud por tanto aportaría una primera idea de como se comporta la red y podría ser útil para detectar errores en los datos.

El coeficiente de Brainerd-Robinson, debido a su definición, es intuitivo y además fue desarrollado específicamente en el contexto de la arqueología para comparar semblanzas en términos de proporciones. El umbral mínimo de similitud necesario para establecer una relación que escojamos, determinará la tipología de la red. Si construimos la red en función de un umbral de similitud alto, obtendremos una red menos conectada que si lo hacemos al revés, pero aportará información concerniente a los principales agrupamientos o clusters de yacimientos, definidos de acuerdo a su ubicación geográfica. Por lo que es necesario realizar múltiples pruebas con distintos umbrales para observar el comportamiento de la red, tal como se ha realizado en este trabajo. El inconveniente de este índice estriba en el hecho de que comparar proporciones puede llevar a conclusiones equivocadas. Esto es así debido a que un reducido número de muestras puede ser el resultado de una pobre conservación, puede ser consecuencia del pequeño tamaño del área excavada o por una carencia real de los atributos considerados. Por tanto es necesario ayudarse de herramientas estadísticas para diferenciar entre estos tres casos. Otro problema gira en torno a la heterogeneidad en la cantidad de categorías de atributos, ya que este índice penaliza a los yacimientos más diversos, debido a su menor sensibilidad a las cantidades reales de los distintos atributos (Mills *et al.* 2017).

Por este motivo, los autores del artículo en el que se basa este trabajo, escogieron el coeficiente de Jaccard. Éste mide la similitud en función de la presencia-ausencia. Calcula el ratio entre las categorías que están en los dos yacimientos comparados y el número de aquellas que están en uno u otro de los sitios considerados. Aunque este índice no tiene en cuenta la heterogeneidad del tamaño de la muestra, evita que los yacimientos grandes adquieran un número masivo de conexiones.

El análisis de los resultados obtenidos en este trabajo apuntan en la misma dirección que el artículo. Se ha podido observar la convergencia entre los resultados de Brainerd-Robinson con índice 50 y Jaccard 25. No así la Simple coincidencia, que diverge ligeramente, en varias de las métricas estudiadas, como el clustering o la intermediación media en la región del Bajo Ebro. Los datos calculados de la longitud media de camino apuntan en la misma dirección que los de NTR utilizados en el artículo, que nos hablan de una primera tendencia de crecimiento positivo de la red, una estabilización y una caída final. Por tanto los resultados permiten hablar de las siguientes fases:

- Fase I: la red experimenta un gran crecimiento durante las primeras tres ventanas. La creación de nodos es alta mientras que la densidad y el agrupamiento decrecen.
- Fase II: fase de oscilación y estabilización, donde la red crece y decrece. Alcanza su tamaño máximo de red, mientras el clustering alcanza su mínimo y la densidad muestra vaivenes con un cambio de tendencia.
- Fase III: La red decrece en las últimas dos ventanas, los nodos menguan de forma clara, mientras que la densidad decrece ligeramente, el agrupamiento sube.

En base a los resultados obtenidos en la comparativa, se observa que combinar los coeficientes de representación de similitud (Simple coincidencia, Jaccard y Brainerd-Robinson) permite obtener una imagen panorámica mucho más completa. Las diferencias que surgen entre los datos de los distintos índices no indican necesariamente contradicciones, sino más bien información complementaria acerca del sistema estudiado. La similitud es un concepto abstracto, por lo que es necesario comparar objetivamente estas medidas para facilitar la elección de la medida en futuros trabajos. Por tanto la elección de un método apropiado de medir la similitud es un paso crucial en el Análisis de Redes Sociales.



La ciencia de las redes tiene un gran potencial que ofrecer a la arqueología, pero cualquier aplicación de estas herramientas y técnicas analíticas, debe sustentarse sobre una construcción de la red bien fundamentada. Esto significa que necesitamos definir los enlaces y los nodos de forma apropiada y el patrón de conectividad debe obtenerse utilizando unas medidas de similitud adecuadas al paquete de datos que se utilice. Tras ello necesitaremos aprender a extraer información útil de estas redes probabilísticas. La estadística debería por ello ayudar a integrar las técnicas de la ciencia de las redes así como también deberíamos ser capaces de cuantificar el grado de fiabilidad de nuestras propias conclusiones.

5. GLOSARIO

Agregación o agrupación: ver clusters

Arcos: se define como la línea que existe entre un par de nodos, que representa algún tipo de relación entre ellos. Existen muchos sinónimos para referir a este concepto: conexión, relación, enlace y línea. Pueden ser direccionales o no direccionales, ponderado o no ponderado. Se suele usar el término arco para denominar a los enlaces direccionales.

Brainerd-Robinson: (ver medidas de similitud) medida de similitud que compara las diferencias analizadas en función de la diversidad de atributos de una entidad. Normalmente cuantifica la similitud en un valor que va entre 0 y 200.

Camino: de un nodo a otro, es una secuencia de nodos conectados por aristas, en la que no figura ningún nodo repetido.

Camino mínimo: entre dos nodos, es aquel de menor longitud de entre todos los posibles caminos entre ambos.

Centralidad: en un grafo. Esta medida referida a un nodo, nos indica su importancia relativa en la red, de la que forma parte. Esta variable puede ayudar a determinar el impacto/influencia/importancia que tiene ese nodo en el resto de la red. Es uno de los conceptos más estudiados en SNA. La centralidad no es un atributo intrínseco de los nodos, sino que depende estrictamente de su localización en la red. Existen diversas métricas de centralidad que se pueden estudiar.

Centralidad del vector propio: mide la influencia de un nodo en la red. Los nodos que tienen un valor alto en esta variable de centralidad, están conectados a muchos nodos que a su vez están bien conectados, por lo que son buenos candidatos para difundir información. Es una medida radial de volumen.

Cercanía (“closeness”): calcula la suma o el promedio de las distancias más cortas desde un nodo hacia todos los demás. Mide la accesibilidad de un nodo en la

red. Es una medida radial de longitud.

Coefficiente de agrupamiento o agregación: representa la probabilidad media de que dos nodos estén conectados a un tercer nodo al que ellos mismos están conectados. Está relacionado con el principio de transitividad en ciencias sociales (un amigo de un amigo es mi amigo).

Coefficiente de clustering: ver coeficiente de agrupamiento

Conector principal: nodo de los más conectados o elemento de una red que recibe una cantidad de conexiones sustancialmente mayor a los elementos normales (grado mucho más alto que los demás nodos).

Cluster: Cúmulo, grupo de elementos.

Conexión: abstracción utilizada en redes complejas para indicar la presencia de una interacción entre dos nodos o elementos cualesquiera.

Diámetro: es la máxima distancia entre dos nodos cualesquiera de la red.

Direccionalidad: es un atributo de los arcos que indica asimetría en la relación existente entre dos nodos.

Distancia: entre dos nodos se define como el número de enlaces del camino más corto que los conecta.

Distribución de grado: es lo que se tendría si se hiciera un recuento en una red del número de nodos por cada grado que se entendería como la distribución de probabilidad de que se de un grado determinado en la red.

Grado: el grado de un nodo viene definido por el número de arcos que inciden sobre él. La media de grados de una red es la suma de los grados dividida por el número de nodos. En una red dirigida el grado de salida un nodo indica el número de arcos que salen del nodo, mientras que el grado de entrada indica los que entran.

Grafo: un conjuntos de vértices o nodos unidos por una serie de aristas o

arcos que permiten representar relaciones entre elementos de un conjunto. Permiten estudiar las interrelaciones entre unidades que se relacionan unas con otras. Se representa gráficamente como un conjunto de puntos (nodos) unidos por líneas (conexiones).

Grafo aleatorio: ver Red aleatoria.

Jaccard: (ver medidas de similitud) medida de similitud que es el ratio del número de coincidencias respecto al número de atributos (que no sean cero) comunes a todos, para un par de entidades dado. Compara el tamaño del grupo de atributos comunes entre dos entidades, con el tamaño del grupo de atributos no triviales. Se cuantifica en un valor que suele estar entre 0 y 100.

Ley de Potencia: definida como una relación matemática entre dos entidades donde la frecuencia de una entidad varía como una potencia de la segunda entidad. Suele asociarse a la descripción de la distribución de las redes libres de escala. Ello implica que unos pocos nodos tienen un grado mucho más alto que la mayoría de los otros nodos (ver Hub).

Homofilia: (“amor por lo semejante”). Es la tendencia que tienen los individuos a asociarse y relacionarse con otros similares. La presencia de homofilia se ha descubierto en gran cantidad de estudios de redes. Es muy útil, ya que las personas con relaciones homofílicas comparten características comunes (educación, creencias, valores, posición social), lo que las interacciones entre ellas sean mucho más fluidas.

Homogeneidad: característica de un grafo. Se da cuando todos sus elementos tienden a estar conectados con un número muy similar de conexiones.

Hub: ver Conector principal

Intermediación (betweenness centrality): es una medida que cuantifica la frecuencia o el número de veces que un nodo actúa como un puente a lo largo del

camino más corto entre otros dos nodos. La idea intuitiva es que si se eligen dos nodos al azar, y luego también al azar uno de los eventuales posibles caminos más cortos entre ellos, entonces los nodos con mayor intermediación serán aquellos que aparezcan con mayor probabilidad dentro de este camino. Los nodos que poseen una posición de intermediarios de alguna manera son también controladores o reguladores del flujo de información.

Longitud de camino: representa el número de arcos recorridos por un camino.

Longitud promedio del camino, o longitud de camino media, es la cantidad media de conexiones que hay que atravesar para llegar de un nodo cualquiera de la red a otro, a través del camino más corto, para todos los posibles pares de la red. Da una medida de la eficiencia en el transporte de información a través de una red.

Matrices de adyacencia: Forma de representación de los datos de una red, en la que se describen las relaciones de un nodo con los más próximos, en forma de filas y columnas que indican si existe un arco entre un par de nodos.

Medidas de similitud: métodos que se utilizan para cuantificar el índice de similitud entre dos entidades.

Motivo: dentro de un grafo es un patrón (o sub-grafo) que se repite dentro de ese grafo.

Nodo: en grafos, entidad discreta del sistema, que se relaciona con otros como él. También se suele utilizar el término actor o vértice.

Peso: es un atributo de los arcos que indica un valor asociado a la relación existente entre dos nodos. Suele ser un número real.

Propiedad emergente (emergencia): Patrón general, más amplio que la suma de las partes, y que permite que el sistema pueda actuar con coherencia sin el dominio de una instancia central. Para los individuos del sistema, estas propiedades

son invisibles.

PPA (Proximal Point Analysis): Es un método de análisis de redes que se basa principalmente en decidir que nodos de la red tienen un papel más importante en las interacciones regionales. Se determina por la conectividad, es decir el número de enlaces que un yacimiento tiene en su red de vecinos.

Puntuaciones-z: La mayoría de las pruebas estadísticas comienzan al identificar una hipótesis nula. Las puntuaciones z y los valores p devueltos por las herramientas de análisis, le dicen si puede rechazar esa hipótesis nula o no. Por lo general, ejecutará una de las herramientas de análisis, con la esperanza de que la puntuación z y el valor p indiquen que puede rechazar la hipótesis nula, ya que indicaría que en lugar de un patrón aleatorio, sus entidades (o los valores asociados con las entidades) exhiben agrupamiento o dispersión estadísticamente significativa.

Red: ver Grafo

Red aleatoria: grafo generado mediante algún proceso aleatorio

Red bipartita: ver red bimodal.

Red de mundo pequeño: tipo de grafo en el que la mayoría de los nodos no son vecinos entre sí y a pesar de lo cual la mayoría de los nodos puede ser alcanzado desde cualquier origen en un número corto de saltos.

Red bimodal: es una red en la que hay definidos dos grupos distintos de nodos, a los que se denomina modos. En este tipo de redes un nodo sólo puede conectarse con un nodo del otro grupo. Se conocen también como redes bipartitas.

Red egocéntricas: es una red que están centradas en un sólo nodo llamado ego y representan los nodos a los que está directamente conectado y los enlaces que los unen. También pueden centrarse en un conjunto de actores y otro de eventos.

Red descentralizada: grafo en el que no existe un único nodo central sino un centro colectivo de conectores. La caída de uno de los nodos centralizadores conlleva la desconexión de uno o más nodos del conjunto de la red, mientras que la caída del cúmulo de nodos centrales produciría la ruptura de la red.

Red distribuida: grafos en los que todos los nodos se conectan entre sí sin pasar por un centro local. Estos tipos de red son sólidos frente a ataques, pero no filtran la información.

Red heterogénea: ver Red libre de escala

Red jerarquizada o centralizada: grafo en el que todos los nodos menos uno son periféricos y sólo pueden comunicarse a través del nodo central. La caída del nodo central priva de flujo a los demás.

Red libre de escala: tipo de red compleja en la que algunos nodos están altamente conectados, mientras que la mayoría mantiene un nivel de conectividad muy bajo.

Red ponderada: es una red que contiene un grupo de nodos y otro de arcos con peso asociado.

Red regular: que tienen que ver con el orden debido a algún tipo de restricción geométrica natural, que exige recorrer la geografía de la red para llegar de un punto a otro. O lo que es lo mismo, la distancia que se debe recorrer, es comparable al tamaño total de la red.

Red unimodal: redes que consideran un único conjunto de actores. Son las más frecuentes.

Simple coincidencia: (ver medidas de similitud) medida de similitud que indica el ratio del número de coincidencias de todos los atributos. Entre dos entidades dadas, muestra cuantos atributos están presentes en ambas.



SNA (Social Network Analysis): es el proceso de investigar las estructuras sociales a través del uso de la teoría de grafos y la teoría de redes. Caracteriza a las estructuras de grafos en términos de nodos (elementos del grafo) y conexiones (enlaces, relaciones o interacciones).

Umbral de percolación: punto a partir del cual, los elementos de un sistema tienden a estar ligados entre sí formando una gran red. Marca la transición entre un mundo aislado, formado por pequeñas comunidades, y un mundo conectado formado por elementos bien conectados entre sí.

Valor umbral: valor a partir del cual se realiza una discriminación (positiva o negativa) de la naturaleza que se decida.

6. BIBLIOGRAFÍA

ALBERT, R. & BARABÁSI, A. (2002): Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, **74**, 47–97, 10.1103/RevModPhys.74.47.

ARRANZ-OTAEGUI, A., LÓPEZ-SÁEZ, J.A., ARAUS, J.L., PORTILLO, M., BALBO, A., IRIARTE, E., GOURICHON, L., BRAEMER, F., ZAPATA, L. & IBÁÑEZ, J.J. (2017): Landscape transformations at the dawn of agriculture in southern Syria: Plant-specific responses to the impact of human activities and climate change. *Quaternary Science Reviews*, **158**, 145–163, 10.1016/j.quascirev.2017.01.001.

BARABASI, A. & ALBERT, R. (1999): Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, **286**, 509–512, 10.1126/science.286.5439.509.

BARTON, C.M. (2014): Complexity, Social Complexity, and Modeling. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **21**, 306–324, 10.1007/s10816-013-9187-2.

BARTON, C.M., ULLAH, I.I.T., BERGIN, S.M., MITASOVA, H. & SARJOUGHIAN, H. (2012): Looking for the future in the past: Long-term change in socioecological systems. *Ecological Modelling*, **241**, 42–53, 10.1016/j.ecolmodel.2012.02.010.

BASTIAN, M., HEYMANN, S. & JACOMY, M. (2009): Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks.

BENKLER, Y. (2006): *The wealth of networks: how social production transforms markets and freedom*. New Haven: Yale University Press, 515 pp.

BENTLEY, R.A. & MASCHNER, H.D.G. eds. (2003): *Complex systems and archaeology*. Salt Lake City: Univ. of Utah Press, 151 pp.

BENTLEY, R.A., MASCHNER, H.D.G. & CHIPPINDALE, C. (2009): *Handbook of archaeological theories*. Lanham, MD: Altamira Press.

BERNABEU AUBÁN, J., GARCÍA PUCHOL, O., BARTON, M., MCCLURE, S. & PARDO GORDÓ, S. (2016): Radiocarbon dates, climatic events, and social dynamics during the Early Neolithic in Mediterranean Iberia. *Quaternary International*, **403**, 201–210, 10.1016/j.quaint.2015.09.020.

BERNABEU, J., GARCÍA PUCHOL, O., PARDO, S., BARTON, M. & MCCLURE, S.B. 2014. AEA 2012 Conference Reading: Socioecological dynamics at the time of Neolithic transition in Iberia. *Environmental Archaeology*, **19**, 214–225, 10.1179/1749631414Y.0000000032.

BERNABEU, J., LOZANO, S. & PARDO-GORDÓ, S. (2017): Iberian Neolithic Networks: The Rise and Fall of the Cardial World. *Frontiers in Digital Humanities*, **4**, 10.3389/fdigh.2017.00007.

BERNABEU, J., MORENO, A. & BARTON, C. (2012): Complex systems, social networks and the evolution of social complexity. *In The Prehistory of Iberia: Debating Early Social Stratification and the State*. Routledge, 53–73.

BORGATTI, S.P. (2005): Centrality and network flow. *Social Networks*, **27**, 55–71, 10.1016/j.socnet.2004.11.008.

BRAINERD, G.W. (1951): The Place of Chronological Ordering in Archaeological Analysis. *American Antiquity*, **16**, 301–313, 10.2307/276979.

BRANDES, U., ROBINS, G., MCCRANIE, A. & WASSERMAN, S. (2013): What is network science? *Network Science*, **1**, 1–15, 10.1017/nws.2013.2.

BRAUDEL, F. (1976): *El Mediterraneo y el mundo mediterraneo en la época de Felipe II. T. 1: [...]*. 2. ed. Madrid: Fondo de Cultura Económica, 858 pp.

BRUGHMANS, T. (2010): Connecting the Dots: Towards Archaeological Network Analysis. *Oxford Journal of Archaeology*, **29**, 277–303, 10.1111/j.1468-0092.2010.00349.x.

BRUGHMANS, T. & POBLOME, J. (2012): Pots in space: understanding Roman pottery distribution from confronting exploratory and geographical network analyses. *In New Worlds out of Old Texts: Developing Techniques for the Spatial Analysis of Ancient Narratives*.

BRUGHMANS, T. (2013): Thinking Through Networks: A Review of Formal Network Methods in Archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **20**, 623–662, 10.1007/s10816-012-9133-8.

CAVALLI-SFORZA, L.L. & FELDMAN, M.W. (1981): *Cultural transmission and evolution: a quantitative approach*. Princeton: Princeton University Press, 388 p.

COLLAR, A. (2007): Network Theory and Religious Innovation. *Mediterranean Historical Review*, **22**, 149–162, 10.1080/09518960701539372.

COLLAR, A., COWARD, F., BRUGHMANS, T. & MILLS, B.J. (2015): Networks in Archaeology: Phenomena, Abstraction, Representation. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **22**, 1–32, 10.1007/s10816-014-9235-6.

DIEZ CASTILLO, A. (2017): JaccaRch: Calculates Jaccard distance and prepares a Gephi ready file.

DRAY, S. & DUFOUR, A.B. (2007): The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of Statistical Software.*, **22**, 1–20.

ERDÖS, P. & RENYI, A. (1959): On Random Graphs I. *Publicationes Mathematicae*, **6**, 290–297.

FERNÁNDEZ-LÓPEZ DE PABLO, J. & BARTON, C.M. (2015): Bayesian Estimation Dating of Lithic Surface Collections. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **22**, 559–583, 10.1007/s10816-013-9198-z.

GARCÍA, D. (2013): Arqueología evolutiva y filogenética cultural. *Complutum*, **23**, 69–92, 10.5209/rev_CMPL.2012.v23.n2.40876.

GRAHAM, S. (2006a): *Ex figlinis: the network dynamics of the Tiber Valley brick industry in the hinterland of Rome*. Oxford: John and Erica Hedges, 156 pp.

GRAHAM, S. (2006b): Networks, agent-based models and the Antonine itineraries: implications for Roman archaeology. *Journal of Mediterranean Archaeology*, **19**, 45–64.

GRANDJEAN, M. (2015): GEPHI – Introduction to Network Analysis and Visualization, *Actualités, Humanités & Société*, Available at: <http://www.martingrandjean.ch/gephi-introduction/>.

HANDCOCK, M., HUNTER, D., BUTTS, C. & MORRIS, M. (2008): Statnet: Software Tools for the Representation, Visualization, Analysis and Simulation of Network Data. *Journal of Statistical Software*, **24**, 1–11.

HOFSTADTER, D. (1999): *Gödel, Escher, Bach: an eternal golden braid*. 20th anniversary ed. New York: Basic Books, 23 pp.

IBAÑEZ, J.J., ORTEGA, D., CAMPOS, D., KHALIDI, L. & MENDEZ, V. (2015): Testing complex networks of interaction at the onset of the Near Eastern Neolithic using modelling of obsidian exchange. *Journal of The Royal Society Interface*, **12**, 20150210–20150210, 10.1098/rsif.2015.0210.

IRWIN-WILLIAMS, C. (1977): A network model for the analysis of prehistoric trade. *Exchange systems in Prehistory*, **9**, 141–151.

JACCARD, P. (1912): The distribution of the flora in the Alpine zone.1. *New Phytologist*, **11**, 37–50, 10.1111/j.1469-8137.1912.tb05611.x.

KNAPPETT, C., EVANS, T. & RIVERS, R. (2008): Modelling maritime interaction in the Aegean Bronze Age. *Antiquity*, **82**, 1009–1024.

KOHLER, T.A. (2011): Complex Systems and Archaeology. *SFI Working Paper*. Sante Fe Institut.

LOZANO, S., PRIGNANO, L. & MORER, I. (2017): The weird, wired past. The challenges of applying network science to archaeology and ancient history. *Economía romana: nuevas perspectivas = The roman economy: new perspectives*. 125–149.

MCPHERSON, M., SMITH-LOVIN, L. & COOK, J.M. (2001): Birds of a Feather: Homophily in Social Networks. *Annual Review of Sociology*, **27**, 415–444, 10.1146/annurev.soc.27.1.415.

MESOUDI, A. (2011): An experimental comparison of human social learning strategies: payoff-biased social learning is adaptive but underused. *Evolution and Human Behavior*, **32**, 334–342, 10.1016/j.evolhumbehav.2010.12.001.

MILGRAM, S. (1967): An Experimental Study of the Small World Problem. *Psychology Today*, **2**, 60–67.

MILLS, B., BRANDES, U., HABIBA & ATHENSTADT, J. (2017): Social Networks and Similarity of Site Assemblages. *Journal of Archaeological Sciences*. (En revisión)

MILLS, B.J., CLARK, J.J., PEEPLES, M.A., HAAS, W.R., ROBERTS, J.M., HILL, J.B., HUNTLEY, D.L., BORCK, L., BREIGER, R., AARON C. & SHACKLEY M. (2013): Transformation of social networks in the late pre-Hispanic US Southwest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 5785–5790, 10.1073/pnas.1219966110.

MITCHELL, M. (2009): *Complexity: a guided tour*. New York: Oxford University Press, 349 pp.

MIZOGUCHI, K. (2009): Nodes and edges: A network approach to hierarchisation and state formation in Japan. *Journal of Anthropological Archaeology*, **28**, 14–26, 10.1016/j.jaa.2008.12.001.

NODUS LABS. (2015): Conference Talks Content Profiling Using Text Network Analysis. *Nodus Labs* Available at: <http://noduslabs.com/cases/conference-talks-content-profiling-text-network-analysis/> [Accessed March 29, 2017].

ODLING-SMEE, J., LALAND, K.N. & FELDMAN, M.W. (2003): *Niche Construction: The Neglected Process in Evolution*. Princeton University Press.

PARDO, S. (2015): *La diversidad cultural del primer neolítico (VII Cal. BP) en el Mediterráneo occidental: un análisis desde los sistemas complejos y la simulación basada en agentes*. Universitat de València.

PASTOR-SATORRAS, R. & VESPIGNANI, A. (2001): Epidemic Spreading in Scale-Free Networks. *Physical Review Letters*, **86**, 3200–3203, 10.1103/PhysRevLett.86.3200.

PEEPLER, M. (2011): R Script for Calculating the Brainerd-Robinson Coefficient of Similarity and Assessing Sampling Error Available at: <http://www.mattpeeples.net/br.html>.

R CORE TEAM. (2013): R: A language and environment for statistical computing Available at: <http://www.R-project.org>.

RENFREW, C., DIXON, J.E. & CANN, J.R. (1969): Further Analysis of Near Eastern Obsidians. *Proceedings of the Prehistoric Society*, **34**, 319–331, 10.1017/S0079497X0001392X.

ROGERS, E. (1983): *Diffusion of innovations*. 3rd ed. New York : London: Free Press ; Collier Macmillan, 453 pp.

SAN MIGUEL, M., TORAL, R. & EGUÍLUZ, M. (2005): Redes complejas en la dinámica social. *INGURUAK, Revista vasca de Sociología y Ciencia Política*, **42**, 127–145.

SEGARAN, T. (2007): *Programming collective intelligence: building smart web 2.0 applications*. 1st ed. Beijing ; Sebastopol [CA]: O'Reilly, 334 pp.

SINDBÆK, S. (2007): The Small World of the Vikings: Networks in Early Medieval Communication and Exchange. *Norwegian Archaeological Review*, **40**, 59–74, 10.1080/00293650701327619.

SOLÉ, R. (2008): *Redes complejas: del genoma a internet*. Barcelona: Tusquets Editores.

SPORNS, O. (2011): The Non-Random Brain: Efficiency, Economy, and Complex Dynamics. *Frontiers in Computational Neuroscience*, **5**, 10.3389/fncom.2011.00005.

VAN DER LEEUW, S.E. (2004): Why Model? *Cybernetics and Systems*, **35**, 117–128, 10.1080/01969720490426803.

WASSERMAN, S. & FAUST, K. (1994): *Social network analysis: Methods and applications*. Cambridge University Press.

WATTS, D.J. (2003): *Six degrees: the science of a connected age*. 1st ed. New York: Norton, 368 pp.

WATTS, D.J. & STROGATZ, S.H. (1998): Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature*, **393**, 440–442.

WHITE, A. (2013): An Abstract Model Showing That the Spatial Structure of Social Networks Affects the Outcomes of Cultural Transmission Processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, **16**, 10.18564/jasss.2219.