

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE COMUNICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECONOMÍA Y DOCUMENTACIÓN



**VISUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN PERSONA-ORDENADOR:
PROPUESTA ALGORÍTMICA PARA LA ORDENACIÓN ESPACIAL DE
GRAFOS**

MEMORIA DE TESIS PRESENTADA POR

YUSEF HASSAN-MONTERO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR EN DOCUMENTACIÓN

DIRECTORES:

**DR. VÍCTOR HERRERO-
SOLANA**

DR. VICENTE P. GUERRERO-BOTE

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Yusef Hassan Montero
D.L.: GR 3445-2010
ISBN: 978-84-693-5200-7

GRANADA, 2010

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE COMUNICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECONOMÍA Y DOCUMENTACIÓN



**VISUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN PERSONA-ORDENADOR:
PROPUESTA ALGORÍTMICA PARA LA ORDENACIÓN ESPACIAL DE
GRAFOS**

MEMORIA DE TESIS PRESENTADA POR:

YUSEF HASSAN-MONTERO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR EN DOCUMENTACIÓN

DIRECTORES:

**DR. VÍCTOR HERRERO-
SOLANA**

DR. VICENTE P. GUERRERO-BOTE

Fdo. Yusef Hassan

Fdo. Víctor Herrero

Fdo. Vicente
P. Guerrero

Granada, 2010

A mis padres, mis hermanos y a Amal.

Agradecimientos

Somos seres sociales, y el logro, pese a quienes ingenuamente lo califican como individual, no es posible aislarlo del contexto de relaciones sociales en el que nos desarrollamos. Por tanto, quisiera comenzar este trabajo mostrando mi agradecimiento a todos aquellos que también han sido partícipes en su creación.

Gracias a Víctor Herrero y Vicente Guerrero, mis directores de tesis, por su inestimable ayuda, orientación, apoyo y por toda la confianza depositada en mi trabajo.

Gracias a Félix de Moya, por concederme la posibilidad de iniciarme y desarrollarme profesionalmente en el grupo de investigación que dirige, y a todos los compañeros y amigos del grupo SCImago.

Gracias a Chesco, José Manuel, Björn y Khaldoon, con quienes tantas conversaciones sobre investigación, y muchos otros temas, he compartido.

Gracias a la Asociación Interacción Persona-Ordenador (AIPO) y las empresas Alt64 y Tobii Technology, por la concesión, en calidad de préstamo, del hardware y software necesarios para el experimento mediante la técnica de *eye-tracking*.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XIX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Concepto de visualización de información.....	1
1.2. Motivación y justificación	3
1.3. Objetivos y estructura del trabajo.....	5
CAPÍTULO 2. INTERACCIÓN PERSONA-ORDENADOR: TEORÍAS Y MODELOS	8
2.1. Introducción	8
2.2. Historia y evolución	12
2.2.1. Origen	12
2.2.2. Desarrollo	13
2.2.3. Interacción Persona-Ordenador y visualización de información ...	19
2.3. Teoría de la Interacción Persona-Ordenador	20
2.3.1. Teoría Cognitiva	22
2.3.1.1. Percepción.....	24
2.3.1.1.1. Proceso de percepción visual.....	24
2.3.1.1.2. Color.....	26
2.3.1.1.3. Atención y búsqueda visual	31
2.3.1.1.4. Percepción de patrones y formas.....	39
2.3.1.1.5. Reconocimiento de objetos.....	44
2.3.1.2. Memoria.....	49

2.3.1.2.1. Estructura de la memoria	49
2.3.1.2.2. Organización y recuperación	54
2.3.1.3. Actividad motora	56
2.3.1.3.1. Ley de Fitts.....	57
2.3.1.3.2. Ley de Hick-Hyman.....	61
2.3.1.4. Arquitecturas cognitivas.....	62
2.3.1.4.1. Técnicas de análisis de tareas.....	65
2.3.1.5. Cognición Distribuida	67
2.3.2. Teoría de la Actividad	70
2.3.2.1. Fundamentos	73
2.3.2.1.1. La actividad como unidad de análisis	73
2.3.2.1.2. Estructura general de la actividad	74
2.3.2.1.3. Estructura relacional de la actividad	77
2.3.2.1.4. La consciencia	80
2.3.2.2. Diferencias entre la Teoría de la Actividad y la Teoría Cognitiva	84
2.3.2.2.1. Las herramientas como intermediarias de la acción	84
2.3.2.2.2. La intencionalidad	86
2.3.2.2.3. El contexto	87
2.3.2.2.4. Función de la Teoría de la Actividad.....	89
2.3.2.2.5. Implicaciones metodológicas.....	90
2.4. A modo de resumen	92
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DE INTERFACES DE VISUALIZACIÓN	98
3.1. Introducción	98
3.2. Visión general del proceso	100
3.3. Adquisición de datos	102

3.3.1. Análisis y selección de datos.....	104
3.4. Transformación de los datos	106
3.4.1. Modelo Espacio-Vectorial.....	109
3.4.2. Análisis de Semántica Latente.....	111
3.5. Extracción de información	114
3.5.1. Análisis de co-ocurrencia.....	115
3.5.2. Funciones de similitud	117
3.6. Reducción de información.....	118
3.6.1. Reducción dimensional	119
3.6.2. Técnicas de poda	121
3.6.3. Técnicas de clustering	123
3.6.4. Redes neuronales	127
3.6.5. Comparación	129
3.7. Representación gráfica de información	130
3.7.1. Lenguajes visuales.....	131
3.7.1.1. Sintaxis gráfica.....	134
3.7.1.2. Semántica gráfica	140
3.7.2. Algoritmos de ordenación espacial	144
3.7.2.1. Ordenación espacial de topologías jerárquicas.....	149
3.7.2.1.1. Algoritmos de grafos jerárquicos	150
3.7.2.1.2. Algoritmos de mapas jerárquicos	153
3.7.2.2. Ordenación espacial de topologías generales.....	156
3.7.2.2.1. Modelo ‘Spring-embedder’	157
3.7.2.2.2. Algoritmo de Kamada y Kawai.....	160
3.7.2.2.3. Algoritmo de Fruchterman y Reingold	164
3.7.2.2.4. ‘Simulated Annealing’	166
3.7.2.2.5. Algoritmo de Tunkelang	171

3.7.2.2.6. Ordenación espacial de grafos de gran tamaño	172
3.7.2.2.7. Comparación	177
3.8. Interactividad de la interfaz	181
3.8.1. Mecanismos no orientados a la distorsión visual.....	183
3.8.2. Mecanismos orientados a la distorsión visual (Focus+Context)....	184
3.8.3. Comparación	188
3.9. Evaluación de visualizaciones de información	189
3.9.1. Atributos de evaluación	190
3.9.1.1. Utilidad.....	191
3.9.1.2. Usabilidad.....	193
3.9.1.3. Relación utilidad-usabilidad	194
3.9.2. Test de usuarios	195
3.9.3. Eye-tracking	198
3.9.4. Evaluación heurística	201
3.9.5. Métodos de evaluación profunda a largo plazo	208
3.9.6. Problemas en la evaluación de interfaces de visualización.....	212
3.10. A modo de resumen	214

CAPÍTULO 4. PROPUESTA ALGORÍTMICA PARA LA ORDENACIÓN ESPACIAL DE GRAFOS

.....	216
4.1. Introducción	216
4.2. Descripción de la propuesta algorítmica	219
4.2.1. Ordenación espacial de nodos	219
4.2.1.1. Algoritmo de ordenación inicial	220
4.2.1.2. Algoritmo de refinamiento.....	223
4.2.1.2.1. Fuerzas.....	224
4.2.1.2.2. Optimización	226
4.2.1.2.3. Marco.....	227

4.2.2. Ordenación espacial de enlaces.....	229
4.3. Evaluación.....	234
4.3.2. Experimento 1: evaluación heurística.....	235
4.3.2.1. Método y materiales	236
4.3.2.1.1. Muestra	236
4.3.2.1.2. Algoritmos	238
4.3.2.1.3. Criterios estéticos.....	240
4.3.2.2. Procedimiento	243
4.3.2.3. Resultados	243
4.3.2.3.1. Grupo A: grafos conectados con baja densidad de enlaces	244
4.3.2.3.2. Grupo B: grafos conectados con alta densidad de enlaces	248
4.3.2.3.3. Grupo C: grafos fragmentados	253
4.3.2.4. Discusión	254
4.3.3. Experimento 2: estudio con usuarios mediante eye-tracking	258
4.3.3.1. Método y materiales	258
4.3.3.2. Procedimiento	259
4.3.3.3. Resultados	261
4.3.3.3.1. Tarea 1: seguimiento visual	261
4.3.3.3.2. Tarea 2: identificar el grado de un nodo	262
4.3.3.3.3. Tarea 3: grado y seguimiento visual	263
4.3.3.3.4. Tarea 4: identificación de nodos por su grado	264
4.3.3.4. Discusión	265
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	268
BIBLIOGRAFÍA.....	273

ANEXO 315

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 Sistema genérico de Procesamiento Humano de Información. Fuente: John (2003).....	23
Fig.2 Esquema simplificado del proceso de percepción visual, basado en Ware (2003) y Wolfe (2006).....	26
Fig.3 Esquemas de color de Brewer (1999).	30
Fig.4 Ejemplo de efecto ‘pop out’ en la búsqueda visual pre-atentiva.....	34
Fig.5 Ejemplo en el que localizar el ítem objetivo requiere de una búsqueda visual serial ...	35
Fig.6 Ejemplos gráficos de las leyes de la Gestalt.	42
Fig.7 En la representación de la izquierda, se usa el principio de simetría para enfatizar la estructura. En la derecha, el principio de la continuidad enfatiza el flujo entre nodos. Fuente: Ware (2003).	44
Fig.8 Objetos formados por ‘geones’. A) Versión de menos a más completa de un objeto compuesto por 9 ‘geones’. B) La diferente colocación de los mismos ‘geones’ puede producir objetos diferentes. Fuente: Biederman (1987)	46
Fig.9 Diagrama UML (izquierda) y diagrama ‘geónico’ (derecha). Fuente: Irani y Ware (2000).	47
Fig.10 Diagrama ‘geónico’ (izquierda) y diagrama plano (derecha). Fuente: Irani y Ware (2000b).	48
Fig.11 Esquema de la relación entre memoria sensorial, a corto plazo y a largo plazo.	50
Fig.12 Taxonomía de componentes de la memoria a largo plazo. Fuente: Squire (2004).	53
Fig.13 Cálculo de la distancia (A) y tamaño (W) de un área objetivo de tipo rectangular. Fuente: MacKenzie (1992).....	59
Fig.14 Esquema del mecanismo de aprendizaje mediante ‘chunking’. Fuente: Howes y Young (1997).....	65
Fig.15 Esquema de la (a) Cognición individual y la (b) Cognición distribuida. Fuente: Perry (2003).....	69
Fig.16 Diagrama de la estructura general de la actividad.	75
Fig.17 Diagrama de la estructura relacional de la actividad. Fuente: Vendí y Harris (2005). .	78
Fig.18 Esquema del proceso de desarrollo de interfaces de visualización	101
Fig.19 Estructuras de datos: unidimensional (a), bidimensional (b) y multidimensional (c) .	107
Fig.20 Ejemplo de representación de un grafo no dirigido mediante una matriz simétrica de adyacencia.....	108
Fig.21 Representación, obtenida mediante MDS, de los grandes grupos temáticos de la CDU. Fuente: Moya-Anegón y Herrero-Solana (1999).	121
Fig.22 Ejemplo de red original sin podar (a) y PFNet ($r=\infty$, $q=N-1$) (b).....	122
Fig.23 Dendrograma basado en el método de Ward. Fuente: Herrero-Solana y Moya-Anegón (1999).....	125
Fig.24 WebSOM, análisis de co-ocurrencia de términos sobre grupos de discusión Usenet. Fuente: http://websom.hut.fi/websom/	129

Fig.25 Ejemplo de representación gráfica de tipo red o grafo. Fuente: Chen (2006)	132
Fig.26 Ejemplo de representación gráfica de tipo Mapa. Fuente: tianamo.com.....	133
Fig.27 Esquema sobre la descomposición sintáctica de representaciones gráficas. Fuente: Engelhardt (2002).	136
Fig.28 Representación gráfica ‘Thread Arcs’. Fuente: Kerr (2003).....	139
Fig.29 Representación de las relaciones contractuales o comerciales entre ‘escépticos del cambio climático’ e instituciones que reciben financiación de la corporación Exxon Mobil. Fuente: exxonsecrets.org/maps.php	142
Fig.30 Ranking de atributos visuales en función de su capacidad para soportar tareas visuales, basada en el trabajo de Mackinlay (1986). Notas: “Intensidad (color)” se refiere tanto al brillo como a la saturación. “Tamaño” se refiere tanto al área como al volumen. “Longitud” se refiere al ancho.....	143
Fig.31 Visualización de la topología global de Mbone (a) y visualización de los pases entre jugadores en la final del mundo del 2006 (b). Fuentes: Munzner et al. (1996) y visualcomplexity.com	145
Fig.32 Ejemplos de grafo de árbol (a), grafo radial (b) y grafo ortogonal (c). Fuente: Ham (2005).....	151
Fig.33 Árbol cónico. Fuente: Robertson, Mackinlay y Card (1991).	152
Fig.34 Árbol de círculos o globos. Fuente: Melançon y Herman (1998).	153
Fig.35 Secuencia de 1) árbol cónico, 2) árbol de disco, 3) árbol de disco compacto y 4) árbol de disco plano. Fuente: Carriere y Kazman (1995).	153
Fig.36 Ejemplo de TreeMap aplicado a la representación gráfica de noticias. Fuente: http://www.marumushi.com/apps/newsmap	154
Fig.37 ‘Bubble tree’. Fuente: Boardman (2000).....	154
Fig.38 Representación de las hiponímias entre conceptos de un corpus textual mediante discos circulares o concéntricos. Fuente: Collins (2007).....	155
Fig.39 Grafo no jerárquico ordenado mediante algoritmo radial. Fuente: Yee et al. (2001). 157	
Fig.40 Representación de la metáfora de los sistemas mecánicos para explicar el funcionamiento de modelo algorítmico ‘spring-embedder’. Fuente: Xu (2007).....	158
Fig.41 Grafo de 15606 nodos y 45878 enlaces ordenado espacialmente mediante el algoritmo de Koren, Carmel y Harel (2002).....	173
Fig.42 Grafo con 4242 nodos y 44387 enlaces. Fuente: Han y Ju (2003).	174
Fig.43 Visualización generada por el artista Andreas Koberle para representar parte de la comunidad Flickr del grupo Processing.org.	176
Fig.44 Grafo con los enlaces adyacentes sin atar (a), y con los enlaces adyacentes atados (b). Fuente: Holten (2006)	176
Fig.45 Atado de enlaces mediante el modelo de Cui et al. (2008) (a) y atado de enlaces mediante el modelo de Holten y Wijk (2009) (b).....	177
Fig.46 Aplicación de la técnica ‘detail+overview’ en el proyecto ‘Atlas of Science’ sobre una visualización en forma de grafo. Fuente: www.atlasofscience.net	184
Fig.47 Ejemplos de grafo sin distorsión (a), distorsión cartesiana (b) y distorsión polar (c). Fuente: Sarkar y Brown (1992).	187

Fig.48 Resultados de una prueba con <i>eye-tracking</i> en forma de mapas de calor sobre dos representaciones de tipo Tag-Cloud. Fuente: Hassan-Montero, Herrero-Solana y Guerrero-Bote (2010).....	201
Fig.49 Mapa de la Ciencia del Mundo. Fuente: Moya-Anegón et al. (2007).	217
Fig.50 Ejemplo de grafo radial. Fuente: Yee et al. (2001).	222
Fig.51 Ejemplo de grafo con ordenación radial, en el que los radios de las circunferencias concéntricas presentan diferencias uniformes (a) y diferencias decrecientes (b).	223
Fig.52 Ejemplo de ordenación espacial del algoritmo original de Fruchterman y Reingold (1991).....	228
Fig.53 Ejemplo de ordenación espacial sin establecer un marco estático, sino redimensionando el área ocupada por los nodos para que se ciña al área disponible para su representación.	229
Fig.54 Ejemplos de atado de enlaces mediante concatenación de curvas de Bézier.	232
Fig.55 Grafos donde los enlaces primarios (azul) y secundarios (verdes) se representan mediante líneas rectas (a); donde sólo se representan los enlaces primarios (b), y donde los enlaces secundarios se ordenan mediante la técnica de “atado” propuesta (c).	233
Fig.56 Grafo con todos los enlaces secundarios representados (a), y donde únicamente los enlaces secundarios que parten del nodo focal, son representados (b).	234
Fig.57 Relación entre número de nodos y de enlaces en los grafos de la muestra (escala logarítmica).	238
Fig.58 Configuración inicial circular y de matriz en un mismo grafo.	240
Fig.59 Promedio de cruces relativos en los grafos del grupo A.	244
Fig.60 Ejemplo de un mismo grafo con solapamiento entre enlaces (a) y sin solapamiento (b).	245
Fig.61 Promedio de continuidad relativa en los grafos del grupo A.	245
Fig.62 Promedio de solapamiento relativo en los grafos del grupo A.	246
Fig.63 Grafo ‘net10’ ordenado mediante RAD-FRM (izquierda) y RAD-FR (derecha).	247
Fig.64 Tiempo promedio empleado por los diferentes algoritmos sobre los grafos del grupo A.	248
Fig.65 Promedio de cruces relativos en los grafos del grupo B.	249
Fig.66 Promedio de continuidad relativa en los grafos del grupo B.	250
Fig.67 Promedio de solapamiento relativo en los grafos del grupo B.	251
Fig.68 Tiempo promedio empleado por los diferentes algoritmos sobre los grafos del grupo B.	252
Fig.69 Ordenación espacial del grafo ‘net11’ mediante los algoritmos FR y FRM.	254
Fig.70 Ordenación espacial resultante de aplicar los diferentes algoritmos estudiados sobre el grafo ‘net14’.	255
Fig.71 Ordenación espacial de los algoritmos KK, RAD-KK y RAD-FRM sobre el grafo ‘net29’	256
Fig.72 Ordenación espacial de los algoritmos KK, RAD-KK y RAD-FRM sobre el grafo ‘net32’.	257
Fig.73 Fotografía del sistema de <i>eye-tracking</i> Tobii T60.	259
Fig.74. A la izquierda el grafo utilizado en la prueba con el grupo A de participantes, y a la derecha el utilizado con el grupo B.	260
Fig.75 Mapas de calor de la tarea 1.	262

Fig.76 Mapas de calor de la tarea 2.	263
Fig.77 Mapas de calor de la tarea 3.	264
Fig.78 Mapas de calor de la tarea 4.	265
Fig.79 Tiempo promedio empleado por los participantes en la consecución de las tareas...	266
Fig.80 Grado de error cometido por los participantes en la consecución de las tareas.....	267

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Criterios estéticos en representaciones de grafos.	148
Tabla 2 Características de la muestra de grafos utilizada en el experimento 1.	237
Tabla 3 Resultados obtenidos por FR y FRM sobre los grafos del grupo C en el experimento 1.	253
Tabla 4 Tiempo empleado y errores cometidos en la ejecución de la tarea 1	261
Tabla 5 Tiempo empleado y errores cometidos en la ejecución de la tarea 2	263
Tabla 6 Tiempo empleado y errores cometidos en la ejecución de la tarea 3	264
Tabla 7 Tiempo empleado y fallos la ejecución de la tarea 4.....	265

1.1. Concepto de visualización de información

Una de las características que en mayor grado diferencian al ser humano del resto de las especies es su capacidad para interiorizar y procesar información, transformándola en conocimiento. Tanto es así que, en los textos de psicología cognitiva, el ser humano es corrientemente descrito como un ‘informívoro’, pues del mismo modo que un carnívoro se alimenta de carne, la información es el alimento de nuestra cognición, y su consumo una necesidad básica para nuestra actividad diaria y adaptación al entorno.

Con el exponencial avance de las tecnologías de la información, cada vez resulta menos costoso producir, almacenar, publicar y compartir información, y como consecuencia nuestras posibilidades para su recuperación y acceso crecen incesantemente. Si bien este consumo que facilita la tecnología nos forma y capacita para procesar información de cada vez mayor complejidad, nuestra capacidad para percibirla, interiorizarla y procesarla permanece estática en términos cuantitativos, ya que está condicionada por nuestra biología.

Como consecuencia, en este escenario de explosión y ubicuidad informativa, las personas estamos condenadas a economizar constantemente nuestra atención, discriminando pasiva y activamente toda aquella que resulte irrelevante para nuestras necesidades e intereses, con el objetivo de evitar la saturación de información, nuestro colapso perceptual y cognitivo¹.

¹ Un estado que incluso podría provocar un deterioro de nuestra salud, bautizado por el psicólogo David Lewis como Síndrome de Fatiga Informativa (Murray; 1998).

La presente tesis afronta la problemática del acceso a la información tomando como objeto de estudio una de sus formas: la visualización. Este concepto hace referencia simultáneamente a un fenómeno cognitivo y a una acción práctica. En el primer caso, la visualización se define como la capacidad de formar mentalmente imágenes visuales de conceptos abstractos. En este sentido, visualizar consistiría en “ver” con la mente estructuras ocultas a nuestros sentidos. En el segundo caso, la visualización es entendida como la acción de representar gráficamente fenómenos no visibles. Por tanto, visualizar puede referirse tanto a una acción mental como una acción práctica, tanto a nuestra capacidad de pensar visualmente acerca de datos que no son visibles, como al proceso de representarlos gráficamente.

Dado que la visualización es un concepto muy amplio, irremediablemente debemos acotarlo a los fines de este trabajo. Tradicionalmente se suele distinguir entre dos grandes categorías: visualización científica y visualización de información. Aunque ambas tratan datos no visibles, la primera se refiere a datos físicos y la segunda a datos abstractos (Polanco, Zartl; 2002). La visualización científica hace referencia a representaciones de datos basados en el espacio físico, como la visualización de moléculas, ADN, órganos humanos, geografía, el universo, etc. Por el contrario, la visualización de información se basa en representaciones de datos de naturaleza no física, estructuras no visibles como la colaboración entre investigadores, la similitud semántica entre documentos de una colección, los patrones de flujo de operaciones financieras, etc. Es necesario aclarar que no debemos confundir la visualización científica con la visualización de información científica, ya que esta última haría referencia a un subconjunto de la visualización de información: la visualización de datos abstractos acerca de fenómenos de producción, comunicación o estructura intelectual de dominios científicos. El presente trabajo se centra principalmente en la visualización de información, lo que no implica que sus resultados no puedan tener aplicación en la visualización científica.

El segundo postulado del presente trabajo es que únicamente focaliza su interés en los fenómenos cognitivos de visualización asistidos por

ordenador, mediados por representaciones gráficas de visualización normalmente interactivas. A este tipo de visualización la denominamos visualización de información persona-ordenador², aunque a lo largo del trabajo será frecuentemente abreviada como visualización de información, o simplemente visualización. Esta condición de partida deja fuera del ámbito directo del presente trabajo la visualización no mediada, o mediada por representaciones gráficas no generadas computacionalmente.

El tercer postulado es que la visualización de información es entendida sólo sobre grandes volúmenes de datos, es decir, aquellos cuyas estructuras subyacentes únicamente pueden ser extraídas algorítmicamente, y no a través del análisis y reflexión subjetiva del diseñador de la visualización. Esto quiere decir que aunque la visualización de información persona-ordenador se reconozca como un problema esencialmente de diseño, no es el modelo mental del diseñador acerca de un dominio de conocimiento el que se intenta representar gráficamente, sino el modelo subyacente a los propios datos.

Como resumen podemos decir que el presente trabajo focaliza su alcance general al acceso de grandes volúmenes de información a través de su visualización mediada por ordenadores (o cualquier otro artefacto interactivo con capacidad de proceso computacional), un área de estudio cuyo objetivo es la concepción de técnicas, algoritmos, metodologías y modelos de desarrollo de interfaces gráficas que faciliten y potencien dicho acceso cognitivo.

1.2. Motivación y justificación

La visualización de información es una emergente área de interés de carácter transversal e interdisciplinar. Ciencias de la computación,

² Esta denominación no es casual, pues se elige por analogía a lo que Marchionini (2006) denomina “Recuperación de Información Persona-Ordenador”, que define como enfoque híbrido entre las áreas de “Recuperación de Información” e “Interacción Persona-Ordenador”.

estadística, diseño gráfico, bioinformática, cartografía, ciencias sociales, comunicación y periodismo infográfico, por citar algunas, son disciplinas de actuación e investigación. Como se ha descrito en la introducción, la visualización de información constituye una importante dimensión del problema de acceso a la información. Por tanto, entre todas estas disciplinas, las ciencias de la documentación, con sus vertientes de investigación en bibliometría, recuperación de información y bibliotecas digitales, cobran cada vez mayor protagonismo, un hecho observable con un análisis de la producción científica sobre el tema.

La investigación y desarrollo de algoritmos orientados al análisis, transformación y representación gráfica de los datos, constituye sin duda el pilar de la visualización de información como área de estudio. Sin embargo, paradójicamente, la investigación en esta área ha desatendido en gran parte la dimensión cognitiva de la visualización, el ámbito psicológico y social del uso de las interfaces de visualización.

Chen (2005), uno de los más reconocidos investigadores en visualización de información, enumera los que según su opinión son los diez problemas aún sin resolver en esta área. Lo más destacable es que de los diez retos expuestos, los primeros cuatro tratan cuestiones acerca del factor humano de la visualización: la necesidad de mayor número de estudios empíricos sobre la usabilidad (facilidad de uso) de las interfaces de visualización; la necesidad de comprender las tareas cognitivas y perceptuales relacionadas con la visualización; el estudio del conocimiento previo que deberían poseer los usuarios para la comprensión de estas interfaces; y la necesidad de que los investigadores en visualización tengan una formación multidisciplinar, incluyendo principios y habilidades de comunicación visual y semiótica, con el objetivo de que las interfaces diseñadas resulten comprensibles para sus usuarios.

Por tanto, la primera premisa de la que parte el presente trabajo es que la investigación científica en visualización de información no puede acometerse de forma disociada a los principios psicológicos que rigen el uso de estas interfaces gráficas y condicionan su utilidad y usabilidad.

Esto implica que tanto el diseño como evaluación de las interfaces de visualización deben fundamentarse en modelos teóricos consolidados que permitan explicar, describir o predecir fenómenos interactivos entre usuarios e interfaz.

La mencionada naturaleza multidisciplinar de la visualización de información ha originado una gran dispersión y desconexión de su literatura científica, provocando una preocupante escasez de trabajos que ofrezcan una visión metodológica global sobre el desarrollo de este tipo de herramientas gráficas. Este hecho implica que, como segunda premisa, asumamos la necesidad de un marco metodológico unificado como medio para sistematizar tanto el diseño como la evaluación empírica de interfaces de visualización de información.

La última premisa de la que parte este trabajo es que, de todos los métodos, técnicas y algoritmos que confluyen en la generación de interfaces de visualización de información, los que tienen un impacto más inmediato en su usabilidad son aquellos destinados a la ordenación espacial automática de los elementos que conforman la representación gráfica. Por tanto, la propuesta de nuevos métodos y algoritmos de ordenación espacial se presenta como una de las líneas de investigación más relevantes y necesarias.

1.3. Objetivos y estructura del trabajo

A raíz de las premisas expuestas, el presente trabajo se propone tres objetivos generales (y los consecuentes objetivos específicos):

- Realizar una aproximación a un marco teórico, tomando como contexto disciplinar la Interacción Persona-Ordenador, que sirva de herramienta para el análisis, comprensión y predicción de los procesos de interacción entre usuarios e interfaces de visualización, así como de la función mediadora de estas interfaces en la actividad de sus usuarios. Este marco no sólo debe posibilitar el estudio

teórico del usuario desde su dimensión perceptual, motora y cognitiva, sino también desde su dimensión sociocultural.

- Propuesta de un marco metodológico para el diseño y evaluación de interfaces gráficas de visualización de información, que abarque desde la etapa de adquisición de datos hasta su concepción gráfica e interactiva, y en el que tanto las etapas de diseño como las de evaluación estén orientadas a garantizar empíricamente la usabilidad y utilidad de la herramienta.
- Propuesta de un procedimiento algorítmico de ordenación espacial para representaciones de grafo. Este procedimiento, dado un grafo no dirigido en forma de matriz simétrica de adyacencia, debe calcular las coordenadas de cada uno de los nodos dentro del marco del espacio disponible.
 - Propuesta de un conjunto de criterios estéticos empíricamente fundamentados para la evaluación de ordenaciones espaciales, así como de una metodología para su comprobación automática.
 - Validación de la propuesta algorítmica a través del análisis automático del cumplimiento de dicho conjunto de criterios, comparando los resultados con los obtenidos por otros algoritmos ampliamente utilizados en la literatura científica sobre visualización de grafos.
 - Análisis de la influencia que los diferentes criterios estéticos tienen en la usabilidad real de la representación, tomando en consideración las tareas visuales que pretenden facilitar y las características topológicas del grafo.
 - Propuesta experimental de un procedimiento para la ordenación espacial de enlaces, con el objetivo de reducir la aglomeración visual en grafos con alta densidad de enlaces.

El trabajo se desarrolla en cinco capítulos: Este primer capítulo de introducción, tres capítulos (del 2 al 4) en los que se abordan cada uno

de los objetivos generales anteriormente expuestos, y un último capítulo (5) dedicado a la exposición de las conclusiones y futuras líneas de investigación.

El capítulo 2 comienza con un análisis de la historia y evolución de la Interacción Persona-Ordenador como disciplina, para a continuación analizar dos de los grandes modelos teóricos que esta disciplina aporta o adapta al estudio del factor humano en procesos interactivos: Teoría Cognitiva y Teoría de la Actividad. A lo largo del capítulo se discuten las posibles aplicaciones e implicaciones de estos modelos en la visualización de información.

En el capítulo 3, como reza su título, se propone un marco metodológico para el diseño y evaluación de interfaces de visualización. La estructura de la propuesta se divide en diferentes etapas: cuatro destinadas al tratamiento automatizado de los datos (adquisición, transformación, extracción y reducción); dos a la representación gráfica de la información y la adición de interactividad; y otra etapa, de ejecución cíclica, destinada a la evaluación de la usabilidad y utilidad de la interfaz.

En el capítulo 4, de carácter práctico, se desarrolla una propuesta algorítmica para la ordenación espacial de grafos, cuya evaluación se lleva a cabo a través de dos experimentos. En el primer experimento se evalúa la eficacia del algoritmo a través de la comprobación automática del cumplimiento de tres criterios estéticos empíricamente fundamentados (cruces entre enlaces, continuidad entre enlaces y solapamiento entre nodos). Los resultados, así como el tiempo empleado, se comparan con los obtenidos por otros algoritmos de ordenación espacial sobre una muestra de 42 grafos. En el segundo experimento se indaga sobre el impacto que diferentes criterios estéticos tienen en la usabilidad visual de los grafos, para lo que se lleva a cabo un estudio con usuarios en el que se registra su comportamiento visual mediante tecnologías de *eye-tracking*.

CAPÍTULO 2.

INTERACCIÓN PERSONA-ORDENADOR: TEORÍAS Y MODELOS

“Technology has made our lives more full, yet at the same time we’ve become uncomfortably ‘full’”.

Maeda (2006)

2.1. Introducción

Las nuevas tecnologías han invadido progresivamente todos los aspectos de nuestras vidas. En el trabajo, el estudio o el ocio, nuestras actividades cotidianas cada vez se encuentran más automatizadas, con herramientas y sistemas que intentan mejorar nuestra productividad, comodidad y capacidad de acción. En este devenir tecnológico, ordenadores y personas están abocados inevitablemente al entendimiento mutuo.

La comunicación entre personas y ordenadores no es equiparable a la comunicación interpersonal, ya que las personas comparten entre sí conocimientos y experiencias muy alejadas de las capacidades de los ordenadores. Como explica Norman (2007), en la interacción entre personas y ordenadores lo que se está produciendo no es un diálogo, sino dos monólogos, en los que a veces el ordenador debe obedecer nuestras órdenes, y en otras ocasiones nosotros debemos obedecer las suyas. La principal diferencia con la comunicación entre personas es que en la interacción persona-ordenador no hay opción de obtener explicaciones sobre el porqué de las órdenes (argumentos, razones o intenciones), debido a las limitaciones en la inteligencia de uno de los interlocutores: los ordenadores.

Observando la evolución computacional, las mencionadas limitaciones ‘intelectuales’ de los ordenadores parecen haberse demostrado

insalvables. Por ello, de paradigmas computacionales de emulación - en los que se intentaba dotar de habilidades humanas a los ordenadores - se ha evolucionado a paradigmas de complementación - donde el ordenador juega el rol de facilitador para los objetivos del usuario- (Fischer; 2001). En palabras de Shneiderman (2003) “el estudio en tecnología ha versado tradicionalmente sobre qué podían hacer los ordenadores; el paradigma actual trata sobre qué pueden hacer los usuarios”.

Ahora bien, que no se produzca una comunicación en sentido estricto entre personas y ordenadores no significa que no sea necesario un “conocimiento” compartido. Dado que la interacción entre ambos se produce sobre un lenguaje de símbolos, el entendimiento mutuo estará condicionado por su correcta interpretación por cada una de las partes. Este intercambio de símbolos se produce en la interfaz, que podemos definir como el elemento mediador o superficie de encuentro entre personas y ordenadores.

Las dos grandes categorías de interfaces son las denominadas interfaces de línea de comandos y las interfaces gráficas de usuario (GUI, *Graphic User Interface*). En el primer tipo la interacción se produce mediante el intercambio de símbolos: el sistema debe interpretar los comandos del usuario, y el usuario los mensajes del sistema. Por tanto, el usuario se verá obligado a aprender y memorizar el conocimiento sintáctico y semántico necesario para entender y ser entendido por el sistema.

En las interfaces gráficas de usuario, en cambio, la carga de conocimiento sintáctico requerido al usuario es menor. El lenguaje de símbolos empleado por el sistema puede ser gráfico o textual, posibilitando al usuario reconocer visualmente cómo realizar una acción (observando por ejemplo las diferentes opciones de un menú), en vez de tener que memorizar previamente las órdenes necesarias en interfaces de línea de comandos. Además, estas interfaces pueden utilizar metáforas gráficas (ej. los botones, la papelera de reciclaje, etc.) y ofrecer manipulación directa (ej. arrastrar objetos), lo que facilita al usuario predecir o intuir cómo deben ser utilizadas, por la relación de familiaridad que se establece con los objetos y acciones del mundo

físico. Como consecuencia de esta mayor facilidad de uso, actualmente las interfaces gráficas de usuario son prácticamente ubicuas en todas las aplicaciones software (Myers; 2003).

Del diseño de la interfaz gráfica de usuario - qué elementos presentará y cómo se comportarán - dependerá en gran medida que la interacción resulte fluida y eficiente, o que por el contrario desemboque en la frustración del usuario. Por tanto, en el trasfondo de la interacción persona-ordenador lo que se está produciendo es una interacción entre diseñador y usuario, puesto que es el diseñador quien condiciona cómo será la experiencia interactiva de su diseño.

Si bien el uso de prácticamente cualquier sistema requiere de un aprendizaje por parte del usuario, podemos afirmar que un diseño de interfaz óptimo será aquel que en mayor grado minimice el coste y tiempo de aprendizaje. El tiempo es un bien valioso y los usuarios no quieren malgastarlo leyendo manuales de uso; los usuarios prefieren aprender de forma práctica, mediante el uso directo del sistema (Myers; 1994) (Carroll; 1997). Esto supone que, idealmente, debe ser el diseño de la interfaz el que se adapte al usuario, y no al contrario. Cuanto más fácil de usar e intuitivo resulte el sistema, menos tiempo necesitará el usuario para la consecución de sus objetivos, menos errores cometerá durante la interacción y, por consiguiente, mayor será su satisfacción de uso.

La disciplina que tradicionalmente ha estudiado el diseño y evaluación de interfaces de usuario es la denominada Interacción Persona-Ordenador (IPO), más conocida por sus nombres y acrónimos anglosajones: Human-Computer Interaction (HCI) o Computer-Human Interaction (CHI). La IPO, según Myers, Hollan y Cruz (1996), puede definirse como el estudio de cómo las personas diseñan, implementan y usan sistemas informáticos interactivos; y de cómo los ordenadores influyen en las personas, las organizaciones y la sociedad.

La IPO también puede definirse simplemente como el estudio y la práctica de la usabilidad (Carroll; 2001), ya que la usabilidad es un

concepto central e inherente a la disciplina. Este anglicismo significa "facilidad de uso", y parece tener su origen en la expresión "user friendly" que fue reemplazada por sus connotaciones vagas y subjetivas (Bevan, Kirakowski, Maissel; 1991).

Numerosos autores han propuesto diversas definiciones de usabilidad, normalmente a través de la enumeración de los diferentes atributos mediante los que puede ser evaluada, dependiendo por tanto cada definición del enfoque con el que pretende ser medida (Folmer, Bosch; 2004). Tomaremos para este trabajo la definición más extendida, que es la ofrecida por la ISO (International Organization for Standardization) (1994), y que define usabilidad como el "grado de eficacia, eficiencia y satisfacción con la que usuarios específicos pueden lograr objetivos específicos, en contextos de uso específicos".

En el presente trabajo sostenemos que la IPO representa el mejor marco disciplinar para afrontar el estudio e investigación en visualización gráfica de información. Como se señaló en la introducción, el concepto de visualización hace referencia simultánea a dos procesos, el de diseñar interfaces gráficas donde representar grandes volúmenes de datos, y el de la construcción perceptual y mental que realizan sus usuarios; ambos procesos vinculados mediante la interacción. Por ello, el estudio de la visualización de información persona-ordenador es el estudio de la relación entre las personas y una clase de tecnología: las interfaces gráficas de visualización como mediadoras entre información y cognición.

El objetivo que pretende este capítulo es introducir la IPO desde su evolución histórica, para a continuación analizar los marcos teóricos que sustentan la disciplina, y que por tanto nos permitirán analizar el diseño y evaluación de las interfaces gráficas de visualización desde la perspectiva del usuario.

2.2. Historia y evolución

2.2.1. Origen

La IPO nace de la confluencia entre la Ingeniería del Software y la Ergonomía (también conocida como “Factores Humanos” en EE.UU.). La primera es una subdisciplina o área de la Informática, que afronta la creación y mantenimiento de aplicaciones software de acuerdo a requerimientos de calidad, fiabilidad y coste. La Ergonomía, por su parte, estudia la relación interactiva entre las personas, artefactos y entornos de trabajo, con especial atención a los factores humanos psicológicos y físicos que condicionan esta interacción.

Este encuentro entre disciplinas era inevitable, ya que las aplicaciones software son desarrolladas para ser usadas por personas, y por ello su usabilidad resulta un factor determinante en la calidad final de la aplicación, en su aceptación social y comercial. Ya que para el usuario “la interfaz es la aplicación” (Harston; 1998), puesto que es la única parte que ven y con la que interactúan, la IPO puede ser entendida como “la parte visible de la Informática” (Carroll; 1997).

Resulta complicado, por no decir imposible, determinar una fecha concreta para el nacimiento de una disciplina. No obstante, aunque la incubación de la IPO se produjo años atrás, 1969 podría considerarse una fecha clave en el surgimiento de la disciplina. En este año se celebra el primer encuentro internacional y se publica la primera revista especializada: “International symposium on man-machine systems” e “International journal of man-machine studies” respectivamente (Sackel; 1997). Será en la década de los 70 y los 80 cuando la IPO empiece a crecer y desarrollarse como disciplina científica, con la publicación de manuales, creación de laboratorios de usabilidad, fundación de las primeras asociaciones y organismos, y proliferación de congresos internacionales y revistas científicas (Marcos-Mora; 2001) (Carroll; 2001) (Grudin; 2005).

2.2.2. Desarrollo

Durante las décadas de los 60 y 70 se produjo una gran cantidad de avances tecnológicos que potenciaron la interactividad de las aplicaciones (Lorés, Granollers, Lana; 2002) (Ribera-Turró; 2005): interfaces de manipulación directa, invención del ratón como dispositivo de acceso, aumento de las capacidades gráficas del hardware, estilos de interacción WIMP (*window, icons, menu, pointing device*) y aplicaciones WYSIWYG (*what you see is what you get*) como los procesadores de texto entre otros.

Conforme las interfaces se vuelven más gráficas e interactivas, resultan más complejas de desarrollar (Myers; 1994). De hecho, la etapa de desarrollo de una aplicación que consume más recursos es la destinada al desarrollo de la interfaz, que según algunos estudios (Myers; 1992) llega a suponer cerca de un 50% del total del código escrito para la aplicación.

En los años 70 la Ingeniería del Software entra en crisis, debido a los problemas derivados del modelo de desarrollo en cascada (Carroll; 2003). En este modelo, las etapas del ciclo de vida del software se ordenan de forma secuencial, y cualquier error de diseño que se detecte en cualquiera de sus etapas obliga a retroceder a etapas previas, aumentando los costes del proyecto considerablemente. Los programadores son usuarios expertos que tienen muchas dificultades para ponerse en la piel del usuario final (Myers; 1994), y por tanto también para diseñar interfaces pensadas para un usuario que tiene muchas menos habilidades y conocimientos técnicos. Pero sin duda el problema principal de este modelo es que las etapas de evaluación y validación de la usabilidad de la aplicación se encuentran precisamente ubicadas al final de la cascada, y cualquier detección de un problema de usabilidad que requiera un rediseño resulta muy costosa. Como afirma Carroll (1997), en esta época los expertos en IPO veían limitada su acción a estas últimas etapas, y por tanto también su capacidad para participar activamente y mejorar sustancialmente la usabilidad de la aplicación.

Estos hechos propiciaron no sólo el surgimiento de marcos teóricos que posibilitasen desde etapas tempranas la toma de decisiones de diseño previsiblemente acertadas para el usuario final, sino también de modelos alternativos al modelo en cascada que involucrasen la evaluación iterativa de decisiones de diseño desde las primeras etapas de desarrollo, como el Diseño Centrado en el Usuario o DCU (UCD: User-Centered Design) (Norman, Draper; 1986). En contraposición al modelo en cascada, el DCU es un proceso iterativo y cíclico, en el que las decisiones de diseño se evalúan con usuarios sobre prototipos antes de ser implementadas, y por tanto todo el proceso se encuentra conducido por el usuario, sus necesidades, características y objetivos.

El primer gran cambio evolutivo de la disciplina se produce a finales de los años 70, cuando la Ciencia Cognitiva irrumpe con fuerza en la IPO. La Ciencia Cognitiva estudia los procesos subyacentes a la mente humana en la adquisición y uso de conocimiento, desde un enfoque multidisciplinar que aglomera de forma difusa metodologías y teorías de numerosas áreas, por lo que a veces es denominada ‘Ciencias Cognitivas’. Entre estas áreas se encuentran la Neurociencia, Lingüística, Filosofía, Inteligencia Artificial y la Antropología, aunque de todas es la Psicología Cognitiva la que tiene el rol más prominente.

Con el objeto de comprender y explicar el funcionamiento de la cognición humana, la Psicología Cognitiva caracteriza el procesamiento humano de información utilizando una metáfora computacional, es decir, por analogía a cómo este procesamiento se produce en los ordenadores. Como señala Kaptelinin (1995), este hecho ayudó en gran medida a su rápida asimilación por la comunidad de IPO.

En esta época se esperaba que la Teoría Cognitiva, por su naturaleza ‘predictiva’, pudiera servir de guía para las primeras etapas del ciclo de vida del software, en forma de principios generales sobre la actividad motora y perceptual, el lenguaje, la resolución de problemas, la memoria, el aprendizaje y la comunicación (Carroll; 2001, 2003). De este modo, la IPO aspiraba a convertirse en una disciplina científica bajo el

paradigma de la Psicología Cognitiva Aplicada. Cada vez se incorporaron más investigadores a la IPO con formación y orientación cognitivista, que desplazaron e incluso ignoraron la investigación previa realizada por los investigadores de Ergonomía (Grudin; 2005).

A finales de los años 80 la IPO empieza a recibir gran atención desde multitud de disciplinas, y como consecuencia se produjo una entrada masiva de investigadores con enfoques y formación académica muy diversa. Esto, sumado al hecho de que el enfoque cognitivo no ofrecía resultados evidentes en entornos reales de usuarios, desplazó a la Psicología Cognitiva a un papel secundario, a favor de las Ciencias Sociales y del Comportamiento (Carroll; 1997).

En el intento de superar las limitaciones del enfoque cognitivo clásico, otras teorías que se propusieron o adaptaron al estudio de la IPO fueron el Enfoque Etnometodológico, la Acción Situada, la Teoría de la Actividad, el Enfoque Ecológico, la Cognición Externa y la Cognición Distribuida (estas dos últimas surgidas de la propia comunidad cognitivista) (Rogers; 2004). De entre todas, un caso remarcable es la aplicación a la IPO de la Teoría de la Actividad (Bødker; 1990). Esta teoría, aunque autores como Carroll (2003) afirman que no es necesariamente incompatible con la teoría Cognitiva, se diferencia claramente al afrontar el estudio del comportamiento individual desde las relaciones interpersonales y culturales en el contexto de motivaciones colectivas y sistemas sociales, en vez de a partir de la representación cognitiva individualizada. Durante este periodo la IPO empieza a reconocer, no sólo a nivel teórico, que los ordenadores son usados en un contexto social, y surgen áreas de incipiente interés como el Trabajo Cooperativo Mediado por Ordenador (CSCW o Computer-Supported Cooperative Work) (Carroll; 2001).

Durante la década de los 90 se producen dos cambios de gran impacto en la relación entre las personas y la tecnología. Por un lado se generaliza el uso de ordenadores, con los ordenadores personales o de consumo; y por otro nace la World Wide Web, masificando el acceso a la información y popularizando el hipertexto como estilo de interacción. El tradicional

contexto de uso de los ordenadores (universidades, sector militar y empresas), se ve forzosamente ampliado a contextos y actividades más sociales y civiles, como el hogar, las escuelas o las bibliotecas (Stephanidis; 2001), y como consecuencia, el 'usuario medio' se diversifica cada vez más en cuanto a habilidades, conocimientos técnicos y necesidades. Como afirman Butler y Jacob (1998), conforme la informática afecta a más aspectos de nuestra vida, la usabilidad adquiere más importancia.

No es hasta que el mercado empieza tomar verdadera conciencia de la importancia de la usabilidad en el desarrollo de productos interactivos, cuando se produce una tangible profesionalización de la disciplina, bajo el emblema de la Ingeniería de la Usabilidad (IU) (Nielsen; 1994). La creciente atención que empieza a recibir la usabilidad está motivada por la cada vez mayor evidencia empírica de que la inversión en usabilidad disminuye los costes e incrementaba la productividad (Myers; 1994), el aumento de la competitividad comercial, y la necesidad de reducir la frustración del usuario final y reducir gastos en formación y atención al usuario (Butler, Jacob; 1998).

IPO e IU representan dos caras diferentes de una misma moneda: La IPO está ubicada en el entorno académico, principalmente preocupada por la investigación básica y el método científico; mientras que la IU surge del entorno laboral y la práctica profesional, más pragmática y preocupada por el retorno de inversión, la obtención de resultados y la relación coste-beneficio de los métodos de diseño y evaluación (Dumas; 2007). A diferencia de la IPO, la IU se ocupa menos de por qué un diseño funciona que de demostrar si realmente lo hace, prestando especial interés a las metodologías de evaluación, como los tests con usuarios (Carroll; 2001) (Dillon; 2002).

Desde aquella época hasta nuestros días, ha existido cierta tensión entre ambas facetas de la disciplina. Por un lado, a pesar del ingente volumen de trabajos teóricos en IPO, esta teoría no ha tenido una amplia repercusión en la práctica profesional (Rogers; 2004). Por otro, la reducción de costes en la aplicación de métodos de investigación y

evaluación - como en el caso de la Ingeniería de Usabilidad 'de descuento' (Discount Usability Engineering) (Nielsen; 1994b)- ha sido muy criticada desde la vertiente académica de la IPO, que ve cómo el 'sentido común' y la 'validez aparente' sustituyen a la evidencia científica (Carroll; 2003).

En la última década las limitaciones de los modelos y enfoques cognitivos enraizados en la disciplina se han vuelto a poner de manifiesto. Tradicionalmente la investigación en IPO ha centrado su estudio en el comportamiento racional del usuario, dejando de lado su comportamiento emocional (estados afectivos, estados de humor y sentimientos) (Dillon; 2001) (Brave, Nass; 2002) (Picard, Klein; 2002) así como la importancia de la estética en este comportamiento (Lavie, Tractinsky; 2004). Caracterizar a los humanos como procesadores computacionales de información es una visión sesgada del fenómeno de interacción entre personas y ordenadores, que deshumaniza al usuario y por tanto no permite comprender en toda su completitud los factores que influyen y motivan el uso y consumo de productos interactivos. Es por ello que en los últimos años se ha empezado a reconocer en el seno de la IPO que los aspectos emocionales juegan un papel fundamental en la interacción del usuario, no sólo desde una perspectiva hedónica de la interacción (Jordan; 1998), sino también por su impacto en la motivación de uso, la valoración del producto, su influencia en los procesos cognitivos, la capacidad de atención y memorización, y el rendimiento del usuario (Norman; 2002) (Brave, Nass; 2002).

La rápida expansión y evolución que está sufriendo la tecnología en los últimos años (tecnologías inalámbricas, dispositivos portátiles, realidad virtual, realidad aumentada, interfaces multimodales...) está diversificando aún más el perfil del usuario objetivo, las actividades en las que se enmarca la interacción, los usos que se da a la tecnología, los modelos de interacción e interfaces, y los contextos de uso. Un ejemplo de los nuevos retos a los que se enfrenta la IPO es la Computación Ubicua (Weiser, Gold, Brown; 1999), que hace referencia a un nuevo paradigma caracterizado por la omnipresencia de tecnología 'invisible' en nuestros entornos. Si a comienzos de la informática la interacción

predominante era entre un ‘mainframe’ y muchos usuarios, y después, con la aparición de los ordenadores personales, la interacción pasó a ser comúnmente entre un ordenador y una persona; actualmente cada vez es más común la interacción entre una persona y muchos ordenadores, ocultos en multitud de dispositivos y artefactos de nuestro entorno. Las interfaces se convierten de este modo en invisibles para el usuario, quien utiliza cotidianamente la tecnología centrado en sus objetivos, sin ser consciente de que se encuentra interactuando con multitud de sistemas informáticos.

Actualmente el foco de atención en IPO está dejando de ser cada uno de los componentes que intervienen (interfaz, usuario, ordenador), a favor del fenómeno que se produce entre ellos (interacción) (Rogers; 2004). El usuario no puede ser la unidad principal de análisis, ya que diseñar productos que enriquezcan su experiencia de uso no es posible sin entender y atender a los factores sociales, culturales y contextuales en los que se enmarca la interacción, las actividades en las que ésta se produce, y las motivaciones individuales y sociales que la originan. Si además, como señalaba Nardi (1995), la mejor interfaz es aquella que resulta transparente, que facilita y no obstruye la interacción, y a la que el usuario debe prestar muy poca (idealmente ninguna) atención; el objetivo que la IPO se propone es precisamente la desaparición de la interfaz, es decir, que su uso sea cada vez menos consciente por parte del usuario. Por tanto, la principal unidad de análisis de la IPO debe ser la interacción (Rogers; 2004), en vez del estudio aislado de los componentes implicados en dicho fenómeno. Como metafóricamente explica Beaudoin-Lafon (2004) “la Interacción Persona-Ordenador no es la ciencia de las interfaces de usuario, al igual que la Astronomía no es la ciencia de los telescopios”.

La interacción como unidad principal de análisis, junto al hecho de que cada vez más los productos con los que se interactúan difícilmente pueden ser considerados ordenadores o computadoras, está produciendo una progresiva evolución terminológica, reemplazando el uso del concepto “Interacción Persona-Ordenador” por el de “Diseño de Interacción”. Como afirman Kaptelinin y Nardi (2006) el Diseño de

Interacción no representa sólo el interés por los ordenadores, sino por artefactos digitales de todas las clases; y no sólo por las capacidades computacionales de dichos artefactos, sino por la totalidad de sus potenciales. Los mismos autores definen el Diseño de Interacción como el “esfuerzo de comprender el compromiso humano con la tecnología digital, y el uso de dicho conocimiento para diseñar artefactos más útiles y satisfactorios”.

2.2.3. Interacción Persona-Ordenador y visualización de información

Como afirma Harston (1998), la IPO es multidisciplinaria en su origen e interdisciplinaria en su práctica. Los profesionales e investigadores se retroalimentan entre sí, y las diferentes disciplinas que confluyen en la IPO, al afrontar el fenómeno de estudio desde diferentes ópticas, se enriquecen, transfirieren conocimiento y conforman una disciplina más global e inclusiva. Sin embargo, irónicamente, esta multidisciplinaridad ha provocado cierta fragmentación en la IPO, en oposición al consenso que caracterizó a etapas anteriores (Carroll; 1997, 2003). Un problema del veloz e inclusivo crecimiento de la disciplina ha sido que el objeto de estudio, así como las metodologías y principios para afrontarlo, se han vuelto más difusos y difíciles de comprender.

La relación IPO-IU no se encuentra exenta de desencuentros; y del lado de la investigación científica, muchos enfoques epistemológicos, corrientes teóricas y modelos se confrontan y compiten entre sí, a veces provocando el enfrentamiento entre investigadores. A esto hay que sumar que mientras que en los comienzos de la disciplina la publicación de estudios se concentraba en congresos y revistas especializadas en IPO, en los últimos años se ha producido una notable dispersión en actas de congresos y revistas de disciplinas ‘maternas’ y ‘transversales’. Como sugiere Grudin (2005), “la IPO está presente invisiblemente en cada una de ellas”.

Aunque, como se ha descrito, durante su corta historia la IPO ha sufrido numerosos cambios provocando cierta desestructuración, también es posible apreciar su progresiva maduración científica en el crecimiento de su producción científica, su presencia cada vez más cotidiana en planes de estudio, y su consecuente impacto en la sociedad.

Este trabajo, al proponer que la visualización de información debería ser estudiada en el marco de la IPO, no sólo lo hace con el objetivo de contextualizar teóricamente su investigación, sino también con el de ayudar a “desfragmentar” la propia IPO.

2.3. Teoría de la Interacción Persona-Ordenador

Las teorías y modelos son herramientas fundamentales para el análisis, comprensión, predicción y explicación de fenómenos, y por tanto para el desarrollo y evolución de cualquier disciplina científica. El presente estudio considera que la teoría - o teorías - que ofrece la IPO representan un marco efectivo para afrontar el estudio de la visualización de información, ofreciendo explicación del fenómeno de interacción entre personas y ordenadores, y sirviendo de guía tanto para el diseño y producción de interfaces visuales efectivas, como para la concepción de métodos y técnicas con este objetivo.

Una primera categorización - o más bien caracterización- de las teorías en IPO puede realizarse en base a su función o propósito. Ben Schneiderman, en un mensaje de la lista de discusión CHIplace en 2002 recogido por Rogers (2004), señalaba como deseables las siguientes funciones:

- Descriptiva: Proporcionar conceptos, clarificando terminología y guiando futura investigación.
- Explicativa: Ofrecer explicación de los fenómenos, relaciones y procesos.

- ‘Predictiva’: Predecir resultados de los cambios de valores en las variables componentes, como por ejemplo puede ser predecir el rendimiento o el comportamiento del usuario en la interacción.
- Preceptiva: Proporcionar orientación para el diseño.
- Generativa: Facilitar a los profesionales crear, inventar o descubrir.

El problema de que una teoría intente asumir varios propósitos al mismo tiempo es que no todos son compatibles entre sí, por lo que las teorías se caracterizan y diferencian por las funciones y propósitos que persiguen. Como indica Rogers (2004), en el seno de la IPO podemos percibir un movimiento desde teorías predictivas y preceptivas (enfoque cognitivo), hacia teorías más explicativas, analíticas y descriptivas (enfoque social).

Otra distinción que podemos hacer de las distintas teorías de IPO es el nivel descriptivo o focal del fenómeno de la interacción. Como foco de estudio teórico, la percepción y habilidad motora del usuario representan el nivel de descripción más específico, por debajo del nivel de la cognición humana, a su vez inferior al de la interacción social. Esta graduación o jerarquía, además, se corresponde o correlaciona con el marco de tiempo en el que se produce el fenómeno. Como afirma Dillon (2002), las respuestas psicofisiológicas (sensoriales y motoras) se producen en márgenes inferiores a una décima de segundo, los procesos cognitivos se corresponden con márgenes de entre 0.1 y 10 segundos, y cualquier acción o comportamiento más duradero debe ser estudiado desde su dimensión sociológica.

No obstante, esta distinción o categorización de las teorías tiene únicamente fines didácticos, ya que se trata definitivamente de una división idealizada, debido a la naturaleza multidimensional de las teorías (Carroll; 2003). Es decir, las diferentes teorías no sólo distan entre sí por el nivel de descripción del fenómeno interactivo, sino también por la perspectiva epistemológica y tradición científica de las que surgen. En concreto, los niveles cognitivo y social son los más difícilmente integrables, y su yuxtaposición, en el mejor de los casos,

daría lugar a una teoría global difícilmente asimilable por investigadores y profesionales, y con menos potencial aún para ayudar en la resolución de problemas concretos de diseño que las actuales teorías por separado.

A continuación se abordarán los dos grandes pilares teóricos que sustentan la investigación en IPO: La Teoría Cognitiva y la Teoría de la Actividad. Si bien la Teoría de la Actividad no ha alcanzado aún la popularidad de las cognitivas, creemos - y así se defenderá - que por sus características resulta la más adecuada para repensar y reflexionar sobre los modelos y metodologías de diseño desde la dimensión social de la interacción.

2.3.1. Teoría Cognitiva

La Psicología Cognitiva surge como un nuevo “paradigma” en oposición al Conductismo. Mientras que el Conductismo trata la mente humana como una “caja negra” que no puede ser estudiada por otro medio que no sea la conducta del sujeto (relación estímulo-respuesta); la corriente cognitivista, en sentido contrario, intenta explicar la conducta a través de los procesos y eventos mentales que conectan estímulo y respuesta. La discrepancia epistemológica entre la comunidad cognitiva y conductista parece a todos modos insalvable, resucitando la vieja disputa filosófica entre racionalistas y empiristas (Pérez Álvarez; 1985). Sin entrar, por el momento, en ningún tipo de discusión o crítica acerca de la validez o robustez de la teoría cognitiva, lo que debemos considerar es su presencia imperante e ineludible en la investigación sobre IPO, y el valor de sus aportaciones al estudio y práctica de la disciplina.

Aunque la Psicología Cognitiva aporta diversos enfoques y modelos, el conocido como Procesamiento Humano de Información (Broadbent; 1958) es sin duda el más destacable, y el que mayor impacto ha tenido en la IPO (Card, Moran, Newell; 1983). El Sistema de Procesamiento Humano de Información caracteriza a las personas como procesadores activos de información, utilizando la metáfora computacional. Es decir, el

procesamiento de información en las personas se concibe por analogía a como éste se produce en los ordenadores. Si los ordenadores adquieren información a través de dispositivos de entrada, la almacenan en memoria temporal y dispositivos de almacenamiento (memoria permanente), la transforman y procesan (CPU), y producen respuestas (dispositivos de salida); el Sistema de Procesamiento de Información Humano (Fig.1) presenta también un funcionamiento cíclico, en el que el procesador actúa como componente central de toma de decisiones, aplicando reglas de producción sobre la información adquirida a través de la percepción o recuperada de la memoria, que como resultado modificarán la memoria o producirán cambios en el mundo exterior a través de acciones motoras.

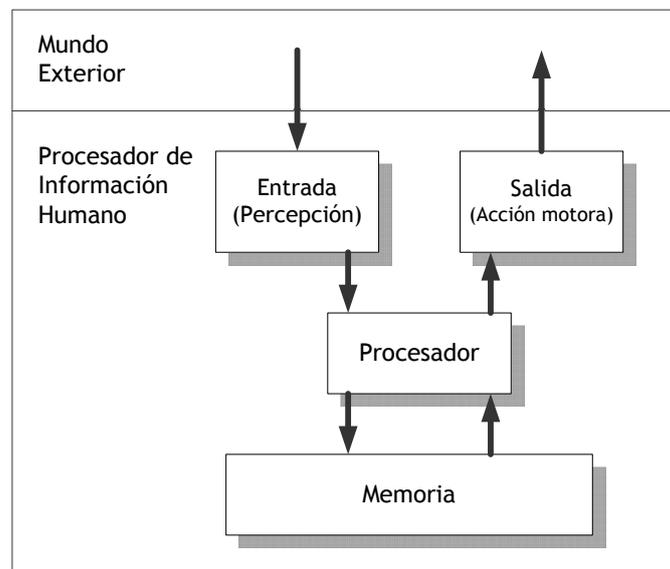


Fig.1 Sistema genérico de Procesamiento Humano de Información. Fuente: John (2003)

Este modelo nos sirve de marco para estudiar cada uno de los subsistemas, profundizando hasta modelos que intentan no solo describir, sino también predecir, el rendimiento, capacidad de aprendizaje y comportamiento de las personas en su interacción con ordenadores.

2.3.1.1. Percepción

El túnel de entrada de toda información hacia nuestra cognición es el conformado por nuestros sentidos, mecanismo fisiológico de la percepción. Resulta obvio que el estudio de la percepción es de vital importancia en la comprensión de la interacción entre personas y ordenadores. Del correcto diseño de una interfaz dependerá tanto que el usuario pueda captar y adquirir aquella información que satisfaga sus objetivos, como aquella necesaria para poder usar el sistema.

De todos los sentidos que posee el ser humano, el visual es el más intensamente utilizado en la vida diaria y el de mayor capacidad. En la interacción con los ordenadores, la visión tiene aún mayor protagonismo, ya que las interfaces en la mayoría de casos presentan la información en formato exclusivamente visual. Aunque interfaces más avanzadas empiezan a ofrecer información (relevante) por otros canales como el audio (ej. interfaces de realidad virtual), el visual sigue siendo el predominante.

En el caso de la visualización de información debemos recordar que el proceso de visualizar no está limitado a la visión, ya que, por ejemplo, es posible visualizar información a partir de estímulos auditivos. En otras palabras, visualizar no es ver con los ojos, sino ver con la mente. Sin embargo, la inmensa mayoría de interfaces de visualización, como las objeto de estudio en este trabajo, están basadas en la representación visual de la información, por lo que el alcance de los siguientes apartados está delimitado a aquellos procesos perceptuales asociados a la visión.

2.3.1.1.1. Proceso de percepción visual

Formalmente se suele distinguir entre sensación y percepción. Mientras que la sensación es el mecanismo fisiológico de la formación de un impulso nervioso a partir de un estímulo físico, la percepción es la asignación de significado e interpretación cognitiva del estímulo, una

construcción mental de la información recibida del exterior. Sin embargo, como indican Cañas, Salmerón y Gámez (2001) esta distinción es más didáctica que real, ya que sensación y percepción están íntimamente ligados. Por tanto, al referirnos aquí al proceso de percepción visual estaremos incluyendo tanto al proceso sensorial como al perceptual originados a partir de estímulos visuales.

Ware (2003) propone un modelo simplificado del proceso de percepción visual, estructurado en tres etapas (Fig. 2). La primera etapa es la de captación visual temprana o sensorial, en la que intervienen la óptica del ojo, los fotorreceptores, y las primeras etapas del procesamiento neuronal. En esta etapa la información fluye en forma de características básicas: color, dirección del movimiento y elementos básicos de la forma. De especial importancia en esta etapa es estudiar la percepción del color, así como los fenómenos de percepción pre-atentiva, por sus importantes implicaciones en el diseño de interfaces gráficas.

En la segunda etapa de la percepción visual tienen lugar una serie de procesos de detección de patrones, tales como el contorno, regiones y grupos de movimiento. Comprender cómo se produce la percepción de patrones y formas, resulta igualmente de vital importancia para el diseño de interfaces, principalmente de cara a la disposición y ordenación visual de los diferentes elementos gráficos en el espacio visual de la interfaz.

En la última etapa, la información visual se almacena en la memoria operativa visual - para la información no visual se emplean otras memorias operativas, como la memoria verbal operativa-. La memoria operativa es la utilizada por el procesador central en la resolución de problemas, y se caracteriza fundamentalmente por tener una capacidad limitada en términos de número máximo de ítems a manejar concurrentemente.

Entre etapa y etapa tienen lugar mecanismos de selección que controlan qué información pasa de una a otra (Wolfe; 2006), ya que si no se

realizara ningún filtrado de la información entrante, la percepción desembocaría inevitablemente en el colapso cognitivo.

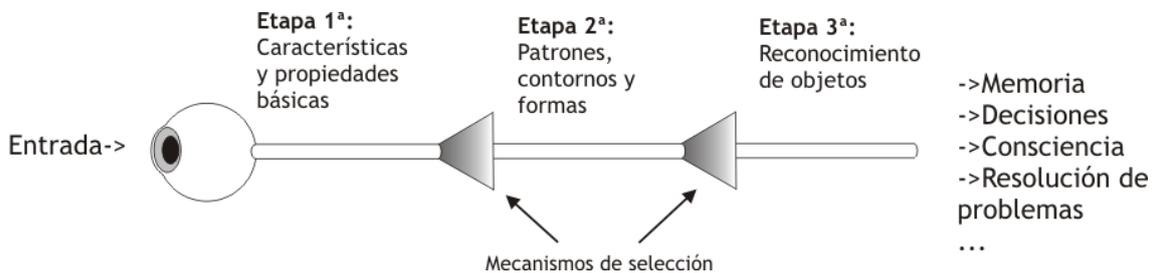


Fig.2 Esquema simplificado del proceso de percepción visual, basado en Ware (2003) y Wolfe (2006).

Como vemos en la figura 2, a partir de esta tercera etapa entran en juego otros procesos vinculados a la percepción, como la resolución de problemas y la memoria, pero antes de abordarlos vamos a describir más detalladamente los factores clave de la percepción visual: el color, la atención, percepción de patrones y reconocimiento de objetos.

2.3.1.1.2. Color

La percepción del color comienza con el impacto de la luz (fotones) en la retina del ojo, y su absorción y codificación por las células fotorreceptoras, que envían la información en forma de impulsos eléctricos a las neuronas del cerebro. Existen dos tipos de fotorreceptores, los conos y los bastones, con funciones diferentes. Los conos son los responsables de detectar el color, y funcionan bien con alta iluminación, mientras que los bastones son más sensibles a la luz, y por tanto están más adaptados a la oscuridad.

Un concepto clave en la percepción humana del color es el de la Tricromacia, condición del ser humano de poseer tres canales independientes para la transmisión de información de color, derivada de los tres tipos diferentes de conos (Byrne, Hilbert; 1997). Estos tipos de conos se clasifican en función de su sensibilidad espectral, y son denominados según su límite sensible de longitud de onda: conos S

(longitud corta, azul), conos M (longitud mediana, verde) y conos L (longitud larga, rojo). Por tanto, la percepción de color en los humanos es tridimensional, resultado del total de los diferentes grados de respuesta de cada uno de estos conos al impacto de la luz (Webster; 1996).

La importancia de la tricromacía para la IPO estriba en que es precisamente la base del funcionamiento de los monitores (CRT y LCD) que son utilizados, entre otros dispositivos, por los ordenadores. Los monitores producen diferentes mezclas de estos colores primarios (rojo, azul y verde) para elicitar el más amplio rango posible de respuestas de los conos de la retina y, por tanto, de sensaciones visuales (Ware; 2003).

Más allá de la naturaleza tricrómata del ser humano, y de cara al diseño de interfaces, resulta también importante atender a procesos post-receptores como el derivado de la teoría de los procesos oponentes, descrita originalmente por Hurvich y Jameson (1957). Esta teoría surge de la apariencia subjetiva de la luz, en concreto de la existencia de pares de colores que no pueden verse al mismo tiempo: rojo-verde, azul-amarillo y negro-blanco (acromático). No son visibles, por ejemplo, el verde rojizo o el azul amarillento. Como describe Webster (1996) la razón de este fenómeno es que el proceso de visión humana se divide en dos etapas, en el que las salidas producidas por los tres tipos de conos se combinan para formar tres canales post-receptores diferentes: uno codifica la luminancia (blanco-negro) y otros dos el color (rojo-verde y azul-amarillo). La teoría de los procesos oponentes está ampliamente sostenida por multitud de evidencias, tanto desde el estudio neurofisiológico como del intercultural. Como señala Ware (2003), la teoría de los procesos oponentes explica, por ejemplo, por qué los colores rojo, verde, azul, amarillo, negro y blanco sean tan importantes en todas las culturas y sociedades.

La consecuencia más directa de esta teoría para el diseño de interfaces es que se debe evitar la combinación de los colores incompatibles (rojo, verde, azul y amarillo), principalmente de los puros o saturados. Por ejemplo, poner letras en color azul sobre fondo amarillo puede inhibir su

visibilidad, o el texto en rojo sobre un fondo azul puede parecer que ‘vibra’ (Cañas, Salmerón, Gámez; 2001).

Al hablar de la percepción del color lo hemos hecho desde la naturaleza general del ser humano, pero no podemos eludir la cuestión de la diversidad funcional de las personas, en concreto la relacionada con las deficiencias visuales cromáticas. Existe un considerable porcentaje de personas que no son tricrómatas, ya que no pueden ver alguno/s de los colores (rojo, verde, azul y amarillo) o incluso ninguno (visión monocromática). En concreto aproximadamente el 4% de la población presenta alguna deficiencia visual cromática (8% en hombres y 1% en mujeres) (Brewer; 1999). Esto significa que, como norma general en el diseño de interfaces, la información visual codificada mediante el color no debe ser esencial, o si lo es debe ser codificada de forma redundante, utilizando por ejemplo las formas gráficas para codificar la misma información.

Otra cuestión importante es la relacionada con el contraste de color entre elementos superpuestos, como por ejemplo entre color de fuente y del fondo en el texto. Dado que a menor contraste entre colores, mayor es la dificultad para discriminar visualmente las formas, en el caso del texto un bajo contraste dificultará severamente su legibilidad. Además, ya que el contraste determina la visibilidad, también condiciona la capacidad de atraer la atención.

Directamente relacionado con el contraste se encuentra la polaridad, de especial importancia en la presentación de información textual y la lectura. En este sentido existen suficientes evidencias de que los usuarios prefieren la polaridad positiva (texto oscuro sobre fondo claro), y a nivel teórico la elección de esta polaridad reduciría la distorsión óptica, la sensibilidad de contraste y la probabilidad de reflejos en la pantalla (Muter; 1996).

Los colores no siempre tienen la misma apariencia, ya que ésta se ve afectada por el contexto. Como indica Brewer (1999), áreas pequeñas de color tienden a parecer más similares a su entorno por un proceso

perceptual de asimilación. Algunas ilusiones ópticas derivadas del contexto son que un mismo color sobre fondos distintos pueda ser percibido como colores diferentes, o que, por el contrario, dos colores distintos sobre fondos distintos puedan percibirse como iguales.

Otra recomendación clásica sobre el uso del color en el diseño de interfaces es no abusar del número de colores diferentes. Esta directriz tiene su base en los procesos que ocurren en la primera y última etapa de la percepción visual. Por un lado una variedad excesiva de colores disminuirá la capacidad de cada uno de ellos para atraer la atención (Wolfe; 2005), homogeneizando la imagen (la atención visual será tratada con más detalle en posteriores apartados). Por otro lado, y no menos importante, las limitaciones del ser humano en cuanto a procesamiento cognitivo y memoria operativa (que entran en juego en la tercera etapa del proceso perceptivo) sugieren que un exceso de codificaciones diferentes puede provocar sobrecarga cognitiva y, por tanto, dificultad para percibir la información codificada mediante color.

Conocer los principios fisiológicos y teóricos de la percepción del color, y las recomendaciones derivadas ya comentadas, supone una herramienta de gran utilidad para saber cómo no debe ser usado el color en el diseño de interfaces. Sin embargo, no ofrecen demasiadas pistas sobre cómo codificar información mediante color de forma efectiva. En este sentido, el trabajo de Brewer (1999) proporciona un conjunto de esquemas clarificadores para este propósito, basados en la tridimensionalidad del color.

La tridimensionalidad de la percepción del color, como hemos visto, está determinada por el proceso de sensación visual y los tres tipos de conos de la retina que intervienen, y posteriormente por la re-configuración de la información en tres canales durante los procesos post-receptores. Ahora bien, desde una perspectiva de la percepción intuitiva y la apariencia subjetiva, la tridimensionalidad del color puede definirse como el agregado de tres variables: matiz, saturación y brillo.

- Esquema binario: Estos esquemas son un tipo específico de esquema cualitativo con sólo dos categorías, codificadas mediante el matiz o el brillo (o ambos).
- Esquema divergente: En este esquema el rango de datos presenta un punto de inflexión, que se representa mediante un color claro, y los valores divergentes (de uno y otro lado del valor de inflexión) se representan usando matices diferentes a cada lado. En el caso de que haya varios valores diferentes a un mismo lado se utilizan graduaciones del brillo.

Como se puede apreciar, la saturación no es utilizada directamente como base para ninguno de los esquemas. Esto se debe a que los diferentes grados o niveles de saturación son más difícilmente perceptibles que el matiz o el brillo, por lo que la autora recomienda que sea usado en conjunción con el brillo (ej. brillo claro y poca saturación, brillo oscuro y mayor saturación).

Cuando en vez de una, se necesitan codificar mediante el color dos variables diferentes, podemos combinar los cuatro esquemas dando como resultado seis esquemas bivariados diferentes (Fig.3): secuencial-secuencial, secuencial-cualitativo, binario-cualitativo, binario-divergente, secuencial-divergente y divergente-divergente.

La percepción del color es un tema de amplio y complejo estudio, pero de vital importancia en el diseño de interfaces de visualización de información. Inevitablemente, fuera de los límites de esta revisión quedan cuestiones tan extensas como la estética y las preferencias subjetivas del color, o las connotaciones y significados del color en las diferentes culturas y sociedades.

2.3.1.1.3. Atención y búsqueda visual

Atención y percepción tienen una relación de dependencia mutua. Nuestra atención es la que guía qué percibimos, pero esta subordinación

puede invertirse súbitamente, siendo un estímulo sensorial el que interfiera, atraiga y determine nuestra atención.

En la interacción con los ordenadores, las personas estamos expuestas a multitud de estímulos sensoriales, tanto procedentes del ordenador como del entorno. Con el objetivo de poder llevar a cabo nuestras tareas y debido a nuestras limitaciones perceptuales y cognitivas, economizamos selectivamente nuestra atención y la guiamos voluntariamente hacia aquellos estímulos de nuestro interés. Imaginemos, por ejemplo, estar leyendo un artículo de una página web mientras se ignora la conversación que mantienen otras personas en la habitación, o incluso los mensajes publicitarios presentes en la misma página web. Para que este proceso de atención selectiva sea posible, las personas disponemos de mecanismos de filtrado que bloquean el procesamiento de otros canales y estímulos sensoriales. Sin embargo la atención no puede ser controlada completamente de forma voluntaria, ya que los mecanismos de filtrado no desconectan categóricamente el resto de canales, ni impiden la percepción de todos los estímulos no atendidos. En el ejemplo citado, nuestra lectura puede verse interrumpida en cualquier momento porque alguien de la misma habitación nos llame por nuestro nombre, o por un sonido inesperado producido por el ordenador. Por tanto la atención selectiva no posibilita un aislamiento sensorial completo, sino que su función es facilitar la detección de los cambios que se produzcan en los estímulos atendidos, frente a la detección de cambios del resto de estímulos.

Como indica Cowan (1988), la atención selectiva requiere que ciertos análisis perceptuales tengan lugar de forma automática, en forma de habituación a los estímulos desatendidos. Es decir, en vez de rechazar o filtrar canales enteros, lo que se produce es una habituación o acostumbramiento a estímulos específicos de esos canales. La deshabituación, por su parte, ocurre cuando se produce algún cambio físico o de gran significación en los estímulos desatendidos, pasando éstos a ser foco de nuestra atención.

Cuando interactuamos con interfaces gráficas, constantemente exploramos visualmente la interfaz a través de multitud de búsquedas visuales consecutivas. Durante la búsqueda, las personas vemos más de lo que somos conscientes de estar viendo, ya que sólo después de fijar o emplear nuestra atención uno puede reconocer un objeto (Wolfe, Klempe, Dahlen; 2000). Por tanto, es precisamente el comportamiento de nuestra atención visual el que mayor interés tiene de cara al diseño de interfaces gráficas fácilmente explorables.

La búsqueda visual puede definirse como la localización o identificación visual de un ítem-objetivo entre un número de ítems-distractores. Se trata, sin duda, de una concepción necesariamente reduccionista del fenómeno de búsqueda visual, derivada del procedimiento de las pruebas experimentales tradicionalmente utilizadas para su estudio. En estas pruebas de laboratorio, a los sujetos se les encomienda localizar un ítem-objetivo de entre un conjunto de ítems-distractores. En la mitad de los ensayos el ítem-objetivo está presente (ensayos positivos), mientras que en la otra mitad se encuentra ausente (ensayos negativos). Para evaluar el rendimiento o eficiencia de la búsqueda visual, lo que se mide es la relación entre el número de ítems presentes en pantalla y el tiempo de reacción (TR) - tiempo que tardan los sujetos en determinar si el ítem-objetivo se encuentra en pantalla o no-.

La Teoría de la Integración de Características (Feature-Integration Theory of Attention) (Treisman, Gelade; 1980) propone dos etapas en el proceso de percepción visual (correspondientes a las dos primeras etapas descritas en el apartado 2.3.1.1.1). En la primera etapa la escena visual es codificada en sus diferentes dimensiones, como color, orientación, frecuencia espacial y dirección del movimiento. Todas estas características son registradas automáticamente y en paralelo (varias al mismo tiempo), a lo largo de todo el campo visual. En la segunda etapa, esas características básicas son combinadas para formar objetos unitarios, integración que ya no se produce en paralelo, sino de forma serial o secuencial, es decir, ítem a ítem. El punto de unión entre las dos etapas se produce con la fijación de nuestra atención, es decir, cuando las características presentes en el foco de nuestra atención se configuran

para formar un objeto individual. Por tanto, podemos hablar de una etapa pre-atentiva y otra atenta (Treisman, Gormican; 1988).

En la búsqueda visual pre-atentiva, ya que se procesan multitud de características básicas sin necesidad de atención focalizada, una característica como el color o la orientación puede distinguir instantáneamente el ítem-objetivo de los ítems-distractores. Así, el ítem-objetivo parecerá que sobresale (efecto 'pop out') respecto al resto. Podemos comprobar este efecto observando la figura 4, donde la línea horizontal es percibida de forma inmediata sobre el resto de ítems distractores.

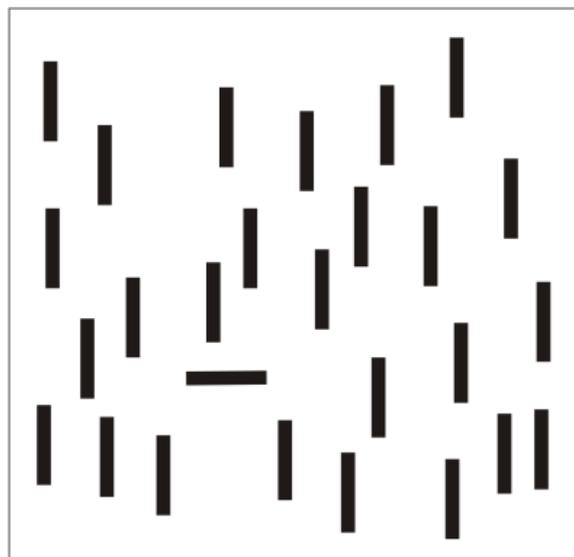


Fig.4 Ejemplo de efecto 'pop out' en la búsqueda visual pre-atentiva

Debido al procesamiento en paralelo de multitud de dimensiones de la escena visual, en la búsqueda pre-atentiva el aumento del número de ítems distractores no aumenta significativamente el TR (tiempo de reacción). Es decir, la localización visual del ítem-objetivo seguirá siendo instantánea independientemente del tamaño del conjunto de ítems.

Por el contrario, cuando el ítem-objetivo está caracterizado por una combinación de propiedades, ninguna de las cuales exclusiva, la

búsqueda visual requiere de atención focalizada (búsqueda atenta), y por tanto se convierte en un proceso secuencial o serial, lo que significa que cuanto mayor sea el número de distractores presentes, mayor será el TR (Palmer; 1995). Por ejemplo, en la figura 5, localizar el ítem azul-horizantal requeriría de una búsqueda serial, y por tanto más costosa que la búsqueda requerida en el anterior ejemplo.

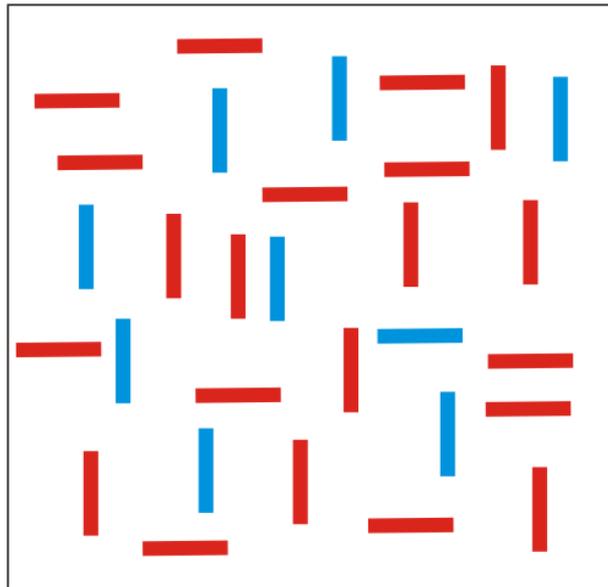


Fig.5 Ejemplo en el que localizar el ítem objetivo requiere de una búsqueda visual serial

Posteriormente, Duncan y Humphreys (1989) pusieron en duda la dicotomía entre mecanismos de búsqueda paralelos y seriales característica de la Teoría de la Integración de Características. Estos autores conciben la eficiencia de la búsqueda visual como un continuo, eficiencia que disminuirá de forma progresiva con el incremento de la similitud entre ítems-objetivo e ítems-distractores, así como con la disminución de la similitud de los ítems-distractores entre sí. Es precisamente esta última variable (heterogeneidad entre los ítems-distractores) la que los autores advierten que Treisman y Gelade (1980) no tuvieron en cuenta, a pesar de su significativo impacto en la eficiencia de la búsqueda visual.

En base a la propuesta de Duncan y Humphreys (1989) podemos deducir que el denominado efecto ‘pop-out’ no solo está provocado por el hecho de que el ítem-objetivo posea propiedades únicas y diferenciadas respecto al resto de ítems, sino también por la gran similitud que los ítems-distractores tienen entre sí. De hecho, en la gran mayoría de experimentos y ejemplos (como el de la figura 4) recogidos en la literatura científica sobre los procesos pre-atentivos, todos los ítems-distractores utilizados son idénticos entre sí. En base al trabajo de estos autores se podría concluir que no existen búsquedas visuales muy eficientes (procesamiento paralelo) y otras cuya eficiencia depende del número de ítems-distractores (procesamiento serial), sino que la eficiencia de toda búsqueda será gradual, directamente dependiente de las diferencias objetivo-distractores y la similitud distractores-distractores.

La Teoría de la Búsqueda Guiada es una teoría híbrida de las anteriores - en cierto modo integradora- y fundamentada sobre mayor número de evidencias empíricas. Originalmente propuesta por Wolfe, Cave y Franzel (1989), esta teoría ha sido progresivamente revisada y reelaborada, hasta alcanzar la versión 4.0 (Wolfe; 2006). Al igual que la Teoría de la Integración de Características, la Búsqueda Guiada divide el proceso de búsqueda visual en dos etapas, una pre-atentiva y otra atenta. En la primera se registran las propiedades básicas de la escena visual, y en la segunda éstas son reconfiguradas para la formación de objetos unitarios. Sin embargo, a diferencia de la Teoría de la Integración de Características donde el procesamiento era en paralelo en la primera etapa y serial en la segunda, en la Teoría de la Búsqueda Guiada ambos procesamientos son masivos y paralelos. No obstante, el acceso de una a otra etapa no es paralelo, ya que se produce a través de un obligatorio “cuello de botella”, mecanismo de peaje tutelado por la atención visual selectiva (Wolfe; 2006) (véase figura 2). Este mecanismo selectivo no es un modelo de difusión ni paralelo ni serial, sino uno híbrido. El autor utiliza para explicarlo la metáfora del “túnel de lavado”: aunque los coches entran uno a uno, varios coches pueden estar en el túnel al mismo tiempo.

Un componente crítico en el modelo de Búsqueda Guiada, y por el que precisamente recibe ese nombre, es el que explica cómo se realiza la selección o discriminación de propiedades entre una y otra etapa. Según este modelo, la atención y selección de propiedades es un proceso guiado, y las diferencias en la eficiencia de una búsqueda dependen de la calidad de esta orientación. La selección se encuentra guiada por una abstracción categórica de las propiedades o características básicas de la primera etapa en forma de mapa de activación. De forma resumida podemos decir que en este mapa, cada ítem se ve caracterizado por la suma de su activación ‘bottom-up’ y su activación ‘top-down’, que conjuntamente conforman la capacidad del ítem para atraer la atención. Por un lado, la activación ‘bottom-up’ es extrínseca, y está determinada por el grado de disimilitud entre el ítem y sus ítems vecinos. Por otro, la activación ‘top-down’ es intrínseca, ya que está determinada por la similitud entre las propiedades del ítem y las propiedades deseadas o buscadas por el sujeto.

Según esta teoría, el efecto ‘pop out’ de la figura 4 está originado por la activación ‘bottom-up’, que guiará nuestra atención directamente hacia el ítem horizontal, debido a su gran disimilitud con el resto de ítems vecinos, y sin necesidad de que nuestra búsqueda esté previamente dirigida hacia ninguna propiedad en concreto. En la figura 5, en cambio, la activación ‘bottom-up’ se encuentra más repartida entre los diferentes ítems, por lo que es la activación ‘top-down’ la que además orienta nuestra búsqueda visual. Las propiedades deseadas para el ítem-objetivo (azul y horizontal), condicionarán que en la búsqueda rápidamente sean descartados aquellos que no cumplen con alguna de estas propiedades, previniendo el despilfarro de recursos atencionales. Esto explica, por ejemplo, que aunque la búsqueda en la figura 5 no es instantánea, tampoco sea completamente secuencial (recorrido visual por todos y cada uno de los ítems presentes). Es decir, el mapa de activación orienta la selección que se produce en el “cuello de botella” entre etapas, guiando nuestra atención hacia los ítems con mayor activación para que sean sus propiedades visuales las que pasen a la segunda etapa, y no las de todos los ítems presentes en la escena. Aunque la búsqueda visual es un proceso guiado automáticamente, tiene

un orden asistemático, ya que como indican Wolfe, Álvarez y Horowitz (2000) el direccionamiento voluntariamente ordenado y deliberado de la atención disminuye la eficiencia de la búsqueda, por lo que las personas instintivamente evitan la sistematización de sus búsquedas.

Otro factor de interés que condiciona la eficiencia de la búsqueda visual es el de la 'memoria' de este proceso, que se refiere al mecanismo de 'marcado' durante la búsqueda de los ítems reconocidos como distractores con el objetivo de que no vuelvan a ser reexaminados en la misma búsqueda. Horowitz y Wolfe (1998) afirmaban, sobre resultados de pruebas experimentales, que la búsqueda visual era un proceso amnésico, en el que no se almacenaba información permanente alguna sobre los ítems examinados. Posteriormente, y como resultado de la experimentación con mayor variedad de pruebas, ambos autores han matizado esta afirmación (Horowitz; 2006) (Wolfe; 2006). Existe por tanto una memoria en la búsqueda visual, aunque ésta es volátil y muy limitada en cuanto al número de ítems que pueden 'recordarse'.

Conocer cómo codificar información visual pre-atentivamente procesable en las interfaces gráficas de visualización resulta de especial interés, ya que estas interfaces tienen por objetivo transmitir de forma visual la mayor cantidad de información posible. De esta forma se posibilitaría al usuario llevar a cabo ciertos tipos de tareas visuales con gran rapidez y precisión. Entre las tareas pre-atentivas podemos señalar la detección de elementos característicos o prominentes, la discriminación visual de conjuntos de elementos, o incluso la rápida estimación relativa de grupos de elementos respecto al total (Healey, Booth, Enns; 1996).

Para el diseño y codificación de información visual, por tanto, debemos considerar qué dimensiones visuales guían u orientan nuestra atención visual, y cuál es la capacidad potencial de cada uno de estos atributos en esta labor. Wolfe y Horowitz (2004), sobre las pruebas experimentales recogidas en la extensa literatura científica sobre el tema, enumeran los diferentes atributos visuales que guían nuestra atención, clasificándolos en cinco grupos, en función de su probabilidad de ser fuente de la orientación de la atención. De todos los grupos, el que más nos interesa

por su mayor potencial es el primero, que incluye el color, el movimiento, la orientación y el tamaño. Es decir, la codificación de elementos visuales a través de estos atributos es la que con mayor capacidad nos permitirá dirigir la atención visual del usuario. Pero además, debemos considerar que las características o diferentes valores que pueden tomar estos atributos, también condicionan su capacidad para guiar nuestra atención. En el caso del movimiento, por ejemplo, es más fácil localizar visualmente un ítem-objetivo en movimiento entre un conjunto de distractores estáticos, que un ítem-objetivo estático entre distractores en movimiento (Wolfe; Horowitz; 2004).

Las etapas posteriores a la selección atenta - la percepción de patrones y formas (procesos atentos) y el reconocimiento de objetos (procesos post-atentos) - serán detallados en los siguientes apartados.

2.3.1.1.4. Percepción de patrones y formas

La segunda etapa de la percepción visual se origina a partir de la fijación de nuestra atención visual, por lo que podemos denominarla etapa atenta. En esta etapa, las propiedades o características que superan el filtro atento se reconfiguran para formar patrones, estructuras, formas, contornos y regiones. Es este proceso de organización el que hace que la percepción no sea una caótica yuxtaposición de sensaciones elementales sobre características básicas como colores o movimientos (Palmer, Rock; 1994). La percepción de patrones como proceso organizativo es, por tanto, un proceso de resolución de problemas visuales, por lo que entender cómo se produce supone una valiosa ayuda para el diseño de interfaces fácilmente perceptibles (Ware; 2003).

La gran mayoría de teorías sobre percepción de formas tienen su origen en la psicología de la Gestalt, corriente surgida en Alemania a principios del siglo XX, y entre cuyos exponentes más reconocidos se encuentran Max Wertheimer, Wolfgang Köhler, Kurt Koffka y Kurt Lewin. El término Gestalt puede ser traducido como 'forma', 'figura' o 'estructura'. Según la teoría de la Gestalt (Gestalttheorie) nuestro sistema visual construye

una representación distorsionada de la realidad a partir de la información sensorial y de nuestras experiencias previas (memoria). En la percepción visual, las formas y estructuras no pueden entenderse como el resultado de la suma individualizada de sus componentes, sino que, como reza el célebre axioma de esta teoría, ‘el todo es más que la suma de sus partes’ (Marcos-Mora; 2004). Esta máxima en cierto modo es incompatible con las teorías de búsqueda visual analizadas previamente, ya que las características básicas filtradas de la etapa anterior (pre-atentiva) no permiten predecir, por sí solas, algunas de las propiedades que presentarán estos patrones estructurales en etapas atentas. Es decir, existe una brecha teórica entre la recepción independiente de las características básicas de un objeto y su percepción como un todo. Sin embargo, a pesar de su difícil conexión con otras teorías, la teoría de la Gestalt ha tenido y tiene un innegable peso en áreas como el diseño gráfico o la IPO, debido a su capacidad explicativa de los fenómenos perceptuales. Además, la teoría de la Gestalt no sólo ha servido de base para el desarrollo de teorías psicológicas de la percepción (Palmer, Rock; 1994), sino incluso, más recientemente, como nuevo enfoque para la investigación neurofisiológica (Ehrenstein, Spillmann, Sarris; 2003).

Resultaría inabarcable para este trabajo el análisis de la teoría de la Gestalt en toda su completitud, por lo que se centrará en su componente de mayor relevancia para el diseño de interfaces visuales: las leyes de percepción de patrones. Las leyes de la Gestalt fueron originalmente enunciadas por Koffka (1935), aunque posteriormente diferentes autores han propuesto nuevas leyes. Las leyes más importantes para el diseño de interfaces son (Ware; 2003) (Chang, Dooley, Tuovinen; 2002):

- Ley de proximidad: Los elementos próximos entre sí, y distanciados del resto, son percibidos conjuntamente.
- Ley de similitud: Los elementos que comparten características visuales (forma, color, tamaño, orientación, textura) tienden a ser agrupados perceptualmente.
- Ley de cierre: Nuestra mente tiende a completar formas inacabadas.

- Ley de simetría: Las formas asimétricas son percibidas más dificultosamente y como incompletas.
- Ley de continuación: La atención visual tiende a seguir instintivamente la dirección espacial de los elementos. Cuanto más suaves sean los cambios de dirección más fácilmente serán percibidos y agrupados conjuntamente los elementos.
- Ley de destino común: Los elementos que se mueven hacia un mismo destino o una misma dirección son agrupados perceptualmente.
- Ley de región común: Elementos ubicados dentro de una misma región cerrada son percibidos como agrupados.
- Ley de conexión: Elementos conectados por otros elementos (como líneas) son percibidos como una misma unidad.

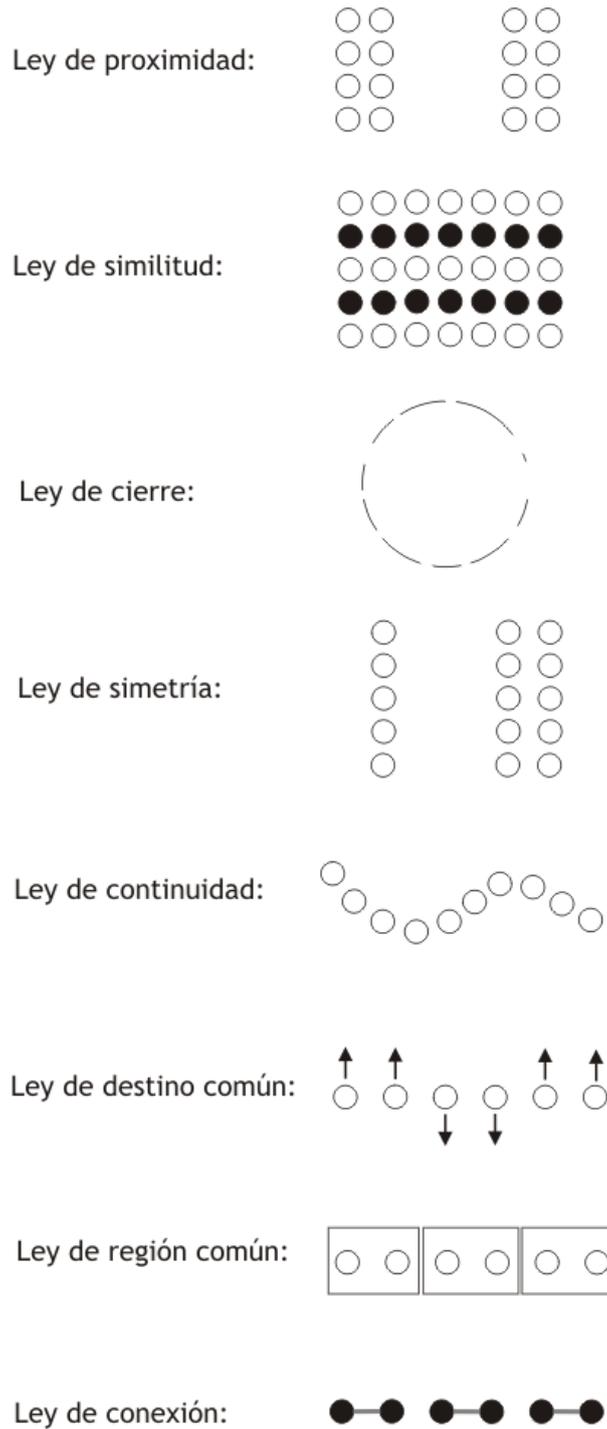


Fig.6 Ejemplos gráficos de las leyes de la Gestalt.

Gran parte de estas leyes o principios están referidos a cómo agrupamos unidades perceptualmente, y cómo grupos son percibidos como una misma unidad. Si la percepción es un proceso de organización, la agrupación perceptual es el eje de este mecanismo.

Al contrario de lo que se pueda suponer, la organización perceptual no parte de las unidades más básicas o indivisibles que van siendo agrupadas progresivamente de forma jerárquica. Como propone la teoría de Palmer y Rock (1994,1994b), tras un proceso de detección de bordes, formación de regiones y diferenciación de figura-fondo, perceptualmente partimos de unas unidades de entrada. Estas unidades, en un proceso de organización parte-todo, pueden posteriormente ser voluntariamente agrupadas en unidades supraordinadas, o divididas mediante un proceso de ‘parsing’ en unidades subordinadas. Por ejemplo, cuando visualizamos un formulario de una interfaz gráfica, podemos percibir los botones como unidades de entrada. Posteriormente podemos percibir su relación de agrupación con otras unidades del formulario (otras unidades similares, próximas o en la misma región), o descomponer el botón en unidades subordinadas (caja y texto).

Las leyes de la Gestalt nos sirven de guía sobre cómo comunicar visualmente relaciones jerárquicas entre unidades, considerando que, por norma, cuantos más principios se usen conjuntamente para comunicar las mismas relaciones de agrupación, más fácilmente serán percibidas. Por el contrario, si varios principios operan de forma opuesta, las relaciones denotadas por alguno de los principios pueden verse anuladas por las de otro de los principios (Palmer; Rock; 1994).

Además, como indica Ware (2003), las leyes de la Gestalt tienen otras posibles aplicaciones a las de la agrupación jerarquizada. Un caso es en la representación de grafos: disposición visual de los nodos y presentación de enlaces entre nodos. Como se puede ver en la figura 7, un mismo grafo puede presentarse de diferentes formas, enfatizando una estructura particular (ley de simetría) o enfatizando el flujo entre nodos (ley de continuidad).

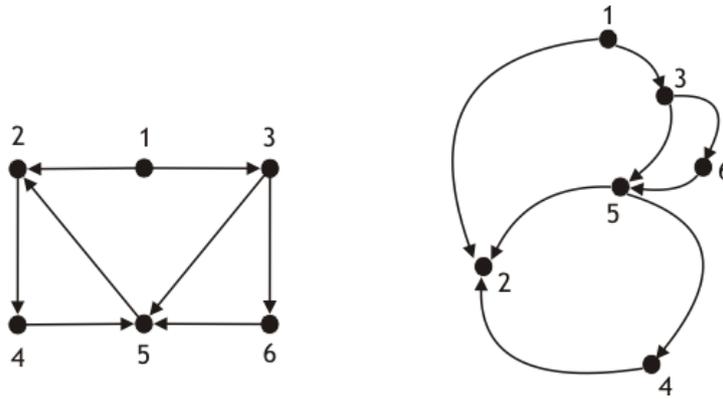


Fig.7 En la representación de la izquierda, se usa el principio de simetría para enfatizar la estructura. En la derecha, el principio de la continuidad enfatiza el flujo entre nodos.
Fuente: Ware (2003).

Las leyes de la Gestalt, por sí solas, nos ofrecen una poderosa guía para la tarea de diseñar interfaces fácilmente perceptibles, no ya orientadas a etapas de procesamiento pre-atentivo, sino a la resolución visual de problemas de organización y ordenación perceptual. Pero además, esta agrupación tiene efectos no sólo en la organización perceptual, sino incluso en la organización postperceptual, ya que como demuestran Woodman, Vecera y Luck (2003) los objetos que son agrupados perceptualmente, tienden a almacenarse conjuntamente en la memoria visual operativa.

2.3.1.1.5. Reconocimiento de objetos

Captar los estímulos físicos a través de nuestros sentidos, guiar nuestra atención hacia determinadas características visuales y organizar perceptualmente dicha información en estructuras y formas, son procesos previos dirigidos al objetivo final de la percepción visual: la interiorización y asignación de significado de los objetos presentes en la escena visual. En esta etapa post-atentiva, dichos objetos permanecen retenidos en la memoria operativa visual durante el tiempo necesario para poder realizar operaciones cognitivas. Entre estas operaciones se encuentra el reconocimiento de objetos, que se produce en forma de enlace activo entre la representación del objeto en nuestra memoria

visual, y su representación en nuestra memoria a largo plazo (Wolfe; Klempe; Dahlen; 2000). Es decir, reconocer implica conocer previamente y establecer una relación entre la representación percibida y la conocida. En el caso de que el objeto no pudiera ser reconocido, si su representación es interiorizada y almacenada en la memoria a largo plazo, se estaría produciendo una adquisición de conocimiento.

El número de objetos que pueden permanecer almacenados al mismo tiempo en la memoria visual operativa es reducido, aunque como indica Ware (2003) estos objetos pueden ser complejos. Pero antes que las limitaciones numéricas y temporales de la memoria (que serán tratadas en el apartado), de cara al diseño de interfaces gráficas debemos cuestionarnos cómo son representados o codificados perceptualmente estos objetos.

La explicación más plausible viene dada por la teoría del reconocimiento por componentes (Biederman; 1987), que describe la percepción visual de objetos por analogía a la percepción del habla. Como es sabido, la percepción del habla se produce sobre una serie limitada de elementos individuales, los fonemas (en español son 24 diferentes), que son combinados en la formación de palabras. La percepción visual no se sustenta sobre fonemas, sino sobre lo que el autor denomina 'geones' (iones geométricos): componentes volumétricos básicos como cilindros, bloques, conos y cuñas. Todos los objetos, por tanto, pueden ser descompuestos en 'geones', y son precisamente los 'geones' presentes en el objeto y la colocación (posición y orientación) de dichos componentes los que determinan la identificación del objeto (Fig.8). El número de 'geones' posibles, al igual que el de los fonemas, es limitado, en este caso a 36 diferentes según Beiderman. Además, al igual que en la percepción del habla donde una palabra puede ser identificada aunque se cometa algún error en su pronunciación, un objeto puede ser identificado visualmente aunque éste se encuentre parcialmente oculto por otros objetos, o carezca de alguna de sus partes.

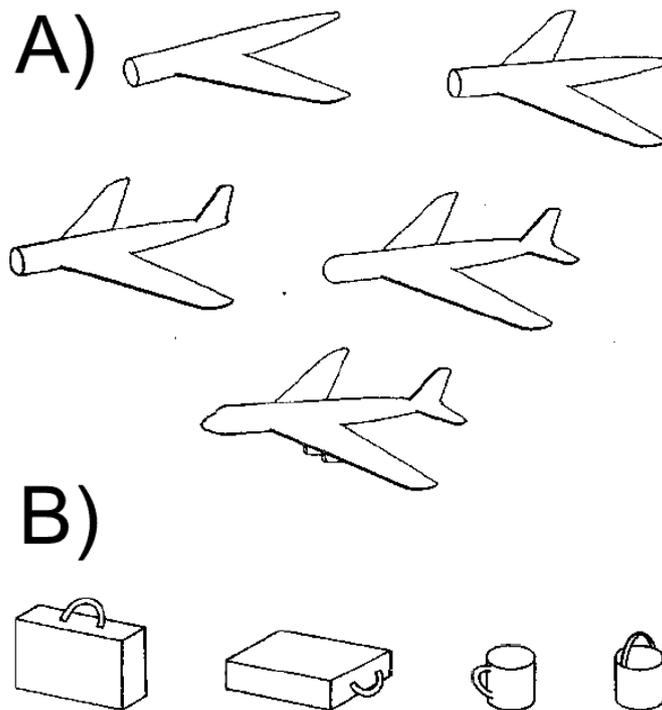


Fig.8 Objetos formados por 'geones'. A) Versión de menos a más completa de un objeto compuesto por 9 'geones'. B) La diferente colocación de los mismos 'geones' puede producir objetos diferentes. Fuente: Biederman (1987)

Como anteriormente se vio, una interfaz gráfica fácilmente perceptible es aquella que facilita la orientación de nuestra atención sobre los diferentes elementos, y la resolución de problemas de organización visual. A estas cualidades, debemos añadir la de facilitar la identificación y reconocimiento de objetos, para lo que la teoría de reconocimiento por componentes ofrece guía explicativa. En el caso interfaces que utilizan metáforas gráficas, la aplicabilidad de esta teoría resulta obvia, ya que sugeriría que la presentación de las metáforas mediante componentes volumétricos ayudará a su identificación, estableciendo un enlace más consistente entre metáfora y objeto referente. Como ejemplo básico podemos citar la representación gráfica de los botones o los iconos, dónde aquellos que presenten volumen serán más rápidamente identificados que los presentados como formas planas.

No obstante, las representaciones de metáforas gráficas no son las únicas que pueden ser mejoradas sobre la base de la teoría de reconocimiento por componentes. Como Irani y Ware (2000) demuestran, los diagramas de tipo grafo son objetos abstractos cuya interpretación se ve sustancialmente mejorada cuando son elaborados mediante componentes volumétricos. En su estudio los sujetos identificaban subestructuras en el diagrama ‘geónico’ un 40% más rápido que sobre el mismo diagrama codificado mediante UML (Unified Modeling Language) (Fig.9). Puesto que las diferencias gráficas entre ambos tipos de diagramas son muy notables, para confirmar sus resultados Irani y Ware (2000b) compararon en otro estudio los diagramas ‘geónicos’ con los mismos diagramas pero presentados con componentes planos (Fig.10), detectando igualmente mejoras significativas en la precisión y eficiencia de la identificación de subestructuras en el caso del modelo ‘geónico’. A partir de estos resultados, Irani, Tingley y Ware (2001) proponen un completo vocabulario gráfico sobre ‘geones’ para la representación de diagramas más fácilmente interpretables y recordables.

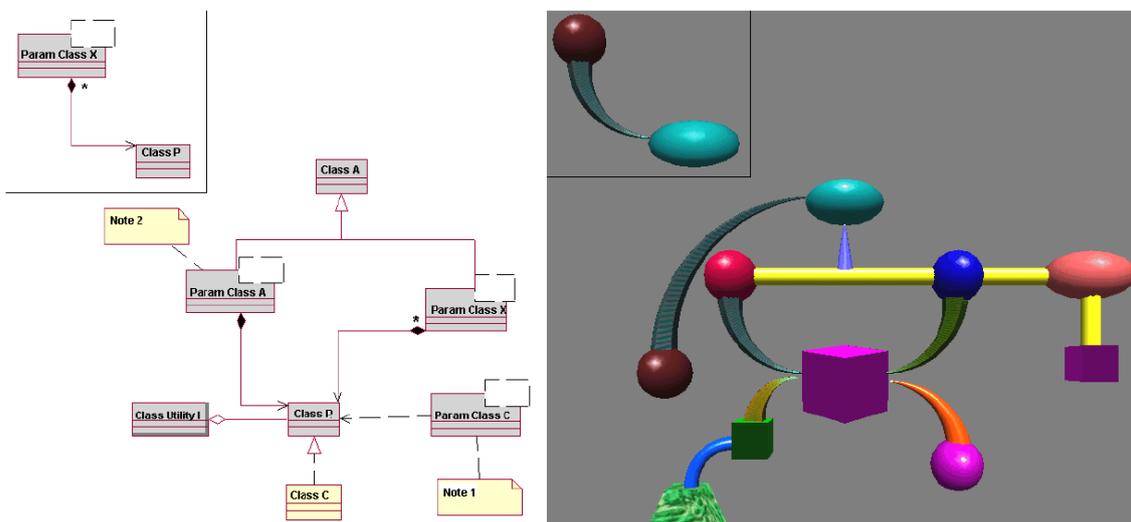


Fig.9 Diagrama UML (izquierda) y diagrama ‘geónico’ (derecha). Fuente: Irani y Ware (2000).

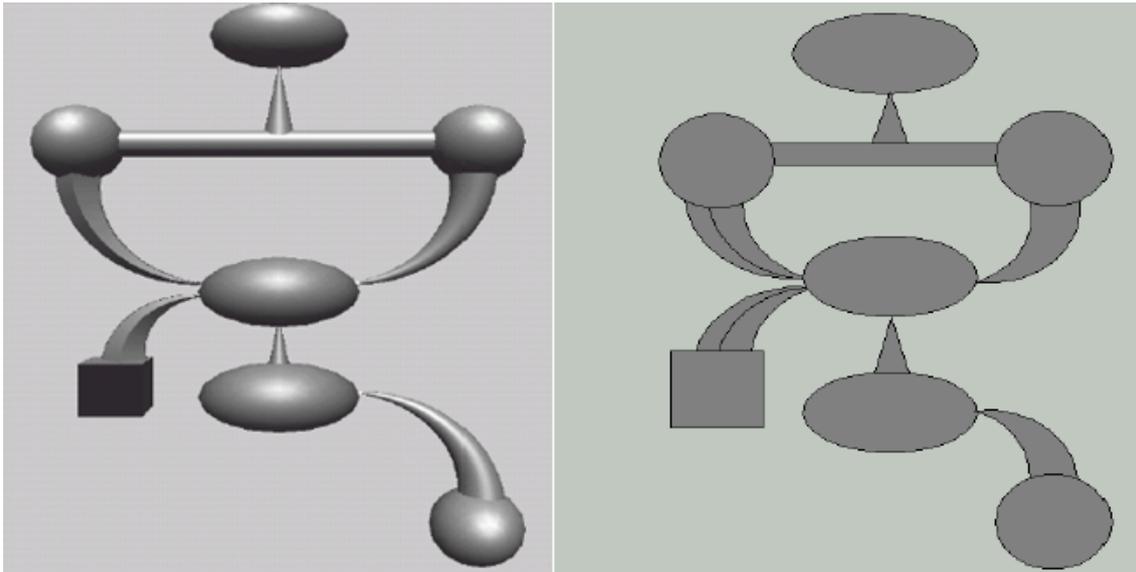


Fig.10 Diagrama 'geónico' (izquierda) y diagrama plano (derecha). Fuente: Irani y Ware (2000b).

El volumen de los 'geones' es una cualidad tridimensional, lo que lleva a cuestionarnos si no será más efectivo perceptualmente diseñar interfaces de visualización tridimensionales en vez de bidimensionales. Ware (2001) intenta resolver esta cuestión, argumentando que el diseño de interfaces 3D no tiene por qué resultar más efectivo que un diseño 2D, pero ya que 2D y 3D no son categorías excluyentes, diseñar con actitud 2½D será en muchas ocasiones la decisión más acertada. Las interfaces 2½D, sin ser puramente tridimensionales, hacen uso de características visuales que denotan profundidad, como las sombras, la oclusión o solapamiento entre objetos, el movimiento rotatorio, o la perspectiva, entre otras. Estas características o efectos tridimensionales pueden ser utilizadas en los objetos para facilitar su identificación, pero por el contrario, la disposición de los objetos en la pantalla (lay-out) es recomendable que se haga sobre los ejes bidimensionales x e y , eludiendo el uso de perspectiva (eje z). Es decir, una interfaz 2½D sería aquella en la que los objetos presentan cualidades tridimensionales, pero están dispuestos o posicionados bidimensionalmente.

2.3.1.2. Memoria

Percibir o adquirir información a través de nuestros sentidos no tendría ninguna utilidad si dicha información no pudiera ser registrada y utilizada. La memoria es el cimiento de la inteligencia, y por tanto entender cómo funciona y se estructura nos puede orientar en el diseño de sistemas interactivos adaptados a las capacidades y limitaciones de sus usuarios - los seres humanos- e incluso en el diseño de sistemas informáticos ‘inteligentes’, tal y como persiguen la Inteligencia Artificial o la Informática Cognitiva (Wang, Wang; 2002).

2.3.1.2.1. Estructura de la memoria

Aunque son numerosos - y muchas veces contradictorios - los modelos y teorías presentes en la literatura científica de psicología cognitiva acerca de la memoria, está generalmente aceptado que la memoria se estructura en varios sistemas principales, a su vez divisibles en diferentes componentes. Estos sistemas son la memoria sensorial, memoria a corto plazo (STM: Short-Term Memory) y memoria a largo plazo (LTM: Long-Term Memory).

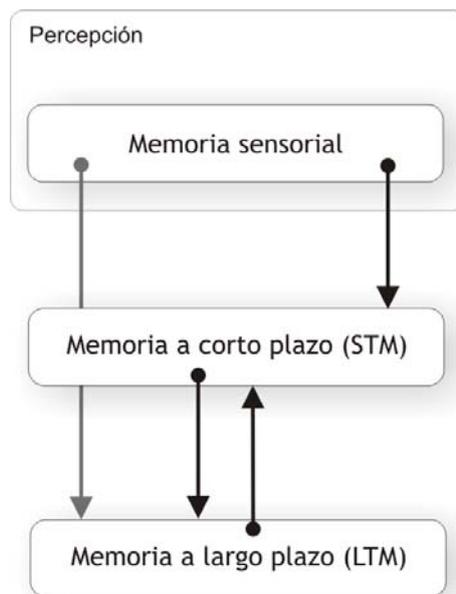


Fig.11 Esquema de la relación entre memoria sensorial, a corto plazo y a largo plazo.

La memoria sensorial está directamente vinculada al proceso de percepción descrito en el anterior apartado. Esta memoria representa el primer conjunto de almacenes en los que se registra la información captada por nuestros sentidos, y su objetivo es alargar la duración de la sensación lo suficiente como para poder ser foco de nuestra atención, y así pasar a nuestra STM. El tiempo que permanece la información en la memoria sensorial es muy breve (250ms), y el número de elementos que puede almacenar (aproximadamente 9) es mayor que el que finalmente es transferido a la STM (Sperling; 1960). A este hecho hay que sumar que incluso hay información que puede transferirse directamente de nuestra memoria sensorial a la LTM sin pasar por la STM (Cowan; 1988). Es decir, vemos más de lo que creemos ver, ya sea porque haya información que no llegue a nuestra STM, o porque no pase por ella.

La STM está fuertemente vinculada a nuestra consciencia, ya que es donde se almacena temporalmente la información que utilizamos para tomar decisiones e interactuar voluntariamente con el entorno. Sin embargo, aunque hay autores que afirman que el contenido de la consciencia y la STM son equivalentes, como indica Cowan (1988) esto se

contradeciría con el hecho de que puede haber activación de la STM sin consciencia (percepción subliminal).

La información almacenada en la STM puede provenir de la memoria sensorial o de la LTM (Fig.11), y ya que es sobre dicha información sobre la que podemos llevar a cabo tareas complejas como el razonamiento o la comprensión, la STM también es denominada memoria operativa (WM: Working Memory) (Baddeley; 2001a). La STM es un almacén que se caracteriza por su temporalidad (aproximadamente 30 segundos) (Cowan; 1988), pero también lo hace por tener una capacidad limitada. Miller (1956) estimó, sobre evidencias empíricas, que el límite de la STM era de unos 7 ± 2 elementos o unidades ('chunks'), aunque trabajos más recientes reducen el número real a entre 3 y 5 (Cowan; 2001). No obstante, la capacidad de la STM varía de un individuo a otro, y como demuestran McVay y Kane (2009) esta capacidad condiciona nuestra habilidad para concentrarnos en una tarea.

La LTM, al contrario que la STM, puede retener información durante largos periodos de tiempo y tiene una capacidad ilimitada (o al menos no tiene límite conocido). Otra diferencia se refiere a su acceso, ya que el contenido de esta memoria no puede ser conscientemente inventariado, aunque sí puede recuperarse mediante asociación entre ítems (Cowan; 1988). Para agilizar su acceso, las personas hacemos uso frecuentemente de estrategias nemotécnicas como la re-codificación de los ítems para facilitar la asociación (Cowan; 2001).

La relación entre STM y LTM es muy estrecha, ya que el flujo de información entre ambas es constante. Tradicionalmente se ha aceptado que ambos sistemas se encontraban disociados anatómicamente, es decir, ubicados en zonas diferenciadas del cerebro. Sin embargo, recientemente Ranganath y Blumenfeld (2005) ponen en duda este hecho en base a numerosas evidencias empíricas, sugiriendo que quizá no existan áreas específicas que soporten cada uno de estos sistemas, sino diferentes circuitos neuronales compartiendo el mismo área cortical, o bien que las distintas áreas no se diferencian por el tipo de memoria que soportan sino por el tipo de información que procesan y representan.

A nivel de teoría cognitiva de la memoria, el modelo que mejor se corresponde con un enfoque de no-disociación entre STM y LTM es el propuesto por Cowan (1999), para quien la STM es considerada un subconjunto activo de la LTM, y la consciencia es a su vez aquel subconjunto de la STM que está siendo foco de nuestra atención. Es decir, en vez de tratar ambas memorias como estructuras separadas que se transfieren información, considera la STM como la activación de una porción limitada de la misma representación que soporta la LTM.

No obstante, no todos los modelos teóricos conciben ambas memorias como una misma estructura. En esta línea, el modelo más remarcable y vigente es el modelo de la 'memoria operativa' propuesto por Baddeley y Hitch (1974), posteriormente revisado y modificado por Baddeley (2000). En este modelo la memoria operativa o STM es definida como un sistema multi-componente, que aunque íntimamente relacionado con la LTM y la función perceptual y motora, es considerado como un sistema separable con sus propios procesos de almacenamiento.

Según Baddeley (2000, 2001b), la memoria operativa se estructura en dos componentes destinados a almacenar diferentes tipos de información (fonológico y visoespacial); un sistema de supervisión de los diferentes almacenes, llamado ejecutivo central; y como reciente incorporación al modelo, el 'buffer' episódico, capaz de integrar información de diferentes fuentes, y que cumple la función de interfaz con la memoria episódica a largo plazo.

Al referenciar la memoria episódica, ya estamos adelantando que la LTM no es tampoco un almacén único y homogéneo, sino que también ha sido dividido en diferentes categorías por los autores que han afrontado su estudio teórico. Squire (2004), propone la taxonomía representada en la figura 12.

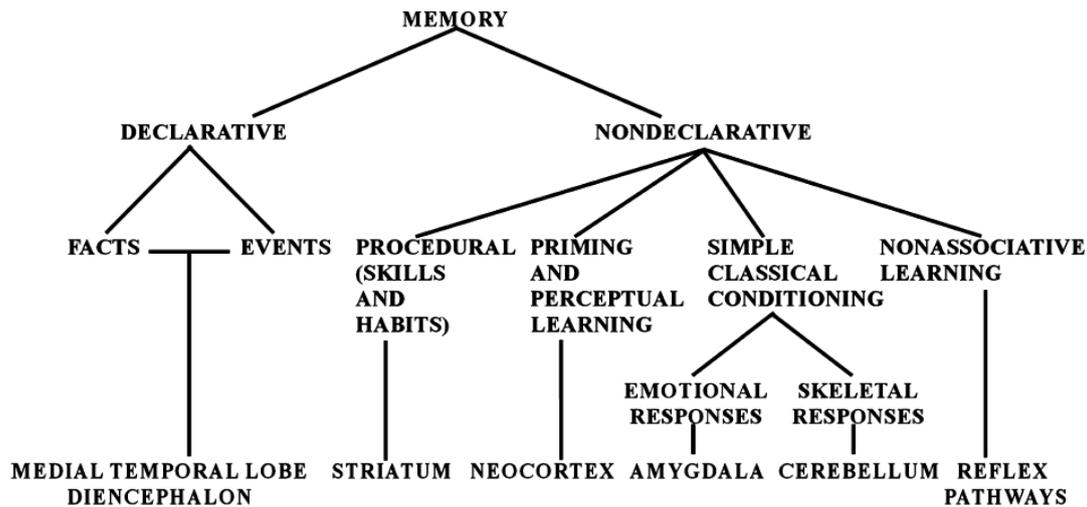


Fig.12 Taxonomía de componentes de la memoria a largo plazo. Fuente: Squire (2004).

En esta taxonomía, la LTM se divide en dos grupos principales, memoria declarativa y memoria no-declarativa. La memoria declarativa (o memoria explícita) se refiere a la capacidad de recordar conscientemente hechos y eventos, mientras que la no-declarativa (o memoria implícita) es una categoría ‘paraguas’ que engloba aquellas memorias que se expresan a través de la acción y ejecución de tareas, en vez de a través del recuerdo.

La memoria declarativa se subdivide en memoria semántica (hechos) y memoria episódica (eventos). La memoria semántica representaría nuestro conocimiento acerca del mundo, tal como el significado de las palabras y sus relaciones. La memoria episódica, en cambio, se refiere a nuestra capacidad para recordar, reexperimentar o revivir eventos ocurridos, como por ejemplo: dónde hemos comido hace unas horas, a quién conocimos hace una semana, o cómo celebramos nuestro último cumpleaños. Mientras que la memoria episódica se organiza de forma espacio-temporal - su contenido se recupera a partir del ‘dónde’ y ‘cuándo’ de los hechos - la memoria semántica lo hace sobre la lógica del significado de los conceptos y sus relaciones (Cañas, Salmerón, Gámez; 2001).

2.3.1.2.2. Organización y recuperación

La memoria es un componente central en el procesamiento humano de información, y por tanto crucial en la interacción entre personas y ordenadores. Es por esto que, más allá de los diferentes almacenes descritos, debemos preguntarnos cómo se registra, representa y recupera el conocimiento en la memoria.

En el caso de la memoria semántica de la LTM, la estructura organizativa más relevante del conocimiento almacenado es el de las redes semánticas (Cañas, Salmerón, Gámez; 2001). En estas estructuras, los conceptos se organizan por afinidad o similitud semántica, formando una compleja red donde los conceptos jugarían el rol de nodos y su similitud determinaría qué vínculos existen entre nodos y cuál es su peso.

La recuperación de conocimiento semántico se produce sobre un mecanismo de activación y propagación de la activación. De este modo recuperar un concepto determinado será más eficiente conforme más próximo semánticamente se encuentre al concepto previamente activado. Por ejemplo, si en un prueba a un grupo de personas les solicitamos que hagan un listado verbal de conceptos para un dominio concreto (como “animales de compañía”), la adyacencia secuencial de los conceptos en su respuesta estará determinada por la similitud semántica que para el participante tengan los conceptos (Sinha; 2003), debido al mecanismo de propagación de activación entre conceptos próximos en la red semántica mental del usuario.

Reflexionemos un momento sobre la importancia que tiene esta forma de estructurar y recuperar conocimiento semántico en el contexto de la interacción con ordenadores. Ya que las interfaces permiten al usuario interactuar por medio de opciones, menús, iconos, etc., cuanto más familiar resulten para el usuario los conceptos representados en la interfaz con aquellos conocidos y perseguidos, más sencillo le resultará establecer un vínculo entre ‘opción’ y ‘objetivo’. En el caso contrario, el

usuario se vería obligado a interiorizar el significado de cada opción y reestructurar su propio conocimiento semántico para poder usar la aplicación, agudizando la curva de aprendizaje.

Además, en la interacción hay una estructura organizativa - ubicada en la memoria operativa- que mediará entre el conocimiento estable del usuario acerca del mundo (y del sistema), y la información que se adquiere del ambiente o mundo físico (Cañas, Antolí, Quesada; 2001). Esta estructura es lo que se conoce en IPO como el modelo mental del usuario, que se refiere al conocimiento dinámico que el usuario tiene acerca del funcionamiento del sistema, sus componentes, los procesos, sus relaciones y cómo un componente influye en otros (Fein, Olson, Olson; 1993).

Este modelo es una representación mental de la estructura y funcionamiento del sistema, que el usuario infiere a partir de su uso y su propia experiencia. Se trata de un conglomerado de creencias acerca de cómo funciona el sistema (Payne; 2003), y por tanto es un “modelo” inexacto, incierto e incompleto. Por ejemplo, lo que un usuario cree que está sucediendo cuando mueve una ventana por su escritorio, o un conductor acerca de los mecanismos desencadenados cuando arranca su coche, no es más que una representación superficial e incompleta del funcionamiento real de su ordenador o automóvil; aunque suficiente para poder hacer uso de estos artefactos.

La investigación sobre modelos mentales sugiere que cuanto más exacto sea el modelo del usuario respecto al funcionamiento y estructura real del sistema, más eficiente y eficaz será su interacción (Fein, Olson, Olson; 1993) (Cañas, Salmerón, Gámez; 2001). A raíz de esta afirmación, y después de todo lo expuesto sobre el funcionamiento, estructura y organización de la memoria, nos enfrentamos a una cuestión crítica en la interacción persona-ordenador: el aprendizaje.

Si bien a lo largo de todo el capítulo se ha defendido que la usabilidad está directamente relacionada con la rapidez y economía de esfuerzo con los que el usuario puede aprender a usar el sistema, o lo que es lo

mismo, con la capacidad del sistema para adaptarse al usuario, resulta innegable que hay sistemas que necesitan de un esfuerzo por parte del usuario para ser comprendidos, o lo que es igual, que el usuario también se adapte al sistema para poder explotar su potencial. Citando a Engelbart “Si la facilidad de uso fuera el único criterio válido, las personas se quedarían en los triciclos y nunca probarían las bicicletas” (Fischer; 2001).

Pero además, en el caso de la visualización gráfica de información, el aprendizaje y adquisición de conocimiento del usuario es un factor de mayor importancia que en otros tipos de aplicaciones, debido a que la función principal de la visualización no es otra que posibilitar y facilitar la adquisición de conocimiento del usuario acerca de estructuras y fenómenos complejos. En otras palabras, las interfaces de visualización pretenden servir de medio para que el usuario adquiera y elabore su propio modelo mental acerca de sistemas complejos de información: cómo funcionan estos sistemas, cómo se estructuran, y qué partes y procesos los componen.

Por tanto, el usuario de una aplicación de visualización no sólo se verá inevitablemente obligado a hacer un esfuerzo para aprender su uso, sino que además deberá hacer otro mayor para comprender el fenómeno o sistema representado, ya que la posibilidad de esta última adquisición de conocimiento supone una de sus motivaciones de uso.

2.3.1.3. Actividad motora

Percibir información y almacenarla o retenerla en la memoria, son procesos destinados a desembocar en una acción. Desde la perspectiva de la psicología cognitiva, personas y ordenadores son sistemas análogos: adquieren y almacenan información que comparten a través de la acción. No obstante, aunque ordenadores y personas presentan sistemas generales de procesamiento de información similares, la forma en la que sus componentes funcionan y se comportan es muy diferente entre unos y otros.

En el caso de los humanos, la acción se materializa a través de la actividad motora. El movimiento de brazos, manos y dedos, representa el mecanismo más ampliamente usado en la interacción con ordenadores, debido a que el ratón y el teclado siguen siendo los dispositivos de entrada más comunes, seguidos de *touchpads* y pantallas táctiles, estos últimos principalmente en tecnología móvil y cajeros automáticos. Sin embargo no podemos obviar otras prometedoras formas de interacción, como el control mediante voz (Christian et al.; 2000) o el seguimiento visual (*eye-tracking*) (Sibert, Jacob; 2000).

La IPO ha propuesto, o adoptado de la investigación básica psicomotora, diferentes modelos teóricos para estudiar el comportamiento motor de los usuarios en la interacción con ordenadores. MacKenzie (2003) divide estos modelos en dos grupos: descriptivos y predictivos. Los primeros explican la interacción del usuario, ofreciendo un marco o escenario descriptivo del problema para facilitar su análisis y la conclusión de soluciones de diseño. Los modelos predictivos, en cambio, permiten predecir matemáticamente el rendimiento del usuario a priori, sin necesidad de tener que observar al usuario frente al sistema real implementado.

Si bien no dudamos de la utilidad que para el estudio y práctica de la IPO tienen los modelos descriptivos, a continuación sólo serán referidos los modelos predictivos más relevantes para la IPO y la visualización de información, por su mayor fundamento empírico y rigor matemático.

2.3.1.3.1. Ley de Fitts

Sin duda, el modelo más robusto aplicado al estudio del rendimiento del usuario en su interacción con ordenadores es el conocido comúnmente como ley de Fitts (Fitts; 1954) (Fitts, Peterson; 1964). Este modelo permite predecir el tiempo y esfuerzo requerido para alcanzar un área determinada, a partir de la distancia y tamaño del área objetivo. Aunque es un modelo general del comportamiento psicomotor, tiene una

aplicabilidad directa al estudio de las interfaces gráficas de usuario, ya que la manipulación directa como mecanismo de interacción propio de estas interfaces convierte al rendimiento psicomotor del usuario en un factor crucial de la eficiencia y eficacia de su uso.

La ley de Fitts tiene su cimiento en la Teoría de la Información de Shannon (1948), en concreto en el teorema 17, que expresa la capacidad de información efectiva C (en bits/s) de un canal de amplitud de banda B (1/s o Hz) como (MacKenzie; 1992, 2003):

$$C = B \log_2(S/N+1)$$

Donde S es la potencia de la señal y N la potencia del ruido. La ley de Fitts, por analogía, considera que el canal de comunicación es humano, y en este caso la capacidad C del canal es denominado índice de rendimiento o IP (index of performance), calculable dividiendo el índice de dificultad de la tarea motora (ID) por el tiempo del movimiento (MT):

$$IP = ID / MT$$

En su analogía, la ley de Fitts asume que la potencia de la señal S es equiparable a la distancia del área objetivo A (*target amplitude*), y la potencia del ruido al ancho o tamaño de dicha área W (*target width*) (Fig.13), por lo que el índice de dificultad se calcularía de la siguiente forma:

$$ID = \log_2(2A/W)$$

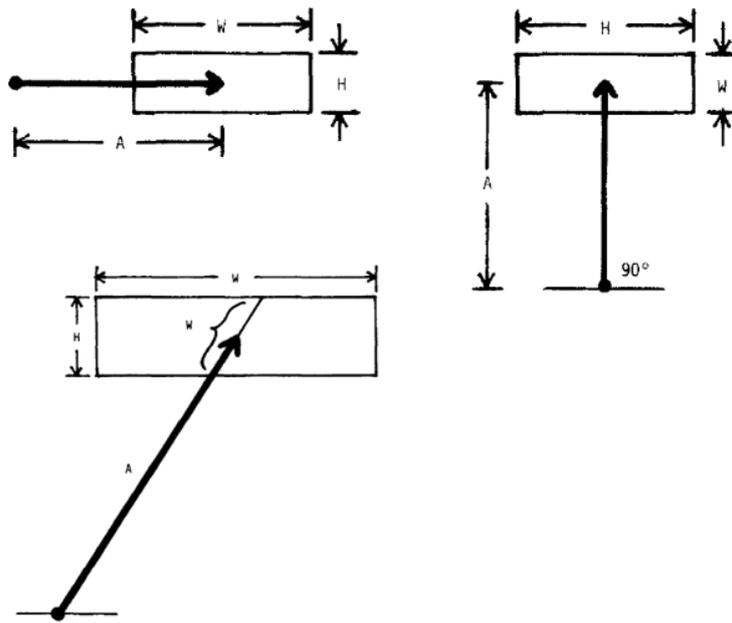


Fig.13 Cálculo de la distancia (A) y tamaño (W) de un área objetivo de tipo rectangular. Fuente: MacKenzie (1992).

MacKenzie (2003) propone que para fortalecer la analogía con el teorema de Shannon, ID podría expresarse del siguiente modo:

$$ID = \log_2(A/W+1)$$

El tiempo del movimiento puede ser medido por observación o, con fines predictivos, calculado de la siguiente forma:

$$MT = ID / IP$$

Donde el índice de rendimiento puede ser sustituido por coeficientes de regresión a y b , quedando el cálculo del tiempo de movimiento MT :

$$MT = a + b ID$$

O lo que sería igual:

$$MT = a + b \log_2(2A/W)$$

Los coeficientes a y b son constantes empíricas dependientes del dispositivo o modo de interacción. Es decir, serían diferentes en función de si, por ejemplo, se está interactuando a través de un ratón o mediante una pantalla táctil. De hecho, la ley de Fitts ha sido usada en numerosos trabajos para realizar comparativas de la eficacia de diferentes dispositivos de interacción (Card, English, Burr; 1978) (MacKanzie; 1992) (Miniotas; 2000).

Esta ley tiene además implicaciones obvias en el diseño de interfaces, como por ejemplo que elementos de la interfaz de gran tamaño y próximos al punto de partida serán más fácil y rápidamente alcanzables que elementos pequeños y distantes.

No obstante, por su carácter general, el modelo de Fitts presenta algunas limitaciones para su aplicación en nuevos modelos de interfaces gráficas, que la investigación en IPO ha intentado subsanar. Por ejemplo, Guiard et al. (2001) estudian el modelo de Fitts sobre interfaces escalables - interfaces que permiten hacer *zoom* -, y Cockburn, Gutwin y Greenberg (2007) estudian su aplicación en nuevos modelos de menús. Aunque sin duda el trabajo más destacable es el de Accot y Zhai (1997), quienes proponen un modelo para movimientos con trayectorias no lineales, como los que son requeridos para alcanzar opciones en menús anidados o desplazarse en entornos 3D, y para los que la ley de Fitts no ofrece predicción alguna.

La forma de integrar todos estos modelos teóricos en la práctica del diseño es otra cuestión importante. Newel y Card (1985) proponen que sean las aplicaciones software que usan los diseñadores las que aseguren el cumplimiento de las recomendaciones derivadas de modelos como la ley de Fitts, sin necesidad de que el diseñador deba entender o conocer estas teorías.

En el caso de la visualización de información, ya que se trata de interfaces generadas automáticamente, lo deseable sería que los algoritmos de distribución visual y distorsión interactiva integraran estos

modelos en sus procesos, con el objetivo de que los diferentes elementos interactivos estuvieran dispuestos y presentados dinámicamente con distancias y tamaños que facilitaran su manipulación y accionamiento.

2.3.1.3.2. Ley de Hick-Hyman

La conocida como ley de Hick-Hyman (Hick; 1952) (Hyman; 1953) hace referencia a un modelo predictivo que, al igual que la ley de Fitts, tiene su base en la Teoría de la Información de Shannon. Este modelo predice el tiempo de reacción (RT) de una persona ante un número n de estímulos o posibles respuestas:

$$RT = a + b \log_2(n)$$

Al igual que en la ley de Fitts, a y b son constantes determinadas empíricamente.

En el contexto de la IPO, Landauer y Nachbar (1985) demuestran la capacidad de predicción de este modelo (y de la ley de Fitts) en la selección de opciones - palabras y números - en menús ordenados alfabéticamente y numéricamente. Que el tiempo de reacción siga una distribución logarítmica, como sugieren los autores, se debería a que su ordenación permite la continua subdivisión mental de las opciones a escanear. En el trabajo también se sugiere que si las opciones estuvieran desordenadas, el modelo logarítmico dejaría de ser útil, ya que los tiempos de reacción seguirían distribuciones lineales debido a la necesaria secuencialidad de la exploración visual de todas las opciones.

De estos resultados se podría deducir que en cualquier menú con opciones textuales la ordenación alfabética mejoraría la eficiencia o tiempo de reacción del usuario, en comparación con otros tipos de ordenación o la disposición desordenada de las opciones. De hecho, estudios previos como el de Card (1982) sostienen conclusiones similares. Sin embargo, como argumentan Mehlenbacher, Duffy y Palmer (1989), la eficacia de una ordenación u otra dependerá del tipo de representación

mental que el usuario tiene de sus propios objetivos. Esta representación puede ser de dos tipos principalmente: sintáctica y semántica. Cuando la representación mental es sintáctica, el usuario tendrá en mente el término específico (opción) que debe seleccionar, por lo que la ordenación alfabética disminuirá el tiempo de reacción, al facilitar la búsqueda visual. Sin embargo, cuando la representación es semántica, el usuario deberá comparar la similitud semántica entre las opciones mostradas y la representación conceptual de sus objetivos (Pierce, Parkinson, Sisson; 1992). En este segundo caso, como demuestran Mehlenbacher, Duffy y Palmer (1989), la ordenación de las opciones por agrupación semántica (con funciones relacionadas) mejoraría el tiempo de reacción frente a la ordenación alfabética.

Como vemos, la respuesta motora, y su predicción, son inseparables de los procesos perceptuales y de los mecanismos de representación y recuperación de conocimiento en la memoria, evidenciando la estrecha interrelación existente entre los diferentes sistemas que conforman el procesamiento humano de información, y la dificultad de estudiar estos procesos de forma aislada al resto.

Pretender explicar y predecir la conducta de los usuarios no puede hacerse a través del análisis individualizado de los procesos atencionales, de la memoria, de la actividad motora y del razonamiento. Se hace necesario, por tanto, la propuesta de teorías generales que integren todos estos procesos y sistemas cognitivos, es decir, teorías sobre las arquitecturas cognitivas que rigen el comportamiento del usuario (Cañas, Salmerón, Gámez; 2001).

2.3.1.4. Arquitecturas cognitivas

Las arquitecturas cognitivas son teorías generales que aglutinan, integran, unifican e interrelacionan conjuntos de teorías específicas o 'micro-teorías' (atención, memoria, razonamiento, aprendizaje...) con el objetivo de predecir la conducta de las personas. Howes y Young (1997) las definen como hipótesis científicas acerca de aquellos aspectos de la

cognición humana que son relativamente constantes a lo largo del tiempo y relativamente independientes de la tarea. En palabras de Lehman, Laird y Rosenbloom (2006) una arquitectura cognitiva es una teoría sobre los mecanismos y estructuras fijas que subyacen a la cognición humana.

Como ya se ha comentado a lo largo del presente capítulo, la psicología cognitiva caracteriza la cognición humana utilizando la metáfora computacional. En este sentido, las arquitecturas cognitivas son el máximo exponente de esta analogía, ya que podríamos verlas como lenguajes de programación, y los modelos que se construyen sobre estas arquitecturas como programas. La arquitectura cognitiva, por sí sola, no provoca un comportamiento, al igual que un lenguaje de programación no puede ser ejecutado. Los modelos que se desarrollan sobre las arquitecturas cognitivas son el contenido, el programa, a partir del que poder realizar predicciones.

Gray, Young y Kirschenbaum (1997) afirman que no se trata de inteligencia artificial, ya que no se pretende crear un programa que gane a Kasparov al ajedrez, sino crear un programa que juegue al ajedrez de la misma forma que lo hace Kasparov. Sin embargo, a pesar de la diferenciación que hacen los autores, las similitudes siguen resultando más que evidentes.

Hasta la fecha son numerosas las arquitecturas cognitivas propuestas en la literatura científica. Las más destacables para la IPO, según (Lewis; 1999) (Gray, Young, Kirschenbaum; 1997) (Cañas, Salmerón, Gámez; 2001) (Howes, Young; 1997), son SOAR, ACT-R, C-I, EPIC, ICS y CCT. De entre todas, SOAR (cuyo nombre no responde a ningún acrónimo) es la más popular y aceptada por la comunidad IPO.

SOAR fue propuesta inicialmente por Laird, Newell y Rosenbloom (1987) (Newell; 1990) y, como arquitectura cognitiva, especifica un conjunto de procesos, memorias y estructuras de control capaces de codificar y procesar programas. Es decir, SOAR encierra el procesador humano de información que se describió en el apartado 2.3.1, con sus sistemas de

percepción (adquisición de información del exterior), acción (respuesta motora), y memoria y procesamiento. En SOAR hay dos tipos de memoria, memoria operativa y memoria a largo plazo, esta última dividida en memoria procedimental, semántica y episódica (Lehman, Laird y Rosenbloom; 2006).

Una de las características principales de esta arquitectura es su descripción del conocimiento en forma de reglas de producción ‘condición-acción’, tal como:

IF {condición} THEN {acción}

Mientras que las reglas están almacenadas permanentemente en la memoria a largo plazo procedimental, las posibles condiciones sobre las que aplicar las reglas son dinámicas y se encuentran en la memoria operativa. El contenido de esta memoria operativa puede provenir del mundo exterior a través de la percepción, o ser resultado de la aplicación previa de alguna regla de producción.

Otra característica importante de SOAR se refiere al aprendizaje. Éste se produce de forma continua, almacenando el conocimiento obtenido de la experiencia en la memoria a largo plazo (procedimental), por medio de un mecanismo esencialmente deductivo denominado ‘chunking’. Este mecanismo consiste en almacenar la solución de un problema para que cuando vuelva a presentarse pueda resolverse sin necesidad de procesamiento. En la figura 14 podemos ver un ejemplo - el caso A es previo al ‘chunking’, y el B posterior- (Howes, Young; 1997).

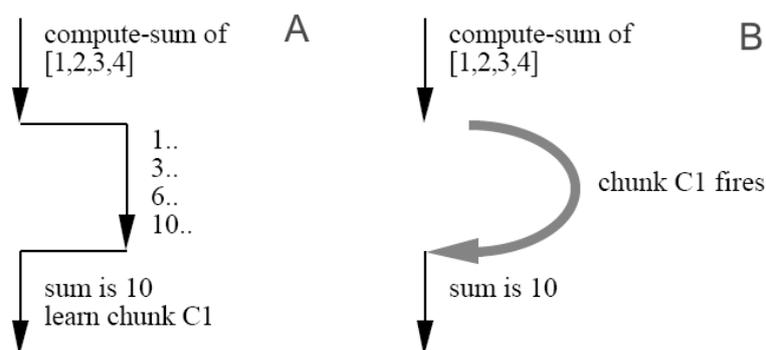


Fig.14 Esquema del mecanismo de aprendizaje mediante 'chunking'. Fuente: Howes y Young (1997)

Una vez que aprendemos que 1, 2, 3 y 4 suman 10, cuando nos enfrentamos posteriormente al mismo problema, podemos dar con la solución sin necesidad de realizar la operación, recuperando ese conocimiento directamente de nuestra memoria a largo plazo procedimental.

Durante mucho tiempo éste ha sido el único mecanismo de aprendizaje que tenía SOAR, aunque recientemente Lehman, Laird y Rosenbloom (2006) han propuesto aumentar el número de mecanismos a tres más: aprendizaje de refuerzo, aprendizaje semántico y aprendizaje episódico.

Como indica Lewis (1999), la principal predicción de una teoría sobre la cognición humana es que los humanos son inteligentes, y esa predicción solo puede sostenerse demostrando, como teoría, un comportamiento inteligente. Según el mismo autor, SOAR parece demostrarlo con más robustez que otras teorías psicológicas, lo que probablemente constituya la razón de su mayor éxito.

A pesar de este éxito, como advierten Gray, Young y Kirschenbaum (1997), la importancia de las arquitecturas cognitivas está lejos de ser aceptada ampliamente por toda la comunidad de investigadores en IPO. Lógicamente, son los investigadores provenientes de las ciencias sociales y de la conducta quienes más recelan de este tipo de investigación teórica.

2.3.1.4.1. Técnicas de análisis de tareas

Directamente relacionadas con el modelo de procesamiento humano de información y las arquitecturas cognitivas, se encuentran las técnicas de análisis de tareas, cuyo conjunto más popular se conoce como la 'familia GOMS'.

La técnica GOMS (*Goals, Operators, Methods, Selection rules*), fue originalmente propuesta por Card, Moran y Newell (1983), aunque posteriormente han surgido diversas variantes (John, Kieras; 1996), de ahí que se hable de ‘familia’. La función de este conjunto de técnicas es describir el conocimiento procedimental, el ‘how-to-do-it’, involucrado en la realización de una tarea (John; 2003).

Con este objetivo GOMS describe la tarea interactiva del usuario a través de una serie de componentes:

- **Objetivos (*Goals*):** Describen lo que el usuario pretende conseguir o realizar (ej. revisar su correo electrónico). Estos objetivos pueden dividirse en sub-objetivos más concretos.
- **Operadores (*Operators*):** Acciones elementales llevadas a cabo por el usuario para la consecución de los objetivos. (ej. hacer clic, teclear, etc.)
- **Métodos (*Methods*):** Diferentes conjuntos secuenciales de operadores que el usuario puede utilizar para conseguir un sub-objetivo. Por ejemplo, si el objetivo es revisar el correo electrónico, un sub-objetivo (en aplicaciones web) sería identificarse introduciendo nombre de usuario y contraseña. Este sub-objetivo puede acometerse usando diversos métodos. Uno sería hacer clic en la caja de nombre de usuario, escribir su usuario, pulsar la tecla ‘tab’, escribir su contraseña y pulsar la tecla ‘enter’. Pero el usuario podría conseguir este sub-objetivo usando una combinación diferente de operadores, es decir, otro método.
- **Reglas de selección:** Si para conseguir un sub-objetivo se pueden utilizar diferentes métodos, como sucedía en el ejemplo anterior, las reglas de selección determinan qué método empleará el usuario y en qué situaciones.

Una de las utilidades principales de usar esta técnica para el análisis de las tareas interactivas del usuario es el de la predicción del rendimiento.

Al descomponer la tarea en diferentes elementos, podemos aproximar el tiempo de ejecución a partir del tiempo necesario para realizar cada uno de los operadores necesarios, y para la toma de decisiones. Como se puede observar, esta técnica sigue la lógica del razonamiento cognitivo computacional, propia de las arquitecturas cognitivas.

Algunas de las críticas que surgen frente a todas estas técnicas y modelos es que, describiendo el comportamiento del usuario de forma computacional, lo deshumaniza, al no considerar los factores ambientales y sociales que pueden afectar a la interacción, el estado afectivo del usuario y la naturaleza imprecisa del comportamiento humano.

2.3.1.5. Cognición Distribuida

Una de las mayores limitaciones del modelo de procesamiento humano de información en el estudio de la IPO es su individualización de la interacción, pues focaliza su atención en el ciclo interactivo entre usuario y ordenador de forma aislada a cualquier contexto social. Pensemos por ejemplo en una oficina llena de trabajadores, y nos resultará complicado imaginar este ensimismamiento interactivo, esta completa ausencia de interacción con otras personas. Si el ordenador tiene conexión a Internet, entonces nos resultará imposible. Como afirma Perry (2003) la teoría cognitiva tradicional no puede ofrecer explicación al comportamiento e interacción social, pero al mismo tiempo, la visión que las ciencias sociales tienen de estos fenómenos resulta difícilmente aplicable al diseño de forma directa.

Estos motivos propiciaron la incorporación de forma paralela de teorías “postcognitivist” en el seno de la IPO, como la Teoría de la Actividad - que será desarrollada en el apartado 2.3.2 - y la teoría de la Cognición Distribuida. Esta última podemos considerarla “poscognitivista” a pesar de surgir de la propia comunidad cognitivista, ya que lo hace con la intención de superar los defectos de la teoría cognitiva tradicional (Kaptelinin, Nardi; 2006).

La Cognición Distribuida (DCog), al igual que la teoría cognitiva tradicional, trata de comprender los sistemas cognitivos, cómo adquieren y procesan información; la diferencia estriba en los límites de la unidad de análisis (Hutchins; 2000). La DCog propone analizar no sólo aquellos procesos cognitivos internos del sujeto, sino también aquellos procesos externos: una cognición socialmente distribuida más allá de la mente del sujeto. En palabras de Hollan, Hutchins y Kirsh (2000), “Un proceso no es cognitivo por el simple hecho de ocurrir en la mente, ni deja serlo por el hecho de ocurrir en las interacciones entre varias mentes”.

Imaginemos, otra vez, una oficina llena de trabajadores, que interactúan entre sí y hacen uso de ordenadores y otros tipos de artefactos. Al igual que la mente humana, este sistema (la oficina) también es capaz de procesar información y resolver problemas. Es un sistema que demuestra “inteligencia”, y por tanto puede ser estudiado también como un problema cognitivo (Perry; 2003).

La unidad de análisis deja de ser la cognición individual de los sujetos, ampliándose a un nivel superior: un sistema funcional de cognición distribuida (Hutchins, Klausen; 1996) (Rogers, Ellis; 1994). Este sistema obedece a sus propios objetivos (objetivos colectivos), y se puede describir en términos de “estados de representación” y “medios”, o en otras palabras, del conocimiento en un momento concreto y del soporte de dicho conocimiento.

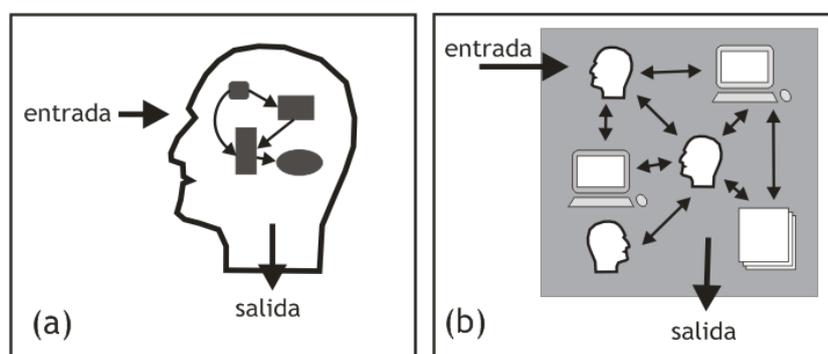


Fig.15 Esquema de la (a) Cognición individual y la (b) Cognición distribuida. Fuente: Perry (2003).

Los medios que registran el conocimiento pueden ser tanto internos al sujeto (memoria) como externos (artefactos tales como un ordenador o un bloc de notas), y lo que varía en dichos medios a través de la actividad cognitiva son los estados de representación del conocimiento. Como afirma Rogers (1997) (Rogers, Ellis; 1994), una propiedad del conocimiento presente en los medios del sistema es que es tanto variable como redundante. El conocimiento que posee un sujeto (o un artefacto) puede ser muy diferente al presente en otros sujetos, pero al mismo tiempo, para la coordinación y comunicación entre los individuos, es necesario compartir conocimiento intersubjetivamente, es decir, que dicho conocimiento se encuentre igualmente representado en más de un individuo. La actividad cognitiva (del sistema) es por tanto la “computación” realizada a través de la creación, transformación y propagación de los estados de representación (Perry; 2003), dirigida por el problema que se pretende resolver colectivamente. Por ello, los estados de representación son dependientes del momento temporal, puesto que la actividad los modifica y transforma constantemente.

En el estudio de la actividad cognitiva del sistema, los artefactos juegan un rol esencial, pues son los soportes externos de la comunicación, colaboración y coordinación intersubjetiva. Estos artefactos pueden ser igualmente vistos como “amplificadores” de la cognición individual (Hutchins; 2000)(Perry; 2003), o quizá más correctamente como entidades sobre las que el sujeto “delega” ciertas tareas cognitivas, como por ejemplo recordar un evento usando una agenda electrónica, o calcular los impuestos a pagar usando una hoja de cálculo.

Que el sistema funcional sea comprendido como una unidad cognitiva, no implica que tenga - como hemos visto - las mismas propiedades cognitivas que los individuos, aunque sí que estas propiedades puedan ser descritas de forma muy similar. En la DCog el sistema es la entidad “inteligente”, donde la resolución de problemas no es una tarea individual sino colectiva, tarea en la que los individuos son parte del

mismo modo que lo es el entorno físico, a través de su interacción. En otras palabras, la DCog es una expansión de la teoría cognitiva a través de la expansión del propio concepto de cognición y sus límites.

Desde la perspectiva de la DCog, el objetivo de estudio es el análisis de la interacción entre individuos, la propagación y trayectorias del conocimiento, y el rol facilitador o entorpecedor que los artefactos computacionales juegan en el transcurso de la actividad colaborativa.

La más destacable implicación en el estudio del diseño de interacción desde la perspectiva de la DCog, es de carácter metodológico. Los experimentos en laboratorio, descontextualizados del entorno natural de trabajo, no permiten por sí solos analizar la estructura distribuida de la cognición. La solución viene dada por el uso de metodologías etnográficas, metodologías de observación mediante técnicas como el análisis contextual, entrevistas en profundidad, encuestas, y grabación de la actividad (audio y video) (Hollan, Hutchins, Kirsh; 2000).

2.3.2. Teoría de la Actividad

La Teoría de la Actividad (TA) tiene su origen en la psicología marxista de la Unión Soviética como oposición a la tradición psicológica occidental. El nacimiento de esta teoría, en la década de 1920, está asociado a Lev Vygotsky, y sus discípulos y colaboradores Alexander Luria y Alexi Leont'ev. Como indica Wilson (2006), de los tres, el trabajo de Leont'ev es el que merece más atención, ya que prácticamente todos los elementos clave de la TA emergen de éste. Además, fue la traducción al inglés de su libro "Activity, Consciousness, and Personality" (Leont'ev; 1978) lo que introdujo esta teoría en la comunidad científica internacional.

La TA parte de la interpretación materialista del concepto de actividad, en oposición a su interpretación abstracta por el idealismo. Como afirma Leont'ev (1978), "Para Marx, la actividad en su forma fundamental y básica era sensorial, actividad práctica en la que las personas entran en

un contacto práctico con objetos del entorno, prueban su resistencia, y actúan sobre ellos, reconociendo sus propiedades objetivas.”. En esta visión, la actividad representa lo que se es, la propia existencia, una relación activa con el mundo exterior que cambiamos con nuestros actos, y que a su vez nos cambia.

Siguiendo con la explicación de Leont’ev (1978), otro elemento clave de la psicología marxista es el de la consciencia, que es entendida como una cualidad de una forma especial de la psique, y que desde su principio es un producto social. Como describen Kaptelinin y Nardi (2006), la TA es una teoría social acerca de la consciencia humana, que interpreta la consciencia como el producto de las interacciones del individuo con personas y artefactos en el contexto de la actividad práctica cotidiana.

Si la teoría cognitiva surgía como un nuevo paradigma frente al conductismo, la TA surge como tajante oposición a todas las anteriores. Esto se puede constatar en las palabras de Leont’ev (1978), al afirmar que “la psicología marxista no es solamente una nueva dirección o escuela, sino una nueva etapa histórica que presenta en sí misma los principios de una psicología materialista auténticamente científica”.

Para empezar a comprender la diferencia de este enfoque teórico en oposición a otros, imaginemos la escena de un profesor, impartiendo clase, y preguntémosnos: ¿Por qué enciende el proyector y conecta su portátil? ¿Por qué pasa lista? ¿Por qué entrega fotocopias a cada uno de sus alumnos? ¿Por qué hace preguntas a los alumnos? ¿Por qué mientras él habla los alumnos permanecen callados? ¿Por qué sube un fichero a su sitio web personal y les indica la URL a los alumnos?

Dependiendo del enfoque teórico, las respuestas a estas preguntas variarán. La teoría cognitiva intentará explicar su comportamiento a partir del procesamiento de información que se produce en la mente del profesor (la DCog a partir de la propagación de dicho conocimiento); desde un enfoque conductista se explicará a partir de las relaciones estímulo-respuesta presentes en el comportamiento del profesor; el

psicoanálisis se centrará en las primeras experiencias y relaciones sociales de su niñez, y su poso en el inconsciente; la biología se fijará en la genética del profesor, y la neurología lo hará en los tejidos de su sistema nervioso.

Ninguno de estos enfoques permitirá comprender en su completitud el comportamiento del profesor, ya que ninguno tiene en consideración la actividad en la que se enmarca dicho comportamiento, las relaciones entre los diferentes sujetos, el papel mediador que tienen los diferentes artefactos en estas relaciones, el motivo de la actividad, el sentido que para los sujetos tiene la actividad, y la organización laboral, funcional y social del contexto en el que se produce la actividad.

2.3.2.1. Fundamentos

Aunque ya se han señalado algunos aspectos clave de la TA, resulta imprescindible indagar más profundamente en los conceptos y estructura de esta teoría para comprender sus verdaderas implicaciones en el diseño de interacción. Además de ofrecer una visión general de la TA, otro objetivo que pretende este apartado es clarificar el vocabulario que sustenta esta teoría, por dos motivos principales:

- Como señala Tolman (1988), si no se aclara y explicita sin ambigüedad el significado de los conceptos clave de la TA, se corre el riesgo de que su interpretación no se corresponda con la intencionalidad de los escritos originales en ruso.
- Una de las mayores aportaciones de esta teoría es establecer un vocabulario unificado y compartido por toda la comunidad científica en el estudio y análisis de fenómenos psicológicos, vocabulario que en sí mismo supone una poderosa herramienta de investigación.

2.3.2.1.1. La actividad como unidad de análisis

En los estudios de psicología, en función del marco teórico sobre el que se sustenten, podemos comprobar el uso de diferentes unidades básicas de análisis. Algunos ejemplos de unidades de análisis - referenciados por Bedny, Seglin y Meister (2000)- son el reflejo condicionado como unidad básica de comportamiento, el comportamiento mismo, o las sensaciones. En los estudios de IPO, la unidad básica más extendida es sin duda la tarea. A través del análisis de tareas se pretende predecir el rendimiento del usuario en la interacción, y observando y midiendo cómo son realizadas tareas por usuarios en laboratorio, evaluar la usabilidad del sistema.

Como indican Bannon y Bødker (1991) y Kuutti (1995), aunque la tarea como unidad de análisis permite realizar fácilmente experimentos en

laboratorio, la propia naturaleza descontextualizada de esta unidad no facilita su análisis en situaciones de entornos reales, ni extrapolar los resultados de los estudios en laboratorio a contextos naturales de trabajo e interacción. En cambio, si consideramos como unidad de análisis la actividad en la que se enmarcan las tareas, estaremos incluyendo automáticamente un significativo contexto al estudio, ya que la actividad es inherentemente social y compartida, una relación práctica e intersubjetiva con el entorno.

2.3.2.1.2. Estructura general de la actividad

La actividad es entendida como un contacto práctico con el entorno, con una realidad objetiva que transformamos colectivamente en el marco del desarrollo social, histórico y cultural del ser humano. Fuera de este marco, ajena a la sociedad, la actividad no existe en el sentido que la TA le da a este concepto.

Para comprender qué implicaciones tiene la actividad como unidad de análisis, debemos aproximarnos primero a su estructura general (Fig.16). En la TA esta estructura es de naturaleza jerárquica, ya que la actividad siempre puede ser descompuesta en series de acciones concatenadas, y estas acciones, a su vez, en operaciones. Por ejemplo, en la actividad docente, el profesor puede realizar acciones como presentar diapositivas a los alumnos, acción que incluirá operaciones como mover el ratón por la pantalla.

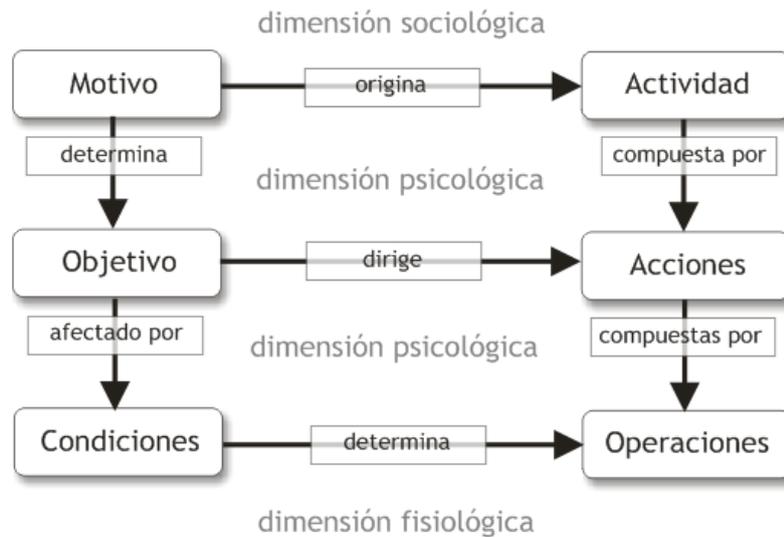


Fig.16 Diagrama de la estructura general de la actividad.

Una misma acción podría formar parte de actividades completamente diferentes (incluso al mismo tiempo), al igual que una misma operación podría serlo de acciones diferentes. Por ejemplo, la acción de presentar diapositivas podría ser parte también de una actividad como la evaluación de las ventas en una reunión de empresa. Y lo mismo podría decirse de la operación de mover el ratón, que sería parte de casi cualquier acción que requiera el uso de un ordenador.

Uno de los principios más importantes de la TA es que las actividades no son espontáneas, ya que toda actividad tiene su origen en un motivo. En palabras de Leont'ev (1978), no pueden existir actividades sin motivo, sino sólo actividades con un motivo subjetiva y objetivamente oculto. El motivo de una actividad, lo que la incita y aviva, es un vínculo entre las necesidades y el objeto sobre el que actuar. Por necesidades no sólo debemos entender aquellas biológicas - como alimentarse - sino también aquellas que son resultado de la actividad. Es decir, la actividad y su efecto transformador en el entorno social y cultural generan nuevos tipos de necesidades, más complejas que las necesidades básicas. En el transcurso histórico del desarrollo de las necesidades del ser humano, la actividad ha pasado de estar destinada a satisfacer sus necesidades vitales, a un estado en el que el hombre satisface sus necesidades

básicas para poder actuar, y desarrollarse como individuo social (Leont'ev; 1978). Es decir, no sólo actuamos para vivir, sino que vivimos para actuar.

Participar en una actividad requiere realizar individual y conscientemente acciones, que están orientadas a la consecución inmediata de un objetivo. Los objetivos son una representación mental del resultado deseado de las acciones, que puede ser más o menos precisa, y tiende a concretarse conforme más próximo se encuentre el resultado de la acción (Bedny, Harris; 2005). Estos objetivos no son independientes del motivo de la actividad, sino que por el contrario están determinados por éste. Además, aunque motivos y objetivos se encuentran en el plano de la consciencia, el motivo no es directamente reconocido por el sujeto, mientras que los objetivos sí. Esto implica que la relación del sujeto con el objetivo sea racional, mientras que su relación con el motivo sea más una percepción emocional sobre el efecto de sus acciones en el éxito de la actividad, y por tanto de los motivos y necesidades que la originan (Leont'ev; 1978).

Mientras que las acciones son siempre conscientes, las operaciones son rutinas automáticas, usadas inconscientemente como respuesta a las condiciones. Como explica Kuutti (1995), inicialmente las operaciones tienen su origen en acciones conscientes, que cuando son practicadas durante suficiente tiempo y tienen un procedimiento sistemático, se terminan convirtiendo en operaciones que realizamos de forma inconsciente. Si las condiciones cambian, la operación puede retornar al nivel de acción, “desautomatizándose”. Por ejemplo, cuando se aprende a conducir se realizan muchas acciones (como cambiar de marcha), que con la experiencia terminan convirtiéndose en operaciones automáticas. Pero si un día tenemos que usar otro vehículo que cambia las condiciones (un coche con marchas automáticas), muchas de las operaciones vuelven a su forma de acción consciente.

Las acciones en la TA, hay que aclarar, pueden ser prácticas o mentales (Bedny, Harris; 2005), es decir, acciones sobre el objeto material o sobre el reflejo sensorial del objeto en la mente del propio sujeto. Aunque

esta distinción la veremos más detalladamente en el apartado sobre la consciencia.

Al igual que entre acción y operación, el límite entre acción y actividad también resulta difuso, ya que lo que en un contexto - con un motivo y objetivos - podría considerarse una actividad, en otro - con otro motivo y objetivos- podría ubicarse en el nivel de acción (Kuutti; 1995). No obstante, los límites entre actividad-acción-operación no deben entenderse como ambiguos, sino como relativos: dependientes del contexto y del momento en el marco temporal del desarrollo de la actividad.

Como se presenta en la TA Sistémica-Estructural (Bedny, Seglin y Meister; 2000) (Bedny, Harris; 2005), entre Actividad y Acción podría ubicarse un nivel intermediario: la Tarea. En el presente trabajo no creemos necesaria la concepción de la tarea como un nuevo nivel, aunque sí que el concepto de tarea puede ser útil visto como agrupación de acciones con objetivos similares o relacionados secuencialmente. Es necesario precisar que en la TA sistémica-estructural, además se diferencia entre objetos de análisis (actividad y tarea) y unidades de análisis (acción y operaciones), aunque de nuevo no consideramos que se trate de una diferenciación imprescindible.

2.3.2.1.3. Estructura relacional de la actividad

Como hemos visto, la actividad es una relación práctica con el entorno, incitada por motivos; un hacer dirigido a explorar y transformar los objetos por medio de las acciones y operaciones. Por ello, además de una estructura general de descomposición, la actividad también presenta otra dimensión estructural en forma de vínculos (acciones) entre sujetos y objetos.

Aunque varios autores proponen diferentes diagramas para representar la estructura específica de la actividad, como señala Wilson (2006) esas diferencias son sólo aparentes. En este trabajo partiremos del diagrama

propuesto por Bedny y Harris (2005) (Fig.17), puesto que es el que más claramente refleja la estructura relacional que la actividad tiene en la interpretación que en este trabajo realizamos de la TA.

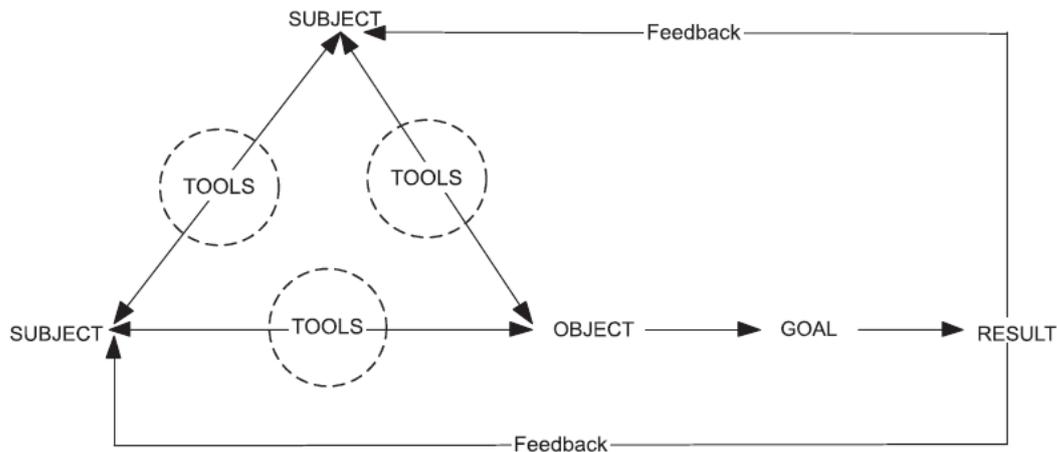


Fig.17 Diagrama de la estructura relacional de la actividad.

Fuente: Vendí y Harris (2005).

Antes de analizar la estructura relacional de la actividad, debemos hacer una necesaria aclaración terminológica: en el marco de la TA objeto y objetivo no se refieren al mismo concepto (Bedny, Harris; 2005). El objetivo (en el diagrama “goal”) es el resultado deseado que dirige nuestra acción, mientras que el objeto es aquello sobre lo que actuamos, transformándolo de un estado inicial hacia un resultado.

La relación activa sujeto-objeto no es unidireccional. Al igual que con nuestras acciones transformamos el objeto, el resultado (o incluso su resistencia al cambio) también nos transforma a nosotros, pudiendo modificar nuestro objetivo y por tanto la dirección de las posteriores acciones. Incluso el motivo de la actividad podría cambiar, aunque su variabilidad es menos dinámica que la de los objetivos. De hecho, el cambio, o mejor dicho, el desarrollo, es una cualidad inherente de la actividad que nos obliga a analizarla inevitablemente en relación con su marco histórico-temporal (Kaptelinin, Nardi; 2006).

También es necesario aclarar que el objeto no tiene por qué ser necesariamente material. Como señala Kuutti (1995) puede ser menos tangible (como un plan) o completamente intangible (como una idea común), siempre y cuando pueda ser compartido para su manipulación y transformación por los participantes de la actividad.

En la estructura relacional de la actividad, además de relaciones sujeto-objeto, también existen relaciones sujeto-sujeto. Estas relaciones sociales representan la comunicación e interacción entre participantes, entendimiento necesario para su coordinación, cooperación, colaboración o competición. Pero además, como indican Bedny y Harris (2005), las relaciones sujeto-objeto conllevan implícitamente un diálogo sujeto-sujeto, en forma de retroalimentación de los resultados. Es decir, si varios sujetos actúan sobre un mismo objeto, el resultado de la acción de uno condiciona las posteriores acciones del resto de sujetos.

Otro concepto fundamental en la TA es el de mediación. Las relaciones entre un sujeto y otros sujetos u objetos se encuentran mediadas por herramientas. Estas herramientas pueden ser materiales, como por ejemplo el martillo que utiliza un herrero en su acción sobre el objeto de metal que pretende transformar; pero también pueden ser intangibles, como por ejemplo en la relación entre sujetos, quienes hacen uso de signos (lingüísticos o no) para interactuar, ya que sin estas herramientas la comunicación sería imposible. El papel de las herramientas en la actividad resulta vital, ya que no sólo posibilitan o facilitan las acciones, sino que al mismo tiempo condicionan los límites de dichas acciones. Además, del mismo modo que una acción podía formar parte de actividades diferentes, las herramientas también pueden formar parte tanto de actividades como de acciones diferentes.

Hay que señalar que las herramientas sólo lo son en su uso, y esto es lo que las diferencia de los objetos: los objetos lo son como foco de la acción, las herramientas lo son como mediadoras de la acción. Por tanto, lo que en una actividad puede ser un objeto, en otra actividad podría considerarse una herramienta. De hecho, como señalan Bannon y Bødker (1991), el diseño en la TA puede ser visto como el proceso en el que

determinamos y creamos las condiciones necesarias para que un objeto se convierta en una herramienta.

Al igual que los objetos - o el resultado de nuestra acción sobre ellos - pueden modificar los objetivos del sujeto, las herramientas también pueden modelar estos objetivos (Kaptelinin; 1995b). Los diseñadores de una herramienta la “impregnan” de sus propios “objetivos”, “objetivos” que influyen en el uso que el sujeto le dará a la herramienta. Por ejemplo, un libro puede ser leído o usado para que un mueble deje de cojear, pero el diseño de dicho libro está impregnado de unos objetivos, que nada tienen que ver con los muebles defectuosos.

Dependiendo de la interpretación que se realice de la TA, existen otros elementos estructurales que pueden ser incluidos, bien bajo la categoría de herramientas especiales o bien como elementos diferentes. Estos elementos son las “reglas” y la “división del trabajo”. Como define Kuutti (1995), las “reglas” son normas, convenciones y relaciones sociales, tanto implícitas como explícitas, que median la comunidad (sujetos participantes); mientras que la “división del trabajo” hace referencia a la relación implícita y explícita de la comunidad en relación con la transformación de los objetos. En la interpretación que en el presente trabajo hacemos de la TA, tanto “reglas” como “división del trabajo” son conceptos englobados como una clase especial de herramientas mediadoras intangibles, las “reglas” como mediadoras de las acciones sujeto-sujeto, y la “división del trabajo” como herramienta mediadora en las acciones sujeto-objeto.

2.3.2.1.4. La consciencia

La TA es una teoría sobre la consciencia, entendida como un producto de la interacción social en la actividad de transformación del entorno, y que sólo existe en relación con esta actividad. La consciencia se refiere a nuestra capacidad de atención, intención, memoria, aprendizaje, razonamiento, habla, reflexión o imaginación. Es el ejercicio de estas capacidades en la actividad diaria por el que nos realizamos como

individuos, siendo al mismo tiempo considerada por la TA como la base de nuestra propia existencia (Leont'ev; 1978) (Kaptelinin, Nardi; 2006).

Aunque la TA es una teoría con marcado enfoque social, no por ello debemos creer que diluye la individualidad en el entramado sociocultural del sujeto. Lo que pretende la TA, y la diferencia de otras teorías, es intentar comprender la verdadera importancia que tiene el contexto en el desarrollo del individuo (Kaptelinin, Nardi; 2006). Con este objetivo, la consciencia humana es comprendida como resultado de la interacción con el entorno físico y social, pero al mismo tiempo como motor transformador de dicho entorno. Es decir, los sujetos no son simples títeres de su entorno, sino los responsables activos de su propio desarrollo histórico-social.

La TA no es una teoría sociológica, es una teoría psicológica, y por tanto su objeto de estudio es el individuo, su mente, su psique. Pero es una teoría que parte de que el error de la psicología tradicional es disociar la dimensión puramente psicológica del individuo de su dimensión sociológica (y de su dimensión fisiológica o biológica), ya que el ser humano, como ser social, sólo puede ser comprendido desde sus relaciones interpsicológicas. La actividad, como se puede ver en la figura 16, es el fenómeno humano que sustenta estas relaciones, el vínculo práctico entre sujeto y comunidad. Igualmente, aunque la consciencia es individual y subjetiva, en la TA se considera un producto social que sólo puede existir en la presencia de una consciencia social, algo que podemos constatar a través del lenguaje (Leont'ev; 1978).

El lenguaje, como herramienta mental mediadora en la interacción entre sujetos, es también un producto social, que sustenta la representación de los objetos, medios, objetivos, resultados, y la actividad misma; la representación de su significado, o en palabras de Marx “el acto de aislar el lado teórico de los objetos”. No obstante, aunque el significado de los conceptos es socialmente construido, el sujeto le asigna un sentido personal dependiendo de su rol en la actividad: el significado de un diamante no tiene el mismo sentido para un minerólogo, un obrero de la minería o un comerciante. A pesar de esta estrecha relación entre

consciencia y lenguaje, como aclara Leont'ev (1978) el lenguaje no es el origen de la consciencia, sino una forma de su existencia.

El canal por el que adquirimos el lenguaje es el sensorial, capacidad indispensable para la interiorización de la realidad objetiva, que a su vez exteriorizamos a través de nuestras acciones. Por tanto, en el transcurso de la actividad podemos decir que se está produciendo una constante transición y transformación bi-direccional entre la realidad objetiva y su imagen subjetiva, entre las acciones prácticas y las mentales. Puesto que la interiorización es la transición de la realidad objetiva al plano mental, al plano de la consciencia interior, este plano de la actividad resulta de especial importancia en la TA como teoría psicológica, así como para los objetivos del presente trabajo.

Al igual que la actividad externa está dirigida a transformar los objetos del entorno, la actividad interna del sujeto es una transformación mental de la imagen subjetiva de dicho entorno, acciones conscientes que también pueden estar mediadas por herramientas mentales (como símbolos), y que por su naturaleza imaginaria son menos limitadas que las acciones externas. Por ejemplo, las personas podemos rotar mentalmente el reflejo subjetivo de un objeto, así como eliminar, reemplazar o añadir características del objeto (su reflejo) mentalmente (Bedny, Seglin y Meister; 2000). Pero no sólo podemos actuar mentalmente sobre imágenes sensoriales, sino también sobre símbolos o información semántica. La consciencia no es un simple proceso pasivo, sino todo un sistema que interrelaciona la realidad objetiva y su imagen subjetiva, el significado compartido de los conceptos y su sentido personal, a través de acciones y operaciones, tanto prácticas como mentales.

Hay que aclarar que al hablar de imágenes reflejadas, esta reflexión sensorial no es pasiva - como sería el reflejo de un objeto en un espejo - sino que es un proceso transformador que posee características activas que implican algún sistema de etapas y operaciones (Bedny, Seglin y Meister; 2000). Es decir, la percepción no es un simple túnel, sino una serie de acciones que se sirven de diversas operaciones para elaborar la

imagen subjetiva. Estas acciones perceptuales, al igual que las motoras, están dirigidas por objetivos. Esto no significa, no obstante, que la imagen subjetiva sea una construcción de la imaginación sin vínculo directo con la realidad objetiva y material, sino que percibir es actuar sensorial y cognitivamente.

Bedny, Seglin y Meister (2000) clasifican las acciones mentales en acciones de conexión directa y acciones de transformación. Las primeras requieren menos atención (por el sujeto), son experimentadas como instantáneas, y son menos conscientes. Ejemplos de acciones mentales de conexión directa serían el reconocimiento de objetos familiares, la memorización o la rotación mental de la imagen de un objeto. Las acciones de transformación, en cambio, requieren un examen y análisis mental más deliberado. Ejemplos de este tipo de acciones serían la toma de decisiones, el razonamiento deductivo o la acción mental creativa.

Sin embargo, y a pesar de que dichos autores se basan en trabajos previos sobre la TA para hacer esta clasificación de las acciones mentales, creemos que su clasificación no sólo es errónea sino que además no se corresponde con la estructura general de la TA. Lo que Bedny, Seglin y Meister (2000) denominan acciones de conexión directa, por sus propiedades deberían ser consideradas simples operaciones mentales, y no acciones. Si las operaciones prácticas son caracterizadas en la TA por su cualidad inconsciente, por formar parte de acciones, y por estar determinadas por condiciones; las operaciones mentales deberían ser igualmente aquellas que en el plano mental del sujeto comparten esas mismas características. Además, al igual que sucede en la actividad externa del individuo, los límites entre acciones y operaciones mentales no son estáticos, y lo que en una etapa del desarrollo del individuo es una acción mental, en una etapa posterior puede convertirse en una operación mental si es automatizada.

El desarrollo del individuo, que acabamos de mencionar, es también un concepto relevante en la TA, que se encuentra directamente relacionado al concepto de la personalidad. Lo que la TA viene a constatar es que los individuos no son sólo producto de su herencia genética o biológica, sino

también de su desarrollo ontogénico, es decir, de la formación de su personalidad a lo largo de su vida. La personalidad no se posee al nacer, se desarrolla progresivamente en el marco de las relaciones socioculturales de la actividad del sujeto (Leont'ev; 1978). Por tanto, la personalidad, como etapa del desarrollo del individuo, resulta un factor condicionante en la interacción social del sujeto y en su capacidad de acción y uso de herramientas.

2.3.2.2. Diferencias entre la Teoría de la Actividad y la Teoría Cognitiva

La TA ha sido importada por varias disciplinas, desde la pedagogía a las ciencias de la documentación (Wilson; 2006). Sin embargo, ha sido precisamente en el contexto de la IPO - a partir del trabajo de Bødker (1989)- donde mayor repercusión ha tenido, seguramente por representar una esperanzadora alternativa al enfoque cognitivo, ofrecer una clarificadora visión holística de la relación entre personas y tecnología, y presentarse como una teoría psicológica unificada frente al cajón desastre de micro-teorías que conviven en la psicología. Además, una de las características que hace de la TA un marco teórico efectivo para la IPO, frente a otras teorías no cognitivistas, es la importancia que otorga a la tecnología en el desarrollo social e individual.

La mejor forma de comprender las implicaciones que tiene esta teoría en el contexto de la IPO, es a través del análisis comparado respecto a las características de las teorías cognitivas, soportes tradicionales de la investigación en IPO.

2.3.2.2.1. Las herramientas como intermediarias de la acción

La IPO es una disciplina acerca del diseño de tecnología, por lo que el principal objetivo de su dimensión teórica es comprender la relación entre las personas (usuarios) y la tecnología. De hecho, como su propio nombre indica, la IPO focaliza toda su atención en el fenómeno de

interacción entre personas y ordenadores (tecnología). Por el contrario, en la TA las herramientas (tecnología) cumplen una función mediadora, por lo que diseñar herramientas eficaces requiere no centrarse en la interacción entre usuarios y herramientas, sino en la interacción mediada por herramientas sujeto-sujeto y sujeto-objeto, en el contexto de la actividad práctica. Es decir, tal y como señala Nardi (1995b), en la TA el objeto del diseño no puede ser visto como la “interacción persona-ordenador” sino como la “actividad mediada por ordenadores”.

Esta visión de las herramientas como intermediarias en el quehacer de las personas, como condicionantes de su capacidad de acción, se corresponde más fielmente con el paradigma actual de la computación mencionado en la introducción de este capítulo, en el que ya no es tan importante lo que puede hacer el ordenador, sino lo que pueden hacer las personas mediante dicha tecnología.

Pero además, esta visión de las herramientas como mediadoras de la acción y supeditadas a los objetivos de quienes las usan, establece una clara relación asimétrica entre personas y ordenadores (Nardi; 1995b). La teoría cognitiva, en cambio, entiende la interacción persona-ordenador como un bucle de transmisión y procesamiento de información entre dos entidades equivalentes. Tanto personas como ordenadores son descritas como modelos computacionales, que cuentan con procesos similares, y que comparten conocimiento entre sí. Este hecho se puede constatar en las palabras de Cañas (2003), cuando afirma que el actual nivel de automatismo de los artefactos tecnológicos los hace candidatos a ser considerados sistemas cognitivos en sí mismos, casi al mismo nivel que los humanos. Si bien las personas generalmente tendemos a la personificación de los artefactos con los interactuamos, atribuyéndoles cualidades racionales o emocionales propias del ser humano, la TA pone de relieve que ese es un error que no podemos cometer como investigadores.

En la TA el conocimiento sólo existe las personas, y los ordenadores no son considerados entidades cognitivas, sino simples mediadores del conocimiento humano (Nardi; 1995b). Además, la TA reconoce la

naturaleza social, emocional, impredecible, reflexiva y creativa del ser humano. En cambio la ciencia cognitiva, en gran medida, computeriza al ser humano al tiempo que humaniza a los ordenadores.

Esto no significa que la TA niegue que las herramientas tecnológicas tengan capacidad transformadora y comportamiento autónomo. Por ejemplo, es sabido que existen agentes software sobre los que el usuario puede delegar acciones, que el software resolverá autónomamente respondiendo a las condiciones y demostrando cierta 'inteligencia' artificial. La diferencia entre el comportamiento humano y el de las herramientas, es que detrás del primero se encuentra una intencionalidad, una voluntad que responde a necesidades y motivos sociales, y que al mismo tiempo es capaz de crear nuevas necesidades y motivos.

2.3.2.2.2. La intencionalidad

La intencionalidad es otro principio fundamental de la TA (Kaptelinin y Nardi; 2006), pues resulta complicado explicar fenómenos como la relación entre personas y tecnología sin una estructura teórica que contemple las intenciones, motivaciones o razones de dicha relación.

La teoría cognitiva describe entidades, procesos y mecanismos de interacción, pero sin atribuirle una intencionalidad claramente definida a dichos sistemas. La TA, en cambio, estructura una actividad dirigida por motivos y cuyas acciones están conscientemente dirigidas por objetivos. No solo aporta capacidad de dirección voluntaria a los sujetos en sus acciones, sino que supedita esos objetivos a motivos conscientemente compartidos con la comunidad, que responden a necesidades no sólo básicas, sino también de desarrollo del individuo y su contexto sociocultural.

La ciencia cognitiva se centra en la información, su representación y propagación, mientras que la TA lo hace en la actividad práctica (Nardi; 1995), en el uso práctico que se le da a esa información, dirigido por

objetivos y originado por motivos. Otorgarle a la información el papel protagonista, implica concebir a los humanos casi como simples soportes o canales de información, que si bien tienen capacidad de procesarla, este procesamiento se encontraría dirigido por la naturaleza de la propia información. Por el contrario, en la TA la información jugaría el mismo papel instrumental que las herramientas, y por tanto no sería más que un medio para la transformación y desarrollo social dirigido por la consciencia colectiva e individual. La actividad - qué hace el ser humano- es la única unidad de análisis que nos permite comprender su realidad psicológica; la información, disociada de la actividad a la que sirve, no.

2.3.2.2.3. El contexto

Una de las características más destacables de la teoría cognitiva es su afán por simplificar y aislar su objeto de estudio, la cognición (Hutchins; 2000). Con este objetivo pretende estudiar el funcionamiento y estructura de la memoria, el razonamiento o las emociones, normalmente a partir de tareas básicas y descontextualizadas en laboratorio. La interdependencia entre la cognición y el comportamiento, como afirman Bedny, Seglin y Meister (2000), se encuentra gravemente descuidada en gran parte de la psicología cognitiva, principalmente en los estudios aplicados.

La TA, por el contrario, niega la posibilidad de comprender la psicología humana de forma descontextualizada, y por ello parte de la actividad como unidad de análisis, ya que ésta lleva embebida información contextual imprescindible acerca de la relación práctica entre los participantes de la actividad y del motivo compartido de dicha actividad. La TA trata la cognición no sólo como un proceso, sino como un sistema autorregulado de acciones y operaciones mentales (Bedny, Seglin y Meister; 2000), indisociable del comportamiento y la interacción intersubjetiva. En la TA el contexto es tanto interno como externo a los sujetos (Nardi; 1995b), pero ambos planos no son concebidos como

esferas independientes sino como partes de un mismo sistema, el de la consciencia, interrelacionado a través de la actividad.

Además, la TA es una teoría histórico-cultural, por lo que la sociedad, cultura y momento histórico se encuentran directamente relacionados con la actividad, y por tanto con la interpretación y análisis de dicha actividad. La teoría cognitiva, en cambio no tiene en consideración el desarrollo del individuo, su personalidad como etapa de dicho desarrollo, ni el contexto sociocultural en el que se encuentra. Incluso la DCog, aunque afirma que el estudio de la cognición distribuida no puede desvincularse del estudio de la cultura en la que se enmarca, simplifica y reduce a la cultura como “el proceso que acumula soluciones parciales a problemas frecuentes” (Hollan, Hutchins, Kirsh; 2000).

Por último señalar que si bien es verdad que la DCog, como evolución de la teoría cognitiva tradicional, provee de contexto a la interacción ampliando el concepto de cognición de los límites del individuo a los del sistema funcional en el que participa, este contexto podemos decir que sólo es atendido cuando es explícito. Por ejemplo, el contexto del aula en actividades de formación. En cambio, la TA es capaz de analizar la actividad de los sujetos aún cuando no se presente explícitamente relacionada a su contexto natural, como por ejemplo el aprendizaje autodidacta de un sujeto sin empleo. Esto es así porque la TA siempre contextualiza la actividad en su entramado social, cultural e histórico, por lo que no es necesario que el sujeto se encuentre directamente vinculado a un entorno laboral o formativo para que la actividad y acciones que realice sean socialmente motivadas.

2.3.2.2.4. Función de la Teoría de la Actividad

Las diferencias entre la teoría cognitiva y la TA no sólo se reducen a su concepción y visión de los fenómenos interactivos, sino también su función o propósito como teorías. La TA tiene una función descriptiva, proporcionando un vocabulario unificado para el estudio de la relación entre personas y tecnología; tiene una función explicativa, al tener en consideración para su estudio los motivos, necesidades y objetivos que vehiculan la actividad; e incluso una consecuente función generativa, puesto que su visión clarificadora del fenómeno interactivo facilita la creación e invención de nuevas herramientas que respondan más eficazmente a su ubicación en la estructura de la actividad. La Teoría Cognitiva, por el contrario, tiene un propósito claramente 'predictivo', ya que intenta predecir cuestiones como el rendimiento del usuario, la eficacia y eficiencia del uso de sistemas interactivos; y consecuentemente también una función preceptiva, de orientación en el diseño, normalmente en forma de directrices o recomendaciones de diseño.

La TA no pretende predecir cada paso en la actividad del usuario, ya que reconoce que la variación de las condiciones puede variar el orden de las acciones y operaciones (Bødker; 1989). Es decir, el rendimiento del usuario se verá claramente afectado por su contexto, el contexto de la actividad, y ésta es la razón por la que los estudios en laboratorio son tan difícilmente extrapolables a contextos naturales.

Autores como Carroll (2003) afirman que ambas teorías no son necesariamente incompatibles, e incluso otros como Nardi (1995,1995b) afirman que la TA no es un rechazo de la ciencia cognitiva, sino su radical expansión, y que sería deseable su fusión con la DCog. No obstante, en nuestra opinión, más eficaz que intentar la creación de una macro-teoría con propósitos tanto explicativos como predictivos, es hacer una interpretación de la TA desde la propia TA. Es decir, en palabras de Kaptelinin (1995b), la TA es una clase especial de

herramienta, lo que implica no rechazar otros enfoques, modelos y teorías, ya que ninguna herramienta, por potente que sea, puede resolver todos los problemas ni -añadimos- servir para todos los propósitos posibles. Esto significa que tanto la TA, como la Teoría Cognitiva, son herramientas igualmente útiles en la actividad investigadora sobre visualización de información, cada una de las cuales nos ofrece una visión (más o menos exhaustiva) de la misma realidad, y que el hecho de que no puedan utilizarse de forma integrada, no implica que no puedan ser usadas paralelamente.

2.3.2.2.5. Implicaciones metodológicas

La TA se presenta como una herramienta conceptual, y no directamente como una metodología práctica de diseño (Bertelsen, Bødker; 2003), aunque esto no significa que su uso no tenga implicaciones metodológicas.

Hablar de metodología y teoría cognitiva es hablar de Diseño Centrado en el Usuario, marco metodológico que asume que el usuario debe ser el centro de todas las decisiones de diseño, la interfaz debe adaptarse a dicho usuario, y la evaluación del sistema se debe realizar de forma iterativa a través de los propios usuarios. La TA reformula este enfoque, proponiendo que el usuario no debe ser el centro de las decisiones de diseño, sino que el diseño debe centrarse en la actividad en la que será usada la herramienta.

Centrar el diseño en la actividad tiene una clara ventaja, y es que los usuarios (sus perfiles) cambian más rápidamente que las actividades. Un diseño centrado en los usuarios de hoy, puede resultar un mal diseño para los usuarios de mañana (Norman; 2005), ya que las habilidades, preferencias y conocimientos de estos usuarios pueden haber cambiado radicalmente. Por ejemplo, los usuarios de una cocina hace diez años poco tendrán que ver con las características de los usuarios actuales, pero en cambio la actividad de cocinar sigue siendo muy similar.

Diseñar, por tanto, es un proceso de estudio y aprendizaje, ya que diseñar para el uso futuro implica analizar y comprender “la actividad actual de los futuros usuarios” (Bannon, Bødker; 1991). Por tanto, una de las implicaciones más importantes del Diseño Centrado en la Actividad es la necesidad de analizar la actividad siempre en un marco temporal suficientemente amplio, ya que la actividad sufre un desarrollo lento, y estudiarla en un marco temporal muy reducido puede conllevar no comprenderla en su completitud.

Imaginemos el diseño de una herramienta que puede formar parte de diferentes actividades, como podría ser un buscador de Internet. Si centramos el diseño en sus usuarios (una muestra representativa), esta información nos resultará de poca utilidad para la mejora de la herramienta, ya que la forma y propósitos con los que será usada por dichos usuarios variarán constantemente, pues el desarrollo de los usuarios, su personalidad, cambiará de forma muy rápida. Además, la inmensa diversidad de los usuarios nos impedirá tenerlos a todos en consideración, sesgando nuestra interpretación. En cambio, las actividades en las que será usada esta herramienta serán más estables y menos diversas, y por tanto su análisis nos facilitará idear versiones o adaptaciones del buscador para dichas actividades (ocio, investigación académica, diseño y programación, educación, etc.).

Tampoco podemos eludir la cuestión de que las personas, a través de la reflexión, “cambian el modo en el que usan la tecnología, más allá de la imaginación de sus diseñadores, modelando las herramientas como mediadoras de nuevas actividades” (Kaptelinin, Nardi; 2006). Analizar y comprender los nuevos usos de una herramienta es el mejor modo de mejorar su diseño, adaptándolo y optimizándolo para las diversas actividades de las que forma parte.

Al mismo tiempo, la oposición a la tecnología, la inaceptación de herramientas, sólo puede ser analizada desde su perspectiva social, cultural e histórica. Los estudios de IPO sobre el impacto de la cultura en el diseño tradicionalmente han reducido esta problemática a cuestiones como el uso de metáforas gráficas, colores y otros elementos de

interfaz. Un ejemplo muy conocido, para explicar la importancia del contexto cultural, es el del uso de iconos para correo electrónico que utilizan la metáfora de un buzón, puesto que la forma que tienen los buzones de correo postal en Estados Unidos nada tiene que ver, por ejemplo, con los de España³. Desde la perspectiva de la TA, la importancia que tiene el contexto y el desarrollo histórico cultural, va más allá de simples detalles de diseño de interfaz. El contexto sociocultural y la actividad son indisolubles, y su impacto sólo puede comprenderse a través su análisis profundo. Pensemos por ejemplo en el diseño de un portal web de búsqueda de empleo o un portal inmobiliario, donde las diferencias culturales entre países no pueden reducirse a cuestiones de interfaz y metáforas gráficas, sino que es necesario comprender la realidad socioeconómica de estos contextos y las relaciones culturalmente condicionadas entre los sujetos (usuarios) y los objetos (trabajos o viviendas).

Por último señalar que el hecho de que la TA conlleve cambios metodológicos no significa que los resultados de los estudios realizados en el marco de la teoría cognitiva no resulten útiles desde un enfoque centrado en la actividad. Lo que sí implica es la posibilidad de reinterpretación de dichos resultados, que aunque referidos al plano interno y mental de las acciones, su interpretación no puede estar desvinculada del plano externo, interpsicológico y socialmente dirigido de la actividad.

2.4. A modo de resumen

El concepto de visualización se refiere a un proceso cognitivo, de creación perceptual, destinado a ampliar nuestro conocimiento sobre fenómenos complejos y subyacentes a grandes volúmenes de información. Por tanto resulta impensable afrontar el diseño de

³ Si bien el cine estadounidense ha terminado familiarizándonos culturalmente con este objeto, el ejemplo no deja de ser válido: simplemente pensemos en un usuario estadounidense utilizando una aplicación entre cuyos iconos se utiliza la imagen de un buzón de correos de nuestro país.

interfaces gráficas de visualización efectivas si no es partiendo de la propia naturaleza psicológica de sus destinatarios.

No es casual que los temas de psicología cognitiva a los que mayor atención se ha prestado a lo largo del presente capítulo sean aquellos que explican y ofrecen guía predictiva sobre los procesos sensoriales y perceptuales. “Diseñar para los ojos” requiere comprender cómo será procesada la información visual por el usuario, desde el primer contacto sensorial hasta la interiorización y asignación de significado en el plano mental.

Durante las primeras décimas de segundo de este contacto perceptual, tienen lugar una gran variedad de procesos que determinarán cuán fácil de abarcar perceptualmente resulta la imagen. La correcta aplicación de las teorías descritas sobre percepción pre-atentiva, atenta y post-atentiva, supone el mejor garante de la usabilidad más inmediata de la interfaz. Esta usabilidad perceptual podemos definirla como la facilidad para discriminar y comparar visualmente qué elementos o zonas son más relevantes que otras, la facilidad para detectar las relaciones entre elementos, y la facilidad para reconocer los objetos presentes e identificar su significado. Una facilidad que implica que estas tareas sean realizadas automáticamente a nivel perceptual, sin llegar a requerir esfuerzo cognitivo. Debemos entender que la atención, como mecanismo de filtrado, tiene por función evitar la saturación informativa, y que el diseño de interfaces de visualización debe tener como primer objetivo facilitar esta tarea.

La razón de esta prioridad del diseño es economizar el esfuerzo cognitivo requerido para comprender la representación gráfica, para que así el usuario pueda dedicar plenamente su capacidad cognitiva en comprender aquello que se está representando. Es decir, cuanto más invisible resulte la interfaz, más visible resultará el contenido.

Si algo hemos aprendido de la investigación sobre la memoria, es que aquella que usamos para razonar y tomar decisiones - la memoria operativa - tiene una capacidad limitada y es retenida durante cortos

espacios de tiempo. Por tanto, el colapso cognitivo a evitar podemos definirlo como la saturación de dicha capacidad con contenido que no tiene relación con el motivo del uso, sino con el uso en sí mismo. Es decir, si el usuario debe generar un complejo modelo mental acerca del funcionamiento, comportamiento y presentación de la interfaz, esto le dificultará generar un completo modelo mental acerca de la información representada. Igual sucedería con el aprendizaje, ya que el esfuerzo que suponga aprender el funcionamiento de la interfaz - su interiorización en la memoria a largo plazo- restará capacidad para aprender e interiorizar el contenido representado.

La actividad motora, como hemos visto, también podrá ser facilitada o entorpecida por el propio diseño de la interfaz. Cuanto más costoso resulte al usuario interactuar con la interfaz - alcanzar o manipular un objeto con el ratón, o elegir una opción entre las posibles - más se entorpecerá la consecución de sus objetivos y malgastarán sus recursos atencionales, cognitivos y motores.

Conforme más nos adentramos en el interior de la cognición humana, la intención predictiva de estas teorías se torna más complicada y opaca. Esto no quiere decir que las teorías cognitivas no ofrezcan valor al estudio de la interacción y la visualización. Las teorías sobre la memoria, la reacción motora, la resolución de problemas y el aprendizaje, resultan de gran valor para comprender el comportamiento interactivo del usuario, pero principalmente para analizar su respuesta o reacción más inmediata ante un estímulo.

No obstante, cuanto más duradero es el comportamiento que quiere ser analizado, menos individual es, y por tanto las teorías sobre el procesamiento humano de información pierden capacidad explicativa. Hasta cierto grado, la DCog suple estas carencias, contextualizando la interacción mediante la ampliación del propio concepto de cognición al nivel de los sistemas funcionales. No obstante la naturaleza social del ser humano sobrepasa también estos límites, y creemos que su comportamiento y su relación con tecnologías como las interfaces de visualización de información, sólo pueden ser comprendidas realmente

desde su dimensión cultural, histórica y social. Por ello, como complemento a las teorías cognitivas, creemos que resulta necesario contar con otras herramientas teóricas que nos permitan contextualizar socialmente la interacción entre personas y ordenadores. Entre las posibles alternativas teóricas, la conocida como Teoría de la Actividad, parece demostrarse como la más efectiva para estos objetivos.

La primera implicación de analizar la visualización de información desde perspectiva de la TA, es la obligada concepción de las interfaces de visualización como herramientas mediadoras de acciones dirigidas por objetivos. Visualizar no sería un proceso pasivo, sino una acción mental que puede estar mediada, o no, por una interfaz gráfica de visualización.

Las interfaces de visualización representan una herramienta que forma parte de “órganos funcionales”, entendidos como “configuraciones de recursos internos y externos funcionalmente integrados” (Kaptelinin; 1995b)⁴. Es decir, al igual que las lentes amplifican nuestra capacidad de ver, o un martillo nuestra capacidad de golpear, las interfaces de visualización amplificarían nuestra capacidad de visualizar. Las interfaces de visualización representarían una herramienta externa que nos posibilitaría o facilitaría una acción interna, visualizar. Por tanto, el objeto que transformamos con la acción mental, sería igualmente interno: una imagen o reflejo de origen sensorial. Además, si visualizar es una acción, inevitablemente debe ser consciente, compuesta por operaciones mentales, y dirigida por un objetivo.

La más inmediata consecuencia del análisis de la visualización de información desde la TA, es que inevitablemente la idoneidad de una interfaz de visualización debe estar vinculada directamente al objetivo que pretende satisfacer, e indirectamente a la actividad en la que se enmarca la acción. Este hecho en cierto modo viene a aportar luz sobre una disyuntiva tradicional en el área de la visualización de información,

⁴ Hay que señalar que el concepto de las herramientas como órganos, tiene su origen en la Marxismo, raíz de la Teoría de la Actividad. Karl Marx, en su obra *El Capital*, decía “El hombre convierte cosas en órganos de su propia actividad: órganos que añade a los suyos”.

y es si las interfaces de visualización pueden tener simultáneamente utilidad como interfaces de recuperación de información. Aunque en principio pueda parecer factible que amplificar nuestra cognición mediante la visualización facilite la posterior acción de recuperar información, la realidad es que son dos acciones diferentes con objetivos diferentes. Por tanto, el usuario que necesite resolver una necesidad de información, encontrará una barrera procedimental al verse obligado a realizar una doble acción (visualizar y recuperar), satisfacer un objetivo en aras de conseguir el otro. Esto no implica que ambas funciones, visualizar y recuperar, sean tajantemente excluyentes, pero sí la dificultad inherente a diseñar cualquier herramienta que pretenda servir para acciones diferentes, pues conforme más “impregnada” esté la herramienta con un objetivo, menos útil se percibirá para el otro. Tampoco implica que las interfaces de visualización no deban ofrecer forma alguna de recuperar los registros o documentos finales, ya que el resultado de visualizar puede como consecuencia formar en el sujeto el objetivo de recuperar.

Es verdad que se podrían haber deducido conclusiones similares tras un análisis de tareas mediante GOMS, e incluso se podría haber intentado una aproximación al tiempo y esfuerzo requerido. La diferencia es que la TA no simplifica la acción mental de visualizar tanto como lo haría la Teoría Cognitiva. Dependerá de la personalidad del sujeto - de su desarrollo ontogénico- que haya transformado mayor número de acciones en operaciones automáticas, o que por el contrario visualizar implique una tarea, entendida como series consecutivas de acciones mentales realizadas conscientemente. Pero además debemos entender que el uso de una herramienta externa como una interfaz de visualización, requerirá de la previa posesión de herramientas internas socialmente construidas. Es decir, las interfaces gráficas utilizan notaciones y vocabularios gráficos, que sólo pueden ser interpretados si previamente se ha interiorizado su significado. Por ejemplo, en el uso de una interfaz de visualización, las relaciones de sus elementos pueden ser extraídas mediante operaciones perceptuales automáticas (leyes de la Gestalt), pero comprender la naturaleza y significado de estas relaciones, e

incluso si estas relaciones tienen alguna significación, requerirá disponer de las herramientas conceptuales necesarias.

Una interfaz gráfica tradicional de usuario será más fácilmente comprendida conforme el usuario haya interiorizado el significado socialmente construido de sus elementos gráficos (botones, menús, barras de desplazamiento...). Esta interiorización se intenta facilitar mediante el uso de metáforas gráficas, por su relación de correspondencia con objetos y acciones del mundo físico conocido. Igualmente las interfaces de visualización, en pos de su aceptación social, hacen uso frecuente de metáforas. Sin embargo, sólo cuando el vocabulario gráfico que emplean sea interiorizado socialmente, cuando sus modelos visuales sean parte del dominio semántico de la actividad a la que sirven, podremos esperar una clara aceptación de las interfaces de visualización.

Como vemos, la verdadera aportación de la TA al estudio de la visualización es su ampliación de los límites del fenómeno a comprender. Una visión que no sólo intenta abarcar la relación más inmediata entre personas y tecnología, sino también la función e idoneidad de la tecnología en el marco de actividades sociales, históricamente desarrolladas y culturalmente condicionadas.

Podemos concluir que si entendemos la visualización de información como la acción de traducir grandes volúmenes de información a un lenguaje visual, la teoría cognitiva ofrecería mayor número de herramientas para la concepción de la sintaxis gráfica, mientras que la TA lo haría para la semántica gráfica.

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DE INTERFACES DE VISUALIZACIÓN

3.1. Introducción

Diseñar es el conjunto de acciones que transcurren desde una idea abstracta hacia su materialización, un proceso durante el cual el concepto va adquiriendo forma concreta hasta concluir en una herramienta supeditada a una función. En el caso de las interfaces gráficas de visualización, éstas tienen la difícil función de transformar grandes volúmenes de datos en conocimiento, o mejor dicho, de mediar en este proceso transformador humano. El presente capítulo tiene por objeto ofrecer un marco que sistematice el proceso de diseño, desarrollo y evaluación de interfaces de visualización, abarcando desde la adquisición de los datos a los mecanismos interactivos con los que el usuario final podrá manipular la interfaz para sus propios objetivos.

La naturaleza multidisciplinar de la visualización de información, y la propia dispersión y desconexión de su literatura científica, hace que los trabajos que ofrecen una visión general y unificada del proceso de generación de interfaces de visualización sean muy escasos. Es el caso del trabajo de Börner, Chen y Boyack (2003), que aunque orientado a la visualización de información científica (dominios de conocimiento), es fácilmente aplicable a áreas de visualización de información de diferente tipología. Los autores proponen un proceso dividido en las siguientes etapas: (1) extracción de datos, (2) definición de la unidad de análisis, (3) selección de medidas, (4) cálculo de similitud entre unidades, (5) ordenación espacial y (6) uso de la visualización resultante para el análisis e interpretación. Aunque dicho trabajo ofrece el más exhaustivo marco metodológico hasta la fecha, también presenta algunas carencias. La limitación más destacable es la que advierten los propios autores

cuando afirman que quedan fuera del alcance de su trabajo “cuestiones importantes y potencialmente relevantes” como el análisis de tareas y usuarios, o los principios de percepción visual.

Herrero-Solana y Hassan-Montero (2006) presentan un marco metodológico similar en muchos aspectos, pero agrupado en tres etapas: (1) análisis y transformación de los datos, (2) aplicación de los algoritmos de clasificación y distribución visual y (3) aplicación de las técnicas de transformación visual. Además de describir las técnicas y algoritmos más relevantes en la generación de interfaces visuales, los autores discuten la compatibilidad entre técnicas de diferentes etapas, pero igualmente dejan fuera de su análisis la dimensión humana de estas interfaces.

Fry (2004), en su tesis doctoral, propone un marco metodológico de más amplia aplicación, en forma de proceso de “diseño de información computacional”, el cual divide en siete etapas: (1) adquisición de datos, (2) *parsing* (análisis sintáctico), (3) filtrado, (4) minería de datos, (5) representación gráfica, (6) refinamiento gráfico y (7) adición de interactividad. Este autor presta mayor atención a cuestiones como la adquisición o extracción de los datos a visualizar, así como a algunos aspectos sobre el diseño gráfico y percepción visual (color, formas, agrupación, ubicación), aunque no llegan a ser tratados en profundidad.

Otros trabajos que intentan ofrecer un marco metodológico para el diseño de interfaces de visualización son (Polanco, Zartl; 2002) (Chung, Chen, Nunamaker; 2003) (Keim; 2002), aunque, una vez más, presentan limitaciones similares a los previamente citados. Es decir, son trabajos centrados en los procesos algorítmicos de representación, pero sin establecer vínculos sólidos con la interpretación y decodificación de estas representaciones por parte de los usuarios.

Que los trabajos sobre metodologías generales en visualización de información desatiendan el factor humano, no significa que en la literatura científica sobre visualización no existan numerosos trabajos centrados en cuestiones específicas como la percepción visual o la

actividad cognitiva en relación con las interfaces de visualización. Un ejemplo es el trabajo de Wünsche y Lobb (2001), quienes proponen conectar ambos procesos de visualización, el de representación gráfica (diseñador) y el de representación mental (usuario), sobre los atributos visuales de la visualización. Por otra parte, Graham, Kennedy y Benyon (2000) proponen el uso de la metodología de Diseño Centrado en el Usuario con el objetivo de diseñar interfaces de visualización usables; es decir, concebir el proceso de diseño como un ciclo iterativo, en el que continuamente las decisiones de diseño son evaluadas involucrando para ello a usuarios reales. Pero sin duda, el autor más destacable en la exploración del factor humano de la visualización de información es Colin Ware, citado numerosas veces en el anterior capítulo, y autor de manuales de referencia como “Information Visualization: Perception for Design” (Ware; 2004) y “Visual Thinking for Design” (Ware; 2008).

El presente capítulo parte de la premisa de que el proceso de diseño y desarrollo de interfaces de visualización no puede disociarse del factor humano, de la naturaleza cognitiva y perceptual de sus usuarios, o de la función mediadora de estas herramientas en la actividad social de los usuarios. Si bien existe cierto consenso entre los autores acerca del proceso de diseño de interfaces de visualización, así como propuestas para extender este proceso involucrando al usuario (directa o indirectamente), creemos necesaria la propuesta de un marco metodológico suficientemente amplio que abarque la generación de interfaces de visualización de información de cualquier clase, y que al mismo tiempo integre el factor humano, tanto en las decisiones de diseño como en la evaluación de estas interfaces. Para ello, este capítulo parte de los trabajos previamente citados, así como de los modelos y teorías de Interacción Persona-Ordenador descritos en el capítulo segundo.

3.2. Visión general del proceso

El proceso de desarrollo de interfaces de visualización propuesto se articula en seis etapas principales, cada una de las cuales engloba su

propio conjunto de técnicas, algoritmos, procedimientos o conceptos teóricos aplicables (Fig.18).

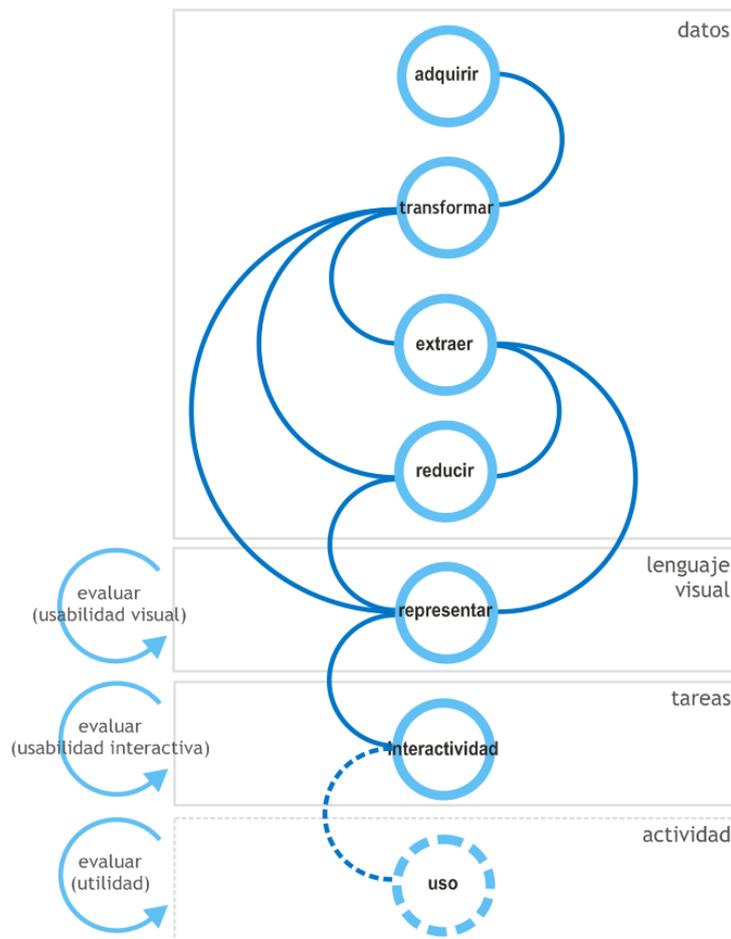


Fig.18 Esquema del proceso de desarrollo de interfaces de visualización

Como todo proceso de creación es de naturaleza secuencial, aunque esto no implica que en todo proyecto sea necesario pasar por todas las etapas, ni que no se pueda retroceder a etapas anteriores para solucionar o refinar el resultado. Las únicas etapas de obligada aplicación son adquirir, transformar, representar y añadir interactividad.

Las cuatro primeras etapas del esquema se refieren a acciones sobre datos en soporte electrónico. La quinta etapa - representar- se refiere a la materialización gráfica de la información extraída de las anteriores, su traducción a un lenguaje visual. La siguiente etapa consiste en la adición de interactividad a la representación, para posibilitar al usuario realizar

tareas de manipulación o exploración con el fin de modelar la interfaz para sus propios propósitos y necesidades. Y la última de las etapas, etiquetada como “uso”, es una etapa de monitorización e investigación del uso de la herramienta, ya implementada, con fines de evaluación.

En este modelo, tanto el resultado de la etapa de representación como el de la adición de interactividad, son evaluados iterativamente bajo la filosofía del Diseño Centrado en el Usuario, con el fin de mejorar y validar su usabilidad. Esto no significa que en las etapas anteriores no se deban llevar a cabo verificaciones continuas de las acciones sobre los datos, sino que esas verificaciones no son consideradas evaluaciones de usabilidad, de naturaleza más compleja. En la última de las etapas, lo que se pretende es evaluar no ya la usabilidad de la herramienta, sino su utilidad.

En los siguientes apartados se describirán las técnicas, procedimientos y principios más relevantes en el desarrollo de interfaces de visualización, clasificados en función de la etapa en la que se ubiquen.

3.3. Adquisición de datos

La etapa de adquisición podemos definirla como la selección y obtención de los datos fuente en formato digital, ya sea a través de una red o directamente del soporte en el que se encuentren almacenados. Dichos datos pueden estar registrados en muy diversos formatos: en uno o varios ficheros, en texto plano, texto delimitado, texto semiestructurado (etiquetado), bases de datos documentales, bases de datos relacionales, etc.

Como resulta obvio, para desarrollar una interfaz que posibilite visualizar la estructura y relaciones subyacentes a grandes volúmenes de datos, el primer requisito es disponer de acceso directo a dichos datos. Las entidades bancarias disponen de ingentes volúmenes de datos sobre las operaciones financieras que realizan sus clientes y la actividad de sus trabajadores; las universidades sobre la actividad de alumnos y personal;

y lo mismo podríamos decir otras grandes empresas, instituciones gubernamentales, organismos internacionales, etc. Todos estos bancos de datos son susceptibles de explotación, extracción de conocimiento y visualización de información. Sin embargo, por cuestiones de seguridad, protección de la privacidad o valor competitivo, se encuentran únicamente accesibles para personal autorizado. Como contrapartida, con la aparición de Internet - y la World Wide Web- el volumen de información disponible públicamente ha crecido hasta niveles impensables décadas antes. Esta información no sólo puede ser accedida, sino también recuperada y almacenada, normalmente a través de 'web crawlers', herramientas que recorren la Web de forma sistemática, dirigidas por objetivos o parámetros previamente definidos.

No toda la información que puede ser accedida o consultada en Internet puede ser recuperada y registrada de forma masiva. En ocasiones es por motivos legales - como puede suceder en bases de datos comerciales accesibles online - y otras por limitaciones técnicas. Por ejemplo, si lo que queremos visualizar es la estructura hipertextual de la Web, va a resultar imposible descargar todo el volumen documental que la conforma, no sólo por su tamaño, sino también porque no toda es 'visible' o 'localizable'. Cuando el problema de los datos a visualizar está relacionado con su tamaño, lo que se suele hacer es utilizar una muestra representativa, aunque no es un procedimiento exento de problemas metodológicos, como los concernientes al método de selección y recuperación de la muestra.

Aunque todas estas cuestiones pueden plantear problemas, los procedimientos y herramientas a emplear son ampliamente conocidos. Es decir, la forma con la que se obtienen y registran los datos es un problema esencialmente técnico, por lo que no es objetivo del presente trabajo la descripción de las diferentes posibilidades.

En cambio, en esta etapa se plantea un interrogante de más compleja solución: ¿Qué datos vamos a adquirir? Uno de los objetivos de la visualización (como actividad de representación visual) es reducir el volumen de los datos con el fin de facilitar su acceso y transformación en

conocimiento sobre un dominio concreto. Esta reducción debe realizarse desde el primer momento, discriminando aquellos datos irrelevantes y tratando únicamente los potencialmente relevantes. Como indica Fry (2004), la pregunta a hacernos sería: ¿Qué interrogantes pretende responder la visualización?

Es muy común encontrarse con visualizaciones donde se representa excesiva información, o dicha información no tiene interés o utilidad para sus usuarios. En otras palabras, visualizaciones cuya fallo radica en la selección de los datos. Las dos conclusiones principales que deberíamos haber extraído del anterior capítulo sobre Interacción Persona-Ordenador es que, por un lado, las personas tenemos unas capacidades perceptuales y cognitivas limitadas, por lo que ofrecer demasiada información puede provocar el colapso atencional y cognitivo del usuario; y por otro, que la relevancia o no de determinada información se encuentra en directa relación con las actividades en las que se contextualiza su generación y su uso.

3.3.1. Análisis y selección de datos

Como se introdujo en el primer capítulo de este trabajo, a diferencia de la visualización científica, la visualización de información (científica o no) no tiene como objeto los datos físicos, sino los datos abstractos. Es necesario, llegado este punto, definir a qué nos referimos por información, qué es aquello que pretendemos visualizar.

En el presente trabajo entendemos que la información es el reflejo registrado de la actividad social, una herramienta conceptual resultado y soporte de dicha actividad. Usamos conscientemente en esta definición un vocabulario propio de la Teoría de la Actividad, ya que creemos que no sólo resulta una teoría útil para comprender la relación entre personas y tecnologías como las interfaces de visualización, sino también para analizar y comprender la naturaleza de la información que pretendemos representar gráficamente en dichas interfaces. Es decir, diseñar interfaces de visualización no sólo requiere entender la función

mediadora de estos artefactos en la actividad de sus usuarios, sino también la propia estructura de la actividad que ha generado la información a visualizar.

Esta reflexión resulta especialmente importante en la presente etapa del proceso de desarrollo de interfaces de visualización, ya que es en este momento en el que se deben decidir cual o cuales serán las unidades de análisis de los datos obtenidos, que deben ser aquellas que respondan a los objetivos de los usuarios de la interfaz.

Börner, Chen y Boyack (2003), en el estudio de la visualización de dominios de conocimiento científico, identifican cuatro unidades de análisis principales: revistas, documentos, autores y términos. Como sugieren los autores, cada una de estas unidades de análisis representa diferentes facetas del dominio de conocimiento a analizar, y posibilita diferentes tipos de análisis.

Haciendo uso del vocabulario de la Teoría de la Actividad, podemos clasificar estas unidades en los dos grupos que conforman la estructura relacional de la actividad: sujetos (autores) y objetos (revistas, documentos y términos). Resulta igualmente sencillo detectar diferentes unidades de análisis relevantes, como los usuarios (también en el grupo de sujetos), cuyo comportamiento accediendo y usando los objetos genera al mismo tiempo información susceptible de ser representada y analizada. Además, al igual que los objetos pueden formar parte de otros objetos (los términos de los documentos, y éstos de las revistas), los sujetos también pueden presentar relaciones jerárquicas con redes explícitas de sujetos (por ejemplo: los autores forman parte de las instituciones en las que llevan a cabo su trabajo).

En la presente etapa, por tanto, se debe analizar la naturaleza de la actividad reflejada en los datos, determinar qué faceta de dicha actividad está representada por cada una de las posibles unidades de análisis, y seleccionar aquella o aquellas unidades de análisis que respondan a los objetivos (en forma de interrogantes) de quienes serán usuarios de la interfaz, por lo que también será necesario analizar la

actividad en la que se contextualizará el uso de la interfaz de visualización.

Entender el contexto en el que se genera la información y el contexto en el que será usada (que no siempre coincidirán), requiere un estudio, investigación y comprensión profunda de las actividades que determinan dicho contexto. Es decir, no será igual diseñar una interfaz de visualización de información científica, financiera, política o de analítica web.

3.4. Transformación de los datos

“Today, if you're analyzing numbers, there are a million ways to make a bar chart. If you're analyzing text, it's hard.”

Martin Wattenberg

Los datos fuente a visualizar pueden estar registrados en diversas formas, aunque su formato más habitual suele ser mediante registros y campos. Para que la información contenida en estos registros sea visualizable, los datos deben ser, o ser transformados en, datos de naturaleza numérica y, por tanto, computable.

Keim (2002) propone una taxonomía de datos formada por seis categorías principales: datos unidimensionales, bidimensionales, multidimensionales, texto-hipertexto, jerarquías-grafos, y algoritmos-software. A esta taxonomía podríamos añadir una séptima categoría, que agrupase los datos de naturaleza audiovisual (imágenes, vídeos y sonidos).

La dimensionalidad de los datos (presente en las tres primeras categorías) hace referencia al número de variables de dichos datos, es decir, a su estructura. De este modo, hablaríamos de datos unidimensionales cuando sólo dispusiéramos de una variable con N valores. Tal sería el caso de un conjunto de vectores cada uno con un solo componente, como por ejemplo la evolución del PIB de un país para

un periodo determinado, donde la variable sería sólo una (PIB) y cada año sería un vector con un único valor para esa variable.

En los datos bidimensionales, en cambio, los diferentes vectores estarían descritos por dos variables o dimensiones, como por ejemplo en el caso de la relación entre el número de volúmenes del fondo documental (variable x) y el número de usuarios (variable y) para un conjunto de bibliotecas (vectores). Por último, en el caso de los datos multidimensionales, el número de variables sería de tres o más, es decir, se trataría de matrices $M \times N$, dónde M sería el número de vectores y N el número de dimensiones o variables (Fig.19).

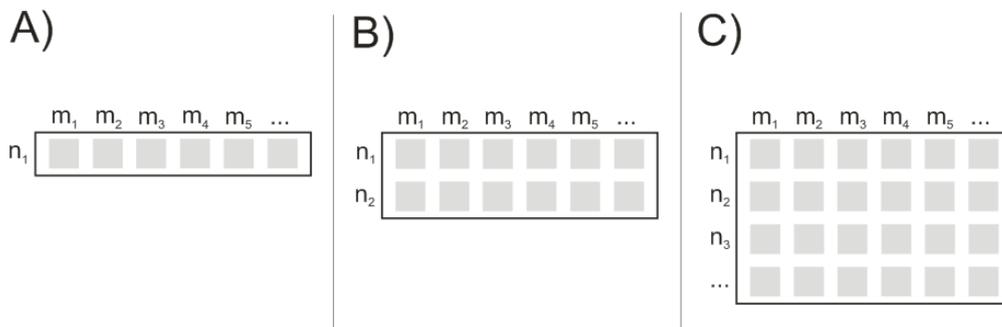


Fig.19 Estructuras de datos: unidimensional (a), bidimensional (b) y multidimensional (c)

El resto de categorías propuestas por Keim (2002), a diferencia de las n -dimensionales, describen datos de naturaleza no numérica, por lo que requieren de transformación para su explotación.

Las jerarquías y grafos son directamente transformables en estructuras multidimensionales, pues un grafo es definido matemáticamente como un conjunto de nodos conectados por enlaces, y una jerarquía simplemente como un tipo de grafo. En concreto, las jerarquías o árboles son aquel tipo de grafo en el que cada nodo-hijo tiene exactamente un único nodo-padre, y donde, por tanto, el número total de nodos es siempre igual al número de enlaces más uno. La transformación de un grafo, del tipo que sea, a su forma multidimensional, únicamente requiere de su representación en forma

de matriz de adyacencia (Fig.20). Las matrices de adyacencia son matrices cuadradas $N \times N$, donde N es el número de nodos del grafo, y la posición a_{ij} representa el vínculo entre el nodo i y el nodo j . Si los valores de las posiciones de la matriz son binarios, indican la existencia o no de un enlace entre ambos nodos; en caso contrario, pueden indicar el peso del enlace, o el número de enlaces entre nodos. Dependiendo del tipo de grafo, la matriz resultante variará en su forma. En los grafos no dirigidos, donde los enlaces que conectan dos nodos no siguen un sentido u otro, la matriz de adyacencia será simétrica o triangular, ya que el valor del enlace entre el nodo j y el nodo i sería idéntico al valor entre el nodo i y el nodo j . En los grafos dirigidos, en cambio, la matriz resultante solo será simétrica cuando todos los enlaces que conecten un nodo con otro, sean idénticos a los que conecten ambos nodos en sentido contrario.

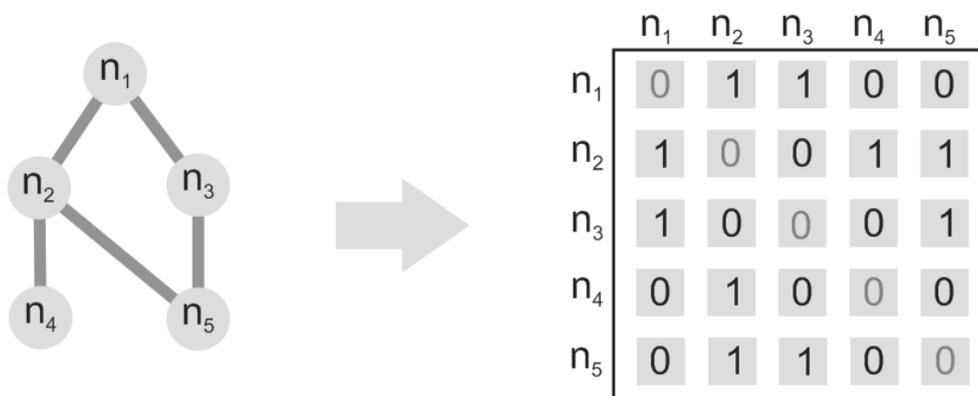


Fig.20 Ejemplo de representación de un grafo no dirigido mediante una matriz simétrica de adyacencia.

La categoría de datos textuales hace referencia a registros compuestos por términos o palabras ordenadas de forma secuencial; y los datos hipertextuales son una clase especial de datos textuales, en los que parte de su contenido codificaría vínculos o referencias a otros registros. En esta categoría no sólo cabrían documentos web con hiperenlaces, sino también, por ejemplo, artículos científicos con sus correspondientes citas bibliográficas.

La información hipertextual contenida en estos datos es fácilmente transformable a estructuras multidimensionales, ya que al igual que sucedía con los grafos dirigidos, únicamente habría que crear una matriz de adyacencia $N \times N$, donde N representaría el número de registros (documentos), y las posiciones a_{ij} la existencia o no de un hipervínculo (o cita) desde el registro i hacia el registro j .

Sin embargo, la transformación de los datos textuales contenidos en estos registros no resulta una tarea tan sencilla. En la literatura científica se han propuesto diferentes modelos, principalmente en el área de la Recuperación de Información, con el fin de representar mediante estructuras multidimensionales el contenido textual de los registros. A continuación se describen los dos modelos más utilizados en esta tarea: El modelo Espacio-Vectorial y el Análisis de Semántica Latente.

3.4.1. Modelo Espacio-Vectorial

Como en el caso de las jerarquías, grafos y estructuras hipertextuales, el resultado perseguido con la transformación de los datos textuales es su representación numérica en forma n -dimensional. Para ello, los modelos de indexación automática parten de la premisa de que los términos que conforman los textos representan su contenido, y que su frecuencia y posición dentro de dichos textos son factores que determinan su capacidad representativa (Luhn; 1958).

Sobre esta lógica se sustenta el Modelo de Espacio Vectorial (SVM: Space-Vector Model) propuesto por Salton, Wong y Yang (1975). En este modelo un espacio documental es descrito como un conjunto de documentos D_i representados por un conjunto de términos T_j . De este modo, cada documento se describe como un vector $D_i = (d_{i1}, d_{i2}, d_{i3} \dots d_{it})$, donde t indica el número total de términos diferentes en el espacio documental, y d_{ij} el peso con el que el término t_j representa al documento d_i .

La relación ponderada entre cada término y cada documento (d_{ij}) se obtiene a través de la función $tf \cdot idf$, donde la frecuencia del término en el documento ($tf = \text{term frequency}$) determina la capacidad de representación del término para dicho documento, y la inversa de la frecuencia del término en todo el conjunto documental ($idf = \text{inverse document frequency}$) su capacidad de discriminación. Existen numerosas propuestas de fórmulas $tf \cdot idf$, algunas de las más importantes son evaluadas comparativamente en el estudio de Salton y Buckley (1988).

Es necesario señalar que, de forma previa a la representación vectorial, es común realizar una serie de ajustes con el objetivo de que los términos que formen parte de este espacio multidimensional sean los más significativos posible. Para ello se suelen eliminar los términos vacíos de significación (*stop-words*), como es el caso de los artículos (que son precisamente aquellos términos que aparecen con mayor frecuencia en los textos); y llevar a cabo una reducción de los términos a su raíz o ‘tema’ (stemming) (Rijsbergen; 1975).

El SVM es un modelo relativamente sencillo y flexible para transformar grandes conjuntos de registros textuales en una representación multidimensional y computable; una gran matriz numérica en la que los documentos estarían representados por filas y los términos por columnas, y en la que cada una de las posiciones de la matriz indicaría el grado con el que un término describe el contenido de un documento.

El modelo que sucintamente hemos descrito no es el único propuesto y desarrollado en la literatura científica sobre Recuperación de Información aplicable al desarrollo de interfaces de visualización. Otro ejemplo es el Modelo Probabilístico, con unos fundamentos similares al SVM pero más robusto matemáticamente, aunque de más compleja implementación (Moya-Anegón; 1994) (Spark-Jones, Walker, Robertson; 2000). Siguiendo la clasificación de Baeza-Yates y Ribeiro-Neto (1999), otros modelos propios del área de la Recuperación de Información a destacar son el booleano, el basado en conjuntos difusos, el de redes neuronales o el de la Indización de Semántica Latente. De entre estos modelos, a continuación describiremos el de Análisis o Indización de

Semántica Latente, que presenta interesantes cualidades para la visualización de información de corpus textuales (Chen, Czerwinski; 1998) (Hofmann; 1999) (Chen; 1999) (Zhu, Chen; 2007) (Jorge-Botana, León, Olmos, Hassan-Montero; 2010).

3.4.2. Análisis de Semántica Latente

El modelo de Análisis o Indización de Semántica Latente (LSI: Latent Semantic Indexing) (Deerwester, et al.; 1990) parte de la premisa de que un problema de los modelos clásicos como el SVM es considerar que únicamente las palabras que aparecen en el cuerpo de cada texto o documento representan su contenido, y no otras que pudieran estar ausentes. Por tanto, uno de los objetivos de este modelo es aumentar la exhaustividad de la indización: que un documento se encuentre vinculado a todos aquellos términos que representen de alguna forma su contenido, aún cuando esos términos no aparezcan en su cuerpo textual. Con este fin, el modelo considera que existe una semántica latente en los conjuntos documentales, implícitamente presente en las relaciones contextuales de las palabras que lo conforman. A modo de ejemplo, si en el conjunto documental los términos “accesibilidad” y “discapacidad” suelen coincidir frecuentemente en los mismos contextos (documentos, párrafos, campos...), implica que el término “discapacidad” debería también representar a aquellos contextos en los que únicamente aparezca el término “accesibilidad”, y viceversa. El ejemplo descrito se hace únicamente con fines didácticos, ya que como afirman Landauer, Foltz y Laham (1998) es importante señalar que las relaciones semánticas representadas mediante la LSI no son simples frecuencias de contigüidad, conteos de co-ocurrencia, o correlaciones en el uso de palabras, sino que dependen de un potente análisis matemático que es capaz de inferir correctamente relaciones semánticas mucho más profundas.

Dicho análisis matemático parte de una matriz A de m términos y n documentos, es decir, de una representación vectorial del conjunto documental propia del SVM. Sobre esta matriz inicial se aplica una

técnica de factorización conocida como Descomposición de Valores Singulares (SVD: Singular Value Decomposition), con lo que la matriz A queda descompuesta en el producto de tres matrices diferentes, tal que:

$$A_{mn} = T_{mm} S_{mn} D'_{nn}$$

Donde T y D son matrices ortogonales, D' es la matriz transpuesta de D , y S es una matriz diagonal. Aclaremos que una matriz transpuesta se obtiene intercambiando las columnas por las filas, tal que la matriz transpuesta de G_{mn} sería G'_{nm} ; una matriz diagonal es aquella en la que únicamente los valores que se encuentran en su diagonal ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \dots, \sigma_{mn}$) pueden ser diferentes de cero; y una matriz ortogonal es aquella cuyo producto por su transpuesta es igual a una 'matriz identidad', es decir, a una matriz cuadrada diagonal en la que todos los valores de su diagonal son igual a 1.

En la SVD la matriz T se obtiene calculando los vectores propios (eigenvectors) de la matriz AA' , es decir, de la matriz resultante de multiplicar la matriz A por su transpuesta. Esos vectores propios ortonormales formarían las columnas de la matriz T . De forma similar, las columnas de la matriz D serían los vectores propios ortonormales obtenidos, esta vez, de la matriz $A'A$. La matriz diagonal S estaría formada por las raíces cuadradas de los valores propios (eigenvalues) de T ó D ordenados de mayor a menor, o lo que es lo mismo, estaría formada por sus valores singulares (Strumpfen, Hoffmann, Agarwal; 2003).

Como se puede apreciar, de todas las operaciones que se realizan sobre la matriz A para su descomposición, la obtención de los vectores y valores propios es la que sustenta todo el proceso. Un vector propio es aquel vector no nulo que satisface la ecuación:

$$Bv = \lambda v$$

Donde B debe ser una matriz cuadrada conocida, v es el vector propio y λ es un escalar llamado valor propio. Al conjunto de vectores propios que

satisfacen la ecuación para un valor propio determinado, se le denomina espacio propio de B para dicho valor. Es necesario señalar que los valores propios de $B=AA'$ y de $B=A'A$ serán siempre idénticos, y por esta razón sólo es necesario calcular los valores propios de uno de los dos productos de matrices para conformar la matriz diagonal S . En cambio, los vectores propios serán diferentes, y de hecho conformarán dos matrices diferentes, T y D .

La resolución de los vectores y valores propios de matrices no es un problema matemática ni computacionalmente trivial, como podemos comprobar en la revisión histórica que Golub y Vorst (2000) realizan sobre la investigación en este tema. Como advierten estos autores, existen numerosos métodos para el cálculo de los vectores y valores propios - método QR, “divide y vencerás”, método Jacobi-Davidson, etc. - cuya idoneidad y eficiencia están condicionadas por la naturaleza y características de la matriz original.

Como señalan Deerwester et al. (1990) la belleza de la SVD es que además posibilita una estrategia simple para crear una aproximación reducida de la matriz original, en la que del producto de las tres matrices en las que quedaría descompuesta la matriz original no resultaría una matriz idéntica a la original, sino una aproximación, tal que $A \approx \hat{A} = TSD'$. Con esta SVD reducida, las tres matrices obtenidas pueden ser consideradas una abstracción de la matriz original, en las que quedarían representadas las relaciones más significativas de los datos, y suprimidas las relaciones casuales o fortuitas.

Para obtener una SVD reducida, ya que los valores singulares de la matriz diagonal S se encuentran ordenados de mayor a menor, se trataría simplemente de eliminar de la matriz S aquellos valores singulares que no se encuentren entre los k primeros, y hacer lo mismo con las columnas correspondientes de T y D . La forma de elección del valor k , es decir, de la cantidad de reducción dimensional a aplicar, aún no tiene una respuesta clara en la literatura sobre LSI, ya que estará muy condicionada por la naturaleza del corpus textual a representar. Según Deerwester et al. (1990), idealmente necesitamos un valor o rango k

suficientemente grande como para obtener una aproximación fiel de la estructura original de los datos, pero suficientemente pequeño como para no representar datos estructurales no significativos.

El modelo LSI, sobre esta SVD reducida, ofrece una serie de métodos para determinar el grado de asociación entre términos y documentos, así como para calcular las relaciones de similitud término-término y documento-documento. Como introducíamos en este apartado, las relaciones que extrae la LSI entre términos y documentos no son simples frecuencias de aparición como sucede en el SVM, sino resultado de un complejo proceso matemático de extracción de la semántica latente en los propios datos. Por ello, a pesar de que el modelo LSI ha sido ubicado en la presente etapa de transformación de los datos, no se trata únicamente de una técnica para la creación de una representación computable de los datos textuales, sino al mismo tiempo de una técnica de extracción y reducción de información. Es decir, la LSI es una técnica que en sí misma abarcaría las dos etapas siguientes del desarrollo de interfaces de visualización.

3.5. Extracción de información

En ocasiones, la simple transformación de los datos originales a matrices o espacios n -dimensionales - descrita en la anterior etapa - posibilita su directa representación gráfica, facilitando la comprensión visual de los datos originales. Sin embargo, en muchas otras ocasiones, no es la estructura explícitamente representada en estas matrices la que aportará información de verdadero valor al usuario, sino la estructura implícitamente presente en estos espacios n -dimensionales, una estructura subyacente que puede ser extraída mediante técnicas denominadas comúnmente de Minería de Datos (DM, Data Mining). Como definen Kopanakis y Theodoulidis (2003), el concepto o categoría de DM hace referencia a un proceso de descubrimiento de conocimiento (a priori desconocido) sobre repositorios de datos complejos, mediante la extracción de información 'oculta' y potencialmente útil en forma de patrones globales y relaciones estructurales implícitas entre datos.

En la mayoría de trabajos, las técnicas de DM suelen clasificarse en tres grupos: minería de contenido, minería de estructura y minería de uso (Berendt, Hotho, Stumme; 2002) (Baeza-Yates; 2004). Para los objetivos de este trabajo, dicha clasificación no resulta útil ya que realmente no permite diferenciar entre tipos de técnicas, pues se trata de una clasificación basada en la naturaleza de los datos fuente, es decir, en el tipo de unidad de análisis y relaciones representadas en los datos.

La dificultad para definir una clasificación clara de las técnicas de minería de datos estriba en que la mayoría de técnicas son estadísticas, y parten del concepto de correlación. Es decir, su intención es determinar la relación, similitud o propiedades comunes entre pares de vectores, y de este modo, entre las unidades representadas por dichos vectores. Estas relaciones son implícitas ya que no se encuentran definidas explícitamente en el espacio vectorial, sino que deben ser extraídas mediante su procesamiento matemático. A continuación se describen las técnicas de DM más usadas en visualización de información agrupadas en dos categorías no excluyentes: Análisis de co-ocurrencia y Funciones de similitud.

3.5.1. Análisis de co-ocurrencia

El método más sencillo para descubrir relaciones entre pares de vectores es el análisis de co-ocurrencia. Dados dos vectores con valores binarios, el grado de relación entre ambos puede ser medido contabilizando el número de veces que, en la misma posición, ambos vectores contienen la cifra 1. Es decir, la similitud entre ambos vectores binarios viene determinada por su producto escalar:

$$\text{SIM}(D_i, D_j) = \sum (d_i * d_j)$$

Dependiendo de qué información se encuentre representada en el espacio n -dimensional, al análisis de co-ocurrencia puede denominarse

análisis de co-word (co-ocurrencia de palabras), co-citación, co-linkage, etc.

Por ejemplo, si tenemos un espacio vectorial o matriz $N \times M$, donde N es el número de documentos de un conjunto documental, M es el número de palabras claves presentes en dicho conjunto, y cada valor binario d_{ij} representa la presencia o no de la palabra clave m_j en el documento n_i , podemos determinar la similitud entre dos palabras clave del conjunto contabilizando cuantas veces co-ocurren dichas palabras clave en los documentos del conjunto, o lo que es igual, calculando el producto escalar de los vectores de ambas palabras clave. Igualmente es posible determinar la similitud de cualquier par de documentos del conjunto calculando el producto escalar de sus respectivos vectores. En estos casos, dada la naturaleza de los datos representados vectorialmente, lo que se pretende extraer es la similitud semántica entre palabras clave, y la similitud temática entre documentos respectivamente.

En una representación vectorial o matriz $N \times N$, donde N fuera el número de documentos, y cada posición d_{ij} representara la existencia o no de un hipervínculo o cita del documento n_i hacia el documento n_j , la matriz estaría representando la estructura explícita hipertextual de un conjunto documental. Mediante el análisis de co-ocurrencias tendríamos dos formas diferentes de determinar la relación temática o semántica entre documentos, en función de si comparáramos los vectores que conforman las columnas de la matriz, o las filas. En un caso la similitud vendría determinada por la frecuencia con la que dos documentos son citados o hipervinculados conjuntamente por otros (co-citación o co-linkage), mientras que en el otro la similitud estaría determinada por la frecuencia con la que los dos documentos coinciden en citar o enlazar a los mismos documentos (bibliographic coupling).

Otro posible caso sería una matriz $N \times M$, donde N representara el número de documentos, M el número de usuarios, y la posición u_{ij} determinara si un usuario m_j ha descargado o accedido al documento n_i . Mediante el mismo simple análisis de los ejemplos anteriores, sería posible determinar la similitud entre usuarios o entre documentos.

Como vemos, las posibilidades son tan variadas como diferente información representemos mediante espacios vectoriales, pero en todos los casos el proceso matemático es el mismo: el cálculo del producto escalar entre todos los pares de vectores, obteniendo así una nueva matriz simétrica que representaría las relaciones implícitamente presentes en la matriz original.

3.5.2. Funciones de similitud

Como indica Moya-Anegón (1994), las funciones de similitud son aportaciones que en el campo de la matemática aplicada se habían hecho anteriormente, y que posteriormente han demostrado una gran utilidad en el campo de la Recuperación de Información - y consecuentemente en el de la visualización de información-. La diferenciación que en el presente trabajo realizamos entre análisis de co-ocurrencia y funciones de similitud (o de 'similaridad') se hace únicamente con fines didácticos, ya que en esencia esta división es inexistente.

Estas funciones toman como entrada dos vectores, y ofrecen como resultado un valor que indica cómo de parecidos o similares son dichos vectores. El producto escalar, que señalábamos como base del análisis de co-ocurrencias, es una función de similitud, que lógicamente no sólo es aplicable a vectores con valores binarios.

Funciones de similitud hay muchas, aunque las que mejores resultados ofrecen se basan, precisamente, en el producto escalar: la del coseno (también llamada de Salton), la de Dice y la de Jaccard.

Coefficiente del coseno:

$$\text{SIM}(D_i, D_j) = \frac{\sum(d_i * d_j)}{\sqrt{(\sum d_i^2 * \sum d_j^2)}}$$

Coefficiente de Dice:

$$\text{SIM}(D_i, D_j) = \frac{2 * \sum(d_i * d_j)}{(\sum d_i + \sum d_j)}$$

Coeficiente de Jaccard:

$$\text{SIM}(D_i, D_j) = \frac{\sum(d_i * d_j)}{(\sum d_i + \sum d_j - \sum(d_i * d_j))}$$

Estas funciones ofrecen valores más exactos que el simple producto escalar, ya que el producto escalar (como función de similitud) tienen en consideración las apariciones de valores mayores que cero en ambos vectores, pero no las ausencias (valores igual a cero). Es por esto que utilizando el producto escalar, entre los vectores $D_i=(3,2,1,8)$ y $D_j=(1,1,5,2)$ obtendríamos un valor de similitud mayor que entre $D_i=(0,0,1,0)$ y $D_j=(0,0,1,0)$, a pesar de que estos dos últimos vectores en realidad son idénticos.

En la búsqueda de relaciones implícitas de similitud entre vectores, en ocasiones se suele aplicar un doble procedimiento de cálculo de similitud. En estos casos primero se aplica una función de similitud (como el producto escalar) sobre la matriz original $N \times M$, obteniendo así una segunda matriz simétrica $N \times N$ que nos indica cuánto se parece cada elemento del conjunto N al resto de elementos de N , en función de cuanto tienden a co-ocurrir en M . Sobre esta segunda matriz $N \times N$, se aplica otra función de similitud, con la que obtendríamos como resultado una tercera matriz $N \times N$, que esta vez nos indicaría cómo de similar es cada elemento de N con el resto de elementos de N , en función de cuanto tienden a parecerse a los mismos elementos de N .

3.6. Reducción de información

Aunque podemos afirmar que el canal visual del ser humano posee un gran “ancho de banda”, no toda la información que adquirimos sensorialmente supera el filtro de nuestra atención, ya que si fuera así sufriríamos un colapso cognitivo. Es decir, somos capaces de percibir más de lo que podemos procesar en cada momento, y por tanto estamos condenados a filtrar, voluntaria e involuntariamente, lo que vemos.

Puesto que el objetivo del proceso de desarrollo de interfaces de visualización es que la información que finalmente quede representada gráficamente sea asequible por seres humanos, una etapa fundamental en este proceso es la de su reducción. Lo que se intenta reducir en esta etapa no es el volumen de información inicial, sino el volumen de su representación numérica (vectorial) resultado de las etapas anteriores. Por tanto, en esta etapa, entran en juego procesos matemáticos y algoritmos destinados a transformar grandes espacios multidimensionales en espacios reducidos representables gráficamente.

Estas técnicas podemos agruparlas en cuatro categorías principales: Técnicas de reducción dimensional, de poda, de agrupación (o *clustering*) y de redes neuronales. Queda fuera del ámbito de la presente revisión el Análisis de Componentes Principales o PCA (Principal Component Analysis) (Pearson; 1901), que si bien tiene aplicabilidad como técnica de reducción de información, sus fundamentos se encuentran íntimamente relacionados a la Descomposición de Valores Singulares (SVD), técnica ya descrita en el apartado 3.4.2, así como a la técnica de *clustering* divisorio *k-means*, que se detallará en el apartado 3.6.3 (Ding, He; 2004).

3.6.1. Reducción dimensional

Consideremos una matriz cuadrada $N \times N$ como un hiperespacio de N dimensiones, en el que cada vector del conjunto está identificado por N coordenadas. Si pretendemos que este espacio sea accesible al ojo humano, deberíamos reducir el número de coordenadas a aquellas representables en un espacio geométrico euclidiano, es decir, a un espacio bidimensional o tridimensional.

Esta reducción dimensional es precisamente el objetivo de la técnica de estadística multivariante denominada Escalamiento Multidimensional o MDS (Multi-Dimensional Scaling). Esta técnica consiste en posicionar las diferentes unidades en un espacio 2D o 3D, e ir recolocando o reposicionándolas iterativamente hasta conseguir que disten entre sí lo

más acercadamente a como lo hacen en el espacio multidimensional original. En esta reducción dimensional, inevitablemente, se produce una pérdida de información, mayor cuanto más diferencia exista entre el número de dimensiones del espacio multidimensional original y el número de dimensiones al que pretende ser reducido. Esta pérdida de información o distorsión de las distancias originales entre elementos suele ser medida a través de la métrica de *stress* propuesta por Kruskal (1964) (originalmente el autor la denominó STRESS, acrónimo de STandardized Residual Error Sum of Squares). En la aplicación de los algoritmos de MDS, como paso previo, se suele establecer un umbral de *stress* aceptable, con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento.

La gran ventaja del MDS es que los datos que obtenemos tras su aplicación, al tratarse de coordenadas, son directamente representables en una interfaz gráfica (2D o 3D), como podemos observar en el ejemplo de la figura 21. Por tanto, esta es una técnica que podemos considerar al mismo tiempo de reducción de información y de ordenación espacial (grupo de técnicas que analizaremos en el apartado 3.7.2).

Una de sus desventajas visuales es que las unidades que se encuentren próximas en el espacio dimensional original, tienden a aparecer muy próximas en el espacio dimensional reducido, produciendo en muchos casos aglomeraciones.

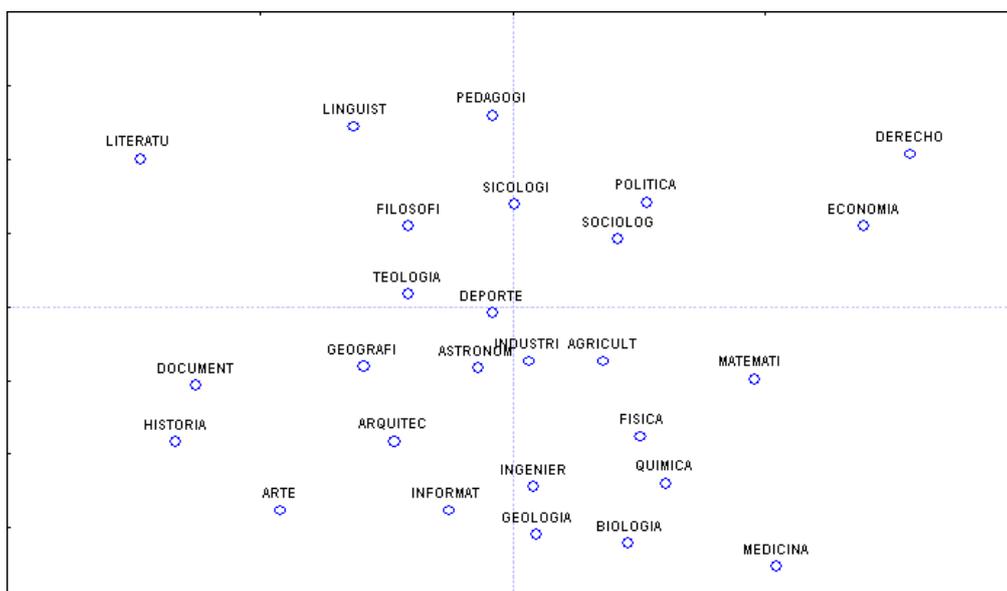


Fig.21 Representación, obtenida mediante MDS, de los grandes grupos temáticos de la CDU. Fuente: Moya-Anegón y Herrero-Solana (1999).

3.6.2. Técnicas de poda

Las técnicas de poda toman como entrada una matriz $N \times N$ pero, al contrario que en el escalamiento multidimensional, los valores de los vectores no son considerados coordenadas, sino enlaces entre elementos. La matriz, de este modo, sería la representación numérica de un grafo, pero el problema de intentar representar visualmente esta matriz como un grafo es que el número de enlaces entre nodos en la mayoría de casos lo haría confuso e incomprensible, ya que en una matriz $N \times N$ el número de enlaces puede llegar a $N^2 - N$ (en redes dirigidas donde los enlaces de la diagonal de la matriz son ignorados al representar enlaces de un nodo con sí mismo). El objetivo perseguido por las técnicas de poda es precisamente eliminar aquellos enlaces menos significativos, para así obtener una versión reducida que mantenga únicamente los enlaces más representativos de la red, su estructura vertebral, una matriz cuya representación en forma de grafo sea abarcable perceptualmente.

De entre todas las técnicas de poda, el método más popular en visualización de información es el llamado de *Pathfinder* (Dearholt, Schvaneveldt; 1990). Esta técnica se basa en la eliminación de todos aquellos enlaces de la red que no cumplan el criterio conocido como la 'condición de la desigualdad del triángulo', es decir, que no formen parte del camino más corto entre cada par de nodos.

Las redes resultantes de la aplicación de esta técnica se suelen denominar PFNETs, y su topología estará condicionada por dos parámetros. Por un lado la métrica r de Minkowski, que determina cómo calcular la distancia entre dos nodos, parámetro que puede tomar tres valores: cuando $r=1$ la distancia es igual a la suma de los pesos de los enlaces que conectan los dos nodos; cuando $r=2$ la distancia es igual a la

distancia euclídea entre los dos nodos; y cuando $r=\infty$ la distancia es igual al mayor de los pesos de aquellos enlaces que conectan los dos nodos. Por otro lado el parámetro q - cuyo rango es $0 < q < N$ - indica la longitud máxima - contabilizada en número de enlaces - del camino entre dos nodos en el que no podrá violarse la 'condición de la desigualdad del triángulo'.

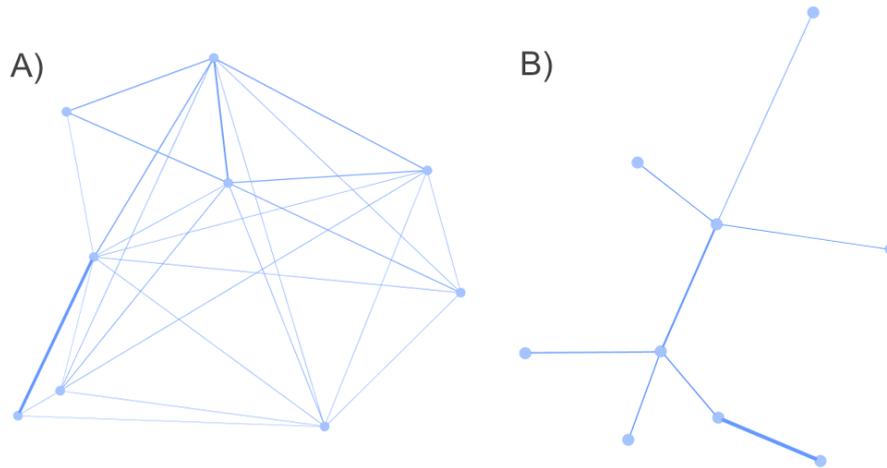


Fig.22 Ejemplo de red original sin podar (a) y PFNet ($r=\infty$, $q=N-1$) (b).

Para calcular una red PFNET (r, q), Dearholt y Schvaneveldt (1990) proponen dos procedimientos algorítmicos diferentes. El primero, útil para matrices tanto simétricas como asimétricas es el siguiente:

1. Calcular las matrices $W^2, D^2, W^3, D^3 \dots W^q, D^q$
2. Comparar los elementos de D^q y W^1 (la matriz original), si $d_{ij} = w_{ij}$ entonces e_{ij} será uno de los enlaces que no se eliminen.

W^q representa el camino más corto entre dos nodos compuesto por q enlaces, mientras que D^q el camino más corto entre dos nodos compuesto por cualquier número de enlaces inferior o igual a q .

Este es un procedimiento computacionalmente muy costoso, con un orden de complejidad igual a $O(q \cdot n^3)$. Por ello, y precisamente motivados por la aplicación de este algoritmo en interfaces de

visualización generadas dinámicamente, en la literatura científica podemos encontrar propuestas diferentes mejoras. Guerrero-Bote et al. (2006) proponen una modificación denominada *Pathfinder* Binario, que logra reducir el orden de complejidad a $O(\log(q) \cdot n^3)$, mientras que la posterior propuesta de Quirin et al. (2008a) ha llegado a reducir el orden de complejidad a $O(n^3)$. Sin embargo esta última propuesta, a diferencia de la de Guerrero-Bote et al. (2006), sólo es aplicable a redes PFNET no dirigidas, cuyo valor q sea igual a $n-1$ (indistintamente del valor de r).

Recientemente Quirin et al. (2008b) han publicado una nueva propuesta, que logra reducir la complejidad de la poda a $O(n^2 \cdot \log(n))$, aunque ésta sólo es aplicable a redes PFNET($r=\infty, q=n-1$). Inspirada en el algoritmo de Kruskal, es una propuesta conceptualmente similar al segundo procedimiento que describen Dearholt y Schvaneveldt (1990) aplicable sólo a matrices simétricas (grafos no dirigidos). Se trata de usar un procedimiento ‘aglomerativo’, en el que inicialmente cada nodo pertenece a su propio *cluster*, y en el que se recorre la lista de enlaces, ordenados de menor a mayor distancia (peso), preservando únicamente aquellos enlaces que conecten dos nodos pertenecientes a diferentes clusters - que a partir de ese momento pasarán a formar parte del mismo cluster-, y descartando o podando aquellos que vinculen nodos ya pertenecientes a un mismo *cluster*.

Existen otras posibles técnicas de poda. La más simple es establecer un umbral y eliminar todos aquellos enlaces cuyo peso sea, aunque esta es una técnica que inevitablemente tiende a fragmentar la red en numerosos componentes. Otra técnica posible es la denominada MST (Minimum Spanning Trees), aunque una red MST puede ser simplemente considerada un caso especial de red PFNet, ya que una red PFNet es un conjunto unido de todos los posibles MSTs de una red original (Chen; 2004) (Dearholt y Schvaneveldt; 1990).

3.6.3. Técnicas de clustering

El objetivo de las técnicas de *clustering* es reducir el número inicial de relaciones presentes en una matriz de similitud $N \times N$, a un número inferior de relaciones de agrupación. Es decir, son procedimientos para clasificar o dividir un conjunto de N elementos en un número K de *clusters* o grupos, donde los elementos que formen parte de un *cluster* deberán parecerse a los elementos del mismo *cluster*, y al mismo tiempo mostrar poca similitud con los elementos del resto de *clusters*.

Las técnicas de *clustering* se suelen clasificar en función del procedimiento general usado, conformando dos categorías: técnicas aglomerativas (*agglomerative clustering*) y divisorias (*partitional clustering*).

Las técnicas aglomerativas consideran cada elemento inicial n_i perteneciente a su propio cluster k_j , por lo que parten de una matriz de similitud entre clusters $K \times K$, donde $K=N$. A partir de esta matriz, se inicia un proceso secuencial:

1. Se fusionan aquellos dos clusters que presentan mayor similitud entre sí.
2. Se actualiza la matriz de similitud entre clusters para reflejar las relaciones de similitud entre los clusters no fusionados y el nuevo cluster resultante de la unión.
3. Se repiten los pasos 1 y 2 hasta que quede un único cluster.

Dentro de las técnicas aglomerativas podemos diferenciar alrededor de 150 tipos diferentes en base a las reglas de aglomeración utilizadas, es decir, en función de cómo se calcula - en el paso 2- la similitud entre el *cluster* resultado de la unión y el resto de *clusters* de la matriz. Entre las reglas de aglomeración más comunes encontramos: encadenamiento simple (single link), también denominado método del vecino más cercano; encadenamiento completo (complete link), o método del vecino más lejano; encadenamiento promedio; y el método de Ward o método de la suma de cuadrados (Herrero-Solana; 2000).

Las técnicas aglomerativas no sólo agrupan los elementos iniciales en un conjunto de *clusters*, sino que además establecen una jerarquía entre *clusters*. Podemos observar este hecho en la representación (denominada dendrograma) de la figura 23.

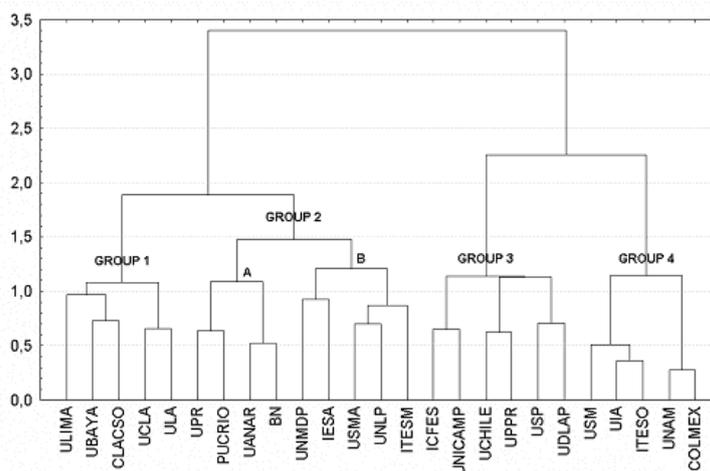


Fig.23 Dendrograma basado en el método de Ward. Fuente: Herrero-Solana y Moya-Anegón (1999).

Las técnicas de *clustering* divisorias afrontan el problema desde la perspectiva opuesta a las aglomerativas. La más popular de las técnicas divisorias, denominada *k-means*, considera la matriz inicial $N \times N$ como un hiperespacio de N puntos, y aplica el procedimiento siguiente:

1. Se decide cuál será el número de *clusters*, k .
2. Se crea un número k de elementos (o puntos), llamados centros de *cluster* o centroides, cuya posición es aleatoria y normalmente no debe coincidir con la de ningún elemento n .
3. Cada elemento o punto n es asignado al *cluster* k cuyo centroide se encuentre más próximo.
4. Se recalcula la posición de cada centroide. La nueva posición debe ser el centro geométrico del *cluster* (determinada por las posiciones de los elementos n que en el paso anterior habían sido asignados al *cluster*)
5. Se repiten los pasos 3 y 4 hasta que la posición de los centroides deje de variar.

La técnica *k-means* resulta mucho más eficiente computacionalmente que las técnicas aglomerativas, pero sin embargo presenta desventajas como la menor calidad del resultado final, y el hecho de que, debido a que las posiciones de los centroides son inicialmente aleatorias, cada aplicación del procedimiento sobre un mismo conjunto de datos ocasionaría resultados diferentes.

Steinbach, Karypis y Kumar (2000) proponen un procedimiento, en cierto modo híbrido, que ofrece unos resultados claramente superiores a la técnica *k-means*, y tan buena o mejor que el de las técnicas aglomerativas evaluadas. Su propuesta, denominada *bisecting k-means*, parte de un único *cluster* inicial, en el que están englobados todos los elementos n .

1. Se decide qué *cluster* partir (o dividir)
2. Determina dos sub-*clusters* usando la técnica *k-means*.
3. Repite el paso 2 un número i de veces, y acepta como buena la mejor de las divisiones realizadas (en términos de similitud global)
4. Repite el paso 1,2 y 3 hasta que se alcance el número de *clusters* deseados.

Menos en el primer paso del proceso iterativo, en el que se parte de un único *cluster*, en el resto hay que decidir cuál de los *clusters* vamos a dividir o partir. Aunque se pueden aplicar muchas reglas diferentes para esta decisión, los autores afirman que las diferencias entre unas y otras son muy pequeñas, y como regla general aplican la regla “dividir el *cluster* más grande”.

Estrictamente hablando, este método es de tipo divisivo, pero a diferencia de técnicas divisivas como *k-means*, y al igual que los métodos aglomerativos, ofrece como resultado una jerarquía de *clusters*.

Los métodos descritos pueden ser calificados de deterministas, en el sentido de que tras el proceso cada elemento termina perteneciendo a un único *cluster*. Existen métodos menos reduccionistas, donde los elementos terminan perteneciendo con diferente grado a diferentes

clusters al mismo tiempo, como es el método Fuzzy C-Means (Bezdek; 1981). Si bien la clasificación resultante de este método puede resultar más expresiva, las múltiples relaciones entre cada elemento y los *clusters* a los que pertenece son de más difícil representación visual, y es por ello por lo que en visualización de información suele ser más común aplicar métodos deterministas, con menor número de relaciones entre elementos y *clusters*.

3.6.4. Redes neuronales

Algunos problemas computacionales resultan de difícil solución mediante enfoques algorítmicos secuenciales. Entre las alternativas surgidas cabe destacar la rama de la inteligencia artificial basada en redes neuronales (ANN: Artificial Neural Networks). Estas redes hacen referencia proceso paralelo inspirado en la biología cerebral humana, que es capaz de asignar una salida multidimensional a una entrada de datos también multidimensional, sobre la base de un aprendizaje previo (Guerrero-Bote et al.; 2003).

Las redes neuronales se han demostrado como una aproximación útil para una gran variedad de problemas computacionales, entre ellos la reducción dimensional de información orientada a su visualización, como es el caso del modelo de mapas auto-organizativos o SOM (Self-Organizing Map) propuesto por Kohonen (1989). El funcionamiento de este modelo se basa en establecer una correspondencia entre la información de entrada y un espacio de salida de dos dimensiones, y por tanto representable gráficamente. De este modo, cada vez que se ingresa un vector en la red, sólo una neurona de la capa de salida resultará activa. Esta neurona vencedora (*winner-take-all unit*) es la que determina qué punto del mapa bidimensional representará al vector.

Lo que realmente está haciendo la red es clasificar la información de entrada, ya que la neurona ganadora representa la clase a la que pertenece la entrada, además de que ante entradas similares se activará siempre la misma neurona. Se trata de un proceso auto-organizativo,

donde la clasificación u organización resultante se encuentra condicionada por la propia naturaleza de los datos introducidos.

De forma similar a los algoritmos de *clustering*, lo que hace la red neuronal es agrupar o clasificar los elementos de entrada. Entre las principales ventajas de las redes neuronales - frente a los algoritmos de *clustering* o MDS - se encuentran su escalabilidad, y que además ofrecen una topología de los elementos en forma de relaciones de vecindad. Es decir, los elementos similares entre sí ocuparán espacios contiguos en el mapa bidimensional resultante. Por su naturaleza bidimensional, esta información es directamente representable gráficamente, como se puede ver en el ejemplo de mapa SOM de la figura 24. Esto significa que esta técnica, al igual que sucedía en el caso de MDS, puede considerarse al mismo tiempo una técnica de reducción de información y de ordenación espacial (apartado 3.7.2).

En el ejemplo de la figura 24 se han tomado como entrada documentos vectorizados, y en la salida la intensidad del color representa la densidad de documentos en cada zona del mapa, y los rótulos o etiquetas describen la temática principal de los documentos próximos.

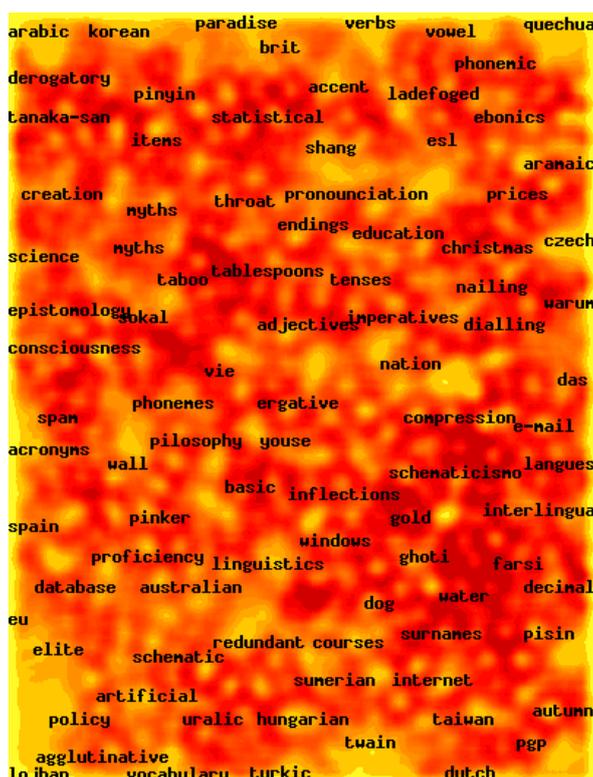


Fig.24 WebSOM, análisis de co-ocurrencia de términos sobre grupos de discusión Usenet. Fuente: <http://websom.hut.fi/websom/>

3.6.5. Comparación

Los diferentes métodos descritos de reducción de información pueden ser considerados complementarios, ya que ofrecen diferentes soluciones para un mismo problema (Herrero-Solana 2000). Aunque con funcionamiento y procedimientos diferentes, todos comparten el objetivo de la reducción de grandes estructuras de datos multidimensionales a estructuras representables gráficamente.

En cualquier reducción, simplificación o resumen de conjuntos complejos de datos, se produce una pérdida de información respecto a la realidad estructural de los datos originales. Es precisamente en función de aquella información estructural más fielmente preservada, que se fundamenta uno de los criterios a través del cual pueden ser caracterizados y comparados los métodos descritos.

Como afirma Kaski (1997), tras una exhaustiva comparación entre los métodos de MDS y SOM, mientras que el primero se orienta a la preservación de su estructura a través de las distancias entre elementos, los mapas auto-organizativos intentan preservar su topología o relaciones de vecindad.

Por otro lado, las técnicas de poda como *Pathfinder*, están orientadas a la representación en forma de grafos, donde lo que se preserva y enfatiza son las relaciones locales entre elementos, representadas mediante arcos o enlaces entre nodos (Chen; 1998). Por último, la información preservada mediante las técnicas de *clustering* es aquella representada por las relaciones de grupo entre elementos.

La preservación de un determinado elemento estructural (y por tanto la pérdida de otra información), condicionará la expresividad de la interfaz

resultante, es decir, el grado de fidelidad con el que los datos originales se ven representados por la estructura visual de la interfaz. Al mismo tiempo, la elección de una u otra técnica condicionará la efectividad de la interfaz, la facilidad de interpretación y comprensión por el usuario.

Existen trabajos que ponderan estas técnicas, como es el caso de la tesis doctoral de Buzydlowski (2003) donde el autor compara SOM y *Pathfinder*, pero el grado de expresividad de cada técnica está fuertemente influenciado por la naturaleza de los datos, por lo que no es posible afirmar que ninguna de ellas sea superior en todos los contextos.

Otra diferencia destacable entre las técnicas de reducción de información es si ofrecen como resultado una estructura directamente representable de forma gráfica, y por tanto pueden ser consideradas también técnicas de ordenación espacial. Mientras que tras la aplicación de MDS o el modelo SOM obtenemos la posición geométrica de cada elemento, y por tanto podemos representarlos gráficamente en un espacio 2D o 3D, en el caso de las técnicas de poda o de *clustering*, la estructura resultante sigue siendo multidimensional, por lo que requieren de la aplicación de procedimientos algorítmicos de ordenación espacial, que describiremos en el siguiente apartado.

La comparación entre técnicas de reducción de información se puede realizar en base a otras variables igualmente importantes, como: escalabilidad, carga computacional, posibilidad de interpretación de dimensiones, distribución visual (estática o dinámica), y escala (global o local) en la que pueden ser aplicados de forma óptima (Börner, Chen, Boyak; 2003). Algunas de estas variables son de gran importancia, como es el caso de la carga computacional del algoritmo, lo que suele conllevar en muchas ocasiones a descartar algoritmos pesados como MDS cuando la generación de la interfaz se deba producir en tiempo real (Buzydlowski, White, Lin; 2001).

3.7. Representación gráfica de información

Tras adquirir los datos originales, transformarlos para posibilitar su procesamiento, extraer relaciones estructurales implícitas, y reducir la dimensionalidad de dichas estructuras, en la presente etapa nos enfrentemos a uno de los problemas más complejos en visualización de información: codificar visualmente los datos con el fin de que el usuario final pueda percibir e interiorizar la mayor cantidad de información posible con el menor esfuerzo posible.

La representación gráfica en visualización de información es entendida como un proceso de traducción, en el que a partir de datos de naturaleza numérica producimos una imagen de equivalente significado mediante lenguaje visual. Esta representación es siempre plana, aunque puede emular tridimensionalidad en mayor o menor grado.

Como proceso de traducción, el eje central de la presente etapa es el lenguaje o lenguajes visuales. Sólo analizando y comprendiendo en profundidad las propiedades del lenguaje visual podemos asegurar la expresividad y usabilidad de la representación generada.

3.7.1. Lenguajes visuales

La manera de representar gráficamente la información es una cuestión que engloba numerosos interrogantes: ¿Qué metáfora emplear? ¿Qué atributos visuales utilizar para codificar cada tipo de variable? ¿Cómo ordenar espacialmente los elementos? ¿Cómo interpretarán los usuarios la representación?, etc.

Esta toma de decisiones se puede ver facilitada por aquellos trabajos que intentan organizar o clasificar las diferentes opciones, proponiendo taxonomías de visualización de información. Estas taxonomías categorizan los diferentes modelos de representaciones gráficas en base a propiedades o características comunes.

Lin (1997) categoriza las representaciones gráficas (de interfaces visuales de recuperación de información) en cuatro grupos principales:

representaciones jerárquicas, de redes (Fig.25), de dispersión y mapas (Fig.26). Sin embargo resulta una taxonomía ambigua, ya que el criterio de agrupación en ocasiones se refiere a la naturaleza de la estructura de datos a representar (jerárquicas), y en otras a la metáfora gráfica a utilizar (mapas).

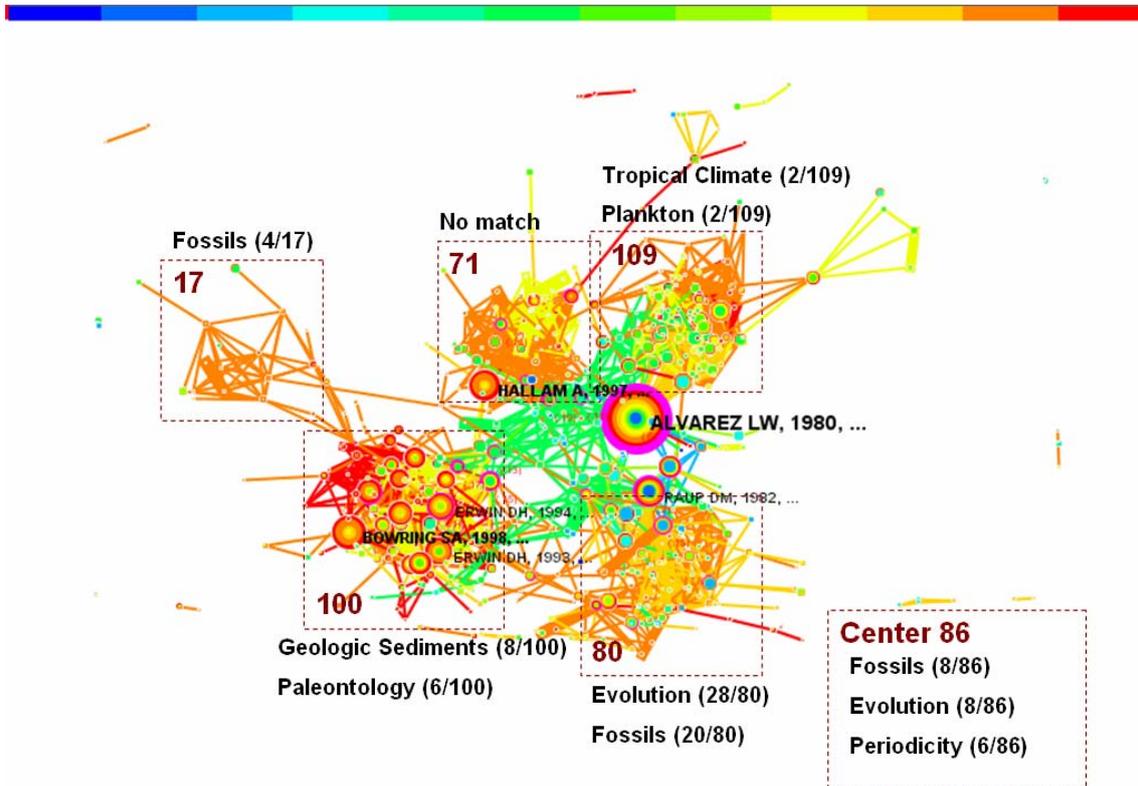


Fig.25 Ejemplo de representación gráfica de tipo red o grafo.

Fuente: Chen (2006)

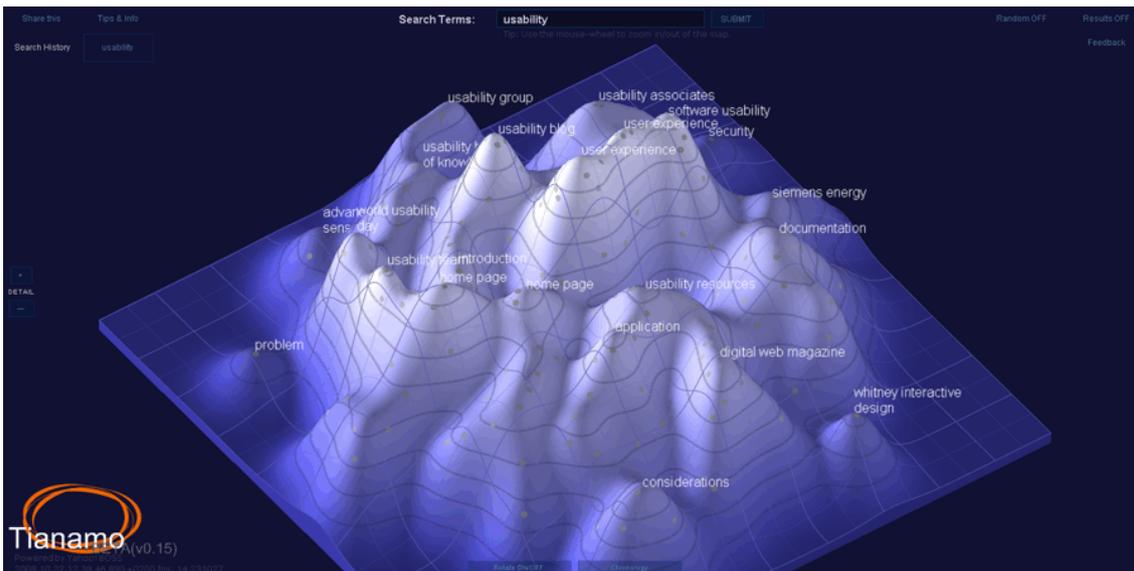


Fig.26 Ejemplo de representación gráfica de tipo Mapa.

Fuente: tianamo.com

Shneiderman (1996) ofrece una taxonomía más precisa, ya que todas las categorías se basan en el mismo criterio: la tipología de los datos a visualizar, que además el autor vincula con las tareas que realizará el usuario sobre estos tipos de datos. Las categorías que componen la taxonomía son: datos unidimensionales, bidimensionales, tridimensionales, temporales, multidimensionales, jerárquicos (árbol) y de red. Sin embargo, aunque el tipo de datos a representar y las tareas asociadas del usuario condicionarán la forma de representar gráficamente dichos datos, un mismo tipo de datos puede ser representado de muy diversas formas, por lo que tampoco resulta una taxonomía que oriente o facilite el cómo representar gráficamente una estructura de datos.

Card y Mackinlay (1997) proponen un complejo sistema de clasificación de visualizaciones de información, en el que se caracteriza cada modelo en función del tipo de datos originales, el tipo de filtro aplicado a dichos datos, el tipo de datos resultantes, las dimensiones utilizadas en la representación, las propiedades gráficas presentes y los procesos de control.

Posteriormente han sido propuestas taxonomías alternativas, como la de Grinstein, Trutschl y Cvek (2001) que recoge 19 categorías diferentes, o la de Keim (2002), que relaciona las categorías de representaciones gráficas con los tipos de datos a visualizar y las posibles técnicas interactivas a aplicar.

Aunque las taxonomías de visualización resultan de gran utilidad como punto de partida para el diseño de este tipo de interfaces, el presente trabajo defiende que es necesario profundizar más en la comprensión de la representación gráfica, aproximándonos a los principios generales - posiblemente universales - que rigen el lenguaje visual.

Para afrontar esta tarea partimos del exhaustivo marco teórico que Engelhardt (2002) desarrolla en su tesis doctoral, y que extendemos vinculándolo con los factores perceptuales que fueron descritos en el capítulo anterior.

Engelhardt (2002) se propone como objetivo analizar la gramática de los lenguajes visuales de las representaciones gráficas, objetivo que materializa en forma de marco teórico unificado. El autor habla de lenguajes visuales (o esquemas visuales) en plural, y considera que la representación gráfica no es sólo un proceso de traducción, sino en ocasiones también de creación de un lenguaje visual específico. Bajo este enfoque, las taxonomías de representaciones gráficas descritas anteriormente pueden ser consideradas taxonomías de lenguajes visuales. De este modo podríamos hablar de diferentes lenguajes visuales como el lenguaje de ‘redes-grafos’ o el de ‘mapas-SOM’.

A pesar de que existen numerosos lenguajes visuales, o incluso de que podemos crear nuevos lenguajes, todos comparten una serie de principios sistemáticos generales que los rigen. Es decir, podemos hablar de una sintaxis gráfica y una semántica gráfica.

3.7.1.1. Sintaxis gráfica

Para comprender la gramática de las representaciones gráficas, el primer paso es analizar su sintaxis. Esta sintaxis se refiere a cómo los elementos de la representación son ordenados, coordinados y vinculados para formar expresiones gráficas.

Engelhardt (2002) resume los principios generales de la sintaxis gráfica del siguiente modo:

- Una representación gráfica es un objeto gráfico
- Un objeto gráfico puede ser:
 - Un objeto gráfico elemental, o
 - Un objeto gráfico compuesto por:
 - El espacio gráfico que ocupa, y
 - Un conjunto de objetos gráficos, contenidos en dicho espacio gráfico, y
 - Un conjunto de relaciones gráficas entre estos objetos gráficos.

Como se expone, el análisis sintáctico propuesto es recursivo, ya que un objeto gráfico compuesto puede contener a su vez objetos gráficos compuestos o elementales, siendo los objetos gráficos elementales aquellos objetos con significación que no contienen objeto alguno.

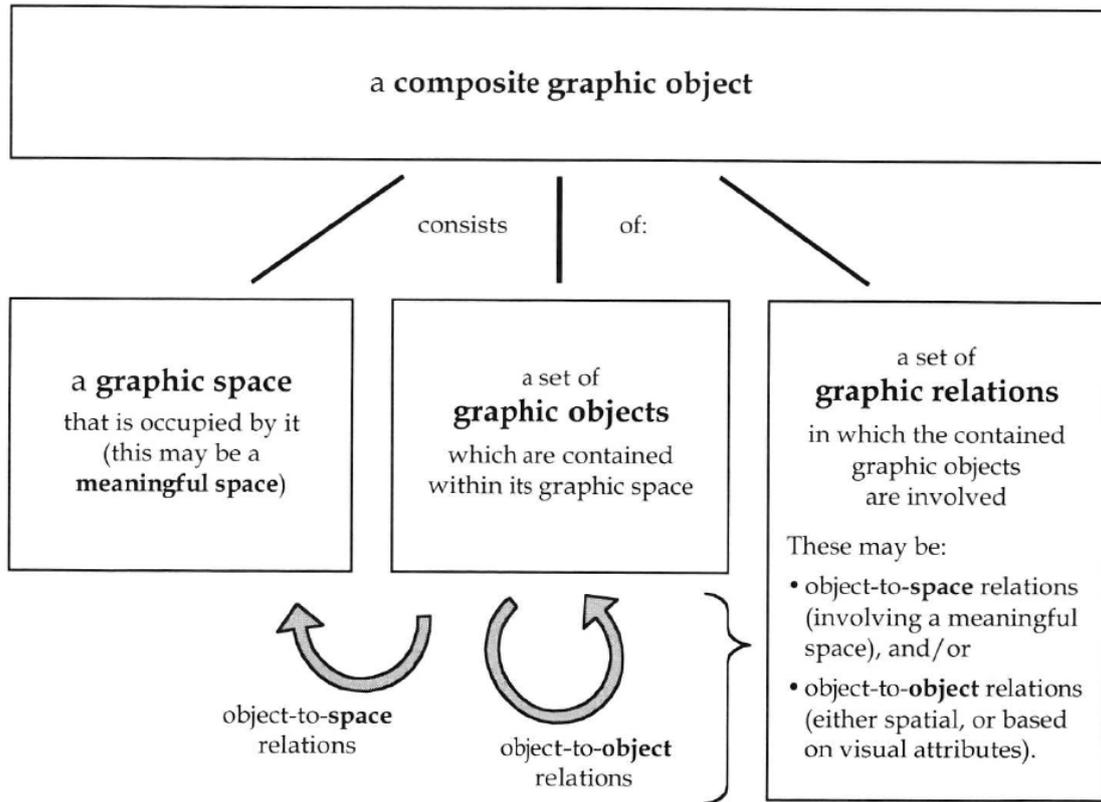


Fig.27 Esquema sobre la descomposición sintáctica de representaciones gráficas. Fuente: Engelhardt (2002).

La estructura sintáctica de cualquier representación gráfica viene definida por las relaciones objeto-espacio y objeto-objeto (Fig.27). Mientras que las relaciones objeto-espacio son siempre relaciones espaciales, las relaciones objeto-objeto pueden ser relaciones espaciales o basadas en atributos visuales.

Al describir las relaciones objeto-objeto, Engelhardt (2002) se centra en las de tipo espacial, ya que considera que han recibido mucha menos atención en la literatura científica que las relaciones basadas en atributos. El autor clasifica las relaciones espaciales objeto-objeto de la siguiente forma:

- Proximidad espacial: Definida por la cercanía espacial entre objetos, y su distancia frente al resto.

- Separación mediante separadores: Un objeto cumple el rol de separador entre otros objetos
- Alineación: Definida por la ordenación lineal de los objetos
- Conexión: Un objeto cumple el rol de conector entre otros objetos.
- Contención: Relación entre un objeto contenedor y los objetos contenidos.
- Superposición: Un objeto es percibido visualmente como superpuesto a otro objeto.

Aunque Engelhardt (2002) afirma, en su revisión de los trabajos publicados sobre las relaciones espaciales objeto-objeto, que puede considerarse que estas relaciones tienen su propia existencia en los principios de percepción de la Gestalt (apartado 2.3.1.1.4), curiosamente considera que su discusión queda fuera del alcance de su trabajo. En nuestra opinión esta relación - el hecho de que prácticamente exista una ley de la Gestalt para describir cada una de estas relaciones- no puede ser obviado, ya que es lo que le confiere universalidad a esta sintaxis gráfica. Una sintaxis que las personas resolveríamos a nivel perceptual, de forma automática, sin necesidad de interpretación consciente, y por tanto sin influencia socio-cultural.

Además, las relaciones objeto-objeto basadas en atributos, que Engelhardt (2002) solo menciona, estarían igualmente descritas por las leyes de la Gestalt, en concreto por la ley de Similitud: objetos que compartieran atributos visuales (forma, color, tamaño, orientación, textura) se verían relacionados sintácticamente.

También creemos necesario el análisis de la secuencialidad o linealidad de estas estructuras sintácticas. Si bien el orden que siguen estas estructuras no es tan rígido como el de las estructuras sintácticas textuales, basándonos en las teorías de percepción pre-atentiva y atenta podríamos hablar de zonas gráficas de inicio, condicionadas por

los atributos visuales básicos y su capacidad para guiar nuestra atención (apartado 2.3.1.1.3), así como de flujos estructurales condicionados por las leyes de la Gestalt (apartado 2.3.1.1.4).

En la estructura sintáctica visual que propone Engelhardt (2002), además de objetos y relaciones entre objetos, los objetos compuestos contienen espacios y relaciones espaciales objeto-espacio, siempre y cuando el espacio sea significativo (“meaningful spaces”), es decir, cuando la posición del objeto en el espacio tenga algún significado. Para comprender estas relaciones, un ejemplo sencillo sería el de un mapa geográfico, en el que las ciudades serían objetos con relaciones objeto-espacio (su posición en el mapa es significativa), mientras que las etiquetas con el nombre de las ciudades sólo presentarían relaciones objeto-objeto, es decir, estarían vinculadas a la ciudad, pero su posición respecto al espacio sería irrelevante.

La sintaxis gráfica de Engelhardt (2002) también contempla la posibilidad de estructuras sintácticas compuestas, es decir, aquellas construidas a partir de dos o más estructuras básicas, mediante la combinación simultánea y/o el anidamiento. En la combinación simultánea, los objetos gráficos formarían parte al mismo tiempo de dos o más estructuras sintácticas básicas. En las estructuras anidadas, un objeto gráfico hace de contenedor general de dos o más estructuras sintácticas básicas.

Para comprender de forma práctica el análisis de la sintaxis gráfica descrito, tomemos como ejemplo la representación de la figura 28. Esta figura ha sido extraída del trabajo de Kerr (2003), que describe una nueva técnica de visualización de estructuras jerárquicas aplicada a los hilos de mensajes de correo electrónico. Cada una de las partes de la representación describe un momento diferente de interacción.

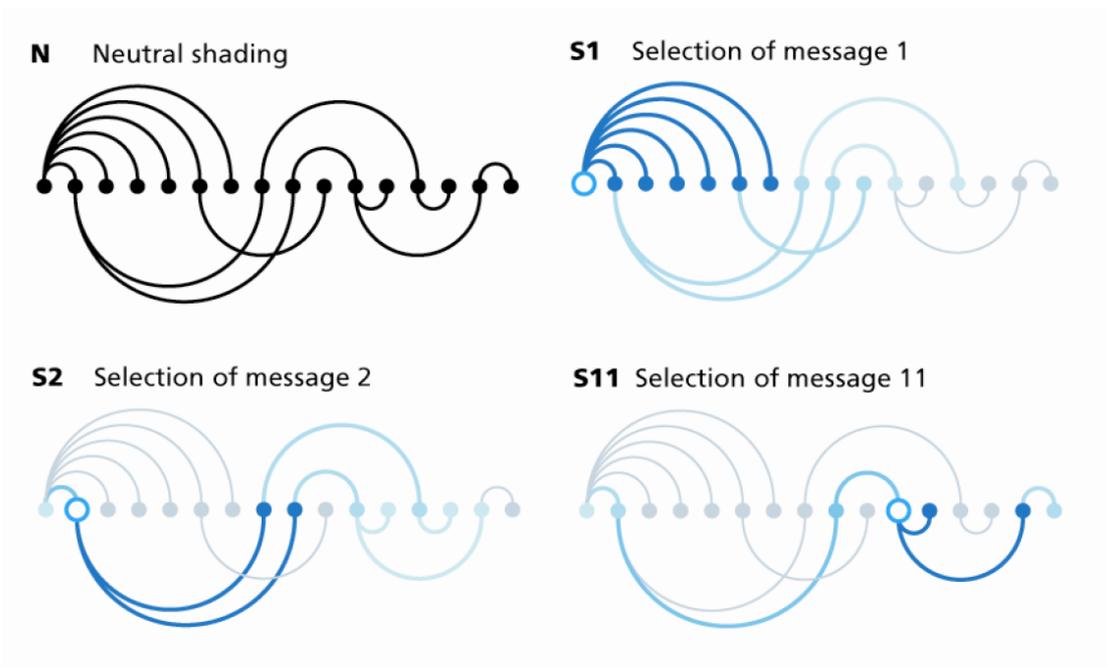


Fig.28 Representación gráfica 'Thread Arcs'. Fuente: Kerr (2003).

La representación presenta una estructura sintáctica compuesta - mediante anidación- de cuatro estructuras sintácticas básicas. Cada uno de estos cuatro objetos o estructuras sintácticas está compuesto por un espacio no significativo - ya que la posición de los objetos contenidos respecto al espacio no implica información alguna-; un objeto básico que cumple el rol sintáctico de leyenda; y un objeto compuesto vinculado a la leyenda. Este objeto compuesto lo forman un espacio no significativo, un conjunto de objetos en forma de arcos - que cumplen el rol sintáctico de conectores-, y un conjunto de objetos en forma de nodos elípticos. Puesto que el espacio no es significativo, no existen relaciones objeto-espacio, pero sí relaciones espaciales objeto-objeto, ya que los nodos se encuentran vinculados sintácticamente tanto por conectores (arcos) como por alineación. Además, en tres de las estructuras, los objetos presentan relaciones objeto-objeto basadas en atributos (color).

A este análisis podemos añadir el de la secuencialidad de cada una de las estructuras básicas, ya que si bien la alineación de los nodos es una propiedad común en las cuatro estructuras, en tres de ellas hay elementos enfatizados gráficamente: nodos de mayor tamaño y arcos

cuyo color presenta mayor contraste respecto al fondo. Estos elementos serán los que guiarán y atraerán la atención visual de forma más enfática, marcando el “punto de inicio” de la estructura sintáctica.

Interpretar el significado que el uso de los atributos visuales (como el color) o de los diferentes objetos (arcos y nodos) tienen en la representación, ya no formaría parte del análisis sintáctico, sino de su análisis semántico.

3.7.1.2. Semántica gráfica

Si la representación gráfica de información es un proceso de traducción de datos a un lenguaje visual, su visualización por parte del usuario es un proceso inverso, de decodificación e interpretación. Este proceso de interpretación está directamente vinculado a su análisis sintáctico: asignamos significado a aquello que previamente hemos organizado perceptual o sintácticamente.

Engelhardt (2002) propone una clasificación de los objetos gráficos de la representación en función de su rol informativo: objetos de información, de referencia, y decorativos. Los objetos decorativos son aquellos que no sirven para expresar información alguna, y por tanto son prescindibles. Los objetos de información son aquellos que representan valores de los datos representados (como las barras en una gráfica de barras), mientras que los objetos de referencia son los que permiten interpretar el significado de los objetos de información a los que se encuentran sintácticamente vinculados (como por ejemplo las leyendas). De este modo, sólo dos de las tres categorías son objeto de interpretación, y una de ellas (objetos de referencia) facilitadora de la interpretación de la otra (objetos de información).

Interpretar es establecer una relación o correspondencia entre representación y representado, o entre lo que ‘se muestra’ y lo que significa. Engelhardt (2002) indica que el estudio de estas correspondencias es ámbito de la semiótica, y clasifica las posibles

correspondencias en cinco categorías, de las que cuatro son aplicables a representaciones de visualización:

- Literal: La representación, de tipo pictórico, presenta similitud con lo representado. Esta representación puede ser realista o esquemática. Ejemplo: el uso de figuras humanas para representar personas.
- Metafórica: Analogía entre representación y representado. Ejemplo: La representación en forma de ‘mapas geográficos’ de información abstracta (Fig.26).
- Arbitraria-convencional: La relación se basa en una convención social. Ejemplo: Uso de leyendas textuales. La asociación entre la palabra “ordenador” y el objeto físico representado es resultado de una convención social, el lenguaje.
- Metonímica: Basada en la asociación mental que se produce entre la representación y lo representado debido a que la primera presenta una relación literal con algo que es parte, causa o consecuencia de lo representado. Ejemplo: El uso de iconos en forma de ‘explosión’ para representar conflictos armados.

Como ejemplo en la figura 29 podemos observar correspondencias literales (iconos que representan personas); correspondencias metonímicas (edificios que representan instituciones); y correspondencias de tipo arbitraria-convencional (texto vinculado a los nodos del grafo). En el caso de los enlaces entre nodos (personas e instituciones), ya que representan información abstracta (relaciones contractuales o comerciales) mediante formas geométricas o no pictóricas, la única forma de asignarle significado es a través de objetos gráficos de referencia que faciliten su interpretación (como leyendas).

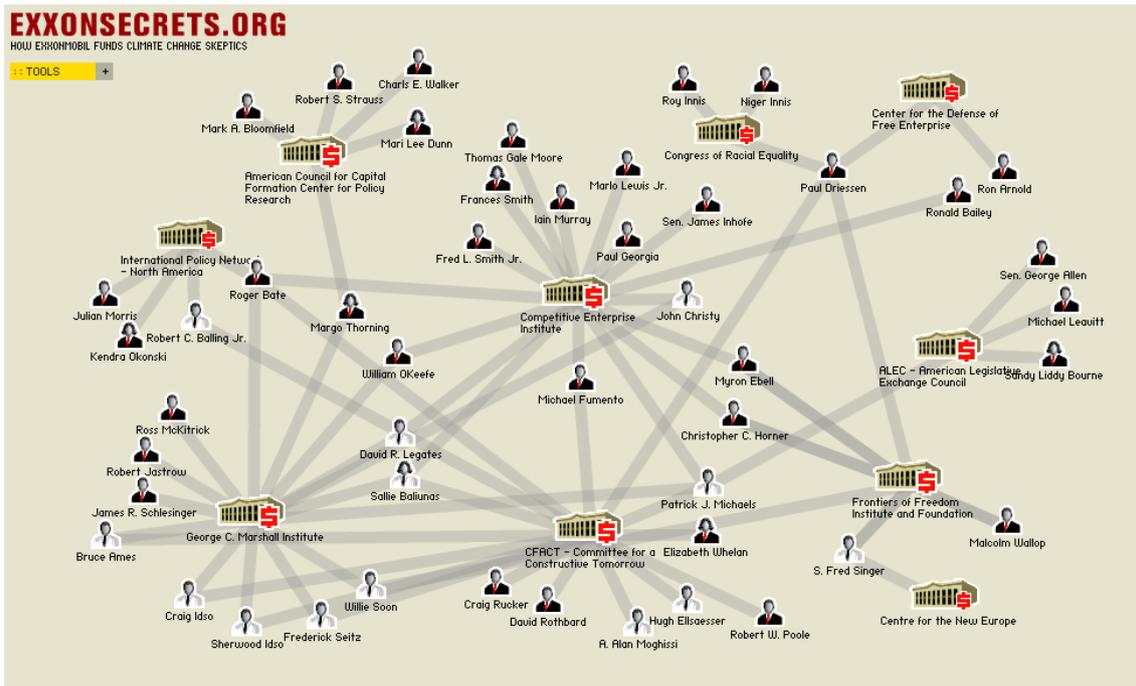


Fig.29 Representación de las relaciones contractuales o comerciales entre ‘escépticos del cambio climático’ e instituciones que reciben financiación de la corporación Exxon Mobil. Fuente: exxonsecrets.org/maps.php.

En el análisis semántico, además de los tipos de correspondencias entre objetos gráficos y su significado, otra cuestión relevante es el de la relación entre atributos visuales y tipos de datos. Por atributos visuales nos referimos a propiedades básicas como el color, tamaño, movimiento, orientación o forma; mientras que los tipos de datos pueden clasificarse en cuantitativos, ordinales y nominales.

El uso del color para codificar información ya fue tratado en el apartado 2.3.1.1.2, en el que reseñábamos el trabajo de Brewer (1999). En dicho trabajo se proponen diferentes esquemas de uso de las dimensiones aparentes del color en función del tipo de datos a codificar. No es de extrañar que el color sea uno de los atributos visuales más usados en visualización de información, ya que como vemos es capaz de codificar los tres tipos principales de datos. Sin embargo, esta versatilidad del color no implica que, para diferentes tipos de datos, soporte la misma eficacia en la realización de tareas visuales como la detección perceptual de diferencias entre objetos. Como podemos ver en la figura

30, en función del tipo de datos a codificar, será más recomendable usar unos u otros atributos visuales.

	Datos Cuantitativos	Datos Ordinales	Datos Nominales
mayor precisión ↑	Posición	Posición	Posición
	Longitud	Intensidad (color)	Matiz (color)
	Orientación	Matiz (color)	Textura
	Tamaño	Textura	Intensidad (color)
	Intensidad (color)	Longitud	Forma
	Matiz (color)	Orientación	Longitud
	Textura	Tamaño	Orientación
↓ menor precisión	Forma	Forma	Tamaño

Fig.30 Ranking de atributos visuales en función de su capacidad para soportar tareas visuales, basada en el trabajo de Mackinlay (1986). Notas: “Intensidad (color)” se refiere tanto al brillo como a la saturación. “Tamaño” se refiere tanto al área como al volumen. “Longitud” se refiere al ancho.

Observando la figura 30 podemos comprobar cómo la “forma” es un atributo en general poco recomendable, ya que su identificación se produce de forma atenta, y no pre-atenta, por lo que requiere más esfuerzo visual y cognitivo. Los atributos de color (matiz e intensidad), aunque son apropiados para datos ordinales y nominales, no son tan útiles para datos cuantitativos. Esto se debe a que es más fácil detectar diferencias cuantitativas entre dos elementos por su tamaño, que por el brillo del color con el que se encuentren caracterizados.

No obstante, la tipología de los datos representados no sería la única variable que condicionaría la eficacia de un atributo visual para codificar información, ya que como sugieren Nowell, Schulman y Hix (2002), la tarea visual que se encuentre realizando el usuario también influiría. Es decir, identificar el valor codificado en un objeto, comparar la relación proporcional entre dos objetos, o determinar la proporción de objetos

del conjunto que comparten un mismo valor, serían tareas visuales diferentes que podrían condicionar la eficacia de un atributo visual u otro en la codificación de los datos.

3.7.2. Algoritmos de ordenación espacial

Como se ha descrito en los apartados anteriores, las representaciones gráficas pueden ser consideradas expresiones de un lenguaje visual, y por tanto susceptibles de análisis sintáctico y semántico. Además, la naturaleza de los datos a representar - su estructura y tipología - es un factor condicionante en la decisión acerca de qué lenguaje utilizar, es decir, acerca de cómo representar gráficamente las relaciones y valores de estos datos (sintaxis) con el fin de obtener un resultado expresivo y comprensible (semántica).

Al tratar las técnicas de reducción de información (apartado 3.6), hablábamos de técnicas que ofrecían como resultado estructuras de datos directamente representables, como era el caso de las redes neuronales (SOM) y el escalamiento multidimensional (MDS). Esto quería decir que, ya que la estructura de datos resultante de su aplicación era bidimensional o tridimensional, cada uno de los elementos de la estructura de datos podía representarse como un objeto gráfico relacionado espacialmente por proximidad o vecindad con el resto de objetos. En otras palabras, la estructura de datos determinaría la ordenación espacial de los objetos gráficos que representan cada elemento.

Sin embargo, cuando la estructura de datos posee más de tres dimensiones, porque sea producto de una reducción mediante *Pathfinder* o *Clustering*, o simplemente porque no haya sido objeto de reducción, no dispondremos de información espacial. Es decir, aunque tenemos información para representar gráficamente las relaciones entre objetos, no la tenemos para ubicar esos objetos en el espacio gráfico de la representación.

En estos casos una posible solución es asociar cada objeto con una variable adicional que determine su posición en un espacio significativo. Podemos ver el ejemplo de la figura 31.a en la que cada nodo está posicionado geográficamente, o el ejemplo de la figura 31.b en la que la posición de cada nodo viene determinada por la “posición de juego” del jugador.

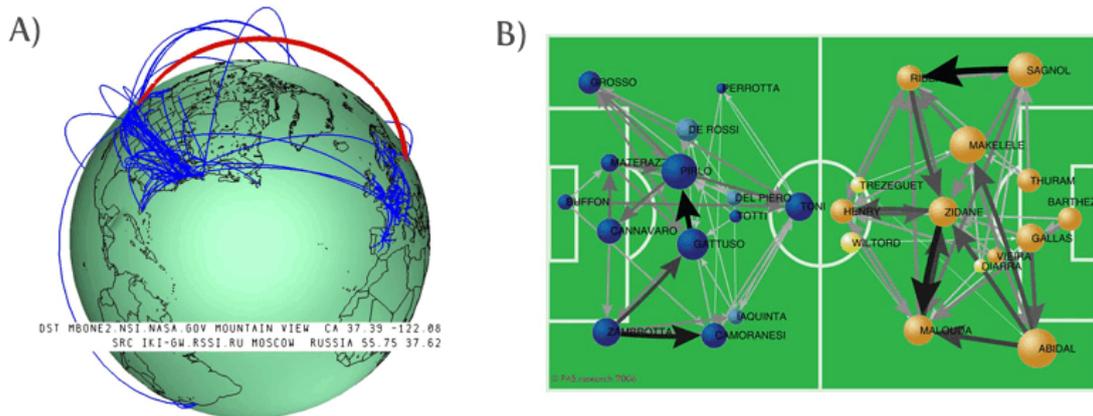


Fig.31 Visualización de la topología global de MBone (a) y visualización de los pases entre jugadores en la final del mundo del 2006 (b). Fuentes: Munzner et al. (1996) y visualcomplexity.com.

En otros muchos casos, sin embargo, no resulta posible o significativo este posicionamiento, por lo que es necesario aplicar algoritmos de ordenación espacial: procedimientos automáticos para posicionar y ordenar en un plano 2D (o 3D) los elementos y relaciones de una estructura de datos multidimensional. Como afirma Chen (2004), la ordenación espacial óptima será aquella que con mayor expresividad comunique las características clave de una estructura de datos, mientras que una mala ordenación aquella que oscurezca la naturaleza de dicha estructura.

Los diferentes algoritmos de ordenación espacial podemos clasificarlos en función de tres criterios. El primer criterio es el tipo de estructura (multidimensional) de los datos a visualizar, en el que distinguimos entre estructuras $N \times N$ y $N \times M$. En las estructuras $N \times N$ un conjunto de elementos N se relacionan entre sí, mientras que las relaciones presentes en

estructuras $N \times M$ vinculan los elementos de un conjunto N con los de un conjunto M . En la literatura científica sobre algoritmos de ordenación espacial predominan ampliamente los trabajos dedicados a estructuras $N \times N$, debido entre otras razones a que, en visualización de información, las relaciones entre conjuntos diferentes ($N \times M$) no suelen representarse espacialmente, sino mediante relaciones basadas en atributos visuales. En este capítulo únicamente serán analizados aquellos algoritmos de ordenación espacial orientados a estructuras $N \times N$.

Estos algoritmos podemos dividirlos a su vez entre aquellos orientados a topologías específicas o a topologías generales. Entre las topologías específicas más estudiadas sin duda destacan las jerárquicas, mientras que los algoritmos orientados a topologías generales están ideados para ordenar espacialmente cualquier estructura $N \times N$, independientemente de su topología.

El tercer criterio es el de la estructura sintáctica perseguida, es decir, el tipo de relaciones sintácticas a utilizar en la representación gráfica de la estructura de datos. En esta clasificación podemos distinguir básicamente entre estructuras gráficas de tipo grafo (relación mediante conectores) y de tipo mapa (relación mediante contención o mediante separadores).

Cabe destacar que aquellas estructuras gráficas de tipo mapa donde los elementos se relacionan por contención, sólo son aplicables a estructuras de topología jerárquica, mientras que el resto serían aplicables también a estructuras de diferente topología.

Las estructuras gráficas de tipo grafo son las más flexibles en cuanto al tipo de estructuras de datos a representar, y por tanto las más estudiadas en la literatura sobre visualización. El objetivo de los algoritmos de ordenación espacial de grafos es posicionar los nodos en el espacio disponible con el objetivo de que el resultado sea lo más fácilmente comprensible y visualizable, cualidad que es medida a través del cumplimiento de una serie de criterios estéticos deseables, descritos en la tabla 1 (Chen; 2004) (Ham; 2005).

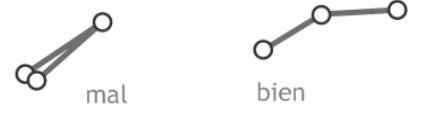
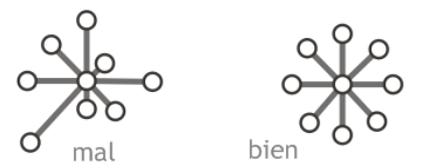
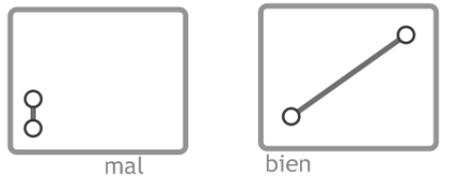
Criterio	Descripción	Ejemplo
Minimizar el número de cruces entre enlaces (o conectores).	Los cruces de enlaces hacen más difícil rastrear visualmente un camino de nodos.	
Minimizar el número de cambios de dirección de los enlaces.	Cuando los enlaces no siguen una línea recta entre nodo y nodo, cuanto mayor sea el número de puntos de inflexión (cambios de dirección) en los enlaces, más complejo será seguirlos visualmente.	
Maximizar la continuidad.	Al rastrear visualmente un camino entre dos nodos, compuesto por dos enlaces y un nodo intermediario, cuánto mayor sea la desviación angular de los enlaces en relación con la línea recta imaginaria que une los nodos de los extremos, menor será la continuidad (Ware et al.; 2002).	
Maximizar el número de enlaces ortogonales.	Si sólo se muestran enlaces estrictamente verticales u horizontales, la representación gráfica resultará más clara.	
Minimizar el solapamiento entre nodos.	De esta forma se facilita distinguirlos visualmente. A esto criterio también podríamos añadir evitar el solapamiento nodo-enlaces.	
Minimizar la longitud de los enlaces.	Enlaces muy largos dificultan su seguimiento visual.	
Minimizar la varianza de la longitud de los enlaces.	Cuando los enlaces tienen una longitud homogénea, conforman un grafo más claro.	
No desperdiciar espacio.	Adaptar el grafo al espacio disponible y la proporción ancho-alto de este espacio.	
Maximizar la simetría.	La simetría facilita la creación de un mapa mental de la representación.	

Tabla 1 Criterios estéticos en representaciones de grafos.

Es necesario advertir que, como afirma Chen (2004), algunos de estos criterios pueden ser mutuamente exclusivos. Por ejemplo, un grafo simétrico puede producir más cruces entre enlaces que uno no simétrico; la ortogonalidad de un grafo puede reducir la continuidad de los enlaces; o intentar aprovechar el espacio disponible al máximo puede hacer aumentar la longitud de los enlaces, e incluso su varianza.

A continuación se revisarán los algoritmos más populares de ordenación espacial, categorizados tanto por la topología de la estructura de datos para los que son aplicables, como por la estructura sintáctico-gráfica perseguida.

3.7.2.1. Ordenación espacial de topologías jerárquicas

Por topologías jerárquicas entendemos espacios vectoriales $N \times N$ donde cada componente de la matriz e_{ij} indica la existencia o no de una relación de ascendencia entre n_i y n_j . En esta topología, un elemento puede tener varios elementos descendentes, pero sólo uno ascendente, o ninguno en el caso de tratarse del elemento raíz de la jerarquía.

En la representación visual de topologías jerárquicas se pueden aplicar tres formulas sintácticas para denotar relaciones jerárquicas: por conexión (un objeto gráfico cumplirá el rol sintáctico de objeto conector entre objeto padre e hijo), por contención (los objetos gráficos hijos se posicionaran dentro del espacio gráfico del objeto padre), y por separación (objetos relacionados se posicionarán de forma adyacente, utilizando objetos separadores). La semántica de estas relaciones deberá explicitarse mediante objetos de referencia, como leyendas.

Por tanto, podemos dividir las técnicas algorítmicas de ordenación espacial para topologías jerárquicas en función del tipo de relaciones sintácticas que se emplearán para su codificación visual: Grafos jerárquicos (relaciones por conexión) y Mapas jerárquicos (relaciones por contención o por separación).

3.7.2.1.1. Algoritmos de grafos jerárquicos

En la extensa literatura científica sobre representación automática de grafos, la representación de jerarquías ha sido sin duda una de las cuestiones que más atención ha recibido.

Uno de los enfoques más populares es el de las estructuras sintácticas de tipo árbol (Fig.32.a). En estos grafos los nodos no sólo están relacionados mediante conectores, sino que además aquellos de un mismo nivel jerárquico están relacionados entre sí mediante alineación. Es necesario señalar que la orientación general de estos grafos puede ser indistintamente vertical u horizontal. Uno de los algoritmos más utilizados por su eficacia, aún hoy, para ordenación espacial de tipo árbol es el originalmente propuesto por Reingold y Tilford (1981) y posteriormente mejorado por Walker (1990).

Otro enfoque común para afrontar el problema de representación de jerarquías es el uso de grafos radiales (Bernard; 1981). Como se puede deducir observando la figura 32.b, el procedimiento consiste en posicionar el nodo raíz en el centro del espacio, e ir posicionando los nodos descendientes en circunferencias concéntricas. Aunque las relaciones entre nodos de un mismo nivel se pueden deducir por su distancia respecto al nodo central, en ocasiones se usan conectores circulares para relacionar sintácticamente estos nodos.

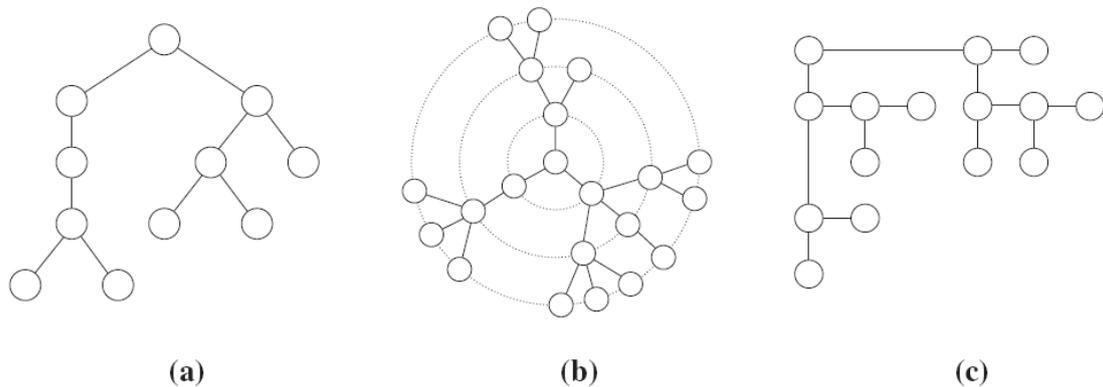


Fig.32 Ejemplos de grafo de árbol (a), grafo radial (b) y grafo ortogonal (c). Fuente: Ham (2005).

La ventaja estética principal que comparten tanto grafos de árbol como radiales es que se evitan o minimizan al máximo el cruce de enlaces. Otros criterios como maximizar la continuidad, minimizar el solapamiento entre nodos, minimizar la longitud de los enlaces y su varianza, o no desperdiciar el espacio, sólo se cumplen cuando se representan estructuras jerárquicas balanceadas (con cierta simetría).

Un tercer método algorítmico, menos conocido que los anteriores, es el de rejilla ortogonal (Fig.32.c) (Shiloach; 1976), en el que los nodos sólo pueden ubicarse en aquellas posiciones de la rejilla directamente adyacentes a la del nodo padre. Frente a los grafos de árbol y radiales, este enfoque algorítmico ofrece un grafo aparentemente más claro al cumplir el criterio estético de maximizar el número de enlaces ortogonales, pero inevitablemente eso disminuye la continuidad, por lo que dificulta el seguimiento visual de caminos.

Estos tres modelos sintácticos (árbol, radial y ortogonal) han inspirado la posterior propuesta de numerosos algoritmos y lenguajes visuales para la representación de estructuras jerárquicas. Los árboles cónicos (Robertson, Mackinlay, Card; 1991) (Fig.33), por ejemplo, representan una técnica de ordenación espacial inspirada en los grafos de árbol, ya que comparten una sintaxis visual similar, sólo que aplicada sobre espacios tridimensionales. El principal problema de este modelo es que

aumenta la percepción de solapamiento entre nodos y la percepción de cruce entre enlaces, lo que obliga al usuario a rotar interactivamente los conos con el fin de poder explorar el grafo.

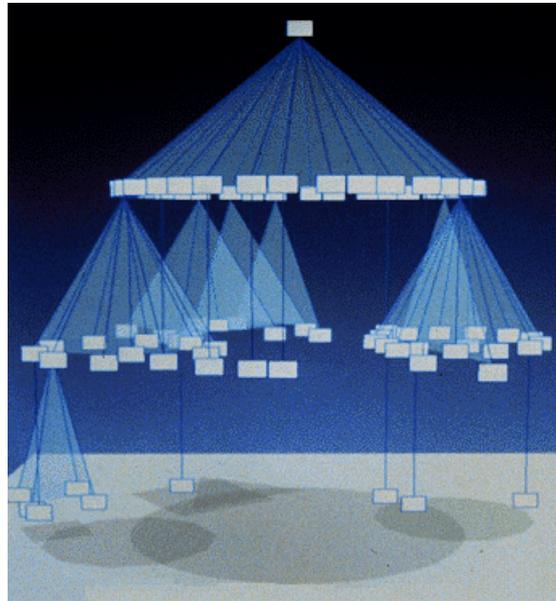


Fig.33 Árbol cónico. Fuente: Robertson, Mackinlay y Card (1991).

Una técnica que comparte muchas similitudes con los grafos radiales es la de árboles de círculos o de globos (Melançon, Herman; 1998) (Lin, Yen; 2007), en la que los nodos hijos no son posicionados en circunferencias concéntricas respecto al nodo raíz, sino respecto a su nodo padre (Fig.34). Sin embargo, a pesar de su similitud con los grafos radiales, las primeras representaciones de este tipo observadas en la literatura científica no son resultado de la modificación de algoritmos radiales, sino de aplanar o ‘bi-dimensionar’ un árbol cónico (Fig.35) (Carriere, Kazman; 1995). La principal ventaja estética de los árboles de globos es que homogeniza la longitud de los enlaces descendientes de un mismo nodo, aunque con ello se minimiza la continuidad. Por último destacar, como propuestas relacionadas, los grafos hiperbólicos de Lamping, Rao y Pirolli (1995), y los grafos arbóreos de Pavlo (2006).

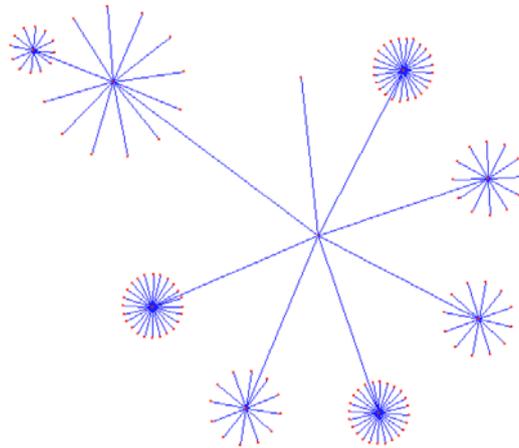


Fig.34 Árbol de círculos o globos. Fuente: Melançon y Herman (1998).

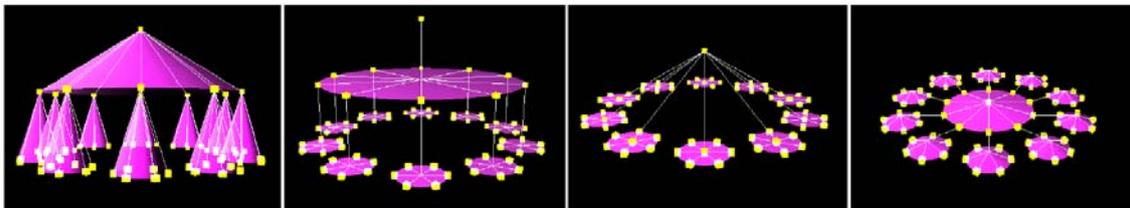


Fig.35 Secuencia de 1) árbol cónico, 2) árbol de disco, 3) árbol de disco compacto y 4) árbol de disco plano. Fuente: Carriere y Kazman (1995).

3.7.2.1.2. Algoritmos de mapas jerárquicos

Uno de los problemas de los algoritmos de grafos es su desaprovechamiento del espacio visual, por lo que resulta complicado encajar grandes estructuras de datos en espacios cuadrados limitados mediante estos algoritmos. Por este motivo Shneiderman (1992) propuso un método alternativo para la representación de estructuras gráficas, que denominó TreeMaps. Esta propuesta se basa en representar los nodos como áreas rectangulares y las relaciones jerárquicas mediante contención (los nodos hijos se ubican dentro de su nodo padre), ocupando todo el espacio visual disponible (Fig.36).



Fig.36 Ejemplo de TreeMap aplicado a la representación gráfica de noticias. Fuente: <http://www.marumushi.com/apps/newsmap>.

Dada la popularidad adquirida por este modelo de visualización, se han publicado multitud de mejoras del algoritmo original, así como algoritmos orientados a representar los nodos mediante otras formas geométricas - círculos, polígonos, bloques tridimensionales...-, tal y como el propio Shneiderman (1999) revisa.

Boardman (2000) propone un método de representación gráfica de estructuras jerárquicas que podemos considerar un modelo híbrido entre mapa y grafo jerárquico, ya que como se puede observar en la figura 37, las relaciones entre nodos se encuentran doblemente representadas por contención y conexión.

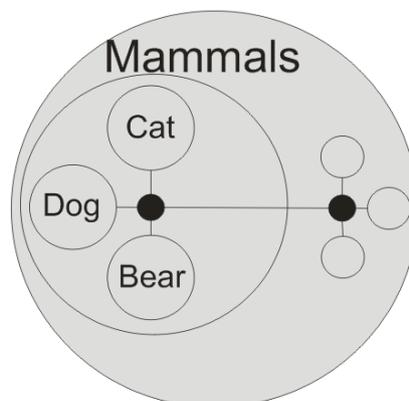


Fig.37 'Bubble tree'. Fuente: Boardman (2000).

Otro método híbrido es el de representación de jerarquías mediante discos circulares (Andrews, Heidegger; 1998) (Yang, Ward, Rundensteiner; 2002), en el que si bien las relaciones entre nodos se representan mediante separadores o por adyacencia, y no por conexión, sus fundamentos algorítmicos de ordenación espacial son muy similares a los de grafos radiales (Fig.38). Stasko et al. (2000), tras su evaluación comparativa respecto a los TreeMaps, concluyen que para tareas de búsqueda y análisis, los mapas de discos circulares obtienen mejores resultados en términos de rendimiento y usabilidad percibida.

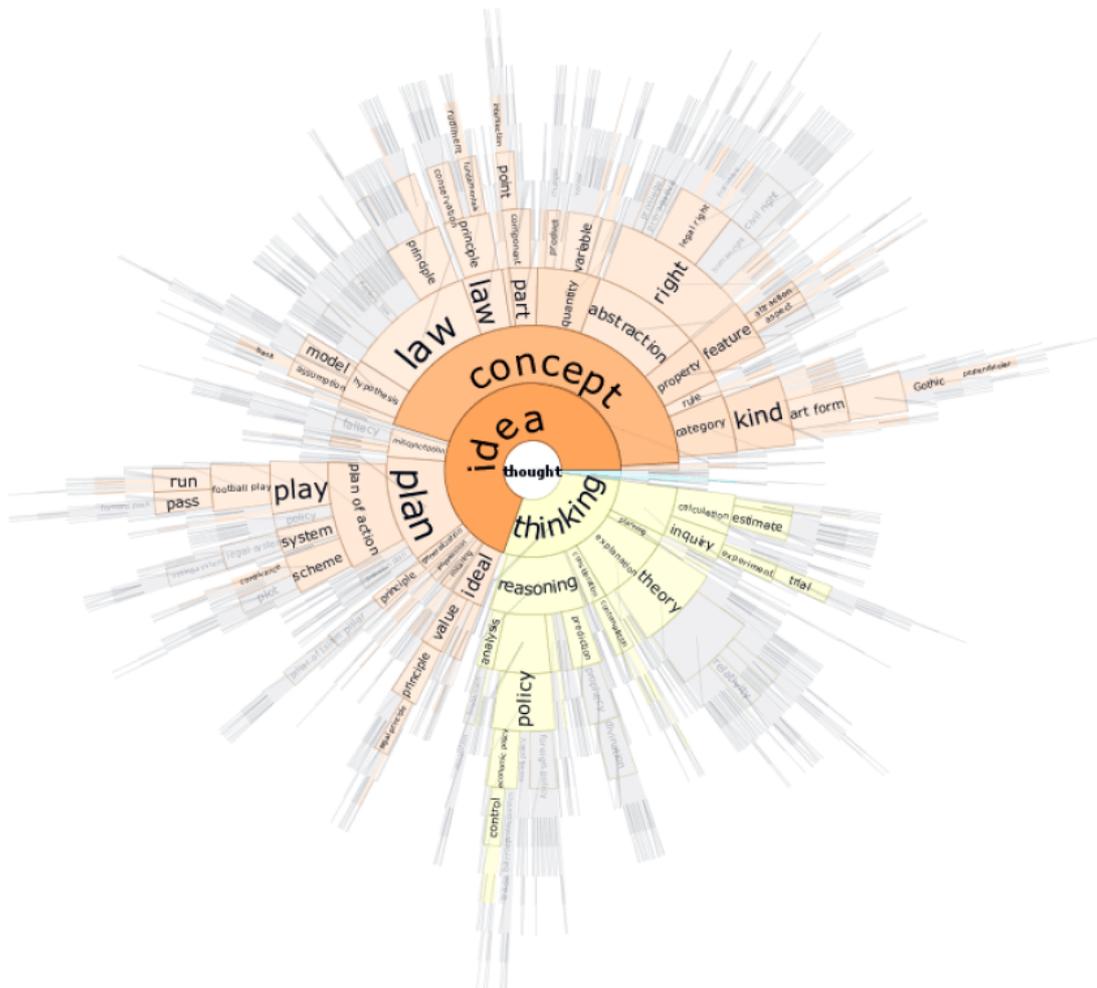


Fig.38 Representación de las hiponímias entre conceptos de un corpus textual mediante discos circulares o concéntricos.
Fuente: Collins (2007).

3.7.2.2. Ordenación espacial de topologías generales

Como afirman Chen y Czerwinski (1998), visualizar topologías complejas de información es mucho más complicado que representar topologías jerárquicas. Por algoritmos de ordenación espacial de topologías generales nos referimos a aquellos que no están ideados específicamente para resolver el problema de ordenación de topologías concretas (como era el caso de las jerárquicas), sino el de cualquier estructura $N \times N$ independientemente de su topología. Es decir, cada nodo de la estructura a representar podría presentar un número de enlaces en el rango de 1 a $N-1$, siendo N el número de nodos que forman la red, por lo que la complejidad de la red estaría determinada por el número de nodos y el número de enlaces totales.

Los algoritmos de mapas jerárquicos descritos son sólo aplicables a estructuras estrictamente jerárquicas, aunque hay que señalar que los algoritmos de grafos jerárquicos podrían ser útiles para representar estructuras no completamente jerárquicas, como podemos observar en la figura 39. No obstante, conforme aumenta la complejidad de la estructura a representar, estos algoritmos pierden eficacia, ya que no están ideados para evitar el cruce de enlaces adyacentes (no jerárquicos), optimizar la distancia entre nodos o aprovechar el espacio disponible.

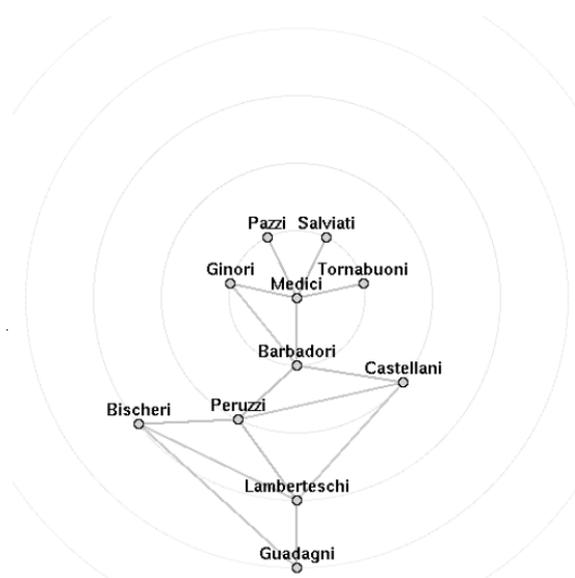


Fig.39 Grafo no jerárquico ordenado mediante algoritmo radial. Fuente: Yee et al. (2001).

La forma más flexible de representar gráficamente topologías generales es en forma de grafos (Lin; 1997), es decir, relacionando visualmente los objetos mediante otros que cumplen el rol de conectores o enlaces. Por tanto, en la siguiente revisión de algoritmos de ordenación espacial para estructuras de topología general únicamente serán tratados los conocidos como algoritmos de ordenación de grafos generales.

La gran mayoría de estos algoritmos comparten una filosofía común en su forma de proceder: partiendo de una configuración inicial del grafo (normalmente posicionando de forma aleatoria los nodos en el espacio disponible), afrontan su ordenación espacial iterativamente. En cada iteración uno o más nodos son reposicionados de acuerdo a reglas o heurísticas basadas en analogías físicas - como fuerzas, energías o tensión entre nodos- hasta que el sistema alcanza un estado óptimo o aceptable, momento en el que termina el proceso.

3.7.2.2.1. Modelo 'Spring-embedder'

El modelo 'spring-embedder' originalmente propuesto por Eades (1984) afronta la ordenación espacial de los nodos mediante una analogía mecánica: los nodos del grafo son considerados anillos metálicos, y los enlaces, muelles elásticos (Fig.40). En cada iteración los nodos se reposicionan dirigidos por la fuerza de los muelles (enlaces), hasta alcanzar un estado de mínima energía.

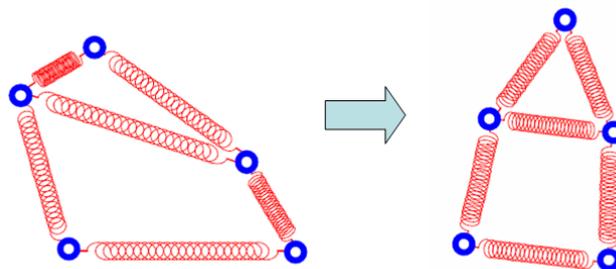


Fig.40 Representación de la metáfora de los sistemas mecánicos para explicar el funcionamiento de modelo algorítmico 'spring-embedder'. Fuente: Xu (2007).

Para calcular la fuerza de atracción entre nodos, en vez de utilizar directamente la “ley de elasticidad de Hooke”, Eades (1984) propone la siguiente fórmula logarítmica:

$$F_{\text{atracción}} = c1 * \log(d/c2)$$

Donde d es la longitud del muelle, y $c1$ y $c2$ son constantes. Además de las fuerzas de atracción, en el modelo de Eades (1984) también se calculan fuerzas de repulsión entre todos aquellos nodos no enlazados entre sí:

$$F_{\text{repulsión}} = c3 / \sqrt{d}$$

Donde d es la distancia entre nodos y $c3$ otra constante.

El procedimiento del algoritmo es tan sencillo como calcular las fuerzas de atracción y repulsión por cada vértice o nodo, y moverlo en la dirección resultante de las fuerzas que se ejercen sobre éste. Este proceso se repite un número M de veces, hasta alcanzar el estado de mínima energía, que Eades (1984) estima que, para la mayoría de los grafos, se alcanza cuando $M=100$.

Tanto el algoritmo de Eades (1984), como los que describiremos a continuación, persiguen que tras su aplicación los nodos queden ordenados de tal forma que el resultado gráfico sea ‘estéticamente agradable’. Ésta es una noción un tanto ambigua, que los diferentes autores reducen a una serie objetiva de principios estéticos (apartado 3.7.2). En el caso de Eades (1984), los principios perseguidos son la uniformidad del tamaño de los enlaces y la máxima simetría posible. En este sentido el algoritmo ofrece unos resultados bastante aceptables en un tiempo razonable, aunque únicamente en el caso de grafos de pequeño tamaño (menos de 50 nodos). No obstante, una de las mayores

ventajas de este algoritmo es su simplicidad y elegancia conceptual, lo que facilita mucho su comprensión e implementación, y es la principal causa de que aún hoy sea uno de los algoritmos más populares.

3.7.2.2.2. Algoritmo de Kamada y Kawai

El algoritmo de Kamada y Kawai (1989), aunque inspirado en el modelo ‘spring-embedder’ de Eades (1984), afronta el problema de las fuerzas entre nodos desde un enfoque diferente. Mientras que en el algoritmo de Eades (1984) se calculan fuerzas de atracción entre aquellos nodos conectados entre sí y fuerzas de repulsión entre los nodos no conectados, en la propuesta de Kamada y Kawai (1989) lo que se pretende es que la distancia geométrica o euclídea entre cada par de nodos se corresponda lo más fielmente a la distancia de los nodos en el grafo. Esto implica que el primer paso del algoritmo sea calcular esta distancia de los nodos en el grafo, es decir, el camino más corto entre cada par de nodos, para lo que los autores proponen el uso del algoritmo de Floyd (1962).

El objetivo del algoritmo de Kamada y Kawai (1989) es disminuir en cada iteración la energía total (E) del grafo hasta alcanzar un estado de mínima energía, momento en el cual la representación visual del grafo será la más “agradable estéticamente”. La variable que mide la energía total del grafo en cada momento se calcula con la siguiente función:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{2} k_{ij} \left(|p_i - p_j| - l_{ij} \right)^2$$

Donde n es el número de nodos; $|p_i - p_j|$ es la distancia geométrica entre dos nodos (llamadas partículas); l_{ij} es la longitud original entre los dos nodos en el grafo; y k_{ij} la fuerza del ‘muelle’ entre ambos nodos. La longitud l_{ij} se calcula de la siguiente forma:

$$l_{ij} = L \times d_{ij}$$

Donde d_{ij} es la distancia entre dos nodos, entendida como el camino más corto entre dichos nodos en el grafo; y L es la longitud deseable de cada enlace. Para calcular L , Kamada y Kawai (1989) proponen que, si disponemos de un espacio limitado de dibujo, se obtenga dividiendo el diámetro del espacio disponible por el valor mayor de todas las distancias d_{ij} entre nodos.

Para calcular k_{ij} , o fuerza del muelle entre dos nodos, los autores proponen la siguiente función:

$$k_{ij} = K / d_{ij}^2$$

Donde K es una constante.

Dadas las anteriores definiciones, lo que el algoritmo pretende en cada iteración es mover cada partícula a aquella posición geométrica que en mayor grado reduzca la energía total (E). Para resolver esta ecuación, ya que calcular el mínimo absoluto resulta muy complejo, los autores proponen calcular el mínimo local, basándose en un método - ampliamente conocido en análisis numérico- denominado de Newton-Raphson.

La elección del método Newton-Raphson conlleva otra de las características que diferencian al modelo de Kamada y Kawai (1989) frente al de Eades (1984), y es que para poder calcular el mínimo local mediante este método los autores se ven obligados a calcular las variaciones de las posiciones de cada nodo mientras el resto de nodos permanecen estáticos. Es decir, mientras que en el modelo de Eades (1984) en cada iteración todos los nodos eran desplazados a una nueva posición, en el de Kamada y Kawai (1989) únicamente uno de los nodos es desplazado por iteración.

A continuación se describe el procedimiento general del algoritmo de Kamada y Hawaii (1989):

```

Calcular  $d_{ij}$  para  $1 \leq i \neq j \leq n$ ;
Calcular  $l_{ij}$  para  $1 \leq i \neq j \leq n$ ;
Calcular  $k_{ij}$  para  $1 \leq i \neq j \leq n$ ;
Configuración inicial (normalmente aleatoria) de las posiciones de
los nodos  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ;
While ( $\max_i \Delta_i > \epsilon$ ) {
  Siendo  $p_m$  el nodo cuyo valor  $\Delta_m = \max_i \Delta_i$ ;
  While ( $\Delta_m > \epsilon$ ) {
    Calcular  $\partial x$  y  $\partial y$  mediante el método Newton-Raphson;
     $x_m = x_m + \partial x$ ;
     $y_m = y_m + \partial y$ ;
  }
}

```

Δ_i podríamos definirlo como el grado con el que el nodo p_i , o mejor dicho, su posición geométrica, contribuye a la energía total del grafo, que se define como:

$$\Delta_i = \sqrt{\left\{ \frac{\partial E}{\partial x_i} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial E}{\partial y_i} \right\}^2}$$

∂x y ∂y indicarían el desplazamiento horizontal y vertical del nodo hacia su nueva posición.

Como señala Chen (2004), podríamos decir que $\max_i \Delta_i$ es el valor del nodo con la “peor posición” de todos.

El valor de convergencia ϵ funcionaría como umbral, determinando en qué momento el algoritmo ha alcanzado el estado de mínima energía y dando por finalizado el proceso. Kamada y Kawai (1989) no ofrecen sugerencia para calcular este valor, ni por tanto mecanismo alguno que determine en qué momento debe finalizar el proceso.

Los principios estéticos que persigue el algoritmo de Kamada y Kawai son evitar el cruce entre enlaces y distribuir uniformemente los nodos en el espacio. Aunque el algoritmo no ofrece mecanismo explícito para detectar y disminuir el cruce de enlaces, analizando los ejemplos recogidos en la literatura científica podemos afirmar que el resultado final que se consigue, principalmente en determinadas clases de grafos,

es uno de los más ‘estéticos’. Este hecho es uno de los motivos por los que el algoritmo de Kamada y Kawai es actualmente uno de los más utilizados en visualización de información, aunque no podemos obviar que, como indican Börner, Sanyal y Vespignani (2007), en parte también se deba a que *Pajek* - una de las herramientas de visualización más populares- lo ofrezca entre sus funciones.

De hecho el modelo de Kamada y Kawai presenta algunas limitaciones serias. Por un lado el algoritmo original sólo es aplicable en redes no fragmentadas, es decir, aquellas que no tienen más de un componente o sub-grafo. Esto se debe a que no es posible calcular la distancia d_{ij} , o camino más corto, cuando p_i y p_j pertenecen a componentes diferentes y por tanto no conectados entre sí. En estos casos los autores proponen aplicar el algoritmo separadamente por cada uno de los componentes, pero esto aumentaría el coste del proceso, además de que si queremos que los diferentes componentes compartan un mismo espacio visual, habría que aplicar otro procedimiento diferente de ordenación espacial sobre los componentes.

Por otro lado, el modelo de Kamada y Kawai es, de por sí, costoso computacionalmente. Los autores discuten brevemente el costo computacional, alegando además que es difícil estimar el número de iteraciones necesarias, ya que estarían condicionadas por la topología del grafo y las posiciones iniciales de los nodos. Sin embargo, al margen de las iteraciones, es fácil inferir que el proceso previo para calcular los caminos más cortos o distancias entre nodos d_{ij} , sumado al cálculo de cada Δ_i , sus valores máximos, y cada δx y δy , hacen que este algoritmo sea pesado computacionalmente.

Otra limitación del algoritmo es que originalmente sólo estaba ideado para ordenar visualmente grafos en espacios 2D, aunque esta limitación ya fue superada en el trabajo de Kumar y Fowler (1994), quienes lo extendieron para su aplicación en espacios 3D.

3.7.2.2.3. Algoritmo de Fruchterman y Reingold

Otro algoritmo que goza de gran popularidad es el de Fruchterman y Reingold (1991), que podemos definir como una mejora del algoritmo original de Eades (1984). Si bien el modelo de Fruchterman y Reingold (1991) persigue implícitamente principios estéticos como la simetría, evitar el cruce entre enlaces y la uniformidad del tamaño de dichos enlaces; el algoritmo únicamente aplica de forma explícita dos heurísticas visuales: 1) Dos vértices (o nodos) conectados directamente deberán posicionarse próximos entre sí, 2) Los vértices no deberán posicionarse demasiado próximos al resto (la distancia mínima vendrá determinada por el espacio visual disponible para representar el grafo).

El procedimiento general del algoritmo podemos observarlo sobre su pseudocódigo:

```
area:=W*L; //W y L son el ancho y alto del espacio disponible
// las posiciones iniciales de los vértices son aleatorias
G:=(V,E);
k:= √(area/|V|);

function fa(d) {
  return d2/k;
}

function fr(d) {
  return -k2/d;
}

for i := 1 to iterations {
  // calcular fuerzas repulsivas
  for v in V {
    // cada vértice tiene dos vectores: .pos y .disp
    v.disp := 0;
    for u in V {
      if (u != v) {
        // Δ es el vector de la diferencia entre las
        // posiciones de los dos vértices
        Δ := v.pos - u.pos;
        v.disp := v.disp + (Δ/|Δ|) * fr(|Δ|);
      }
    }
  }
  // calcular fuerzas de atracción
  for e in E {
    //cada enlace e es un par ordenado de vértices .v y .u
```

```

    Δ := e.v.pos - e.u.pos;
    e.v.disp := e.v.disp - (Δ/|Δ|) * fa(|Δ|);
    e.u.disp := e.u.disp + (Δ/|Δ|) * fa(|Δ|);
  }

  //limitar el desplazamiento máximo a la temperatura t y
  //prevenir que los vértices queden fuera del espacio disponible
  for v in V {
    v.pos := v.pos + (v.disp/|v.disp|) * min(v.disp, t);
    v.pos.x := min(W/2, max(-W/2, v.pos.x));
    v.pos.y := min(L/2, max(-L/2, v.pos.y))
  }
  // reducir la temperatura conforme la ordenación
  // se aproxime a una mejor configuración
  t := cool(t);
}

```

k se define como la distancia óptima entre vértices, que como podemos ver es resultado de la raíz cuadrada de la división del área ($W \cdot L$) entre el número de vértices a ordenar.

Una diferencia significativa respecto al algoritmo de Eades (1984) la encontramos en las funciones utilizadas para calcular las fuerzas. En este modelo la fuerza de atracción se calcula dividiendo la distancia (d) al cuadrado entre la distancia óptima (k), y la fuerza de repulsión dividiendo la distancia óptima al cuadrado por la distancia. La razón de no usar la función logarítmica de Eades (1984), según argumentan Fruchterman y Reingold (1991), no es porque ofrezca peores resultados sino por su mayor coste computacional.

A diferencia del algoritmo de Kamada y Kawai (1989), en el que sólo un nodo era reposicionado por cada iteración, en el algoritmo de Fruchterman y Reingold (1991) todos los nodos cambian de posición por iteración. Este proceso se repite un número determinado de iteraciones, que los autores fijan en 50 para la mayoría de casos. Al finalizar cada iteración se disminuye el valor de la temperatura t , lo que implica que conforme mayor número de iteraciones se hayan ejecutado, menor será el desplazamiento posible de los nodos.

Las ventajas principales del algoritmo de Fruchterman y Reingold frente al de Kamada y Kawai son su menor coste computacional, debido a que son necesarias menos iteraciones para obtener resultados similares; y su

aplicabilidad directa sobre redes fragmentadas, es decir, redes con más de un componente.

Entre sus desventajas se encuentra el hecho de que el mecanismo utilizado para que los nodos no salgan del espacio disponible empujados por las fuerzas de repulsión, en ocasiones produce que algunos nodos queden adosados a los bordes del espacio, pudiendo producir solapamiento entre enlaces. Otra limitación del modelo de Fruchterman y Reingold se hace latente cuando se aplica sobre redes no fragmentadas muy poco densas, entendiendo la densidad (de enlaces) como la relación entre el número de enlaces y el de nodos. En estos casos las fuerzas de atracción quedan en desventaja con las de repulsión, provocando numerosos cruces entre enlaces.

3.7.2.2.4. 'Simulated Annealing'

Una solución alternativa a los modelos 'spring-embedder' en la ordenación espacial de grafos generales, es la aplicación de la técnica de 'Simulated Annealing' (SA) - que podríamos traducir como 'temple simulado'-, propuesta por Davidson y Harel (1989, 1996).

El nombre de la técnica SA deriva de la analogía del proceso en el que los líquidos son enfriados hasta alcanzar su forma cristalina:

“Es ampliamente conocido que cuando un líquido es enfriado lentamente, éste alcanza una forma totalmente ordenada, llamada cristal, que representa el estado de mínima energía del sistema. Por el contrario, un enfriamiento rápido da como resultado estructuras amorfas, con una mayor energía, que representan un mínimo local.”

(Davidson, Harel; 1996)

A diferencia de los modelos iterativos estándar como los descritos anteriormente, los algoritmos SA permiten movimientos 'cuesta arriba', que en vez de mejorar empeoran la solución temporal. Con este comportamiento lo que el algoritmo pretende es escapar de los mínimos

locales, para alcanzar un estado final de energía lo más cercano posible al mínimo global. Es decir, se ralentiza el enfriamiento, para obtener una mejor solución.

Veamos el pseudocódigo del algoritmo (Davidson, Harel; 1996) (Chen; 2004):

```
// Establecer una configuración inicial  $\vartheta$  aleatoria
 $\vartheta := \vartheta_{\text{random}}$ ;
// Establecer la temperatura inicial
 $T := T_0$ ;
while (condición de control) {
  // Elegir una nueva configuración  $\vartheta'$  de entre
  // las configuraciones vecinas de  $\vartheta$ 
   $\vartheta' := \vartheta + \Delta$ ;
  // Siendo  $E$  y  $E'$  los valores de la función de energía
  // aplicada sobre  $\vartheta$  y  $\vartheta'$  respectivamente
  // y siendo  $\text{random}$  un valor aleatorio entre 0 y 1
  if ( $(E' < E)$  OR ( $\text{random} < e^{(E-E')/T}$ )) {
    // aceptar la nueva configuración
     $\vartheta := \vartheta'$ ;
  }
  // reducir la temperatura  $T$ 
   $T := \text{cool}(T)$ ;
}
```

Por configuración ϑ se entiende la asignación de una posición dentro del espacio disponible a cada uno de los nodos del grafo. Como puede observarse, se parte de una configuración aleatoria.

El algoritmo realiza un número predeterminado de iteraciones, valor que puede establecerse dependiendo de la complejidad del grafo. Además del número de iteraciones, la *condición de control* también puede incluir algún tipo de mecanismo que detecte si durante las últimas iteraciones no ha cambiado ningún valor, para en dicho caso proceder a finalizar súbitamente el proceso.

En cada iteración se elige una configuración candidata ϑ' entre todas las configuraciones vecinas a la configuración actual ϑ . Por configuraciones vecinas se entiende aquellas configuraciones que sólo difieren de la actual en la posición de uno de sus nodos. Esto implica que en cada iteración, en caso de ser aceptada la nueva configuración candidata, sólo se verá afectada la posición de uno de los nodos.

El elemento más importante del proceso es la definición de la función de energía (llamada por los autores función de coste), ya que es la que determina qué principios estéticos persigue el algoritmo. A diferencia de los modelos ‘spring-embedder’, donde los principios estéticos perseguidos no eran explícitamente integrados en el procedimiento, en el modelo SA la función de energía no es otra cosa que la cuantificación de todos aquellos principios estéticos deseados. Es decir, el objetivo de la función de energía es determinar en qué grado la configuración candidata δ' es estéticamente más agradable que la configuración actual δ .

Los principios estéticos que forman parte de la función de energía son los siguientes:

- Distribución uniforme de los nodos: El componente responsable de esta heurística es una función que devuelve un valor inversamente proporcional a la distancia entre dos nodos. El resultado de sumar el valor de esta función para cada par de nodos, indica cómo de uniformemente distribuidos se encuentran los nodos del grafo.

$$c_1 = \sum_{i,j} \frac{\lambda_1}{d_{i,j}^2}$$

Donde $d_{i,j}$ es la distancia entre el nodo i y el nodo j , y λ_1 es un factor de normalización que define la importancia relativa de este criterio respecto al resto de componentes de la función de energía.

- No escapar del espacio disponible: Dado que en la búsqueda de nuevas configuraciones puede haber nodos que escapen de los límites del espacio disponible para representar el grafo, con el fin de evitar esta situación la función de energía incluye un componente que penaliza la cercanía de los nodos respecto a los laterales del espacio.

$$c_2 = \sum_i \lambda_2 \left(\frac{1}{r_i^2} + \frac{1}{l_i^2} + \frac{1}{t_i^2} + \frac{1}{b_i^2} \right)$$

Donde r_i , l_i , t_i y b_i , indican la distancia entre el nodo i y los laterales

derecho, izquierdo, superior e inferior respectivamente. Incrementando λ_2 se empujará los nodos hacia el centro, y disminuyéndolo se aprovechará más el espacio cercano a los laterales.

- Uniformidad de la longitud de los enlaces: Para asegurar este criterio estético, lo que hace la función de energía es incorporar un componente que penaliza los enlaces largos.

$$c_3 = \sum_k \lambda_3 d_k^2$$

Donde d_k es la longitud del enlace k , y λ_3 el correspondiente factor de normalización.

- Minimizar el cruce de enlaces: Reducir a su mínimo posible el número de cruces entre enlaces es una tarea complicada, por lo que los autores incorporan a la función un sencillo componente que, si bien no los reduce al mínimo, si da como resultado grafos más agradables estéticamente. Este componente c_4 es la suma de tantos valores λ_4 como número de pares de enlaces se crucen.

- Distancias nodo-enlace: Distanciar los nodos entre sí e intentar impedir el cruce entre enlaces no evita que haya nodos que queden muy próximos a enlaces no conectados con dichos nodos. Por este motivo, el algoritmo incluye un componente que parte de la definición de que la distancia entre un nodo y un enlace es igual a la distancia mínima entre el nodo y cualquier punto del enlace.

$$c_5 = \sum_{i,k} \frac{\lambda_5}{g_{i,k}^2}$$

Donde $g_{i,k}$ es la distancia entre el nodo i y el enlace k , y λ_5 el correspondiente factor de normalización. Además los autores relacionan las distancias nodo-enlace con el factor de normalización del componente c_4 de la siguiente forma:

$$\lambda_4 = \frac{\lambda_5}{g_{\min}^2}$$

Donde g_{\min} es la distancia mínima definida. Este componente resulta muy costoso computacionalmente, por lo que los autores aconsejan

que sólo sea aplicado en las últimas iteraciones del algoritmo, en su etapa de ‘fine-tuning’.

La función de energía descrita -a través de sus componentes- nos permite determinar si la energía de la configuración candidata δ' es menor que la de la configuración actual, lo que implicará aceptar automáticamente la nueva configuración. En caso de que la energía de la configuración candidata sea mayor que la actual, la decisión de aceptarla o no es probabilística.

En esta función probabilística entra en juego la temperatura T , que en el algoritmo parte de un valor inicial predeterminado, el cual va siendo reducido iteración tras iteración mediante una función de enfriamiento.

$$cool(T) = \gamma T$$

Donde γ debe ser un valor entre 0.6 y 0.95 (los autores utilizan 0.75).

Aunque el algoritmo de Davidson y Harel (1989, 1996) ofrece unos resultados comparables a los de Kamada y Kawai (1989) y Fruchterman y Reingold (1991), presenta serias limitaciones que lo descartan como una alternativa eficaz. La primera limitación es que, como los autores indican, en grafos de más de 60 nodos el algoritmo deja de ofrecer buenos resultados. Además, por su propia lógica de “enfriamiento lento”, resulta computacionalmente costoso, lo que tampoco lo hace adecuado para los casos en los que la velocidad es un factor crucial, como en la ordenación espacial en tiempo real.

Debido a esto, y como sugieren sus propios autores, este algoritmo sería más adecuado para el refinamiento (‘fine-tuning’) de layouts ya preprocesados con otros algoritmos de ordenación espacial, que como solución general.

3.7.2.2.5. Algoritmo de Tunkelang

Tunkelang (1999), en su tesis doctoral, parte de la reflexión de que los algoritmos descritos de tipo ‘force-directed’ o ‘spring-model’, aún cuando afrontan la ordenación espacial desde el marco de la optimización numérica, no aprovechan las aportaciones resultado de la investigación en este marco en otras disciplinas. Lo que el autor propone es aprovechar precisamente estas aportaciones con el fin de reducir el tiempo de procesamiento de la ordenación espacial. Además, también propone la mejora de la calidad estética del grafo final mediante un modelo más completo y el uso de heurísticas para evitar mínimos locales; así como mejorar la flexibilidad del procedimiento separando el modelo físico de ordenación espacial del procedimiento de optimización. Para ello, Tunkelang (1999) no desarrolla un modelo propio, sino que parte del modelo de Fruchterman y Reingold, modificándolo y extendiéndolo.

El algoritmo de Tunkelang (1999) utiliza la misma función para calcular la fuerza de atracción entre nodos que Fruchterman y Reingold, sólo que la distancia entre nodos tiene en cuenta el tamaño y forma de cada nodo. Es decir, esta distancia no es la existente entre los centros de los nodos, sino entre los bordes o límites de esos nodos. En los modelos tipo Fruchterman y Reingold esta estrategia resulta suficiente para mejorar estéticamente el resultado final, aunque otros, como el de Kamada y Kawai, requieren de aproximaciones diferentes para obtener mejoras similares (Harel, Koren; 2002a).

Sobre la función de repulsión entre nodos, Tunkelang (1999) realiza más modificaciones. Además de considerar la forma y tamaño de los nodos, el autor destaca que esta función cumple dos funciones diferentes: evitar el solapamiento entre nodos y distribuir los nodos uniformemente en el espacio disponible. Por ello, el autor utiliza constantes diferentes en la función de repulsión en base a si la distancia entre los dos nodos es menor que k (distancia óptima en el modelo de Fruchterman y Reingold) o es mayor. Con el objetivo de evitar solapamientos entre nodos y

enlaces, además de las fuerzas de repulsión nodo-nodo, Tunkelang (1999) propone el uso de fuerzas de repulsión nodo-enlace, aunque por cuestiones de rendimiento estas fuerzas sólo se aplican en etapas avanzadas del proceso de ordenación espacial.

Las modificaciones del modelo de Fruchterman y Reingold por parte de Tunkelang (1999) descritas hasta ahora tienen el objetivo de mejorar estéticamente el resultado final. Sin embargo, la verdadera aportación del trabajo de Tunkelang (1999) es el de la optimización del proceso. Para ello, una de las propuestas del autor es la aplicación de modelos propios del cálculo de fuerzas electroestáticas y gravitacionales de la física de partículas, en concreto el de Barnes y Hut (1986). En este modelo, se divide jerárquicamente el espacio en cuatro celdas cuadradas. Cada una de las celdas que contenga más de un nodo, es subdividido en cuatro celdas, proceso que se repite hasta que no haya ninguna celda con más de un nodo contenido. Una vez finaliza este proceso de “particionamiento”, lo que se hace es recorrer el árbol jerárquico de celdas desde las “hojas” hacia “raíz”, calculando sólo las fuerzas entre los nodos de celdas vecinas.

3.7.2.2.6. Ordenación espacial de grafos de gran tamaño

La escalabilidad es uno de los principales problemas que presentan los algoritmos descritos (Chen; 2004). Si bien algunos, como el de Tunkelang (1999), proponen procedimientos de optimización, la verdad es que en términos generales son algoritmos que ofrecen resultados pobres y tiempos de procesamiento prolongados cuando se enfrentan a la ordenación espacial de grafos de gran tamaño (>1000 nodos).

Una de las aproximaciones algorítmicas más populares para la ordenación de grafos de gran tamaño es el uso de la estrategia de multi-escala o multi-nivel (Hadany, Harel; 2001) (Harel, Koren; 2002b). Su procedimiento consiste en llevar a cabo etapas diferentes de ordenación; en unas se reposicionan conjuntamente *clusters* de nodos, y en otras nodos individuales (fine-tuning). Estos *clusters* son grupos de

nodos que se estima quedarán próximos en la representación final, por lo que pueden ser tratados como un único nodo. Esta estrategia es usada en el trabajo de Koren, Carmel y Harel (2002) (Fig.41), combinada con el cálculo de vectores propios (eigenvectors), dando como resultado un algoritmo que, como afirman los autores, es capaz de ordenar grafos de millones de nodos en menos de un minuto. Walshaw (2003) describe otro algoritmo multi-nivel, en el que se usa un *clustering* aglomerativo de nodos, y donde el procedimiento va descendiendo en la jerarquía de clusters y aplicando técnicas *force-directed* sobre los *clusters* de cada nivel.

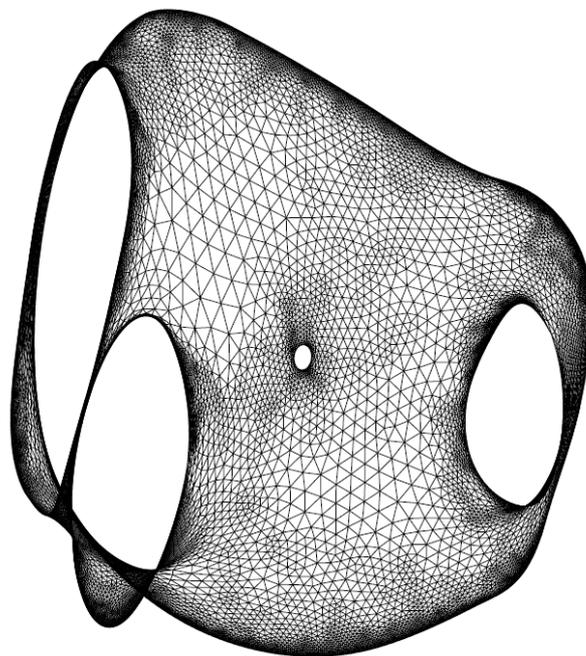


Fig.41 Grafo de 15606 nodos y 45878 enlaces ordenado espacialmente mediante el algoritmo de Koren, Carmel y Harel (2002).

Han y Ju (2003) también usan una aproximación multi-escala o multi-nivel, pero en vez de tratar conjuntos de nodos como uno sólo, lo que proponen es detectar nodos-pivote (pivot-nodes), es decir, aquellos nodos que resultarán clave en la ordenación final. El número de estos nodos-pivote está determinado por la densidad del grafo (enlaces y nodos). La posición del resto de nodos se calcula sobre su distancia con los nodos-pivote, y después se procede a refinar el resultado

reubicándolos respecto a los nodos de corte o *cutvertex* (aquellos nodos que si se eliminaran fragmentarían el grafo en diferentes componentes). Tal y como afirman los autores, este algoritmo es capaz de ordenar espacialmente un grafo de miles de nodos y enlaces en 10 segundos (Fig.42).

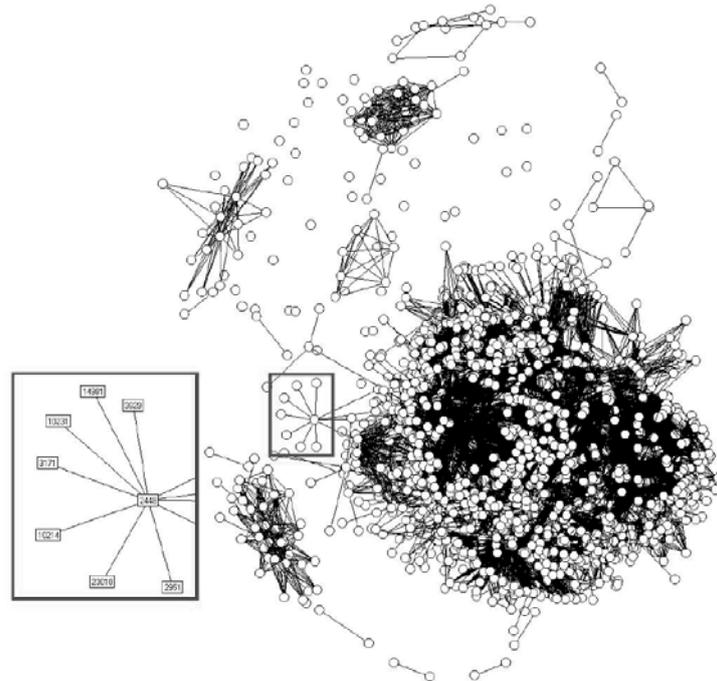


Fig.42 Grafo con 4242 nodos y 44387 enlaces. Fuente: Han y Ju (2003).

Aunque no cabe duda de la variedad de aplicaciones que todas estas propuestas pueden tener en diferentes ámbitos de la visualización gráfica - como la representación de grandes estructuras hipertextuales o de redes de interacciones proteína-proteína (Koren, Carmel, Harel; 2002) -, también es cierto que en muchas ocasiones las soluciones gráficas que ofrecen pueden no tener utilidad alguna desde la perspectiva humana de la visualización. Es decir, las personas estamos limitadas perceptual y cognitivamente en cuanto a la cantidad de información que podemos procesar, y cuando los grafos representados son de un gran tamaño, por eficaz que pueda resultar el algoritmo empleado, la representación gráfica resultante será percibida como una maraña de nodos y conectores difícilmente comprensible.

De hecho, en ocasiones resultará más recomendable utilizar algoritmos de ordenación espacial mucho menos complejos que los descritos en este apartado, pero cuyo resultado gráfico puede ser mucho más informativo y significativo para el usuario. Tal es el caso de la ordenación circular de los nodos del grafo (Fig.43). Con este método no se evitarán cruces entre enlaces ni se preservará la continuidad en los caminos entre nodos, pero nos permite detectar más fácilmente los nodos de mayor grado (con mayor número de enlaces directos). Esta forma de representación tampoco permite, no obstante, detectar si se trata de un grafo fragmentado (con más de un componente), o identificar qué nodos se encuentran más fuertemente relacionados entre sí. Una vez más, como venimos defendiendo en este trabajo, vemos que las decisiones sobre representación gráfica deben estar supeditadas a las tareas visuales que se pretendan satisfacer con la visualización.

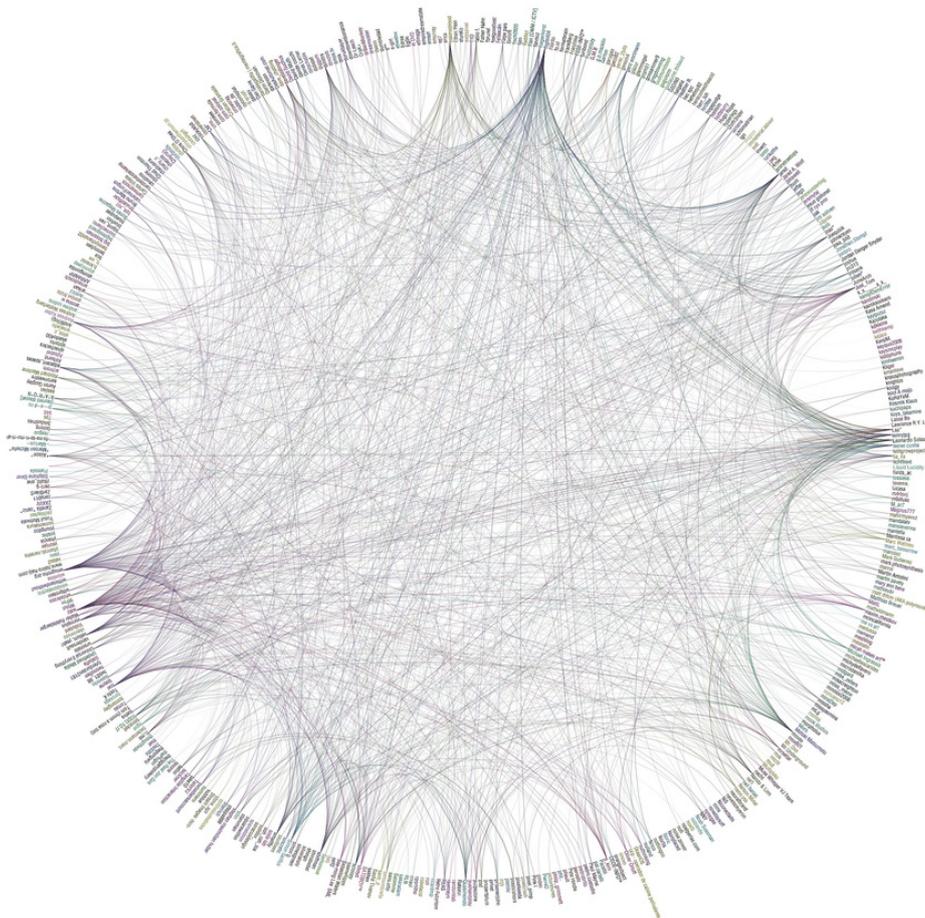


Fig.43 Visualización generada por el artista Andreas Koberle para representar parte de la comunidad Flickr del grupo Processing.org.

Otras técnicas propuestas en la literatura científica para disminuir la complejidad visual en grafos de gran tamaño, son aquellas destinadas a la ordenación espacial, esta vez no de los nodos, sino de los enlaces, como es el caso del ‘atado’ (bundling) de enlaces adyacentes (Holten; 2006). Esta técnica está ideada para aquellos casos en que es posible diferenciar, en los enlaces que componen el grafo, entre enlaces de inclusión (jerárquicos) y enlaces adyacentes (relacionales). Primero, considerando únicamente los enlaces de inclusión, se ordenan los nodos utilizando algún algoritmo tradicional de ordenación de grafos jerárquicos (como el de grafos radiales). A continuación, cada enlace adyacente se “dobla”, modelado como una curva B-spline, hacia la línea poligonal definida por el camino de los enlaces de inclusión entre los dos nodos. Como podemos ver en la figura 44, el resultado es una representación gráfica en la que la ordenación de enlaces disminuye significativamente la complejidad visual.

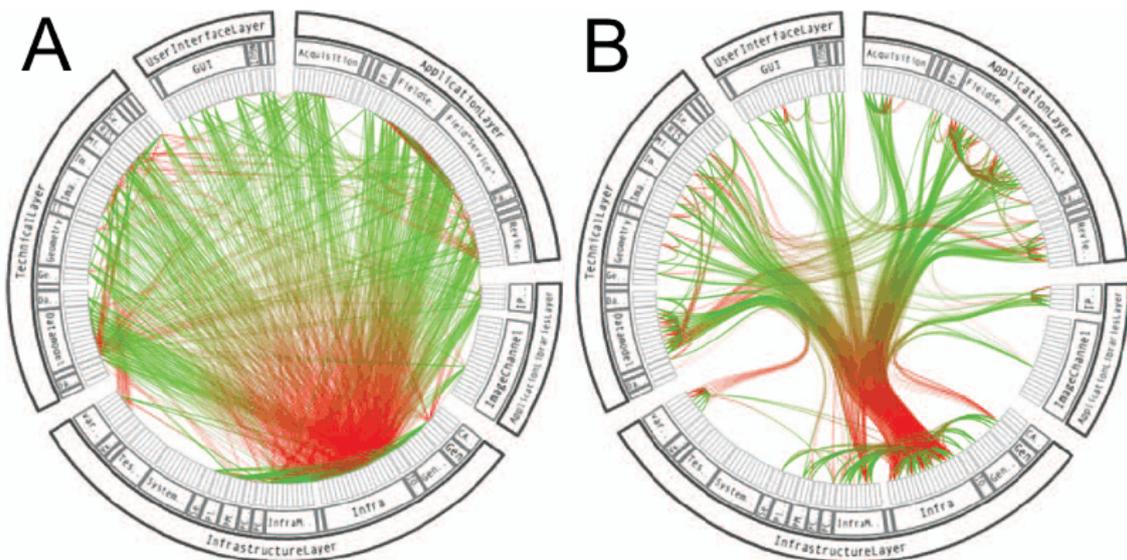


Fig.44 Grafo con los enlaces adyacentes sin atar (a), y con los enlaces adyacentes atados (b). Fuente: Holten (2006)

Recientemente, en la literatura científica se han propuesto modelos de ‘atado’ de enlaces para grafos de topología general. Cui et al. (2008)

proponen un conglomerado algorítmico que parte de la agrupación de aquellos enlaces con direcciones y longitudes similares. Sobre este *clustering* se crea una malla de puntos de control, con el fin de doblar y encauzar esos enlaces para que pasen por dichos puntos de control, y así reducir la densidad visual del grafo (Fig.45.a). Holten y Wijk (2009) proponen un método más costoso computacionalmente, pero de más intuitiva implementación. En este caso los autores emplean un algoritmo de tipo ‘force-directed’, pero en vez de sobre los nodos, sobre los enlaces. Como afirman los autores, con este método se minimiza la variación en la curvatura de los enlaces, facilitando su seguimiento visual (Fig.45.b).

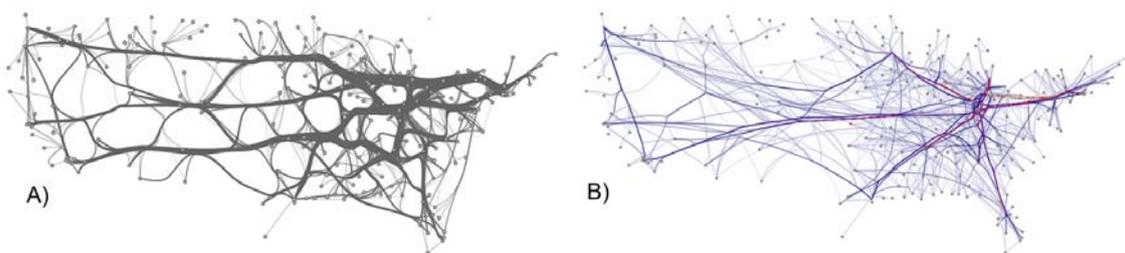


Fig.45 Atado de enlaces mediante el modelo de Cui et al. (2008) (a) y atado de enlaces mediante el modelo de Holten y Wijk (2009) (b).

3.7.2.2.7. Comparación

Una propuesta algorítmica para la ordenación espacial de grafos sólo puede ser valorada en función de su eficiencia y eficacia en la resolución de problemas de ordenación en contextos específicos, y de forma comparativa a otros algoritmos.

Por eficiencia nos referimos al tiempo requerido por el proceso algorítmico, determinado por su complejidad computacional. Por eficacia, en cambio, nos referimos a su capacidad para resolver satisfactoriamente el problema de ordenación, o en otras palabras, a la estética o legibilidad de la ordenación resultante.

La eficiencia no es un aspecto exento de importancia, pero el avance de la capacidad y velocidad de procesamiento del hardware inevitablemente disminuye su relevancia frente a la usabilidad visual, pues la evolución de la capacidad perceptual y cognitiva de los seres humanos no sigue el ritmo acelerado de la evolución tecnológica. Además, aún en el caso de la ordenación espacial en tiempo real de grafos de gran tamaño, donde la eficiencia puede cobrar mayor protagonismo, como vemos es un problema que puede afrontarse mediante el empleo de estrategias multi-escala o multi-nivel.

Aunque los trabajos en los que fueron publicados los algoritmos más significativos de ordenación espacial que hemos descrito incluían evaluaciones, en éstas se prestaba mayor atención a la eficiencia que a la eficacia del algoritmo, pues esta última sólo era valorada a través del análisis informal de la estética de los grafos o de comparaciones aisladas con algoritmos previos a través de la revisión subjetiva de galerías de ejemplos.

Este no es un hecho que deba extrañarnos si tenemos en cuenta que evaluar la eficacia de un algoritmo implica mayor complejidad e incertidumbre que evaluar su eficiencia. Primero porque esta eficacia está condicionada por el factor humano de la visualización, y segundo porque, a pesar del propósito general de estos algoritmos, su eficacia está también condicionada por la naturaleza del grafo a ordenar, en concreto por su tamaño, densidad de enlaces y topología.

El tamaño del grafo, entendido como el número de nodos que lo forman, resulta un factor condicionante, no sólo en la valoración de la eficiencia del algoritmo, sino también en la de su eficacia o capacidad para ofrecer resultados estéticos y visualmente usables. Por ejemplo, como veíamos, el algoritmo de Davidson y Harel (1989, 1996) aunque ofrece buenos resultados en grafos de pequeño tamaño, es incapaz de manejar satisfactoriamente grafos de más de 60 nodos.

Otro factor crítico es el de la densidad de enlaces del grafo, que podemos definir como el ratio entre el número de enlaces y el número

de nodos. Por ejemplo, en grafos poco densos, el algoritmo de Kamada y Kawai (1989), gracias a su forma de calcular la energía y tensión entre dos nodos sobre la distancia que hay que recorrer de uno a otro a través del grafo, ofrecería mejores resultados que el de Fruchterman y Reingold (1991), en el que el cálculo de las fuerzas de atracción sólo considera la ejercida por aquellos nodos directamente conectados. En cambio, la diferente forma de calcular la atracción entre dos nodos, no implicaría diferencias significativas en su aplicación sobre grafos con alta densidad de enlaces.

Aunque sin duda, el factor más decisivo sobre la eficacia de los algoritmos de ordenación espacial es la topología del grafo. Esto no sólo es aplicable a algoritmos de ordenación orientados a topologías específicas, sino también a los orientados a topologías generales, que muestran diferente eficacia en función de la topología concreta que presente el grafo. En este sentido, por ejemplo, el algoritmo de Kamada y Kawai (1989) es incapaz de resolver, por sí mismo, la ordenación espacial de redes fragmentadas.

Como decíamos, la eficacia de un algoritmo sólo puede ser valorada en relación a la eficacia de otros algoritmos en contextos similares (grafos de naturaleza similar). Es por esta razón que resultan de vital importancia los trabajos dedicados al estudio comparativo de conjuntos de algoritmos.

El primer estudio que afrontó este tipo de evaluación de forma exhaustiva fue el de Himsolt (1995). El autor utiliza una muestra de 100 grafos sobre los que aplica 7 algoritmos de ordenación espacial diferentes. Entre los criterios de evaluación analizados se encuentran el cruce entre enlaces, la densidad - entendida como el área ocupada por el grafo dividida por el número de nodos-, la variación del tamaño de los enlaces, la distancia entre nodos, la ortogonalidad de los enlaces y el tiempo destinado a la ordenación. A estos criterios se suma la valoración subjetiva de 20 investigadores y estudiantes sobre la estética de los grafos. Aunque los resultados no pueden considerarse definitivos, destacan los buenos resultados obtenidos en general por los algoritmos

de Kamada y Kawai (1989) y Fruchterman y Reingold (1991). Entre los criterios estéticos de más importante cumplimiento, el autor señala el cruce entre enlaces y la distribución uniforme de los nodos.

Brandenburg, Himsolt y Rohrer (1995) llevan a cabo un experimento similar, pero esta vez centrado en cinco algoritmos de ordenación espacial, todos orientados a la resolución de topologías generales. Los resultados indican que los cinco ofrecen, en términos generales, ordenaciones espaciales satisfactorias. Entre las diferencias detectadas, los autores señalan que el algoritmo de Tunkelang (1999) es una buena opción para aquellos problemas de ordenación que el resto no resuelve satisfactoriamente, aunque tiene un comportamiento poco predecible; el algoritmo de Fruchterman y Reingold (1991) es más rápido que el resto, pero sólo en grafos de pequeño tamaño (<60 nodos); y el algoritmo de Davidson y Harel (1989) es el más flexible, pero también el más lento. Los autores concluyen su trabajo con un ranking general de algoritmos recomendados, encabezado por el de Kamada y Kawai (1989).

Vismara et al. (2000) llevan a cabo un estudio aún más profundo, ya que evalúan comparativamente 27 algoritmos, utilizando un total de 25 criterios estéticos. No obstante, en lo que se refiere al grupo de algoritmos orientados a topologías generales, el estudio utiliza únicamente 3 heurísticas y presenta unos resultados muy similares a los obtenidos por los trabajos previos. Es decir, ningún algoritmo ofrece diferencias demasiado significativas, a excepción del algoritmo de Tunkelang (1989), que los autores recomiendan usar en aquellos tipos de grafos en los que fallen el resto.

Purchase (2000) afronta la comparación entre algoritmos desde una perspectiva diferente, en vez de a través de criterios estéticos, mediante un estudio con usuarios. Los resultados sugieren que los 8 algoritmos evaluados no presentan diferencias en el tiempo que emplean los participantes en completar las tareas, pero sí en el número de errores que cometen. En este sentido, los autores destacan los buenos resultados obtenidos por los algoritmos de Kamada y Kawai (1989), Tunkelang (1999) y Fruchterman y Reingold (1991).

Hachul y Jünger (2006) evalúan 6 algoritmos orientados a la ordenación de grafos de gran tamaño, sobre una muestra de 29 grafos. Además de medir su eficiencia, los autores evalúan su eficacia a través del análisis subjetivo de la calidad visual del resultado, concluyendo que esta eficacia varía enormemente en función de la topología del grafo testado.

Aunque los trabajos descritos suponen una valiosa herramienta en la tarea de determinar qué algoritmo resulta más eficaz y eficiente, sigue siendo una tarea de difícil solución, ya que dichos trabajos no relacionan de forma clara la eficacia de los algoritmos con factores contextuales concretos, como la topología del grafo o su densidad de enlaces. En todo caso, el hecho de que determinados algoritmos, como el de Kamada y Kawai (1989) o Fruchterman y Reingold (1991), obtengan en la mayoría de estudios valoraciones positivas similares, sugiere que debe tratarse de algoritmos capaces de resolver satisfactoriamente una mayor variedad de topologías, lo que explicaría en parte su gran popularidad en el área de la visualización de información. Además, este hecho los convierte en candidatos ideales para la evaluación comparativa de nuevos procedimientos algorítmicos de ordenación espacial, como el que presentaremos en el capítulo 4.

3.8. Interactividad de la interfaz

Todas las etapas descritas hasta el momento comparten un objetivo común, el de simplificar grandes volúmenes de datos a representaciones gráficas perceptual y cognitivamente abarcables. No obstante, como hemos visto en los apartados más recientes, es posible que la representación gráfica resultante presente una excesiva complejidad visual, por lo que deberemos aprovechar las posibilidades interactivas del medio para posibilitar al usuario manejar o controlar dicha complejidad.

Por interactividad de la interfaz nos referimos, en este apartado, a las posibilidades de acción que ofrece la interfaz con el fin de que el usuario

pueda manipular, explorar y transformar la representación gráfica con objetivos exclusivamente de visualización. Por tanto, quedan fuera del alcance de este trabajo aquellas posibilidades interactivas que no sirvan directamente a este propósito, como por ejemplo aquellas destinadas a la recuperación de información o la transformación o edición de los datos representados.

Entre los mecanismos interactivos que puede ofrecer una interfaz de visualización a fin de facilitar su comprensión, podemos diferenciar entre mecanismos de manipulación directa y de transformación visual interactiva. Los primeros permitirían al usuario modificar manualmente la posición u orientación de los elementos gráficos de la representación. Ya que estos mecanismos son ampliamente conocidos y están presentes en prácticamente cualquier interfaz gráfica de usuario, a continuación vamos a centrarnos en los mecanismos de transformación visual interactiva.

La transformación visual interactiva cumple el objetivo de facilitar al usuario la administración de su propia atención visual, ya sea reduciendo o distorsionando la información visual a voluntad propia. La investigación sobre mecanismos de transformación visual interactiva es anterior a la visualización de información como disciplina, ya que son mecanismos necesarios desde el mismo momento en que surge el problema de tener que presentar en una reducida pantalla de ordenador más información de la que ésta puede mostrar de forma simultánea.

Estos mecanismos pueden ser clasificados en cuatro grupos diferentes: *panning*, *zooming*, múltiples vistas y *focus+context* (Gutwin, Fedak; 2004). Estos grupos pueden a su vez clasificarse en mecanismos que ofrecen una vista parcial de la representación (*panning* y *zooming*), y aquellos que integran vista en detalle y vista global (múltiples vistas y *focus+context*). Además, los tres primeros grupos podrían ser considerados no orientados a la distorsión, mientras que el grupo de *focus+context* representaría un grupo de mecanismos orientados a la distorsión visual (Leung, Apperley; 1994).

3.8.1. Mecanismos no orientados a la distorsión visual

Por técnicas de *panning* nos referimos a aquellas que ofrecen al usuario la posibilidad de paginar o hacer '*scroll*' de la representación gráfica, mientras que por técnicas *zooming* a aquellas que posibilitan aumentar el tamaño o ver en detalle una parte de la representación. Ambas técnicas pueden ofrecerse conjuntamente, y comparten el problema de que por sí solas pueden resultar desorientadoras para el usuario, ya que sólo permiten ver simultáneamente una parte de la representación (Storey et al.; 1999).

Una posible solución para este problema es el empleo de técnicas de múltiples vistas o *detail+overview*, que como su nombre indica consisten en ofrecer desde la interfaz diferentes vistas de la misma representación visual. Por un lado se ofrece una visión global de la representación para orientar al usuario, y por otro una vista para su exploración visual en detalle. Igualmente se proporcionan mecanismos interactivos para especificar el nivel de detalle (*zoom*), así como para seleccionar qué parte de la representación es la que se quiere observar en detalle en cada momento.

Como ejemplo podemos observar en la figura 46 la aplicación que hicimos de esta técnica en el proyecto 'Atlas of Science' del grupo SCImago.

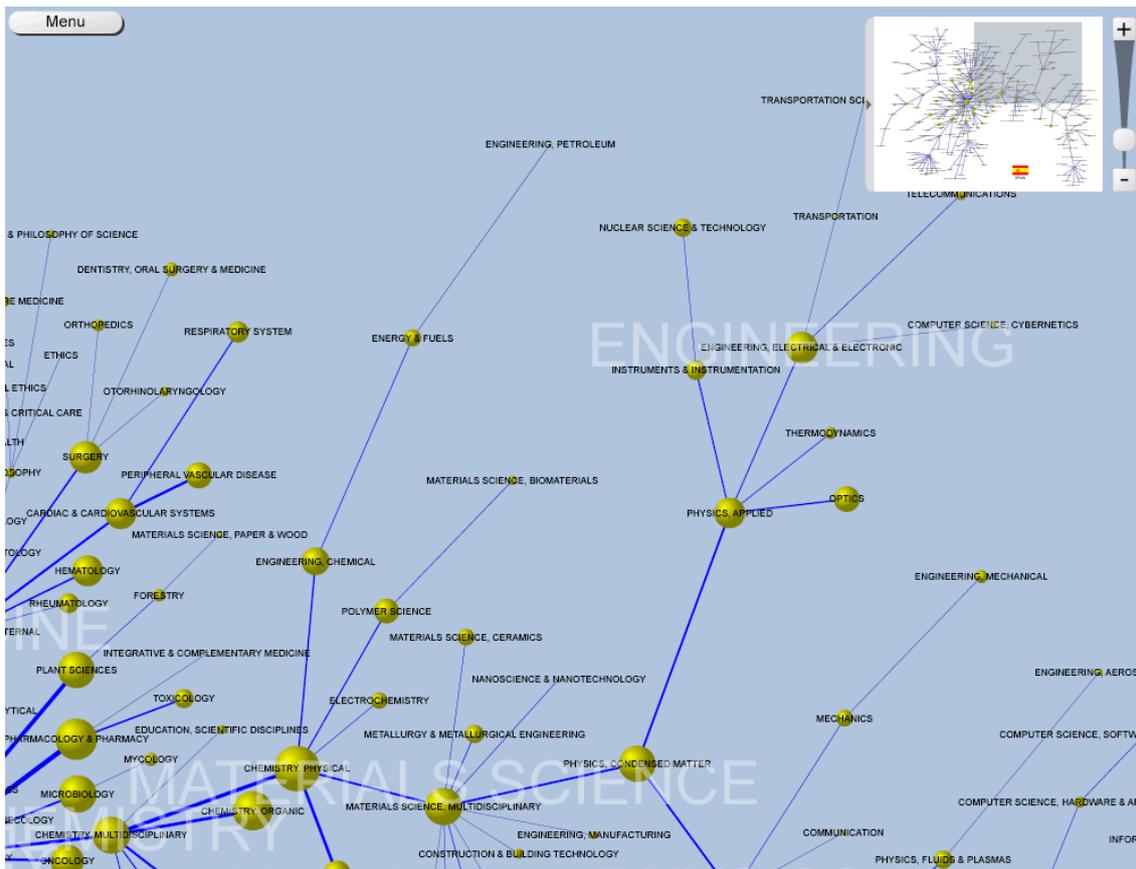


Fig.46 Aplicación de la técnica ‘detail+overview’ en el proyecto ‘Atlas of Science’ sobre una visualización en forma de grafo. Fuente: www.atlasofscience.net

3.8.2. Mecanismos orientados a la distorsión visual (Focus+Context)

Las técnicas *focus+context* pueden ser utilizadas como alternativa a las técnicas *detail+overview*, e incluso, en algunos contextos, como complemento (Hayama, Kanai, Kunifuji; 2003).

La idea consiste en ofrecer al usuario, a través de una única vista, tanto una visión en detalle como una visión global de la representación gráfica. Las premisas de las que parte esta técnica son las siguientes (Polanco & Zartl 2002):

- El usuario necesita visualizar tanto la información global (contexto) como la información en detalle (el foco de su visualización) de forma simultánea.
- La información que necesita visualizar en detalle es diferente a la que necesita para contextualizarla.
- Esos dos tipos de información deben combinarse en una única vista.

De acuerdo a estas premisas, el funcionamiento de las técnicas de *focus+context* consiste en distorsionar la representación visual, haciendo más visible el foco y minimizando el contexto. Para realizar esta distorsión, las técnicas de *focus+context* pueden hacer uso de dos procedimientos:

- Filtrado o elisión de información visual: ocultamiento o elisión de aquellas partes de la estructura visual de la representación de menor interés, hasta que necesiten ser visualizadas.
- Distorsión o deformación de información visual: alteración de las posiciones, formas y tamaños de los elementos visuales que conformar la representación.

Aunque variando en las funciones de magnificación que emplean para realizar esta distorsión visual (Leung, Apperley; 1994), podemos afirmar que las técnicas *focus+context* conceptualmente tienen en común el efecto visual que persiguen, denominado genéricamente de ‘ojo de pez’ (*fisheye*), en el que se magnifica el foco de atención y se minimiza la zona visual contextual o periférica.

A pesar de que existen propuestas previas conceptualmente similares como la vista bifocal (Spence, Apperley; 1982), posteriormente extendida por Mackinlay, Robertson y Card (1991), fue Furnas (1986) quien formalizó el concepto de ‘ojo de pez’ como tal, a través de su función de Grado de Interés o *DOI* (*Degree Of Interest*), que asigna a cada elemento visual un valor que representa el interés del usuario en visualizarlo.

$$DOI(x,y)=API(x)-D(x,y)$$

En la función, $DOI(x,y)$ es el grado de interés que para el usuario tiene el elemento x , cuando el elemento foco que se está visualizando es y . $API(x)$ es el valor global de la Importancia A Priori (*A Priori Importance*) que tiene el elemento x , y $D(x,y)$ la distancia existente entre el elemento x y el elemento focal y .

Furnas (1986) aplicaba esta función a estructuras textuales jerárquicas, asignando el valor de API en función del nivel jerárquico en el que se encontraba el nodo, y calculando el valor de la distancia en función del camino que habría que recorrer a través del árbol jerárquico para llegar de un nodo a otro. Por tanto, no ofrece ningún modelo matemático para su aplicación en otros contextos, como por ejemplo en el de la representación gráfica.

Existen multitud de aplicaciones basadas en el concepto de ‘ojo de pez’, que no sólo difieren en el contexto de aplicación, sino también en la forma y método. De hecho, como afirma Noik (1993), mientras que la propuesta original de Furnas estaba enfocada principalmente a la utilización de procedimientos de filtrado o elisión, muchas de las posteriores aplicaciones están basadas en procedimientos exclusivamente de distorsión o deformación visual.

En el contexto de las representaciones gráficas, Sarkar y Brown (1992) proponen un modelo matemático para la aplicación del efecto de ‘ojo de pez’ en representaciones de grafo, introduciendo dos posibles métodos de distorsión visual: transformación cartesiana y polar (Fig.47). Para su aplicación en grafos, los autores introducen variaciones sobre la función DOI original, midiendo la distancia entre dos nodos $D(x,y)$ a través del cálculo de la distancia euclídea entre ambos vértices en la red.

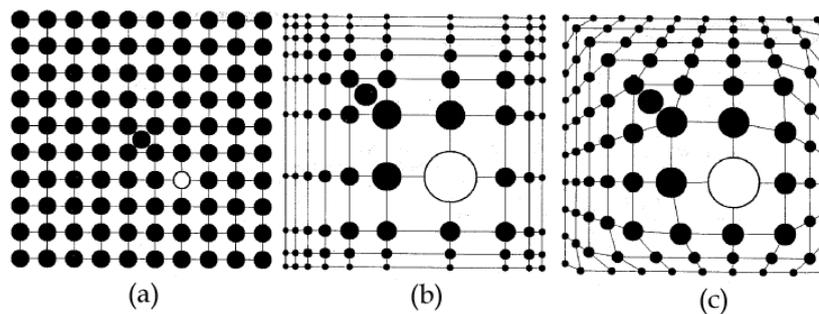


Fig.47 Ejemplos de grafo sin distorsión (a), distorsión cartesiana (b) y distorsión polar (c). Fuente: Sarkar y Brown (1992).

Un aspecto importante en la aplicación de estas técnicas de transformación visual en representaciones complejas, es la necesidad de preservación del mapa mental que el usuario adquiere en la visualización previa a la distorsión. Para preservar este mapa mental, una vez aplicado el efecto de distorsión, el usuario debería poder equiparar mentalmente la representación distorsionada con aquella que visualizaba antes de la distorsión. Para ello se deberían conservar propiedades del grafo como la dirección de las líneas, la topología, la ortogonalidad y las distancias entre elementos. Lógicamente, preservar todas estas propiedades es imposible desde el momento en que lo que se está realizando es precisamente una distorsión visual. Una posible solución la ofrecen Storey et al. (1997, 1999), quienes proponen un algoritmo para la aplicación del efecto ‘ojo de pez’ en grafos adaptable según las propiedades del grafo que quieran ser conservadas tras la distorsión, con el objetivo de preservar el mapa mental del usuario.

La técnica de ‘ojo de pez’ es muy popular en los estudios de visualización de información, un hecho que se puede constatar a través de los numerosos casos de aplicación (Fowler, Wilson, Fowler; 1992) (Orimo, Koike; 1999) (Rennison; 1994) (Chen; 1998) (Turetken, Sharda; 2004) (Yang, Chen, Hong; 2003) (Janecek, Pu; 2005) (Hassan-Montero, Herrero-Solana; 2006a).

3.8.3. Comparación

Como ya hemos adelantado, las técnicas de *panning* y *zooming*, aunque útiles en ciertos contextos, al no proporcionar una visión global de la representación no resultan del todo apropiadas para representaciones visuales complejas. De hecho, como se demuestra en varios trabajos (Schaffer et al. 1996) (North, Shneiderman; 2000) (Gutwin, Fedak; 2004), las técnicas de *detail+overview* y *focus+context* presentan una mayor efectividad demostrada en este tipo de interfaces visuales. Como reza la heurística de Plumlee y Ware (2006), el uso de vistas adicionales es necesario cuando las tareas de comparación visual requieren patrones de mayor complejidad que los que pueden almacenarse en la memoria visual operativa.

No obstante, la técnica *detail+overview* presenta algunos problemas como es la desconexión visual entre la vista en detalle y la vista global (Parker, Franck, Ware; 1998) (Storey et al.; 1999), que pueden ocasionar dificultades para apreciar de forma precisa la relación entre la zona visualizada en detalle y su contexto. Otro problema es que requiere por parte del usuario la integración mental de ambas vistas (Schaffer et al.; 1996) (Yang, Chen, Hong; 2003), lo que podría repercutir en una 'sobrecarga cognitiva' del usuario. Por estos motivos en determinados contextos la aplicación de técnicas de *panning* y *zooming*, por sí solas, ofrecen incluso mejores resultados que la de *detail+overview* en cuanto a eficiencia en la consecución de tareas por el usuario (Hornbæk, Bederson, Plaisant; 2002).

Aunque en base a esto podríamos deducir que las técnicas *focus+context* serían las más adecuadas para su empleo en interfaces de visualización, Storey et al. (1999) alertaban de la preocupante carencia de estudios de análisis y evaluación que determinaran la validez de estas técnicas de distorsión visual de forma empírica. Sin embargo, en esta última década se han publicado numerosos trabajos que aportan, basados en evidencias empíricas, más claridad sobre la eficacia de estas técnicas.

Yang et al. (2003), sobre una interfaz de visualización con forma de mapa de categorías y generado mediante el modelo de mapas auto-organizativos (SOM), aplican diferentes técnicas de transformación visual para comparar su rendimiento. Tras su evaluación a través de estudio con usuarios, los autores concluyen que tanto la técnica de ‘ojo de pez’ (basada en procedimientos de distorsión de información visual), como la técnica de fractales (Koike; 1995) (basada en procedimientos de filtrado de información visual), incrementan la eficacia en la visualización de grandes mapas de categorías frente a la no utilización de ninguna de ellas. En este tipo de mapas, la técnica de filtrado parece ofrecer cierta ventaja frente a la de distorsión; mientras que entre los métodos de distorsión aplicables en la técnica de ‘ojo de pez’, el método de transformación cartesiana es preferida por los usuarios frente al método de transformación polar.

Por otro lado, Baudisch et al. (2002) comparan el rendimiento de los usuarios frente a interfaces que utilizan los cuatro grupos de técnicas descritas, concluyendo que sobre representaciones gráficas estáticas las técnicas de *focus+context* ofrecen resultados significativamente superiores al resto.

Cockburn, Karlson y Bederson (2008), tras una exhaustiva revisión bibliográfica, concluyen que la efectividad de estos mecanismos está condicionada por la tarea interactiva que pretenden facilitar. En concreto, los mecanismos de múltiples vistas o *detail+overview* resultan más apropiados cuando el usuario busca la comprensión de la representación, mientras que las técnicas *focus+context* parecen más efectivas en tareas que implican obtener una visión global rápida de los datos o la exploración rápida de representaciones que presentan una estructura clara.

3.9. Evaluación de visualizaciones de información

El desarrollo de la visualización de información como área de estudio ha estado marcado desde sus orígenes por la propuesta de interfaces, lenguajes visuales, algoritmos y técnicas interactivas. Paradójicamente, no es hasta hace una década cuando la atención de los investigadores empieza a dirigirse hacia la necesidad de evaluación empírica y centrada en los usuarios de estas propuestas de visualización (Chen, Czerwinski; 2000).

Actualmente, la investigación en visualización de información se encuentra cada vez más interrelacionada con la Interacción Persona-Ordenador - tal y como evidencia el presente trabajo-, y los estudios sobre visualización de información se han visto enriquecidos, no sólo con los modelos y teorías de la IPO, sino también con sus metodologías de evaluación centradas en el usuario. Como consecuencia, cada vez resulta más habitual que los trabajos con propuestas de visualización incluyan resultados de su evaluación, además de que cada vez son más numerosos los trabajos enfocados a evaluar comparativa y empíricamente interfaces, mecanismos y modelos de visualización - como se ha podido comprobar en los apartados 3.7.2.2.7 y 3.8.3 -. Aún así, en la revisión exploratoria llevada a cabo por Ellis y Dix (2006), se muestra que el porcentaje de artículos que incluyen evaluación de la técnica propuesta es aún muy pequeño (20%), y en una gran parte de estos casos la evaluación está mal planteada o ejecutada.

El presente apartado no pretende ofrecer una guía metodológica exhaustiva sobre evaluación de visualizaciones de información, pero sí destacar los conceptos y técnicas de evaluación más relevantes, así como los problemas inherentes a la evaluación empírica de este tipo de productos interactivos y visualmente complejos.

3.9.1. Atributos de evaluación

El primer paso de la evaluación es definir y delimitar qué va a ser objeto de evaluación. Freitas et al. (2002, 2002b) diferencian tres aspectos evaluables de la visualización de información:

- Usabilidad de la representación visual, o expresividad
- Usabilidad de la interfaz, o de los mecanismos interactivos
- Usabilidad de los datos, o calidad de los datos

Aunque la distinción resulta lógica, ya que evaluar cada uno de estos aspectos requiere de enfoques diferentes, no coincidimos con los autores en considerar la tercera categoría propia del ámbito de la usabilidad, pues consideramos que se refiere a otro atributo de calidad del producto: su utilidad. De esta forma, en el presente trabajo partimos de la siguiente categorización de los atributos de calidad susceptibles de evaluación:

- Utilidad
- Usabilidad
 - Usabilidad visual
 - Usabilidad interactiva

3.9.1.1. Utilidad

Retomando las explicaciones sobre la Teoría de la Actividad del capítulo 2, podemos afirmar que las acciones de las personas están dirigidas por objetivos conscientes, y éstos a su vez determinados por motivos socialmente compartidos, que definimos como el vínculo entre las necesidades y el objeto sobre el que actuar. Por tanto, en el presente trabajo, entendemos por utilidad de una herramienta de visualización su capacidad perceptible de resolver y satisfacer objetivos y, consecuentemente, necesidades. Es decir, la utilidad de una herramienta estaría definida por el provecho, beneficio e interés que produce su uso; o en definitiva, por su valor de uso.

Llegados a este punto debemos aclarar que la utilidad de una herramienta de visualización es el atributo de calidad que en mayor grado condiciona su uso, popularidad y aceptación social. No debemos entender la utilidad como una propiedad universal, ya que no existen herramientas útiles o inútiles, sino herramientas que son percibidas útiles o no como mediadoras de acciones en actividades específicas por quienes comparten dichas actividades.

El pilar que sustenta la utilidad de una herramienta de visualización son los datos. La utilidad potencial de estos datos se encuentra inicialmente determinada por el análisis y selección que tienen lugar en la etapa de adquisición de datos (apartado 3.3). El éxito de esta etapa, como se describió, se encuentra condicionado tanto por el conocimiento sobre la actividad que ha originado los datos, como por el de la actividad en la que se contextualizará el uso de la herramienta de visualización.

Dado que las etapas del proceso de diseño posteriores a la adquisición tienen el objetivo de transformar esos datos, extraer datos implícitos y reducir su volumen, la utilidad de los datos se encuentra también condicionada por el resultado de este proceso. Es decir, si bien el objetivo general del proceso es el de prescindir de lo superfluo y extraer lo significativo, también es cierto que los errores que se puedan cometer durante éste podrían desembocar en un resultado distorsionado que no reflejara la realidad de los datos originales.

Uno de los mayores retos de la visualización de información como área de estudio es precisamente el de resolver el problema estratégico de la utilidad de las herramientas de visualización, buscando audiencias más allá de la frontera de usuarios ‘early adopters’, es decir, alcanzando la ‘early majority’. Como explica Plaisant (2004):

“Early adopters are visionaries who enjoy new tools and want to try out all the features. The early majority are pragmatists who want something that is reliable, proven, and solves real problems. One of our roles as information visualization researchers is to provide convincing evidence of utility, which

is difficult for any new technology, but presents specific challenges for information visualization.”

3.9.1.2. Usabilidad

Tal y como se describió en el segundo capítulo, la usabilidad es un anglicismo que significa facilidad de uso, y que como atributo de calidad puede ser medida a través de tres componentes principales (ISO; 1998) (Nielsen; 2003): eficacia, o número de errores que cometen los usuarios en tareas específicas; eficiencia, o tiempo que emplean para la consecución de dichas tareas; y satisfacción, o usabilidad percibida tras la realización de las tareas.

Dado que las herramientas de visualización de información presentan cualidades claramente distintivas frente a otras aplicaciones software, en su evaluación creemos oportuno diferenciar entre usabilidad visual y usabilidad interactiva como dos aspectos de la usabilidad que requieren metodologías y enfoques de evaluación propios (Freitas et al.; 2002b).

Por usabilidad visual nos referimos al grado en el que la representación gráfica facilita la consecución de acciones y operaciones visuales sobre los datos. Entendemos que la percepción visual no es un proceso pasivo, sino una acción dirigida por objetivos y formada por operaciones. Por tanto, consideramos la visualización de información como una acción cognitiva que requiere de acciones previas perceptuales y de las operaciones visuales consecutivas que las conforman, es decir, del uso visual de la representación gráfica.

Por usabilidad interactiva, en cambio, nos referimos a la facilidad de uso de aquellos mecanismos interactivos de la interfaz dirigidos a posibilitar la manipulación, transformación y exploración de la representación gráfica y los datos representados por ésta. Aunque esta usabilidad también abarca operaciones visuales, éstas cumplen una función diferente a aquellas condicionadas por la usabilidad visual, ya que son accesorias: vinculadas, pero no directamente, a la acción cognitiva de la

visualización. Es decir, la tarea visual de determinar las diferencias entre dos elementos gráficos (y por tanto entre las variables representadas), estaría condicionada por la usabilidad visual. En cambio, localizar visualmente el botón con el que poder hacer ‘zoom’, representaría una tarea visual secundaria, condicionada por la usabilidad interactiva.

Otros autores, como Huang, Eades y Hong (2008), proponen distinciones similares, al afirmar que el poder de un sistema de visualización viene determinado por 1) la efectividad de las representaciones gráficas estáticas para comunicar información y 2) la efectividad de los mecanismos interactivos para organizar estas representaciones de tal modo que faciliten el procesamiento de información y la adquisición de conocimiento.

3.9.1.3. Relación utilidad-usabilidad

Utilidad y usabilidad son dos atributos diferentes, que influyen de distinto modo en el uso de la herramienta. Mientras que la utilidad es el factor que motiva el uso, la usabilidad es un atributo “higiénico”, destinado a no desmotivar al usuario (Zhang, Dran; 2000). Esto significa que la utilidad es el principal factor que hace que las personas nos veamos motivadas a usar una herramienta, y la usabilidad la que posibilita que logremos nuestros objetivos e impide que la experiencia desencadene en un estado de frustración.

Ahora bien, aunque diferentes, utilidad y usabilidad son atributos mutuamente dependientes. Por un lado, la utilidad de cualquier producto depende de su usabilidad, ya que como afirman Dillon y Morris (1999) “la usabilidad representa el grado en el que el usuario puede explotar la utilidad”. Esto quiere decir que es la usabilidad de la herramienta la cualidad que determina que el usuario pueda percibir su utilidad y ser capaz de aprovecharla.

Por otro lado, la usabilidad sólo puede ser valorada en relación con la utilidad, pues “un producto o aplicación será usable en la medida en que el beneficio que se obtenga de usarlo (utilidad) justifique el esfuerzo necesario para su uso (aprendizaje, atención, tiempo...).” (Hassan-Montero, Ortega-Santamaría; 2009). Esto significa que la complejidad percibida de un proceso interactivo o visual estará condicionada por la recompensa final: por el grado de motivación del usuario que determine la utilidad de la herramienta.

A continuación describiremos las técnicas de evaluación más destacables en visualización de información, así como qué atributos de calidad están destinados a evaluar.

3.9.2. Test de usuarios

El mejor modo de evaluar una herramienta de visualización es poniéndola a prueba con usuarios reales. Los tests de usuarios, también conocidos como pruebas con usuarios o pruebas de usabilidad, son pruebas realizadas en laboratorio (entornos controlados) en las que se solicita a los participantes que realicen una serie de tareas predefinidas, y donde el evaluador registra el comportamiento del participante, mide su rendimiento (eficacia o número de errores, y eficiencia o tiempo empleado), su satisfacción (usabilidad percibida), e intenta interpretar su comportamiento y las métricas obtenidas.

Como vemos, el test de usuarios representa el método vertebral de la evaluación de usabilidad, ya que es esta prueba la que da sentido a la definición de usabilidad a través de la medición de los componentes que la conforman (eficacia, eficiencia y satisfacción). Tanto este método, como la visión de la usabilidad que de él se deriva, podemos encuadrarlos en el pensamiento científico reduccionista, cuya estrategia pretende generalizar resultados a partir de experimentos controlados en laboratorio, y donde la unidad de análisis es la tarea, específica y descontextualizada (Shneiderman, Plaisant; 2006).

Es precisamente el tipo de tareas que tendrán que llevar a cabo los participantes durante la prueba, lo que determina qué aspecto de la usabilidad pretende ser evaluado (usabilidad visual o interactiva). De este modo, cuando las tareas representen acciones y operaciones principalmente perceptuales y cognitivas sobre la representación gráfica, se perseguirá evaluar la usabilidad visual. En cambio, cuando las tareas sean complejas y requieran acciones concatenadas, incluidas motoras, y dirigidas al uso interactivo de la herramienta, se estará persiguiendo evaluar su usabilidad interactiva.

Dado que la tarea es la unidad básica de análisis en este tipo de pruebas, para evaluar la usabilidad visual de una interfaz de visualización resulta imprescindible que nos detengamos en analizar qué tipo de tareas pueden ser evaluadas a nivel perceptual. Wehrend y Lewis (1990) proponen una clasificación o taxonomía de tareas básicas e independientes del dominio que deben posibilitar las interfaces de visualización, clasificación que ha sido posteriormente revisada y extendida por otros autores (Morse, Lewis; 2000). Basándonos en estas taxonomías, podemos distinguir las siguientes tareas básicas:

- Localizar: Encontrar objetos previamente conocidos (y por tanto las variables representadas por estos objetos).
- Identificar: Encontrar elementos previamente desconocidos.
- Distinguir: Detectar diferencias entre dos o más objetos.
- Categorizar: Determinar a qué grupo o categoría pertenece un conjunto de objetos.
- Agrupar (“cluster”): Determinar si un conjunto de objetos forman parte de un mismo grupo.
- Distribución: Detectar patrones entre los objetos.
- Ordenar (“rank”): Determinar el orden, prioridad o importancia entre series de objetos.

- Relacionar: Detectar relaciones entre objetos y conjuntos de objetos.

Cualquier interfaz de visualización debería facilitar estas tareas básicas, a ser posible a nivel de representación gráfica, aunque también se podrían usar mecanismos interactivos como los descritos en el apartado 3.8. Por tanto, aunque estas tareas puedan ser usadas como unidad de análisis en la evaluación de la usabilidad visual con usuarios, también podrían formar parte de la evaluación de la usabilidad interactiva cuando para realizarlas sea necesario emplear mecanismos interactivos.

Entre las tareas de un nivel de complejidad superior, es decir, aquellas que ya dependen en mayor grado de la usabilidad interactiva que de la visual, y que requieren de mayor número de operaciones por parte del usuario, podemos enumerar las siguientes (Shneiderman; 1996):

- “Overview”: Obtener una visión general de los datos representados.
- “Zoom”: Ver en detalle una parte de la representación.
- Filtrar: Eliminar objetos sin interés de la representación.
- Detalles bajo demanda: Obtener datos específicos sobre un objeto o grupo de objetos, a petición.
- Relacionar: Obtener interactivamente el detalle de las relaciones entre objetos o grupos de objetos.
- Historial: Poder deshacer o rehacer acciones sobre la interfaz.
- Extraer: Obtener los datos representados en la visualización.

Las tareas descritas son relativamente fáciles de evaluar, ya que representan acciones básicas, donde el rendimiento del usuario es fácilmente comprobable y comparable midiendo el tiempo y errores que comete durante su ejecución. Sin embargo, conforme aumentamos la complejidad de las tareas; las diferencias entre sujetos, la diversidad de

comportamientos y la dificultad para aislar el rendimiento del usuario de otras variables no controlables, aumentan significativamente.

Una solución en estos casos es sustituir el enfoque de evaluación sumativa, por el de evaluación formativa. En este enfoque no resulta tan importante cuantificar la usabilidad de la interfaz como detectar posibles problemas de usabilidad que ayuden a mejorar su diseño. En estos test de usuarios “de alto nivel”, el evaluador observa y registra los problemas con los que se encuentran los participantes durante la ejecución de las tareas. Para comprender el comportamiento de los participantes se suele utilizar el protocolo 'think-aloud' o 'pensamiento en voz alta', que consiste en solicitar al participante que exprese verbalmente durante la prueba qué está pensando, qué no entiende, por qué lleva a cabo una acción concreta o duda sobre cómo actuar. Este protocolo tiene algunos inconvenientes que pueden distorsionar el resultado de la prueba, como el hecho de que contar lo que uno hace y por qué lo hace inevitablemente altera la forma en la que se hacen las cosas. Una alternativa es el protocolo 'think-aloud retrospectivo', en el que el participante primero realiza la tarea y, una vez finalizada, expresa verbalmente cómo recuerda que ha sido su proceso interactivo. No obstante, la precisión de estos protocolos es cuando menos cuestionable, dado que las personas no somos capaces de observar directamente nuestros procesos cognitivos por introspección (Nisbett, Wilson; 1977).

3.9.3. Eye-tracking

Como hemos visto, los test de usuarios permiten evaluar la usabilidad visual de una interfaz de visualización observando cómo los usuarios realizan tareas básicas previamente encomendadas, y midiendo el tiempo y errores que cometen. Sin embargo, en estas pruebas no se registra, y por tanto no es susceptible de análisis, una información que puede resultar de gran valor para comprender las causas reales del resultado de la prueba: el comportamiento visual del participante.

El concepto de *eye-tracking* (o seguimiento visual) hace referencia a un conjunto de tecnologías (hardware y software) que permiten, precisamente, monitorizar y registrar la forma en la que una persona mira una determinada escena o imagen, en concreto en qué áreas fija su atención, durante cuánto tiempo y qué orden sigue en su exploración visual (Hassan-Montrero, Herrero-Solana; 2007). Desde el punto de vista procedimental, las pruebas de *eye-tracking* resultan muy similares a los test con usuarios, ya que la única diferencia se encuentra en la tecnología usada para registrar el comportamiento del usuario. Puede considerarse, por tanto, una tipo de test de usuarios enfocado específicamente a la evaluación de la usabilidad visual por medio del uso de una tecnología ideada para tal fin.

La mayoría de sistemas de *eye-tracking* se basan en el uso de cámaras (eye-trackers) que proyectan rayos infrarrojos hacia uno o los dos ojos del participante, infiriendo la zona de la escena visual que el usuario se encuentra atendiendo en cada momento. Podemos diferenciar dos clases de sistemas de *eye-tracking*: aquellos que se colocan en la cabeza del participante, y aquellos que registran su movimiento ocular desde la distancia, normalmente ubicados y camuflados en el monitor. Estos últimos resultan menos intrusivos (Goldberg, Wichansky; 2003), pero no permiten la evaluación en contextos de uso donde el participante debe tener completa libertad para mover la cabeza.

Tras un breve proceso de calibración del sistema, el participante de la prueba puede dar comienzo a la realización de las tareas que le hayan sido encomendadas, tiempo durante el cual el sistema monitorizará y registrará continuamente su movimiento ocular: fijaciones y “sacadas”. Las fijaciones son periodos (200-600ms) de relativa quietud del ojo que posibilitan ver nítidamente la zona enfocada, mientras que las “sacadas” son los saltos o movimientos rápidos (30-120ms) que se producen entre una y otra fijación (Jacob; 1995).

Una vez finalizada la prueba, el software de *eye-tracking* debe permitir analizar los resultados. Para ello, suelen emplearse representaciones gráficas que resumen la ingente cantidad de información que cada

participante ha generado con su exploración visual. Para analizar el comportamiento visual de cada participante individualmente, se suelen utilizar representaciones gráficas de su recorrido visual en forma de grafo lineal, donde cada nodo identifica una fijación, el tamaño del nodo el tiempo de la fijación, y los conectores entre nodos el salto visual de una fijación a la siguiente. Para analizar de forma agregada el comportamiento visual de un grupo de participantes, se suelen emplear 'heatmaps' o mapas de calor, donde los colores de mayor intensidad señalan las zonas de la interfaz en las que los participantes han fijado su atención con mayor frecuencia (Fig.48).

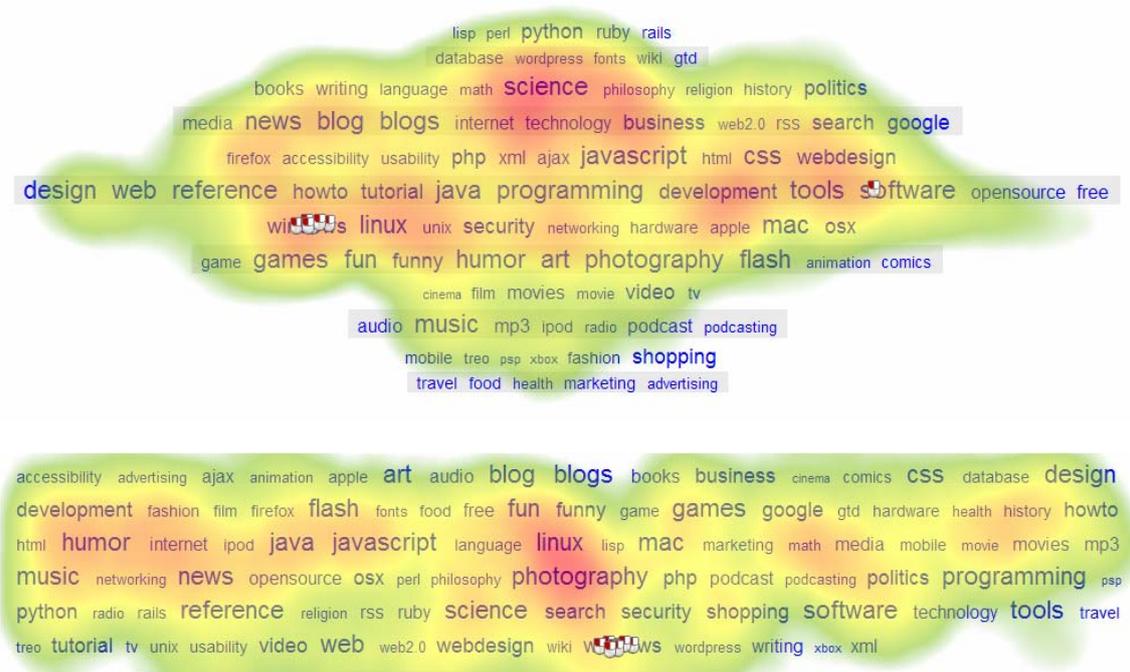


Fig.48 Resultados de una prueba con *eye-tracking* en forma de mapas de calor sobre dos representaciones de tipo Tag-Cloud.
Fuente: Hassan-Montero, Herrero-Solana y Guerrero-Bote (2010).

Aunque esta clase de tecnología no es tan novedosa como pudiera parecer, ya que el estudio del movimiento ocular tiene más de un siglo de historia (Jacob, Karn; 2003), no es hasta la década de los 90 cuando empieza a detectarse un número significativo de estudios relacionados con la evaluación de interfaces gráficas (Hassan-Montero, Herrero-Solana; 2007). En el caso concreto de las interfaces de visualización, a pesar de las atractivas posibilidades que esta tecnología ofrece para la evaluación de su usabilidad visual (Huang, Eades, Hong; 2008), actualmente el número de estudios que se publican sigue siendo muy marginal. Por esta razón en el presente trabajo hemos considerado de gran interés analizar de forma práctica el uso de esta tecnología con fines de evaluación, tal y como se describirá en el capítulo 4.

3.9.4. Evaluación heurística

No todas las técnicas de evaluación requieren de la participación de usuarios. Tal es el caso de los métodos de evaluación por inspección como la evaluación heurística, propuesta originalmente por Molich y Nielsen (1990).

En esta técnica varios expertos inspeccionan y analizan el diseño en busca de potenciales problemas de usabilidad, comprobando para ello el cumplimiento de principios de diseño usable (llamados principios heurísticos) previamente establecidos y fundamentados en evidencias científicas. Estos principios de diseño o ‘heurísticas’ son directrices que establecen requisitos que debe cumplir el diseño con el fin de facilitar su comprensión y uso por el usuario final.

Esta es una técnica de evaluación muy popular en el campo de la ingeniería de la usabilidad, debido principalmente a su bajo coste, así como a la sencillez de su procedimiento. De hecho, es una técnica que puede ser realizada por revisores no expertos y aún así ofrecer resultados satisfactorios, siempre que estos revisores cuenten con guías de evaluación suficientemente detalladas. Entre sus desventajas podemos destacar que se trata de una técnica que revela problemas de usabilidad “menores” (en comparación con otras técnicas, como los test de usuarios), o que incluso es posible que reporte falsas alarmas (González, Pascual, Lorés; 2006).

Numerosos autores han propuesto conjuntos de principios heurísticos o reglas de diseño que pueden ser empleadas como heurísticas (Schneiderman; 1986) (Nielsen; 1994c) (Tognazzini; 2003), y que podrían aplicarse en la evaluación de la usabilidad interactiva de herramientas de visualización, ya que describen principios comunes a cualquier clase de producto o software interactivo. No obstante, la compleja naturaleza visual e interactiva de las herramientas de visualización requiere de marcos de evaluación heurística específicos para este tipo de interfaces, ya que de no ser así el número de problemas de usabilidad (visual e interactiva) que pasarían desapercibidos para los revisores podría ser demasiado elevado. Además, como señalan Zuk et al. (2006), aún no está claro que el proceso y características propias de la evaluación heurística

en el contexto de la ingeniería de la usabilidad - como el número de evaluadores necesarios o el grado de especificidad de las heurísticas- sean igualmente válidas en el contexto de la evaluación de visualizaciones de información.

En un trabajo reciente, Lam (2008) realiza una exhaustiva revisión de trabajos que ofrecen evidencias empíricas de problemas de usabilidad interactiva en el contexto de herramientas de visualización. Todos estos problemas son estructurados por la autora en un marco de “costes de interacción”, formado por siete “costes” o problemas interactivos, y las heurísticas que se derivan:

- El coste de formar objetivos: Se debe evitar que el usuario se sienta perdido, facilitándole la decisión sobre qué subconjunto de datos explorar y evitando la sobrecarga de opciones en la interfaz.
- El coste de reconocer cómo alcanzar un objetivo: Se debe facilitar al usuario traducir su necesidad a operaciones sobre la interfaz. Los usuarios esperan que los mecanismos de interacción sean estándar, y por tanto familiares y reconocibles.
- El coste de los múltiples modos de interacción: Se debe facilitar al usuario traducir las operaciones de la interfaz en operaciones sobre su dispositivo de entrada (como el ratón).
- El coste físico de ejecutar secuencias de operaciones: Se debe evitar que las acciones físicas (mediante el dispositivo de entrada) resulten costosas para el usuario.
- El coste de la aglomeración visual: Se debe evitar que las operaciones interacción causen distracción perceptual en el usuario, como por ejemplo cuando en función del movimiento del ratón cambie el estado visual de la interfaz.
- El coste de interpretación de los cambios de estado de la interfaz: Se debe facilitar que, cuando la interfaz cambie en respuesta de una

acción del usuario, éste pueda, primero, predecir el cambio, y segundo, reconocer la relación entre ambos estados.

- El coste de comparar y evaluar cambios del estado de la interfaz: A menudo el usuario necesitará reflexionar sobre las diferencias entre estados de la interfaz o diferentes vistas en la misma, acciones que deben verse facilitadas interactivamente.

Como se puede comprobar, los costes de interacción descritos encuentran explicación teórica en los diferentes modelos de la teoría cognitiva descritos en el capítulo segundo de este trabajo: percepción visual, memoria, análisis de tareas y actividad motora.

Zuk et al. (2006) afirman que aunque en la literatura científica se han propuesto diversas listas de heurísticas para la evaluación de visualizaciones de información, son pocas las que tratan específicamente el aspecto visual (usabilidad visual) de estas visualizaciones. En realidad lo que se echan en falta son marcos integrados de evaluación heurística visual, no tanto criterios o principios de diseño fruto de la investigación empírica de los procesos perceptuales en el uso de visualizaciones de información.

Por ejemplo, en el apartado 3.7.2 (Algoritmos de ordenación espacial), se describían una serie de criterios estéticos deseables en representaciones de tipo grafo. En el apartado 3.7.1.2 (Semántica gráfica) se comentaba el grado de precisión que cada tipo de atributo visual tiene para codificar cada tipo de datos. Igualmente, en el apartado 2.3.1.1 (Percepción visual), se describían numerosas recomendaciones de diseño derivadas del estudio teórico de la percepción visual (color, atención visual, organización perceptual y reconocimiento de objetos). Todos estos criterios y principios teóricos pueden ser considerados heurísticas específicas de usabilidad visual, y por tanto ser utilizados en la evaluación de interfaces de visualización.

Aunque, como decíamos, no exista un esquema o taxonomía de evaluación heurística visual consensuado por la comunidad científica,

que ordene y sistematice todos estos criterios y principios, sí existen trabajos que proponen taxonomías para este tipo de evaluación, como la taxonomía de Freitas et al. (2002b):

- Limitaciones
- Complejidad cognitiva
 - Densidad de los datos
 - Dimensionalidad de los datos
 - Representación de información relevante
- Ordenación espacial
 - Localización de los objetos
 - Orden lógico
 - Oclusión
 - Orientación espacial
 - Representación de detalles
 - Contexto de referencia
- Codificación de información
 - Mapeo de información
 - Técnicas realistas
- Estado de transición
 - Tiempo de generación de la imagen
 - Orientación visio-espacial

Como señalan Freitas et al. (2002b), por limitaciones se refieren a aquellas visuales y geométricas impuestas por el área disponible y la complejidad cognitiva; la ordenación espacial condiciona la facilidad para localizar objetos; la codificación de la información la facilidad de interpretación; y el estado de transición la de percepción de cambios en la representación.

Uno de los aspectos positivos de los criterios o heurísticas de usabilidad visual en representaciones de tipo grafo (apartado 3.7.2), es que pueden ser medidos de forma automática. De hecho, como vimos en anteriores apartados, algunos algoritmos incluso integran en su procedimiento estos criterios, como era el caso del algoritmo de “Simulated Annealing” (apartado 3.7.2.2.4).

No obstante, la evaluación heurística de la usabilidad visual de los grafos presenta dos problemas: 1) No existen evidencias empíricas que justifiquen que todos estos criterios sean asumibles como axiomas (Ware et al.; 2002), y 2) algunos de estos criterios son incompatibles o excluyentes entre sí (Chen; 2004) (Zuk et al.; 2006).

Purchase (1998), mediante estudios con usuarios en los que se medía el tiempo y errores que cometían en la consecución de tareas, demuestra que hay suficientes evidencias empíricas de la importancia de criterios como “minimizar el cruce entre enlaces”, evidencias menos sólidas acerca de los criterios “minimizar el número de cambios de dirección de los enlaces” y “maximizar la simetría”, y no encuentran evidencias que sustenten la relevancia del criterio “maximizar el número de enlaces ortogonales”. En un experimento muy similar, Purchase, Carrington y Allder (2002) concluyen que los únicos criterios que influyen significativamente en el tiempo empleado en la consecución de las tareas son “minimizar el cruce entre enlaces” y “maximizar la simetría”, mientras que el número de errores cometidos durante las tareas sólo se ve afectado por los criterios “minimizar el número de cambios de dirección de los enlaces” y, una vez más, “minimizar el cruce entre enlaces”. Como vemos, de los criterios estéticos analizados por estos autores, evitar el cruce de enlaces parece demostrarse como el más relevante.

Por su parte, Ware et al. (2002) estudian el criterio “maximizar la continuidad”, solicitando para ello a los participantes del experimento que determinen el camino más corto entre dos nodos de un grafo. Los resultados demuestran que, al menos para esta tarea visual, dicho criterio tiene una importancia muy significativa.

En un trabajo reciente, Huang, Eades y Hong (2008), a través de diversos experimentos, detectan que criterios como el cruce entre enlaces influyen en el rendimiento y preferencias de los participantes, pero además descubren que la posición (central y superior) de los nodos del grafo tiene un significativo impacto en la percepción de la importancia de dichos nodos. Mediante el uso de *eye-tracking*, los autores descubren que, en tareas de seguimiento visual de caminos entre dos nodos, los participantes utilizan una estrategia de “línea geodésica”, es decir, que siempre intentan seguir los nodos más cercanos a la línea recta imaginaria entre nodo origen y destino, lo que sustenta la importancia del criterio “maximizar la continuidad”. Además sus resultados confirman que los cruces de enlaces dificultan la tarea de seguimiento visual, especialmente si el ángulo de corte tiene pocos grados.

Si bien los estudios descritos aportan diversas evidencias empíricas sobre la influencia que determinados criterios tienen en la usabilidad visual, no plantean directamente el problema de la incompatibilidad entre criterios. En el presente trabajo creemos que la única solución a este problema es ponderar la importancia que el cumplimiento de uno u otro tendrá en la representación, ponderación que no sólo debe basarse en evidencias empíricas sobre su influencia en la usabilidad visual, sino también en función de cuáles sean las tareas visuales que la representación gráfica pretenda soportar.

3.9.5. Métodos de evaluación profunda a largo plazo

Dillon (2002), como ya citábamos en el capítulo 2, afirma que las respuestas psicofisiológicas (sensoriales y motoras) se producen en márgenes inferiores a una décima de segundo, los procesos cognitivos se corresponden con márgenes de entre 0.1 y 10 segundos, y cualquier acción o comportamiento más duradero debe ser estudiado desde su dimensión sociológica.

El principal problema de las técnicas de evaluación con usuarios descritas hasta el momento es que, por su naturaleza de experimentos controlados en laboratorio, sólo permiten analizar comportamientos y reacciones “inmediatas” o de bajo nivel. Por tanto, no posibilitan el estudio de comportamientos más prolongados y socialmente condicionados, por lo que ni sirven para detectar problemas de usabilidad que sólo emergen en usos prolongados, ni tampoco, y más importante, permiten evaluar la utilidad de las herramientas.

Para entender por qué los métodos reduccionistas en laboratorios controlados no posibilitan evaluar determinados problemas de usabilidad ni la utilidad de las herramientas de visualización, primero debemos comprender que el propósito principal de la visualización de información es la comprensión o entendimiento (insight) (North; 2006). Como señala North (2006), esta comprensión se caracteriza por su naturaleza compleja, profunda, cualitativa, inesperada y vinculada a la relevancia de los datos. Yi, Kang, Stasko y Jacko (2008) identifican cuatro etapas del proceso de la comprensión: obtener una visión global del conjunto de datos foco de interés; ajustar el grado de abstracción y/o el nivel de selección de los datos; detectar patrones en forma de distribuciones, tendencias, frecuencias y estructura de los datos, ya sea por confirmación de hipótesis o por descubrimiento de conocimiento inesperado; y por último, relacionar o equiparar la información obtenida con el modelo mental del usuario.

El problema de los experimentos controlados es que se basan en tareas, que inevitablemente deben estar predefinidas por los evaluadores (impuestas a los participantes), deben ser breves (para posibilitar la comparación del tiempo empleado para completarlas), y deben ser muy específicas (las posibles vías de solución están también limitadas) (North; 2006). Por tanto, son pruebas que se basan en tareas descontextualizadas del entorno físico y social de los usuarios, y desvinculadas de la naturaleza inesperada, serendípica y socialmente condicionada del entendimiento o descubrimiento.

Para suplir las limitaciones de las pruebas con usuarios en laboratorio, Shneiderman y Plaisant (2006) proponen un nuevo método de investigación, que denominan “Estudios de caso a largo plazo, profundos y multidimensionales” (MILC: Multi-dimensional In-depth Long-term Case studies). El término multidimensional hace referencia al empleo combinado de diversas técnicas: observación directa (etnografía), entrevistas, encuestas y monitorización automática del uso de la herramienta. El término profundo se refiere al intenso compromiso de los investigadores con los usuarios estudiados, acompañándolos en todo el proceso. La expresión “a largo plazo” se utiliza para describir la naturaleza longitudinal del estudio, que comienza con la formación de los usuarios sobre el uso de la herramienta, hasta que éstos alcanzan el nivel de expertos. Y por último, la expresión “estudios de caso” hace referencia al informe detallado acerca de un pequeño grupo de individuos trabajando en sus propios problemas, utilizando la herramienta para sus propios objetivos en su entorno natural de trabajo. Como señalan los autores, los objetivos del método MILC son la mejora de la herramienta y la detección de principios y directrices de diseño para dichas herramientas; así como la consecución exitosa de los objetivos de los usuarios expertos, a través del uso de la herramienta.

Shneiderman y Plaisant (2006) resumen las principales directrices para llevar a cabo estudios mediante MILC:

- Focalizar la investigación en objetivos concretos y definidos.
- Identificar de 3 a 5 participantes, idealmente con objetivos y experiencia en el dominio de conocimiento variada.
- Documentar las características de la herramienta que será evaluada, especificando los cambios de diseño que experimente a lo largo del estudio.
- Identificar qué constituiría un éxito profesional para los usuarios. Es decir, cuál es su objetivo o motivación final.
- Establecer un programa para la observación y las entrevistas.

- Preparar la herramienta para que monitorice y registre su uso, siempre teniendo especial cuidado con la privacidad de los usuarios.
- Proporcionar un diario a los usuarios para que vayan anotando comentarios, problemas encontrados y objetivos logrados.
- Proporcionar entrenamiento en el uso de la herramienta a los participantes, hasta que alcancen el nivel de expertos.
- Llevar a cabo visitas y entrevistas con los participantes, indagando en qué herramientas se usan conjuntamente con la estudiada, qué conocimiento han adquirido a través de la herramienta, con quienes han colaborado y en qué tareas. Estas entrevistas son un momento perfecto para discutir acerca de lo que el participante haya anotado en su diario.
- Animar a los participantes a que usen la herramienta más adecuada para cada tarea, y que así no se ven obligados a usar necesariamente la herramienta foco de estudio para todos los casos.
- Modificar la herramienta tanto como sea necesario, de tal forma que proporcione las funcionalidades requeridas por los participantes durante el estudio.
- Documentar éxitos de uso y fracasos.

Valiati, Freitas y Pimenta (2008) describen tres estudios llevados a cabo mediante el método MILC, calificando los resultados obtenidos como muy positivos. Entre los descubrimientos alcanzados, destacan la identificación de numerosas nuevas funcionalidades requeridas por los usuarios y no soportadas por la herramienta original. Además, los autores observaron que los usuarios, en la mayoría de casos, utilizaban la herramienta con objetivos concretos, como medio para confirmar hipótesis definidas, pero raramente la usaban con propósitos generales o exploratorios. Sin embargo, en muchas ocasiones, la solución de estos objetivos iniciales llevaba a los usuarios a nuevos objetivos e inesperadas vías de exploración.

Aunque el método MILC ofrece información de gran valor, principalmente para identificar problemas de utilidad y usabilidad de la herramienta en contextos naturales de trabajo, no por ello resulta un método carente de problemas y limitaciones. Por ejemplo, Valiati, Freitas y Pimenta (2008) destacan la dificultad de reclutar participantes y el largo tiempo necesario para llevar a cabo estos estudios.

3.9.6. Problemas en la evaluación de interfaces de visualización

La evaluación de interfaces de visualización de información no es una tarea sencilla. Lieberman (2006), en una carta abierta con el expresivo título “The Tyranny of Evaluation”, presenta un alegato en contra del sector más “evaluacionista” de la Interacción Persona-Ordenador. Como argumenta el autor, los métodos de evaluación requieren controlar variables difícilmente controlables, como las tareas, la experiencia de los participantes o el estilo cognitivo. Zhai (2006) responde a esta carta con otra, titulada “Evaluation is the worst form of HCI research except all those other forms that have been tried”, parafraseando la conocida cita de Winston Churchill sobre la Democracia. El autor reconoce los límites de los métodos de evaluación, pero justifica su necesidad cuando se carece de modelos y marcos teóricos que justifiquen o validen la interfaz. Además, Zhai (2006) desmonta lo que considera ciertos malentendidos en relación con la evaluación empírica, como que los estudios empíricos son comparaciones sin sentido entre dos opciones, que solo existe un método de evaluación, que los resultados de evaluación se sobre-generalizan, o que como no todas las variables humanas son controlables, no tiene sentido la evaluación con usuarios.

Ellis y Dix (2006), en un trabajo más exhaustivo sobre estudios de usuarios en visualización de información, afirman que estos estudios tienen limitaciones y resultan complicados de ejecutar correctamente, pero que esta imagen negativa que tienen para muchos investigadores se

mitigaría con un conocimiento más preciso sobre ellos. Con este objetivo, los autores revisan varios casos de estudio, analizando los errores cometidos, e identifican numerosos problemas asociados a la evaluación con usuarios. Los autores sugieren que el mayor error al afrontar la evaluación es no entender la naturaleza generativa de estas herramientas de visualización, es decir, que no se trata de herramientas que en sí mismas tengan valor, pues sólo producen resultados en contextos determinados. Además, en la mayoría de trabajos de evaluación se utilizan enfoques de evaluación sumativos o formativos, cuando, precisamente por la naturaleza generativa de estas herramientas, se debería optar por enfoques exploratorios, enfoques que faciliten ver o descubrir aspectos desconocidos sobre nuestras ideas o el concepto de la herramienta.

Como queda patente en este capítulo, la comunidad de la Interacción Persona-Ordenador y visualización de información ve en los estudios empíricos de evaluación con usuarios la vía lógica para consolidar el área como disciplina científica, aunque este no es un camino exento de obstáculos. Por un lado, los experimentos controlados son difícilmente controlables, ya que, como resume Lieberman (2006), “no existe un estándar ISO para el ser humano”. Además, estos experimentos sólo llegan a alcanzar las interacciones y tareas más básicas e inmediatas, por lo que difícilmente pueden ofrecer una imagen exhaustiva de la experiencia de uso. Por otro lado, los enfoques de evaluación sumativos y formativos heredados de la psicología cognitiva, tienen difícil aplicación sobre herramientas de visualización de información, debido principalmente a la complejidad del propósito final de estas herramientas: la comprensión y el entendimiento de conocimiento subyacente a grandes volúmenes de datos. Este objetivo, esta transformación de información gráfica en conocimiento, sólo puede ser estudiado en directa relación con la actividad y contexto social en los que tiene lugar el uso de la herramienta; no a través de tareas básicas explícitamente impuestas a los sujetos del estudio en entornos de trabajo descontextualizados.

Métodos de evaluación como el MILC pueden superar algunas de las limitaciones propias de los experimentos controlados en laboratorio, ofreciéndonos información de gran valor sobre la utilidad y la usabilidad de las herramientas en contextos reales de uso. No obstante, también presentan problemas significativos, como el prolongado tiempo necesario para su ejecución, lo que puede eternizar la publicación de resultados de investigación.

Por todo ello, parece razonable que en esta área de investigación siga siendo norma natural la publicación de modelos de visualización de información no necesariamente acompañados de resultados de evaluación con usuarios. O en todo caso, no necesariamente usando enfoques de evaluación sumativos o formativos en laboratorio.

3.10. A modo de resumen

En el presente capítulo se ha propuesto un marco unificado de desarrollo de interfaces de visualización, estructurado de la siguiente forma: cuatro etapas destinadas al tratamiento automatizado de los datos (adquisición, transformación, extracción y reducción); una etapa de representación gráfica de la información; otra etapa de adición de interactividad; y una etapa, de ejecución cíclica, destinada a la evaluación de la usabilidad y utilidad de la herramienta.

El objetivo perseguido ha sido doble: servir a investigadores como medio para sistematizar el desarrollo de interfaces de visualización; y, como revisión bibliográfica, servir de medio para analizar y detectar qué etapas, técnicas, modelos y algoritmos aún son susceptibles de mejora, y por tanto requieren de mayor esfuerzo investigador.

Como diferencia a otros trabajos similares, en el presente marco se ha prestado especial atención a la importancia, en la adquisición de datos, del análisis social de la realidad que reflejan. En la etapa de representación gráfica se ha intentado ir más allá del análisis taxonómico de estas representaciones, analizando la sintaxis y semántica

que conforman su gramática gráfica, y relacionándola con los modelos teóricos sobre percepción visual descritos en el anterior capítulo. Además, se ha dedicado especial atención al tema de los algoritmos de ordenación espacial, pues consideramos juegan un rol principal en la usabilidad visual de las visualizaciones.

Otro de los temas que, en trabajos similares, han sido más desatendidos, es el referente a la evaluación de estas interfaces. En el presente capítulo se ha propuesto un esquema que diferencia entre atributos de usabilidad y utilidad, se han descrito las técnicas y métodos más relevantes de evaluación, y se ha analizado la compleja realidad de la evaluación con usuarios.

En resumen, el presente marco teórico-metodológico ha pretendido focalizar el proceso no tanto en aspectos tecnológicos como humanos, pues entendemos que las interfaces de visualización son artefactos cognitivos y sociales, cuya dimensión tecnológica sólo tienen sentido en armonía con las necesidades, motivaciones, objetivos, capacidades, contexto y naturaleza de sus usuarios.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA ALGORÍTMICA PARA LA ORDENACIÓN ESPACIAL DE GRAFOS

4.1. Introducción

Uno de los objetos de estudio en visualización de información que mayor interés despierta entre la comunidad científica dedicada a la bibliometría, es el de los mapas de la ciencia, que pueden definirse como la representación de un conjunto de elementos o entidades y de las relaciones existentes entre ellos (Klavans, Boyack; 2009). Los elementos pueden representar disciplinas, revistas científicas, categorías temáticas de las revistas, autores, artículos, instituciones, o cualquier otra unidad descriptiva de los procesos y estructura de la difusión y comunicación del conocimiento científico. Igualmente, existen muy diversos criterios sobre los que extraer la estructura relacional de estos elementos, como co-citación, co-ocurrencia de palabras clave, colaboración (co-ocurrencia de autores o instituciones en los mismos documentos), etc. Debido a las cualidades estructurales de estas redes, su forma más común de representación gráfica suele ser la de grafos, en los que las entidades se representan como nodos y sus relaciones como enlaces. Como indican Small y Garfield (1985), estos mapas sirven para representar la distribución espacial de áreas de investigación, que además ofrecen información adicional en forma de relaciones.

Aunque existen numerosos modelos de mapeo de la ciencia⁵, uno de los más destacables por su escala es el que Moya-Anegón et al. (2007) proponen en el contexto del proyecto “Atlas de la Ciencia” (Moya-

⁵ Una de las más exhaustivas recopilaciones de mapas de la ciencia es el proyecto “Places & Spaces” dirigido por Katy Börner (scimaps.org).

Aunque dedicado de forma más genérica a cualquier tipo de visualización de redes complejas, resulta también destacable la colección presente en el proyecto “Visual Complexity” dirigido por Manuel Lima (visualcomplexity.com).

Aneón, et al.; 2004). En este modelo de mapa se utilizan como unidades de análisis las categorías temáticas ISI-JCR, y la relación entre dos categorías viene determinada por el número de trabajos entre cuyas referencias coinciden artículos publicados en revistas pertenecientes a una u otra categoría (co-citación de categorías).

Como se puede observar en el mapa de la figura 49, las categorías temáticas se representan como nodos elípticos, cuya área viene determinada por el número de artículos publicados en cada categoría. Las relaciones de co-citación se representan como enlaces, cuyo grosor indica el grado o peso de la co-citación. Además, cada categoría se codifica con un color que identifica el área temática general al que pertenece, áreas que se extraen mediante análisis factorial.

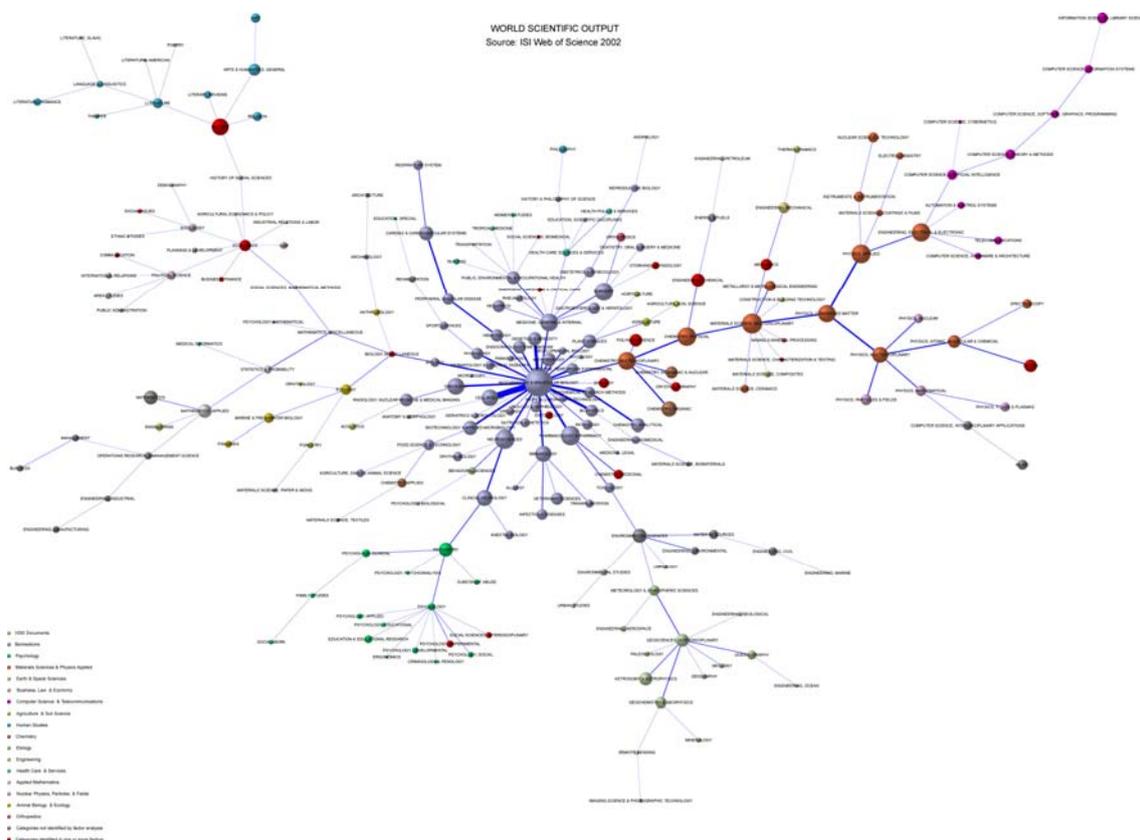


Fig.49 Mapa de la Ciencia del Mundo. Fuente: Moya-Aneón et al. (2007).

La generación automática en tiempo real de estos mapas presenta fundamentalmente dos problemas metodológicos. Por un lado, dado que

las redes de co-citación, por su naturaleza, presentan una alta densidad de enlaces que dificultaría la exploración visual de su representación gráfica, es necesario llevar a cabo un proceso de reducción de información. En este caso, los autores emplean como técnica de poda el método de *Pathfinder*, utilizando los parámetros $r=\infty$ y $q=n-1$ (véase apartado 3.6.2). Ya que este es un procedimiento que, debido a su coste computacional, puede resultar lento en redes de mediano y gran tamaño, han sido varios los trabajos enfocados a su optimización, motivados precisamente con fines de mapeo de la ciencia (Guerrero-Bote et al.; 2006) (Quirin et al.; 2008a, 2008b).

El otro problema metodológico se encuentra en el procedimiento de ordenación espacial del grafo (véase apartado 3.7.2). Dado el tamaño moderado de estas redes, el problema no es tanto de coste computacional como de usabilidad visual del resultado. Moya-Anegón et al. (2007) probaron con dos de los algoritmos más populares en visualización de información para la ordenación espacial de grafos de topología general (apartado 3.7.2.2), en concreto, el algoritmo de Fruchterman y Reingold (1991) y el de Kamada y Kawai (1989). Los autores se decantaron por el de Kamada y Kawai (1989), debido a la observación de mejores resultados en términos estéticos. No obstante, como señalan los mismos autores, fue necesario hacer uso de posteriores procedimientos automáticos de detección de solapamientos entre nodos y enlaces sobre la ordenación espacial resultante, con el fin de poder repositonarlos manualmente y facilitar la legibilidad del mapa.

Los pobres resultados obtenidos en el citado trabajo mediante el método de Fruchterman y Reingold (1991) tiene su explicación en la baja densidad de enlaces que presentan estas redes, lo que provoca que las fuerzas de repulsión entre nodos tengan mucha más influencia que las de atracción durante la ordenación espacial. Este desequilibrio no se produce en el algoritmo de Kamada y Kawai (1989), aunque no por ello el resultado puede considerarse óptimo.

El presente capítulo parte de la premisa de que los algoritmos de ordenación orientados a topologías generales pueden resultar poco

eficaces cuando se enfrentan a grafos de topologías específicas, como aquellas topologías no fragmentadas de apariencia jerárquica o semi-jerárquica (tan características de la poda de enlaces mediante la técnica de *Pathfinder*).

El presente capítulo describe la propuesta y validación de un procedimiento algorítmico para la ordenación espacial de grafos con baja densidad de enlaces y topología de apariencia jerárquica o semi-jerárquica. Que la presente propuesta se encuentre motivada por la generación automática y en tiempo real de mapas de la ciencia, no significa que sólo tenga aplicación en esta clase de representaciones, ya que en principio el único condicionante para su aplicación es de carácter topológico. No obstante, también se indagará sobre la aplicabilidad del procedimiento algorítmico propuesto en grafos de diferente topología.

4.2. Descripción de la propuesta algorítmica

4.2.1. Ordenación espacial de nodos

Cuando una red ponderada (con diferentes pesos asignados a sus enlaces) es podada mediante la técnica *Pathfinder*, utilizando para ello los parámetros $r=\infty$ y $q=n-1$, el grafo resultante suele presentar una topología característica. Esta topología puede ser considerada una jerarquía o semi-jerarquía sin nodo raíz, ya que a nivel semántico los enlaces no representan realmente relaciones jerárquicas, sino asociativas, y por tanto no hay ningún nodo que pueda considerarse raíz o padre de otro nodo.

Es cierto que estos grafos pueden ordenarse espacialmente mediante algoritmos orientados a topologías generales, pero el uso de estos algoritmos presenta dos problemas: 1) Por su orientación general, no necesariamente ofrecen los mejores resultados para grafos con topologías concretas; y 2) Al partir de configuraciones iniciales aleatorias, ofrecen como resultado ordenaciones espaciales variables.

En el presente procedimiento algorítmico se propone el uso de dos etapas diferentes, empleando una estrategia de “Simulated Sintering” (Grover; 1987), en la que partiendo de una configuración inicial de bajo coste (no iterativo) se pretende facilitar el posterior procedimiento de ordenación en detalle (iterativo). Aunque son varios los trabajos que han empleado esta estrategia en la ordenación espacial de grafos (Mutton; 2005) (Rodríguez-Tello, Hao, Torres-Jiménez; 2008) (Zhou, Huang; 2008), hasta donde conocemos ninguno ha utilizado el procedimiento propuesto en el presente trabajo. Las etapas que forman el procedimiento algorítmico son:

1. Algoritmo de ordenación inicial: El objetivo de esta etapa es partir de una configuración inicial estable que se encuentre lo más próxima posible a la configuración final deseable, y que dicha configuración inicial pueda alcanzarse sin un costo computacional significativo. Dada la apariencia jerárquica o semi-jerárquica de los grafos objeto de estudio, se ha optado por utilizar un algoritmo de ordenación radial (Bernard; 1981).

2. Algoritmo de refinamiento: Esta etapa tiene como función mejorar iterativamente la configuración inicial, con el doble objetivo de asegurar la usabilidad visual de la ordenación final, y de evitar que denote jerarquía entre nodos. En esta etapa proponemos el uso de una modificación propia del algoritmo de Fruchterman y Reingold (1991).

4.2.1.1. Algoritmo de ordenación inicial

Como se ha adelantado, en esta etapa se decidió utilizar un algoritmo de ordenación radial, que recordemos (apartado 3.7.2.1.1) consiste en posicionar el nodo raíz en el centro del espacio, e ir posicionando los nodos descendientes en circunferencias concéntricas.

Ya que las redes PFNet ($r=\infty$, $q=n-1$) no son estrictamente jerarquías, no presentan nodo raíz, por lo que necesariamente el primer paso es elegir, de entre los nodos que forman el grafo, cuál actuará como nodo raíz.

Para esto se utilizó un procedimiento de búsqueda del nodo central, que definimos como aquel nodo que presenta los caminos más cortos hacia el resto de nodos del grafo. Este procedimiento se divide en dos pasos:

1. Determinar el camino más corto entre cada par de nodos, para lo que se emplea el algoritmo de Floyd (1962).
2. Elegir aquel nodo en el que la suma de las distancias (caminos más cortos) respecto al resto de nodos, devuelva el menor de los valores.

Este es un procedimiento que conlleva cierta complejidad computacional, y que por tanto puede afectar a la eficiencia del algoritmo frente a grafos de gran tamaño. Otra opción mucho menos costosa sería elegir como nodo raíz aquel que presente mayor grado (número de nodos directamente enlazados), aunque este criterio, lógicamente, sólo ofrecería buenos resultados en aquellas clases de redes en las que los nodos de mayor grado tiendan a ocupar zonas centrales.

Una vez elegido el nodo central, se procede a definir la jerarquía de nodos. Para ello, todos los nodos directamente enlazados al nodo raíz (nivel j) son considerados sus hijos. El proceso se repite en consecutivos niveles de la jerarquía ($j+1, j+2, j+3...j+n$), teniendo en cuenta que desde el momento en que un nodo es considerado hijo de otro, no puede ser considerado hijo de ninguno más, aún cuando también presente enlaces a esos otros nodos. Recordemos que esta es una situación que podría darse cuando la topología de la red no tenga una apariencia estrictamente jerárquica.

Una vez definidos los roles jerárquicos entre nodos, es posible aplicar el algoritmo de ordenación radial. En este algoritmo, el nodo raíz se posiciona en el centro del espacio disponible, mientras que el resto de nodos se posicionan en circunferencias concéntricas, tantas como niveles de profundidad tenga la jerarquía y cada una de ellas con un radio mayor a la de su nivel ascendiente.

Todos los nodos, menos el raíz, se posicionan a lo largo del diámetro de la circunferencia del nivel al que pertenezcan. Para ello este diámetro se reparte entre los nodos del mismo nivel, aunque no de forma igualitaria, ya que el reparto estará condicionado por el número de nodos descendientes (directos o no) que posea cada nodo en la jerarquía. Es decir, aquellos nodos con mayor descendencia presentarán una distancia euclídea mayor respecto al resto de nodos del mismo nivel.

La forma en la que se calculan estas posiciones puede comprenderse de forma intuitiva a través de la figura 50. Como vemos, el nodo A es el nodo raíz, posicionado en el centro. El nodo B, ya que tiene mayor número de hijos que el resto de nodos de su mismo nivel jerárquico, se posiciona en el punto medio de un arco de mayor longitud. La longitud del arco se hereda y reparte entre sus hijos (entre ellos C), en este caso a partes iguales ya que ninguno tiene descendencia.

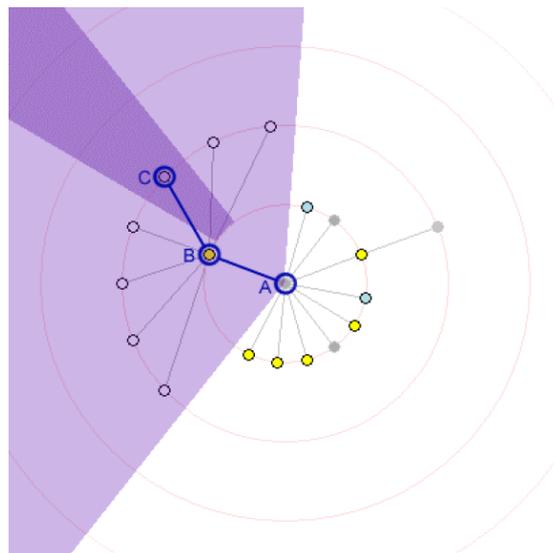


Fig.50 Ejemplo de grafo radial. Fuente: Yee et al. (2001).

Las diferencias de los radios entre circunferencias concéntricas pueden ser uniformes o decrecientes. En la presente propuesta hemos utilizado diferencias decrecientes, en base a la observación de que el mejor aprovechamiento del espacio disponible y la más uniforme distribución de los nodos (Fig.51) repercutían positivamente en la siguiente etapa de refinamiento.

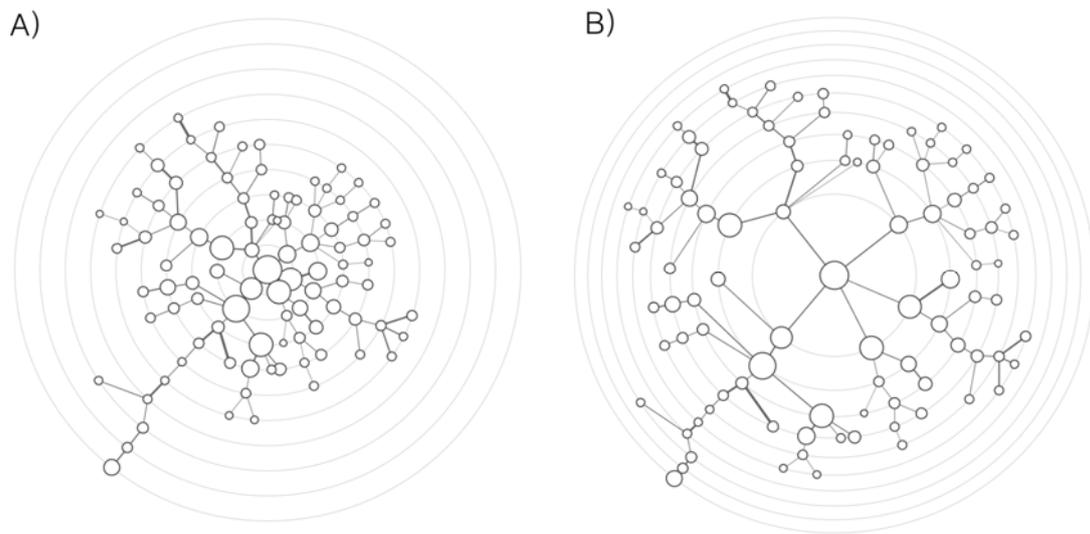


Fig.51 Ejemplo de grafo con ordenación radial, en el que los radios de las circunferencias concéntricas presentan diferencias uniformes (a) y diferencias decrecientes (b).

4.2.1.2. Algoritmo de refinamiento

Una vez obtenida la configuración inicial, se procede al refinamiento o mejora iterativa de dicha solución. El objetivo de esta etapa es doble. Por un lado se pretende que este reposicionamiento suponga una mejora significativa en términos de usabilidad visual, mejora que será valorada a través de criterios estéticos. Por otro lado, aunque en la primera etapa la red ha sido tratada como una jerarquía, la realidad es que a nivel semántico en este tipo de redes los enlaces no indican relaciones jerárquicas, sino aquellas relaciones asociativas más significativas (y por tanto no podadas). Esto significa que el nodo raíz actúa como tal, pero realmente no es un nodo más importante que el resto. Ya que la posición central en un grafo denota importancia (Huang, Eades, Hong; 2008), esta segunda etapa debería evitar dicha percepción.

En esta etapa se optó por usar un algoritmo de tipo “force-directed”, en concreto el de Fruchterman y Reingold (1991). Aunque también se consideró el uso del algoritmo de Kamada y Kawai (1989), como indican

sus autores, en este algoritmo la configuración inicial de partida no tiene demasiado impacto en la ordenación final, excepto en casos muy concretos. En cambio, en el algoritmo de Fruchterman y Reingold (1991) la calidad de la ordenación final es muy sensible a la configuración de partida, por lo que los propios autores incluso sugieren su uso como procedimiento de refinamiento en estrategias de “Simulated Sintering”.

Tras las primeras pruebas, se optó por realizar una serie de modificaciones sobre el algoritmo, con el fin de lograr mejores resultados. A continuación se describen dichas modificaciones.

4.2.1.2.1. Fuerzas

La forma de calcular las fuerzas de repulsión en el algoritmo original de Fruchterman y Reingold (1991) tiene como objetivo principal la uniforme distribución de los nodos en el espacio disponible, es decir, que las distancias entre todos los nodos, conectados o no, tiendan a ser similares. Si bien esta uniformidad, y la consecuente reducción de la posibilidad de solapamiento entre nodos, pueden ser consideradas heurísticas estéticas, la realidad es que al mismo tiempo provoca dos problemas: 1) Resulta más difícil percibir una estructura general cuando los nodos tienden a ocupar de forma uniforme el espacio disponible, y 2) Aumenta la probabilidad de cruce entre enlaces, como se demostrará en el apartado sobre evaluación de este mismo capítulo.

Para afrontar estos problemas, se ha modificado la forma de calcular el desplazamiento por repulsión de cada nodo. Recordemos el mecanismo original utilizado por el algoritmo:

```
for v in V {
  // cada vértice tiene dos vectores: .pos y .disp
  v.disp := 0;
  for u in V {
    if (u != v) {
      // Δ es el vector de la diferencia entre las
      // posiciones de los dos vértices
      Δ := v.pos - u.pos;
      v.disp := v.disp + (Δ/|Δ|) * fr(|Δ|);
    }
  }
}
```

```
}  
}
```

Sobre este procedimiento, lo único que ha sido modificado es el cálculo del vector $v.\text{disp}$, que recordemos indica cuál debe ser el desplazamiento del vértice v resultado de la suma de las fuerzas de repulsión ejercidas sobre él por resto de vértices. La función modificada es la siguiente:

```
 $v.\text{disp} := v.\text{disp} + (\Delta/|\Delta|) * f_r(|\Delta|) * (C1 + f_t(v) + f_g(v));$ 
```

Donde $C1$ es una constante cuyo objetivo es que, si $f_t(v)$ y $f_g(v)$ son igual a cero, no se anule el efecto de la fuerza de repulsión. $f_t(v)$ es una función que devuelve un valor normalizado entre 0 y 1, en el que 1 significa que v es el nodo con mayor tamaño del grafo, y 0 que es el de menor tamaño. $f_g(v)$ es también una función que devuelve un valor normalizado entre 0 y 1, pero en el que 1 indica que v es el nodo de mayor grado, y 0 el de menor grado. En otras palabras, la distribución de nodos dejará de ser uniforme dado que los nodos con mayor tamaño y grado ejercerán fuerzas de repulsión mayores sobre el resto que los nodos de menor tamaño y grado. Esta función además intenta reducir la probabilidad de solapamiento entre nodos.

Otro de los problemas del algoritmo original se encuentra en el cálculo de las fuerzas de atracción entre nodos, pues no tiene en consideración la densidad de enlaces del grafo, ya que sólo utiliza dos variables: la distancia entre nodos (d) y la distancia óptima entre nodos (k).

$$f_a(d) := d^2/k$$

El problema de esta función se hace latente principalmente en grafos con baja densidad de enlaces, ya que las fuerzas de atracción quedan en desventaja con las de repulsión. Para disminuir en la medida de lo posible este desequilibrio, se optó por realizar la siguiente modificación a la función original:

$$f_a(d) := (d^2 * N) / (k * \log(V))$$

Donde N es el número de vértices del grafo, y V el número de enlaces. De este modo, un mayor número de nodos implicará un aumento en las fuerzas de atracción entre ellos, mientras que un mayor número de enlaces disminuirá dichas fuerzas de forma no lineal. Si bien es cierto que esta es una solución seguramente susceptible de mejora sobre una base matemática más fundamentada, tras numerosas pruebas la función ha demostrado mejores resultados que la función original, principalmente en el caso de grafos con baja densidad de enlaces.

4.2.1.2.2. Optimización

Para optimizar el proceso del algoritmo, en esta implementación hemos utilizado una de las técnicas sugeridas por Fruchterman y Reingold (1991), quienes detectan que no tiene sentido calcular las fuerzas de repulsión ejercidas por todos los nodos del grafo, ya que se obtienen resultados muy similares si sólo son calculadas las ejercidas entre nodos cercanos. Como los autores proponen, en nuestra implementación sólo se calculan fuerzas de repulsión entre nodos cuya distancia sea menor que $2*k$, donde k es la distancia óptima entendida como la raíz cuadrada de la división del área disponible entre el número de vértices del grafo.

Pero además, tras diversas pruebas, llegamos a la conclusión de que tampoco resultaba necesario calcular todas las fuerzas de atracción ejercidas por nodos conectados. Por tanto, en la presente propuesta sólo son tenidas en cuenta las fuerzas de atracción entre nodos conectados cuya distancia es mayor que $k/2$. Aunque se probó el uso de márgenes mayores (como k , o $2*k$), se descartaron tras la observación de que influían negativamente en la calidad visual resultante. En cambio, el margen utilizado no sólo mejora la eficiencia, sino que incluso tiene un impacto positivo en la calidad visual, ya que cuando dos nodos (conectados) están demasiado próximos, el cálculo de sus fuerzas de atracción no cumple objetivo estético alguno.

Esta es una optimización que, por aplicable únicamente a fuerzas de atracción, tiene un mayor impacto en grafos con alta densidad de enlaces. No obstante esto no significa que, en términos generales, la presente propuesta resulte más eficiente que el algoritmo original de Fruchterman y Reingold (1991). Esto se debe a que, dado que en nuestra modificación las fuerzas de atracción tienen mayor peso, en cada iteración habrá mayor número de nodos cuya distancia sea menor a $2*k$, y por tanto será mayor el número de fuerzas de repulsión a calcular.

4.2.1.2.3. Marco

En el reposicionamiento de cada nodo puede ocurrir que las fuerzas de repulsión terminen provocando que el nodo quede fuera del espacio disponible para representar el grafo. Para evitar esta situación, Fruchterman y Reingold (1991) proponen una sencilla regla, en la que el marco del área actuaría como un muro infranqueable:

$$\begin{aligned}v.pos.x &:= \min(W/2, \max(-W/2, v.pos.x)); \\v.pos.y &:= \min(L/2, \max(-L/2, v.pos.y));\end{aligned}$$

Donde W es el ancho del área, L el alto, y $v.pos$ el vector de las coordenadas del nodo v .

De este modo, cuando en el desplazamiento del nodo éste queda ubicado, por ejemplo, en una coordenada x menor que la coordenada x del borde izquierdo del marco, el nodo es automáticamente reposicionado sobre dicho borde.

Este procedimiento puede ocasionar con bastante facilidad que queden componentes enteros adosados a los bordes del marco, solapándose los enlaces que unen sus nodos, tal y como podemos comprobar en la figura 52.

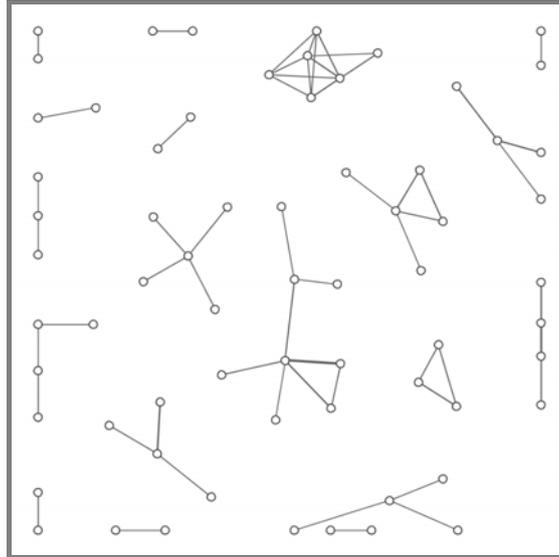


Fig.52 Ejemplo de ordenación espacial del algoritmo original de Fruchterman y Reingold (1991).

Para evitar esta situación se utilizó un mecanismo simple pero efectivo, propuesto recientemente por Zhou y Huang (2008). Este mecanismo permite que durante el proceso de ordenación los nodos se repositionen libremente, sin establecer un límite o borde para el área. Una vez finalizado el proceso, se redimensiona el área ocupada por los nodos para que se ciña al área disponible para su representación.

Como se puede observar en la figura 53, con este mecanismo el mismo grafo representado en la figura 52 presenta una ordenación más satisfactoria, principalmente por la ausencia de solapamientos entre enlaces.

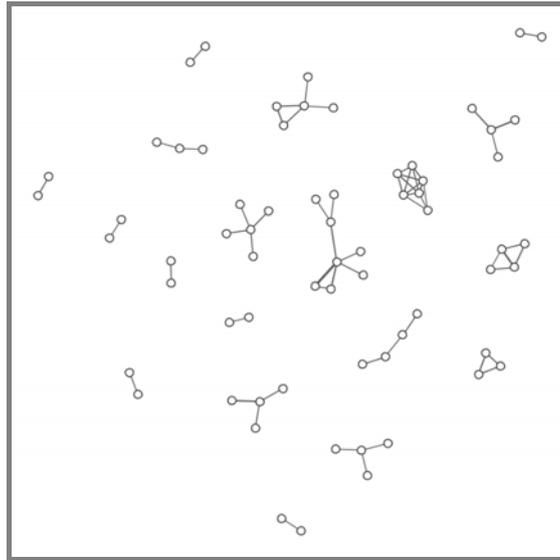


Fig.53 Ejemplo de ordenación espacial sin establecer un marco estático, sino redimensionando el área ocupada por los nodos para que se ciña al área disponible para su representación.

4.2.2. Ordenación espacial de enlaces

El objetivo de la técnica de *Pathfinder*, como ya se ha visto, es eliminar aquellos enlaces menos significativos de la red, para así obtener una versión reducida pero más comprensible, en la que únicamente se mantengan los enlaces más representativos. Es decir, es una técnica en la que la pérdida de información se justifica por la ganancia de otra información, o el famoso “less is more”.

No obstante, también es cierto que, dependiendo de los datos representados y de la actividad en la que se contextualice el uso de la visualización, esta simplificación de la información podría causar el efecto contrario, complicando o limitando su comprensión. Por esta razón en el presente trabajo también se plantea la propuesta experimental de un procedimiento que, sustentándose en la clasificación que la técnica de *Pathfinder* realiza entre enlaces primarios y secundarios, en vez de eliminar estos últimos, los ordene visualmente de forma que su representación gráfica no conlleve una excesiva aglomeración visual.

Para ello, se propone la aplicación del modelo de ordenación espacial de enlaces conocido como “atado” de enlaces (Holten; 2006) (apartado 3.7.2.2.6). Recordemos que esta técnica consiste en doblar los enlaces entre nodos, haciéndolos pasar por puntos o zonas comunes. Para determinar el camino o guía por el que pasarán los enlaces doblados, hasta la fecha se han propuesto tres métodos diferentes: 1) Cuando es posible diferenciar entre enlaces primarios y secundarios, los secundarios se doblan hacia la línea poligonal definida por los enlaces primarios (Holten; 2006); 2) Se calcula una malla de puntos de control por los que deben pasar los enlaces a doblar (Cui et al.; 2008); y 3) Se utilizan métodos ‘force-directed’ entre los enlaces a doblar (Holten, Wijk; 2009). La presente propuesta es similar a la técnica original utilizada por Holten (2006), pero con la diferencia de que también es aplicable a grafos generales, ya que la distinción entre enlaces primarios y secundarios no viene predeterminada, sino que se extrae con la aplicación del método *Pathfinder*.

Para modelar un enlace secundario entre dos nodos hacia la línea poligonal definida por el camino que habría que recorrer de uno a otro siguiendo enlaces primarios, el primer paso es determinar cuál es el camino más corto entre ambos nodos. Para esta tarea se propone el uso del algoritmo de Dijkstra (1959), ampliamente conocido en teoría de grafos.

Una característica de la presente propuesta es que, en vez modelar el enlace secundario como una curva *B-Spline*, se modela como una concatenación de curvas de Bézier. La razón es de carácter práctico, ya que aunque hay entornos de programación que ofrecen funciones específicas para dibujar curvas de Bézier, resulta muy difícil que ofrezcan funciones para curvas *B-Spline*.

Como es sabido, las curvas de Bézier tienen cuatro puntos: dos puntos de anclaje (extremos de la curva), y dos puntos de control que determinan la dirección de la curvatura. El procedimiento utilizado para concatenar

curvas de Bézier, dado un vector pos con tantos elementos como puntos tiene el camino de nodos a seguir, es el siguiente:

```

j:=0;
punto_anterior:=pos[j];

While (j<pos.longitud) {
  if (pos.longitud-j>4) {
    punto_medio:=F_punto_medio(pos[j+2],[pos[j+3]]);
    // Esta función devuelve el punto medio o equidistante
    // de la línea recta cuyos extremos son los dos puntos
    // que se le pasan como argumentos.

    Bezier(punto_anterior, pos[j+1],pos[j+2],punto_medio);
    // Esta función dibuja una curva de Bézier pasándole
    // 4 argumentos en este orden:
    // Punto de anclaje 1, Punto de control 1,
    // Punto de control 2 y Punto de anclaje 2

    punto_anterior:=punto_medio;
    j++;

  } else if (pos.longitud-j=4) {
    Bezier(punto_anterior,pos[j+1],pos[j+2],pos[j+3]);
    j++;
  } else if (pos.longitud-j=3) {
    Bezier(punto_anterior, pos[j+1],pos[j+1],pos[j+2]);
  } else if (pos.longitud-j=2) {
    Line(pos[j],pos[j+1]);
    // Dibuja una línea recta entre ambos puntos
  }
  j++;
}

```

En la figura 54 podemos ver dos ejemplos de aplicación del procedimiento en dos caminos diferentes de puntos:

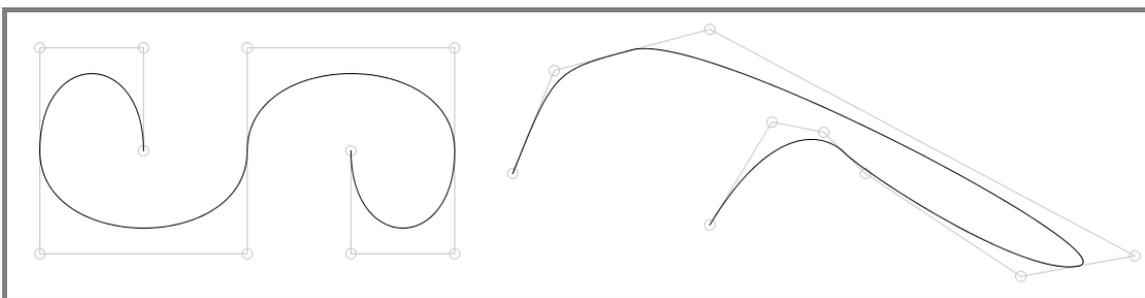


Fig.54 Ejemplos de atado de enlaces mediante concatenación de curvas de Bézier.

Para poder valorar la eficacia del procedimiento propuesto, en la figura 55 se presentan tres vistas de un ejemplo real de grafo. Como se puede observar, la técnica de “atado” de enlaces propuesta (C) consigue una representación menos aglomerada visualmente que la versión sin

ordenación (A). Además, añade información respecto a la versión podada (B), como la densidad de interconexiones de algunas zonas del grafo, lo que en determinadas redes puede resultar muy clarificador para detectar y comprender patrones relacionales.

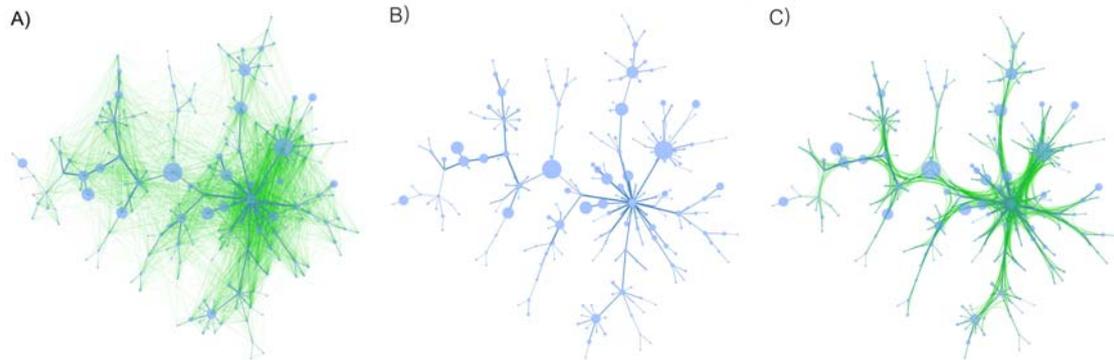


Fig.55 Grafos donde los enlaces primarios (azul) y secundarios (verdes) se representan mediante líneas rectas (a); donde sólo se representan los enlaces primarios (b), y donde los enlaces secundarios se ordenan mediante la técnica de “atado” propuesta (c).

No obstante, en este tipo de grafos altamente interconectados, podría resultar de gran utilidad que, como adición al atado de enlaces, se ofrezcan mecanismos interactivos de “detalles bajo demanda”. Por ejemplo, cuando el usuario sobrevolara un nodo, se podrían hacer desaparecer del grafo todos aquellos enlaces secundarios que no estuvieran vinculados al nodo focal, tal y como podemos ver en el ejemplo de la figura 56.

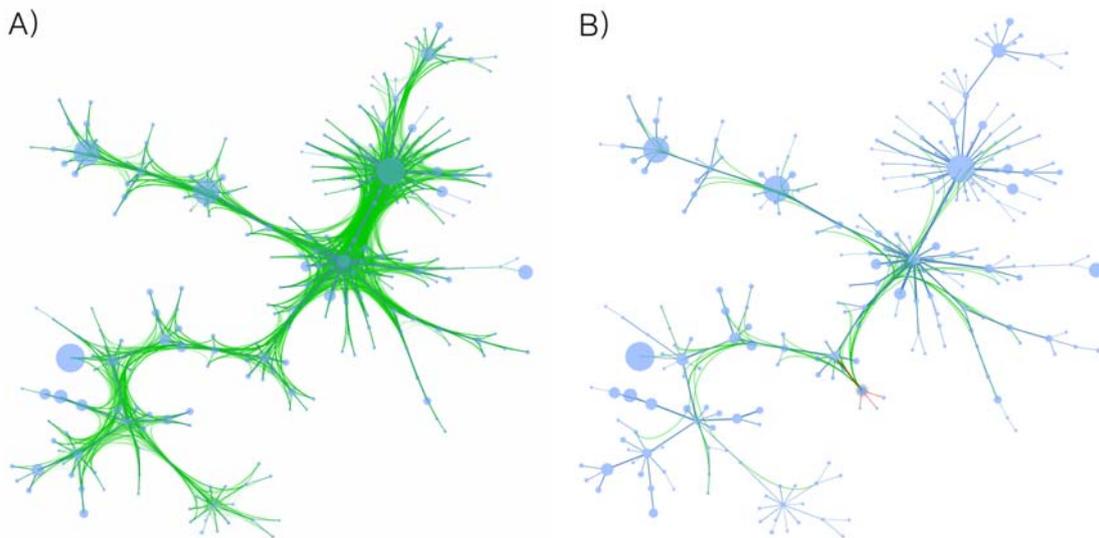


Fig.56 Grafo con todos los enlaces secundarios representados (a), y donde únicamente los enlaces secundarios que parten del nodo focal, son representados (b).

Aunque esta técnica de ordenación presenta prometedoras posibilidades, también es cierto que aún son necesarias futuras investigaciones que validen empíricamente su usabilidad visual. No podemos eludir que esta forma de representar enlaces, atenta directamente contra algunos criterios estéticos en grafos, como son “minimizar el número de cruces entre enlaces” o “minimizar el número de cambios de dirección de los enlaces”.

4.3. Evaluación

Como se argumentó en el capítulo tercero, la evaluación en visualización de información es una tarea compleja, debido a los diversos problemas conceptuales y metodológicos que plantea, lo que incluso puede llegar a justificar que en esta área de investigación resulte natural la publicación de trabajos que no ofrezcan evaluación empírica de sus resultados.

No obstante, ya que los procedimientos algorítmicos propuestos en este capítulo tienen como objetivo final mejorar la usabilidad más inmediata, facilitando tareas visuales y cognitivas básicas, el presente trabajo

formaría parte de aquellos casos en los que la evaluación empírica no sólo es deseable, sino incluso ineludible.

La evaluación se ha dividido en dos experimentos diferentes:

- **Evaluación heurística:** Se lleva a cabo una evaluación heurística de la eficacia del procedimiento algorítmico propuesto para la ordenación espacial de nodos. Para ello se comprueba el grado de cumplimiento de diferentes criterios estéticos (cruce entre enlaces, continuidad entre enlaces y solapamiento entre nodos) sobre una muestra de 42 grafos. Los resultados se comparan a los obtenidos por diferentes algoritmos de ordenación espacial. Además de los criterios estéticos, la eficiencia (tiempo requerido) del algoritmo también es evaluada comparativamente.
- **Estudio con usuarios:** este segundo experimento pretende indagar en el impacto que diferentes criterios estéticos tienen en la usabilidad visual de los grafos. Para ello se lleva a cabo un estudio con usuarios, utilizando tecnologías de *eye-tracking* para registrar el comportamiento visual de los participantes.

Como se puede comprobar, los experimentos se centran únicamente en la propuesta algorítmica de ordenación de nodos. La evaluación empírica del procedimiento de ordenación de enlaces (apartado 4.2.2) se pospone a trabajos futuros, ya que la propuesta aún se encuentra en una fase temprana de investigación.

4.3.2. Experimento 1: evaluación heurística

El objetivo de este primer experimento es validar comparativamente la eficacia y eficiencia del procedimiento algorítmico propuesto para la ordenación espacial de nodos, a través de la evaluación automática de heurísticas estéticas y del tiempo destinado por el algoritmo para el finalizar el proceso.

4.3.2.1. Método y materiales

4.3.2.1.1. Muestra

Para el presente experimento se utilizó una muestra de 42 grafos, compuesta por redes extraídas de ejemplos reales, en ocasiones modificadas automáticamente para adaptarlas a los requisitos del experimento. La tabla2 resume las características topológicas más significativas de los grafos utilizados.

Nombre del grafo	Nº de nodos	Nº de enlaces	Enlaces ponderados	Nodos ponderados	Densidad de enlaces	Alta densidad	Fragmentado	Grupo
net1	53	52	•	•	1			A
net2	27	349	•		12,963	•		B
net3	272	24509	•		90,110	•		B
net4	73	114	•	•	1,575	•		B
net5	80	79	•		1,000			A
net6	95	85	•	•	0,905		•	C
net7	95	94	•	•	1,000			A
net8	252	251	•	•	1,000			A
net9	258	257	•	•	1,000			A
net10	218	217	•	•	1,000			A
net11	66	55	•		0,848		•	C
net12	700	1573	•		2,249	•	•	C
net13	88	88	•	•	1,011			A
net14	147	146	•	•	1,000			A
net15	240	239	•	•	1,000			A
net16	307	1123	•	•	3,661	•		B
net17	234	675	•	•	2,889	•		B
net18	277	279	•	•	1,011			A
net19	27	26	•	•	1,000			A
net20	332	2126	•		6,407	•		B
net21	332	332	•		1,003			A
net22	244	243			1,000			A
net23	128	127			1,000			A
net24	39	170	•		4,385	•		B
net25	1022	1021			1,000			A
net26	47	302			6,447	•		B
net27	144	264			1,840	•		B

net28	56	97			1,750	•		B
net29	327	337			1,034			A
net30	131	641			4,901	•		B
net31	63	62			1,000			A
net32	511	510			1,000			A
net33	511	510			1,000			A
net34	350	349			1,000			A
net35	100	99	•	•	1,000			A
net36	65	64	•	•	1,000			A
net37	53	52	•	•	1,000			A
net38	94	93	•	•	1,000			A
net39	66	65	•	•	1,000			A
net40	381	380	•		1,000			A
net41	79	3081	•		39,013	•		B
net42	79	78	•		1,000			A

Tabla 2 Características de la muestra de grafos utilizada en el experimento 1.

Además del número de nodos y enlaces que componen cada grafo, la tabla 2 indica si los enlaces y/o los nodos están ponderados, es decir, si tienen asignados diferentes pesos. En la columna con el encabezado “Densidad de enlaces” se presentan los valores resultado de aplicar la siguiente función:

$$Densidad = (\text{Número de enlaces} + 1) / \text{Número de nodos}$$

La razón por la cual en la función se suma 1 al número de enlaces es para que, en grafos no fragmentados (un único componente), la densidad mínima posible sea siempre igual a 1. En estos casos, la topología del grafo tendría la apariencia de una jerarquía pura.

Los grafos de la muestra han sido clasificados en tres grupos diferentes (Fig.57), en función de sus propiedades topológicas, cuyos resultados de evaluación serán analizados separadamente:

- Grupo A: Grafos no fragmentados con baja densidad de enlaces (densidad < 1,2). Grupo compuesto por 27 grafos.

- Grupo B: Grafos no fragmentados con alta densidad de enlaces (densidad > 1,2). Grupo compuesto por 12 grafos.
- Grupo C: Grafos fragmentados. Grupo compuesto por 3 grafos.

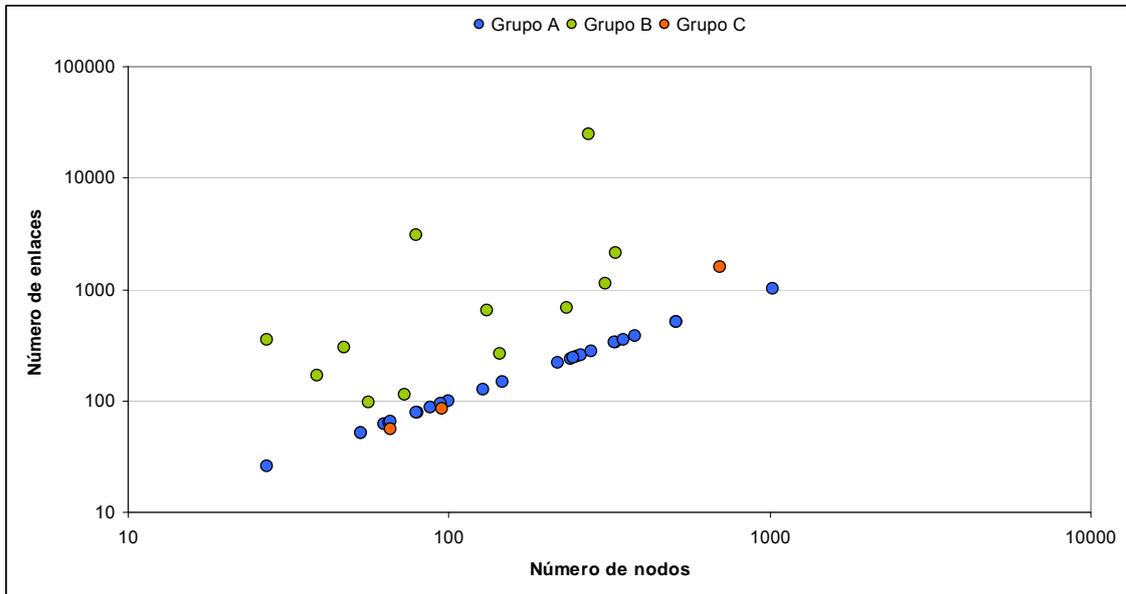


Fig.57 Relación entre número de nodos y de enlaces en los grafos de la muestra (escala logarítmica).

4.3.2.1.2. Algoritmos

Sobre los grafos que componen la muestra, se han aplicado los siguientes procedimientos algorítmicos de ordenación espacial de nodos:

- RAD: Algoritmo de ordenación radial, con procedimiento de selección de nodo raíz (descrito en el apartado 4.2.1.1)
- FR: Algoritmo original de Fruchterman y Reingold (1991) (descrito en el apartado 3.7.2.2.3). Se utilizó un número de iteraciones predefinidas (=50).
- FRM: Modificación propuesta en el presente trabajo del algoritmo FR (descrito en el apartado 4.2.1.2). Se utilizó un número de iteraciones predefinidas (=50).

- KK: Algoritmo original de Kamada y Kawai (1989) (descrito en el apartado 3.7.2.2.2). Dado que los autores no ofrecían en su trabajo original un método concreto para determinar en qué momento el algoritmo ha alcanzado el estado de mínima energía y por tanto puede darse por finalizado el proceso, en el presente trabajo hemos utilizado como condición de finalización el momento en que la diferencia entre el valor máximo de Δ_i y del anterior máximo sea menor que 0,1. Por si esta condición no llegará a producirse, se limita el número de iteraciones a un máximo de 1800, y el número de veces consecutivas que un nodo es reposicionado por iteración a 5.
- RAD-FRM: Procedimiento algorítmico propuesto en el presente trabajo, en el que se realiza una ordenación inicial mediante RAD, que a continuación es refinada mediante FRM.
- RAD-FR: Combinación algorítmica de RAD y FR.
- RAD-KK: Combinación algorítmica de RAD y KK.

En el caso de FR, FRM y KK, a fin de que las pruebas fueran reproducibles en diferentes momentos, se debía evitar partir de configuraciones iniciales aleatorias que pudieran producir resultados variables. Para ello se optó entre dos tipos de configuraciones iniciales arbitrarias pero no aleatorias, que denominamos configuración circular y de matriz (Fig.58).

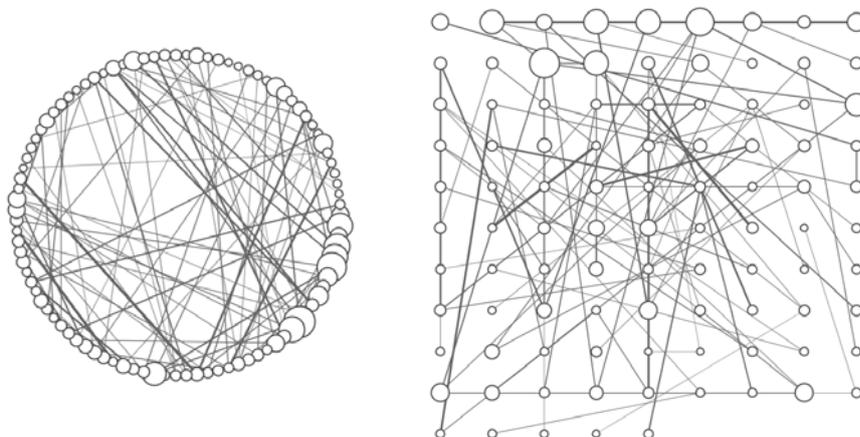


Fig.58 Configuración inicial circular y de matriz en un mismo grafo.

En el caso de FR y FRM, ya que ninguno de los dos tipos de configuraciones iniciales suponen aproximación alguna a la ordenación final perseguida, la elección no influye en el resultado final, por lo que para ambos algoritmos se decidió utilizar la configuración inicial de matriz.

En el caso de KK, aunque el uso de una u otra configuración inicial tampoco afecta a la calidad de la ordenación final, en cambio la uniforme distribución de los nodos en estas configuraciones sí se observó que influía en la probabilidad de que el algoritmo se encontrara con un mínimo local y diera por finalizado el proceso antes de tiempo. Partiendo de la configuración de matriz este fenómeno se produjo en 4 de los grafos, mientras que con la configuración circular sólo en uno. Por tanto, en el presente experimento, el algoritmo KK siempre partió de configuraciones circulares, a excepción de en el caso del grafo 'net34', en el que se partió de una configuración inicial de matriz para evitar el mínimo local.

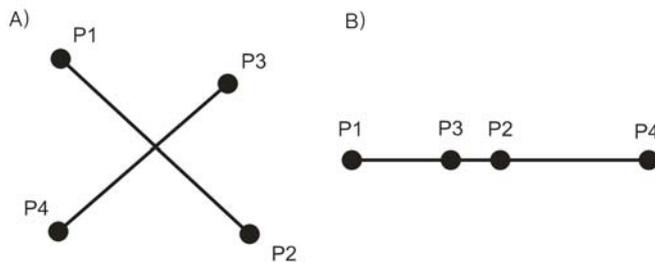
Dado que ni KK ni las aproximaciones radiales pueden afrontar grafos fragmentados, los grafos del grupo C únicamente fueron testados utilizando FR y FRM.

4.3.2.1.3. Criterios estéticos

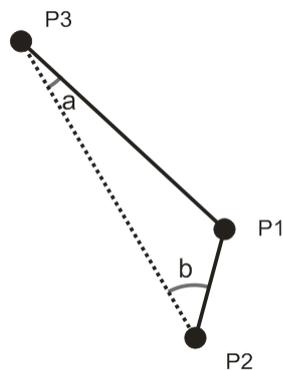
Los criterios estéticos utilizados para evaluar la usabilidad visual del resultado de aplicar los diferentes algoritmos fueron:

- Cruces entre enlaces, resultado de sumar:
 - Intersecciones entre enlaces: Número de veces que las líneas rectas de cada par de enlaces que no conectan ningún nodo en común, presentan un punto de intersección.

- Solapamientos entre enlaces: Número de veces que las líneas rectas de cada par de enlaces, presentan un segmento de intersección. En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de intersección (A) y solapamiento (B) entre las líneas (P1, P2) y (P3, P4).



- Continuidad entre enlaces: Dados dos nodos - P2 y P3 - enlazados a un mismo nodo - P1 -, la continuidad del camino entre P2 y P3 viene dada por la suma del ángulo b comprendido entre las rectas (P2,P1) y (P2,P3), y del ángulo a que forman las rectas (P3,P1) y (P3,P2).



La continuidad de la ordenación espacial de un grafo completo se calcula sumando el valor resultante en todos aquellos pares de enlaces que conectan un mismo nodo en alguno de sus extremos. De este modo, cuanto menor es el valor obtenido, mayor podemos decir que es el grado de continuidad de los caminos de nodos que forman el grafo.

- Solapamiento entre nodos: Número de veces que la distancia entre los centros de las circunferencias de cada par de nodos es menor a la suma de sus radios.

La elección de estos criterios estéticos, y no otros, se debe al mayor número de evidencias científicas acerca de su impacto en la usabilidad real de la representación (apartado 3.9.4).

4.3.2.2. Procedimiento

Para llevar a cabo el experimento, todos los algoritmos así como las rutinas de comprobación de los criterios estéticos se implementaron en un mismo *script* en Processing⁶.

La ejecución de las pruebas se realizó sobre un PC con microprocesador AMD Athlon 64 3500+, 2200Mhz, 2 GB de memoria RAM y sistema operativo Microsoft Windows XP.

4.3.2.3. Resultados

Los resultados del experimento se encuentran detallados en el Anexo, que incluye, por cada grafo de la muestra, una captura de la ordenación espacial obtenida con la aplicación de cada algoritmo, así como los valores absolutos de los tres criterios estéticos y del tiempo empleado en la ordenación.

A continuación analizamos de forma agregada los resultados por cada uno de los tres grupos de grafos de la muestra. Con el objetivo de que los valores de los criterios estéticos sean comparables entre grafos de diferentes tamaños, se utilizan valores relativos, calculados de la siguiente forma:

- *Cruces relativos*=Número de cruces/ Número de enlaces
- *Continuidad relativa*=Grado de continuidad/ Número de enlaces
- *Solapamiento relativo*=Número de solapamientos/ Número de nodos

⁶ Processing es un entorno de desarrollo basado en Java y creado originalmente por Casey Reas y Benjamin Fry. URL: www.processing.org

4.3.2.3.1. Grupo A: grafos conectados con baja densidad de enlaces

Cruces entre enlaces

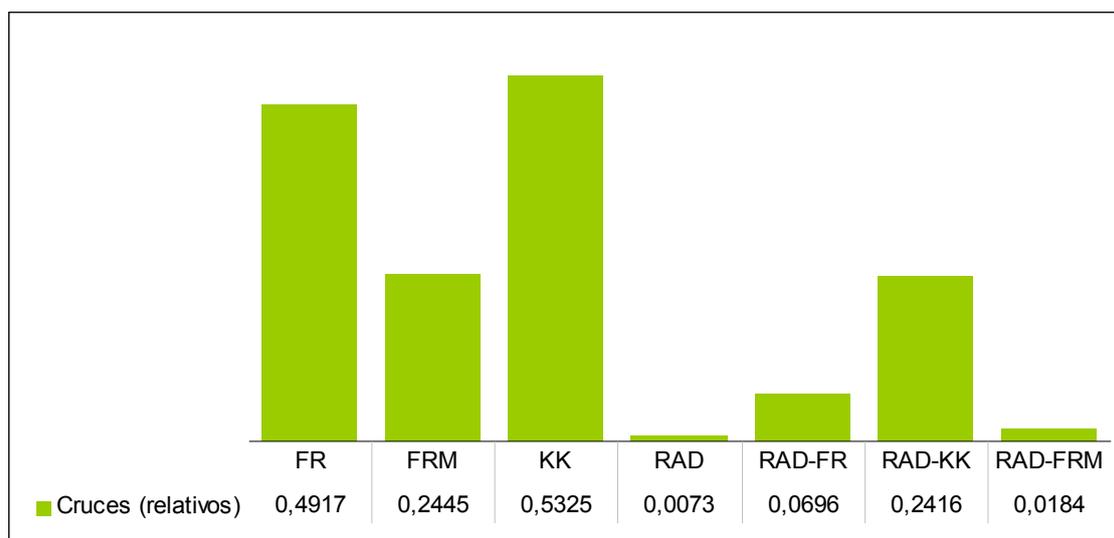


Fig.59 Promedio de cruces relativos en los grafos del grupo A.

Lo primero que demuestran los resultados es que, para este tipo de grafos, la estrategia de “Simulated Sintering” partiendo de una configuración inicial radial, mejora la estética de la ordenación en términos de cruces entre enlaces. Tal y como se puede observar en la figura 59, RAD-FR, RAD-KK y RAD-FRM presentan menor número de cruces que sus respectivas versiones sin configuración inicial radial (FR, KK y FRM).

Aunque FR presenta un número de cruces similar a KK, y RAD-FR uno similar a RAD-FRM, debemos destacar que FR y RAD-FR son los únicos algoritmos que entre los cruces, además de intersecciones, presentan solapamientos entre enlaces, debido al marco fijo del área disponible que emplean estos algoritmos en su procedimiento (véase apartado 4.2.1.2.3). Si bien las intersecciones entre enlaces dificultan la consecución de tareas visuales, los solapamientos son especialmente

perjudiciales para la usabilidad visual, ya que impiden la identificación visual de los enlaces (Fig.60).

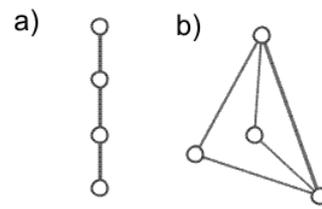


Fig.60 Ejemplo de un mismo grafo con solapamiento entre enlaces (a) y sin solapamiento (b).

Como demuestran los resultados, la modificación propuesta en el presente trabajo (FRM) ofrece mejores resultados que el algoritmo original (FR), así como que uno de los algoritmos más populares en visualización de información (KK). Además, la combinación propuesta (RAD-FRM) es, junto a RAD, el procedimiento algorítmico que menor número de cruces entre enlaces produce en este tipo de grafos.

Continuidad entre enlaces

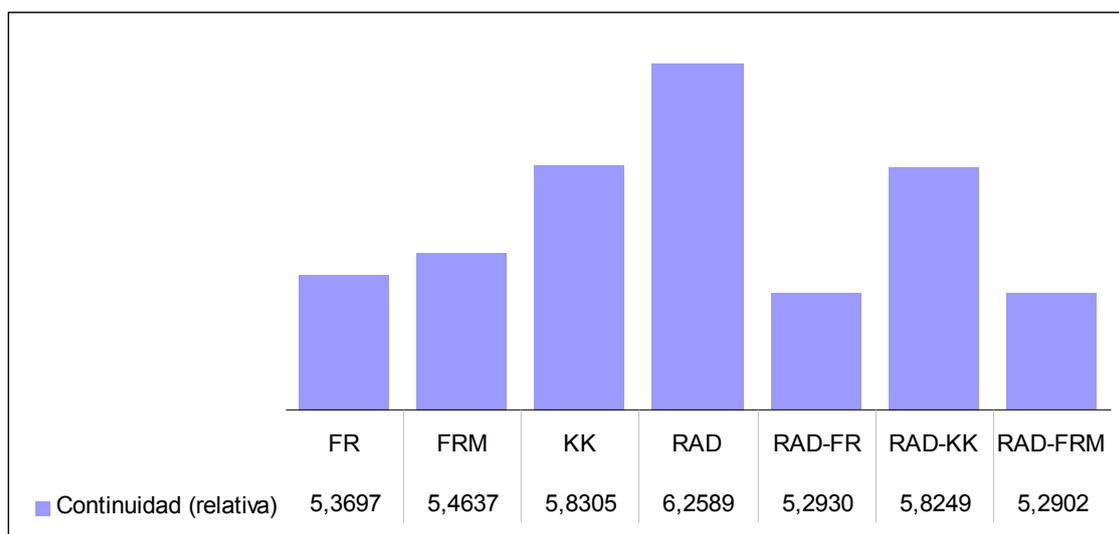


Fig.61 Promedio de continuidad relativa en los grafos del grupo A.

Los resultados demuestran que la estrategia de “Simulated Sintering” partiendo de una configuración inicial radial, influye positivamente en la continuidad entre enlaces, puesto que RAD-FR, RAD-KK y RAD-FRM presentan mejores resultados que los respectivos FR, KK y FRM (recordemos que en este criterio un valor menor indica mejor valoración).

Aunque las diferencias puedan parecer poco significativas, no lo son, pues debemos recordar que este es un valor promedio de valores relativos, que se obtienen sumando la desviación angular entre cada par de enlaces conectados a un mismo nodo, y dividiendo dicha suma entre el número de enlaces del grafo.

Si bien FRM no demuestra mejores resultados en términos de continuidad entre enlaces que FR, el procedimiento algorítmico propuesto en el presente trabajo (RAD-FRM) es el que obtiene mejor valoración en este criterio, seguido de cerca por RAD-FR.

Solapamiento entre nodos

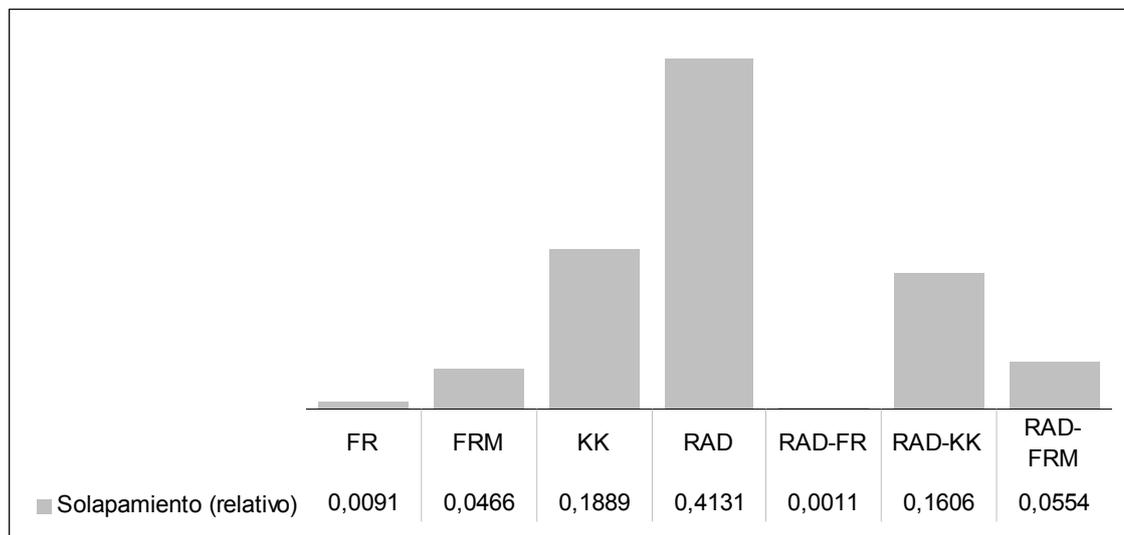


Fig.62 Promedio de solapamiento relativo en los grafos del grupo A.

En lo que se refiere al solapamiento entre nodos, la estrategia de “Simulated Sintering” influye positivamente en los resultados de RAD-KK y RAD-FR si los comparamos con los respectivos KK y FR. No ocurre así en la comparación entre RAD-FRM y FRM, donde el solapamiento es ligeramente mayor cuando se parte de una configuración inicial radial.

Los algoritmos que ofrecen mejores resultados son claramente FR y RAD-FR, debido a la uniforme distribución de los nodos en el espacio disponible que persiguen estos procedimientos. No obstante, esta uniforme distribución conlleva algunos problemas. Por un lado, y como se ha comprobado en este mismo apartado, es causa directa de un mayor número de cruces entre enlaces, algunos en forma de solapamientos entre enlaces. Por otro lado, aunque se trata de un criterio estético no cuantificado en el presente trabajo, esta uniformidad espacial provoca que resulte más difícil para el usuario identificar la estructura global del grafo. Ambos problemas son directamente observables comparando el resultado de la aplicación de los algoritmos RAD-FRM y RAD-FR sobre el grafo ‘net10’ (Fig.63).

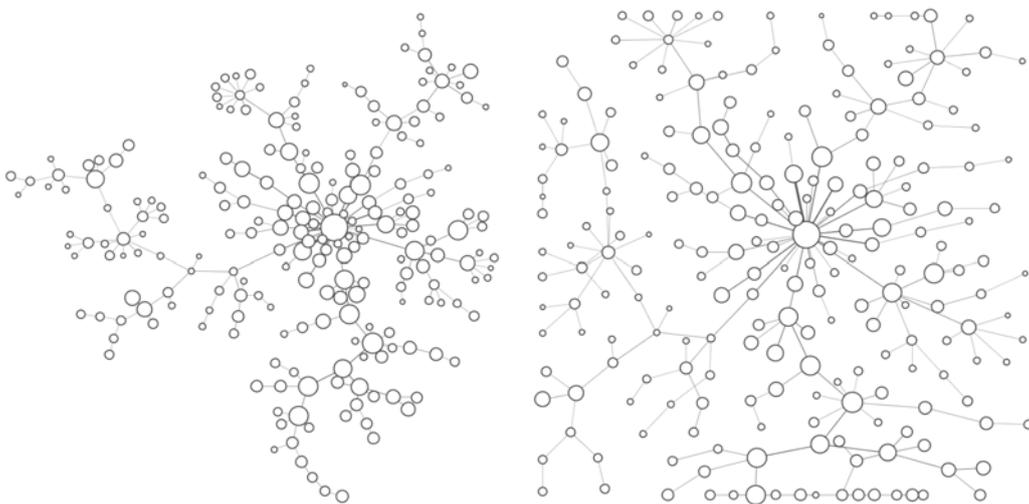


Fig.63 Grafo ‘net10’ ordenado mediante RAD-FRM (izquierda) y RAD-FR (derecha).

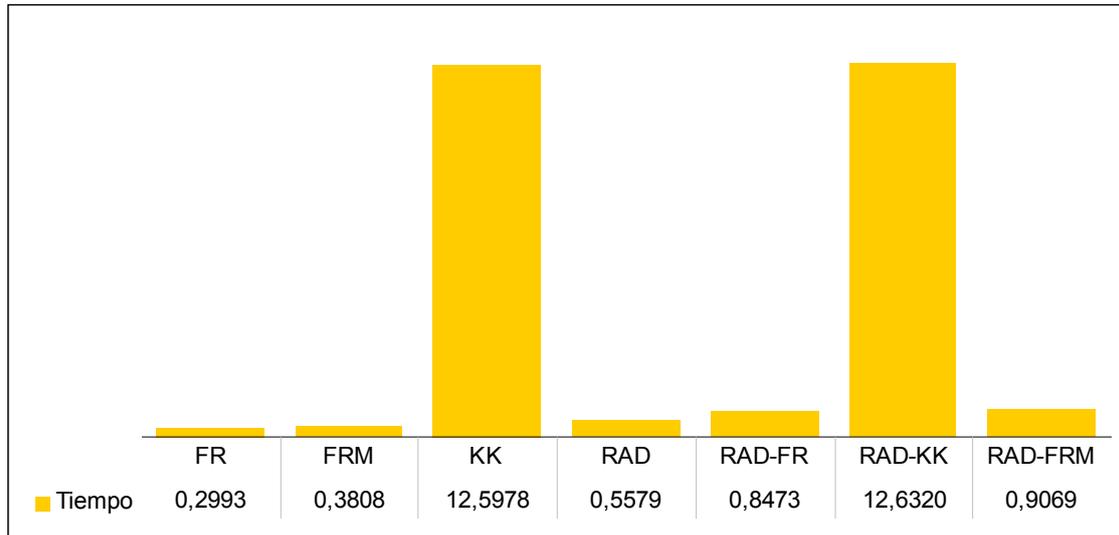


Fig.64 Tiempo promedio empleado por los diferentes algoritmos sobre los grafos del grupo A.

Desde el punto de vista de la eficiencia, los peores resultados son claramente los obtenidos por KK y RAD-KK. Las diferencias entre el resto de algoritmos no son significativas, demostrándose que tanto FRM como RAD-FRM son propuestas que, influyendo positivamente en la estética de la ordenación resultante, no destacan negativamente en términos de eficiencia.

4.3.2.3.2. Grupo B: grafos conectados con alta densidad de enlaces

Aunque los procedimientos algorítmicos propuestos en el presente trabajo (FRM y RAD-FRM) tenían como objetivo la ordenación espacial de grafos con baja densidad de enlaces (grupo A), con el presente experimento también se pretende indagar en su eficacia y eficiencia en la ordenación espacial de grafos de diferente topología, como aquellos que componen el grupo B.

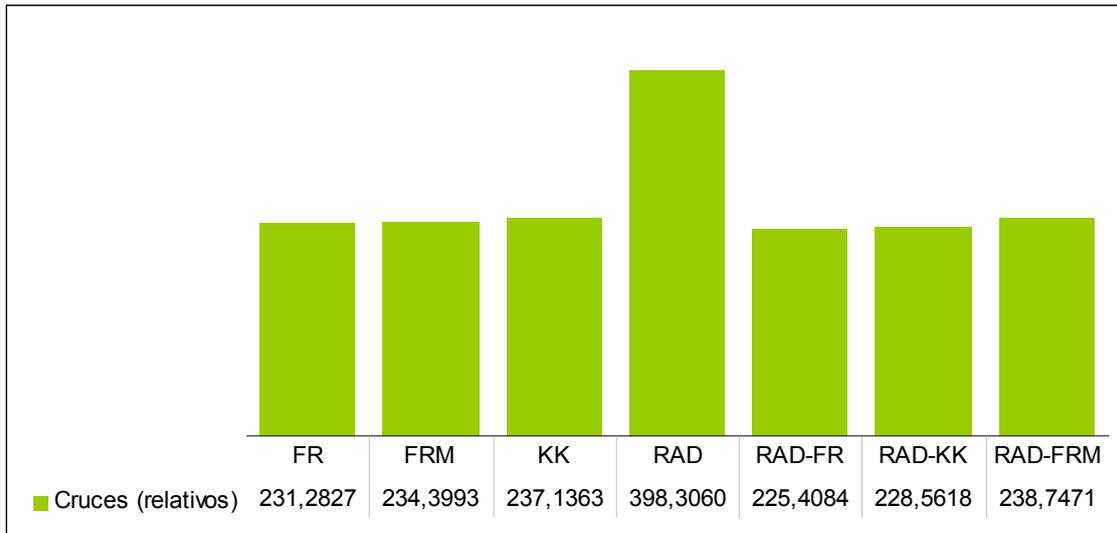


Fig.65 Promedio de cruces relativos en los grafos del grupo B.

Dada la alta densidad de enlaces de los grafos que conforman el grupo B, es normal que la mayoría de algoritmos estudiados presenten valores similares en términos de cruces de enlaces, debido a que una gran parte de esos cruces son inevitables. El único algoritmo que presenta un número de cruces significativamente mayor es RAD, puesto que a diferencia del resto no es un algoritmo orientado a topologías generales, por lo que no emplea mecanismo alguno - directo o indirecto- para minimizar este fenómeno.

Continuidad entre enlaces

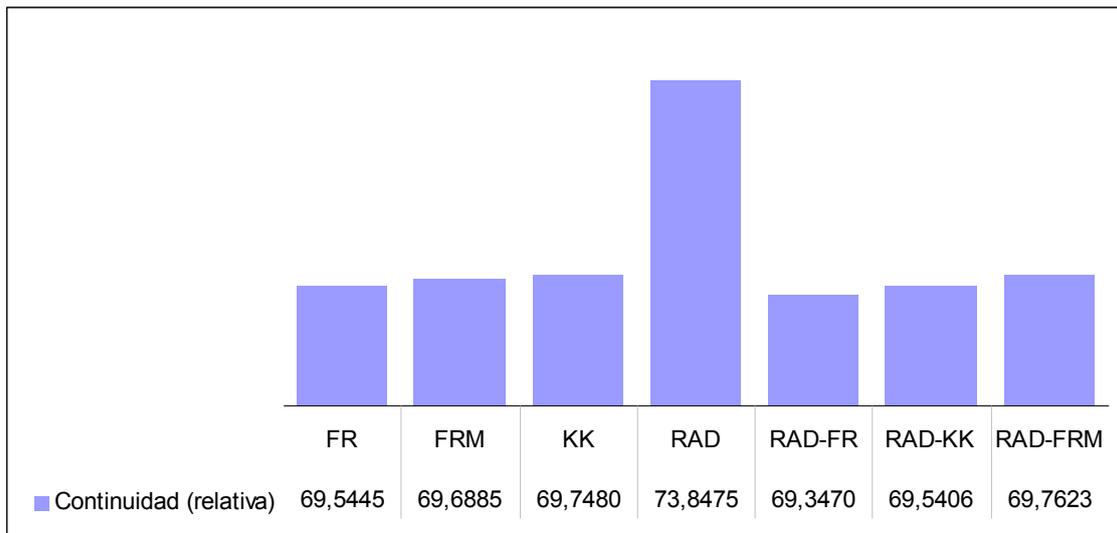


Fig.66 Promedio de continuidad relativa en los grafos del grupo B.

Al igual que ocurre con el cruce entre enlaces, las diferencias entre algoritmos - obviando el caso de RAD - en términos de continuidad entre enlaces, resultan muy poco significativas. Además podemos afirmar que la alta densidad de enlaces en este tipo de grafos, minimiza la importancia que tanto este como el anterior criterio estético tienen en la usabilidad visual de la ordenación resultante, dado que tareas como el seguimiento visual de caminos de nodos resultan perceptualmente inabarcables. Habría que destacar que es en estos casos cuando los procedimientos de ordenación de enlaces, como el propuesto en el apartado 4.2.2, resultarían especialmente necesarios.

Solapamiento entre nodos

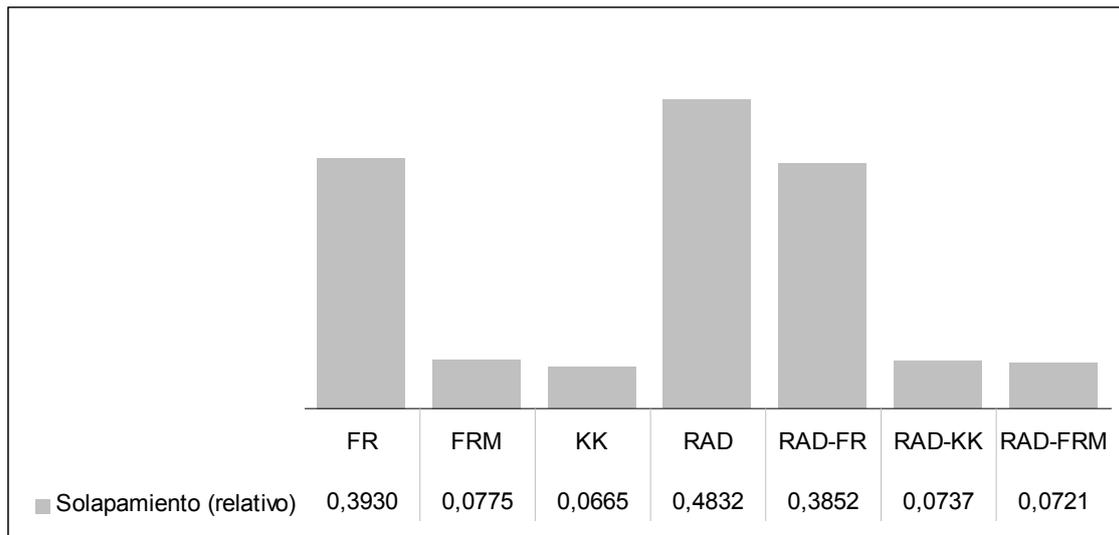


Fig.67 Promedio de solapamiento relativo en los grafos del grupo B.

Al contrario que sucedía con los anteriores criterios, en el caso del solapamiento entre nodos no sólo se observan diferencias significativas entre algoritmos, sino que además debemos considerar que este criterio sí tiene una mayor relevancia en la usabilidad visual de este tipo de grafos. Un menor solapamiento no sólo facilita la identificación visual de nodos, sino también la de sus características estructurales, como su centralidad o grado.

Un hecho destacable en los resultados es que, mientras que en el grupo A los algoritmos FR y RAD-FR eran los que menor número de solapamientos producían, en este grupo son, junto a RAD, los que mayor número producen. Este hecho se explica debido a que si bien la escasez de enlaces de los grafos del grupo A provocaba que las fuerzas de repulsión tuvieran mayor influencia que las de atracción, la alta densidad de los grafos del grupo B provoca el efecto contrario. Este efecto no se produce en el caso de FRM y RAD-FRM, dado que el cálculo de las fuerzas de atracción tiene en consideración tanto el número de nodos como el de enlaces, y las fuerzas de repulsión tanto el tamaño como el grado de los nodos.

Por último señalar que los únicos algoritmos que obtienen resultados similares a FRM y RAD-FRM en términos de solapamiento entre nodos, son KK y RAD-KK.

Tiempo

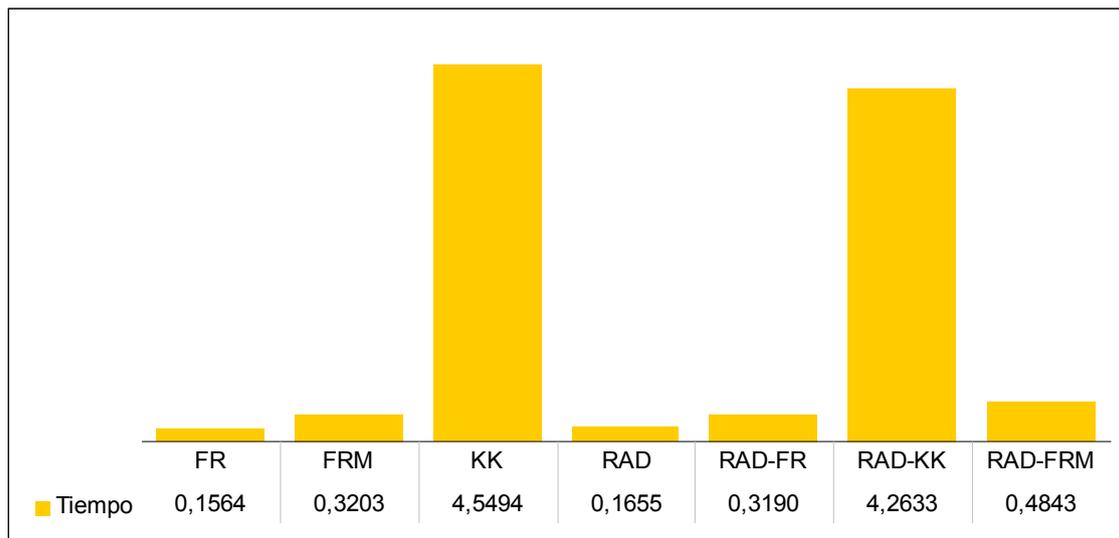


Fig.68 Tiempo promedio empleado por los diferentes algoritmos sobre los grafos del grupo B.

Al igual que sucedía en el grupo A, los resultados del presente grupo demuestran que KK y RAD-KK son los algoritmos más ineficientes, mientras que el resto presenta tiempos promedio similares. La razón por la que RAD, sin ser un algoritmo iterativo, presenta un tiempo promedio superior a la de algoritmos iterativos como FR, se debe al procedimiento utilizado para la elección del nodo raíz (apartado 4.2.1.1), que recordemos requería calcular el camino más corto entre cada par de nodos del grafo.

La explicación de por qué, a pesar de la mayor densidad de enlaces, los tiempos promedios de este grupo son significativamente menores a los obtenidos por los mismos algoritmos sobre los grafos del grupo A, se encuentra en el tamaño medio de los grafos en cada grupo, entendido como el número medio de nodos por grafo. Los grafos del grupo A presentan una media de 224,5 nodos, mientras que los del grupo B una

media de 145 nodos, lo que evidencia que el factor principal que condiciona la eficiencia de estos algoritmos es el tamaño del grafo, por encima de su densidad.

4.3.2.3.3. Grupo C: grafos fragmentados

Este grupo de grafos, por su naturaleza fragmentada, sólo son ordenables espacialmente mediante FR y FRM, dado que KK no es capaz de manejar grafos con más de un componente, y la configuración de partida radial de algoritmos como RAD-FR y RAD-FRM no aporta valor alguno en este tipo de grafos.

Por tanto, a continuación se presentan los resultados obtenidos por FR y FRM (Tabla 3). Si bien, dado el pequeño número de grafos que componen este grupo, no pueden ser considerados representativos, sí nos permiten obtener una primera impresión sobre la eficacia y eficiencia de ambos algoritmos.

	FR	FRM
Cruces (relativos)	0,4574	0,4056
Continuidad (relativa)	2,5828	2,5497
Solapamiento (relativo)	0,0	0,0867
Tiempo	0,1667	0,2340

Tabla 3 Resultados obtenidos por FR y FRM sobre los grafos del grupo C en el experimento 1.

Aunque los dos algoritmos arrojan resultados similares, FRM parece ofrecer ventaja en cruces y continuidad entre enlaces, mientras que FR lo hace en solapamiento entre nodos y eficiencia.

No obstante debemos recordar que FR, al contrario que FRM, provoca cruces en forma de solapamiento entre enlaces, tal y como se puede observar en la figura 69, lo que supone razón suficiente para descartarlo como algoritmo de ordenación.

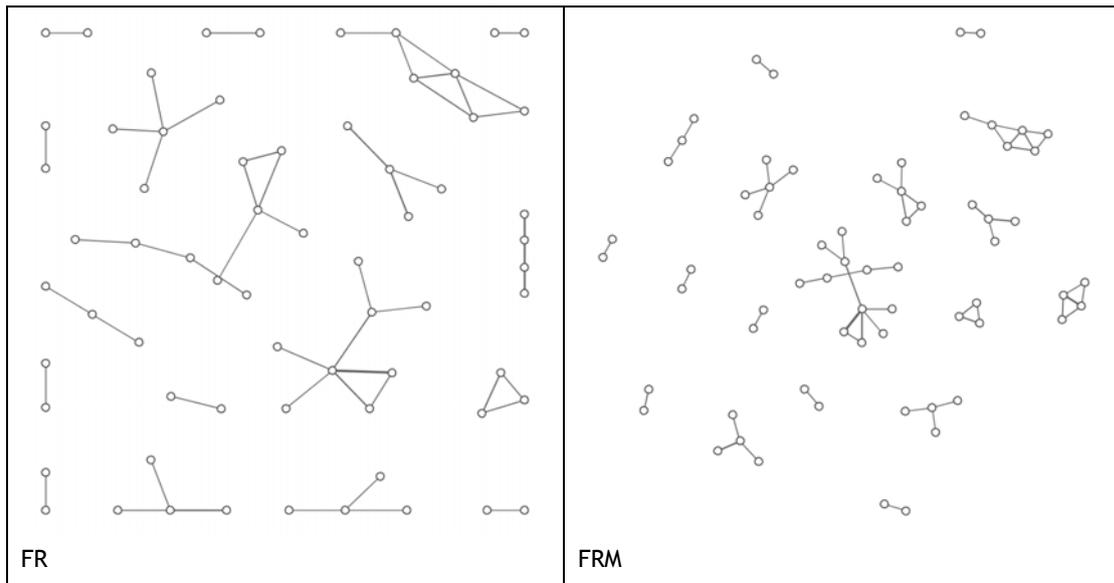


Fig.69 Ordenación espacial del grafo 'net11' mediante los algoritmos FR y FRM.

4.3.2.4. Discusión

Como demuestran los resultados obtenidos, el procedimiento algorítmico en dos etapas propuesto en el presente trabajo (RAD-FRM), es el que mejor relación eficacia-eficiencia presenta en la ordenación de grafos no fragmentados de baja densidad de enlaces (grupo A). Además, la estrategia de “Simulated Sintering” partiendo de una configuración inicial radial se demuestra efectiva en términos de eficacia cuando en la etapa de refinamiento se utilizan otros algoritmos iterativos (RAD-KK y RAD-FR), aunque estas combinaciones no logran la misma calidad estética que RAD-FRM. Como ejemplo visual de la superioridad estética de RAD-FRM en este tipo de grafos podemos tomar el caso del grafo ‘net14’ (Fig.70).

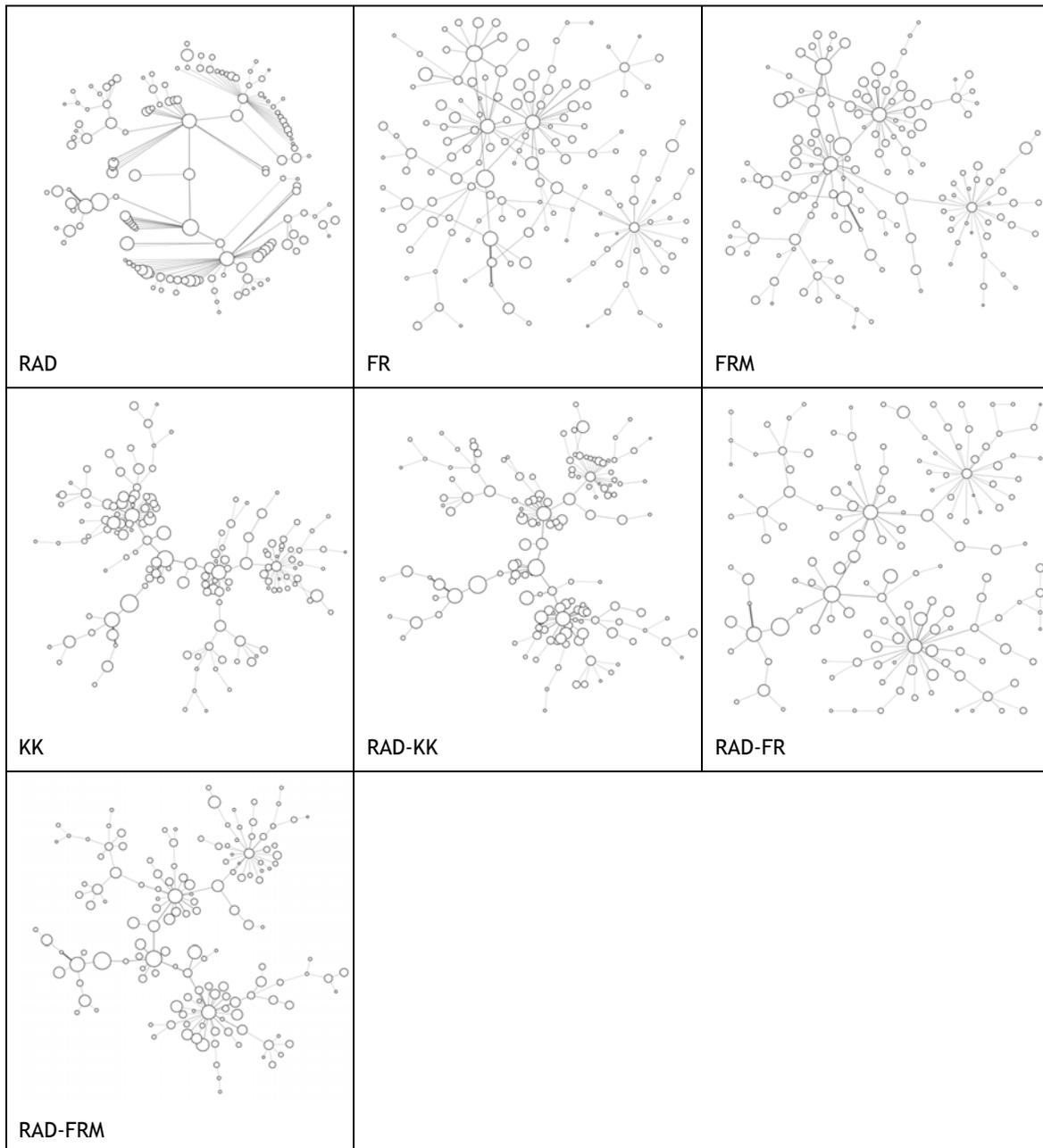


Fig.70 Ordenación espacial resultante de aplicar los diferentes algoritmos estudiados sobre el grafo 'net14'.

No obstante, los promedios son abstracciones matemáticas que diluyen las diferencias individuales. En este sentido debemos señalar el caso del grafo 'net29' perteneciente al grupo A, en el que únicamente KK y RAD-KK consiguieron aproximar una ordenación que reflejara claramente su estructura (Fig.71). Esto se debe a que el grafo presenta caminos de nodos en forma de anillos, lo que provoca que la configuración inicial radial no suponga una aproximación a la ordenación final deseable. Aún así, hay que destacar que en este caso KK consumió las 1800 iteraciones

definidas como límite sin alcanzar el estado de mínima energía deseable, quedando numerosos nodos inmóviles en las posiciones de partida definidas por la configuración circular.

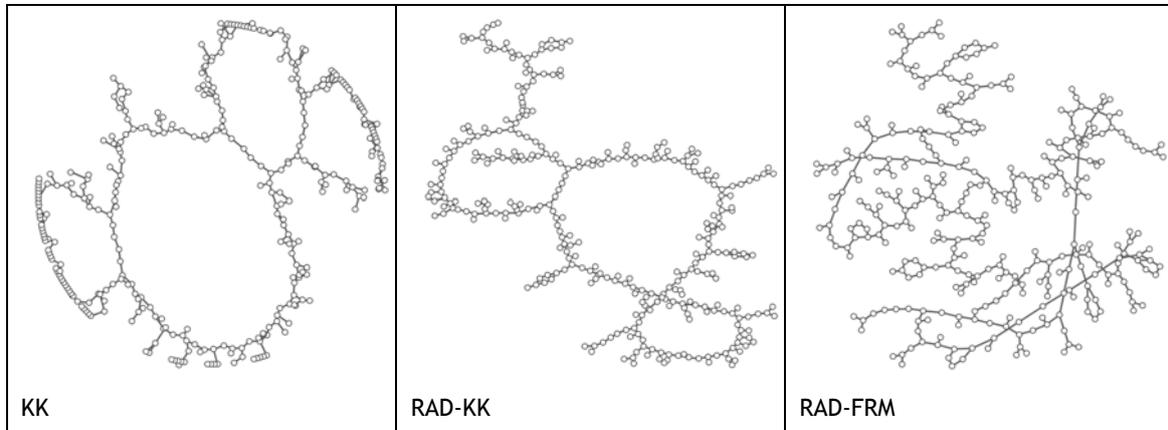


Fig.71 Ordenación espacial de los algoritmos KK, RAD-KK y RAD-FRM sobre el grafo 'net29'

Este hecho no implica que KK pueda considerarse un algoritmo eficaz para una mayor variedad de grafos con baja densidad de enlaces, ya que en topologías de apariencia jerárquica sus resultados son de muy baja calidad estética, principalmente en términos de cruces entre enlaces. El caso extremo lo encontramos en la ordenación de árboles binarios (grafos donde un nodo no puede tener más de dos hijos), como se puede comprobar en la figura 72. Este exceso de cruces entre enlaces en los algoritmos KK y RAD-KK es consecuencia del cumplimiento de otro criterio estético, minimizar la varianza de la longitud de los enlaces, cuya incompatibilidad con el criterio de cruce entre enlaces queda patente.

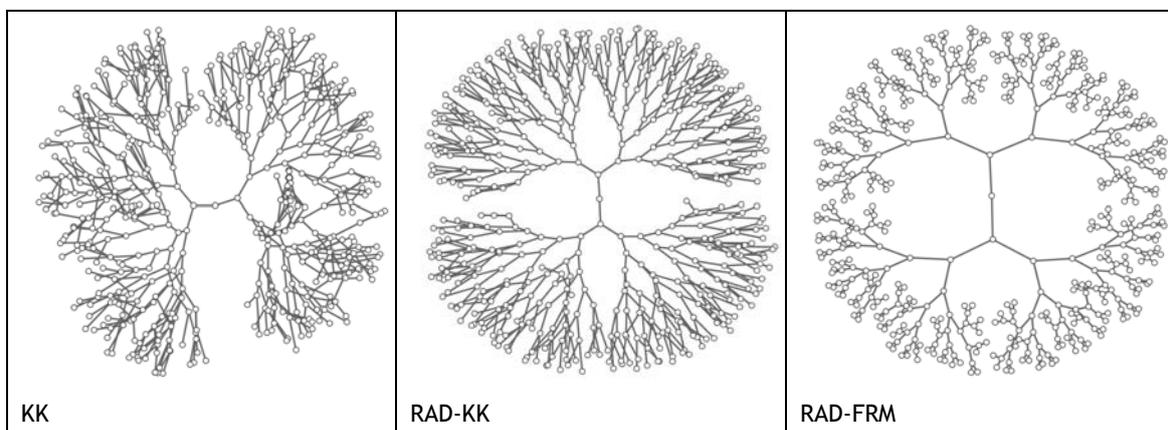


Fig.72 Ordenación espacial de los algoritmos KK, RAD-KK y RAD-FRM sobre el grafo 'net32'.

Analizando los resultados obtenidos en los grafos del grupo B, podemos concluir que el algoritmo FRM - la modificación propuesta en el presente trabajo del algoritmo original FR-, es el que mejor relación eficacia-eficiencia demuestra en grafos con alta densidad de enlaces. En este tipo de grafos la ordenación inicial radial no supone ventaja significativa en términos estéticos, debido a que no ofrece aproximación alguna a la ordenación final deseable. Cabe destacar que, aunque KK obtiene resultados estéticos muy similares a FRM en este tipo de grafos, su eficiencia es mucho menor que la de FRM.

El análisis de los resultados de este segundo grupo de grafos pone además de relieve la necesidad de que los criterios estéticos a utilizar en la evaluación, no sólo sean considerados en base a las evidencias empíricas que los sustenten, sino también en base a las características topológicas del grafo. Como se ha argumentado, criterios como el cruce entre enlaces o la continuidad, tendrían un impacto marginal en la usabilidad de la representación cuando la alta densidad de enlaces impida que se puedan alcanzar niveles perceptualmente aceptables.

En el caso de los grafos del grupo C, sobre los que únicamente se aplicaron los algoritmos FR y FRM, a pesar de lo difícil de extrapolar los resultados debido al pequeño número de grafos que componen el grupo, podemos afirmar que FRM resulta más eficaz que FR, debido principalmente a que FRM no produce solapamientos entre enlaces.

Un resultado inesperado ha sido la poca eficiencia que KK (y RAD-KK) ha demostrado en comparación con FR y sus derivados, pues contrasta con los resultados obtenidos en trabajos previos (Himsolt; 1995) (Brandenburg, Himsolt, Rohrer; 1995), en los que se igualaba FR y KK en términos de eficiencia, o incluso se sugería que FR resultaba especialmente lento en grafos de más de 60 nodos.

Una posible explicación a este resultado es que la implementación de FR utilizada en los citados trabajos no incluyera mecanismo alguno de optimización, como el de sólo calcular fuerzas de repulsión entre nodos próximos, tal y como sugerían Fruchterman y Reingold (1991). Otra explicación es que el umbral utilizado en el presente trabajo para determinar en qué momento KK ha alcanzado el estado de mínima energía - y por tanto puede dar por finalizado el proceso- sea el causante del excesivo tiempo consumido. No obstante, en las numerosas pruebas realizadas no encontramos otro umbral que redujera el tiempo de proceso sin que afectase significativamente a la calidad estética de la ordenación. De hecho, han sido numerosos los casos en los que KK incluso consumió el límite máximo de 1800 iteraciones sin haber alcanzado el estado de mínima energía.

4.3.3. Experimento 2: estudio con usuarios mediante eye-tracking

El objetivo de este segundo experimento es explorar el impacto que determinados criterios estéticos tienen en la usabilidad visual de la ordenación espacial de los nodos, llevando a cabo para ello un estudio con usuarios mediante técnicas de *eye-tracking*.

4.3.3.1. Método y materiales

Para realizar el experimento se utilizó el sistema de *eye-tracking* Tobii T60 y el software de análisis 'Tobii Studio enterprise edition'. El modelo T60 tiene la apariencia de un monitor TFT de 17 pulgadas de color negro (Fig.73), y las cámaras (*eye-trackers*) se encuentran camufladas en la zona inferior, resultando invisibles a los ojos del participante. Entre las características técnicas del sistema, señalar que usa una frecuencia de 60Hz, tiene una resolución máxima de 1280x1024 píxeles, y una precisión de 0.5 grados con un desvío inferior a los 0.3 grados.



Fig.73 Fotografía del sistema de *eye-tracking* Tobii T60.

El experimento se llevó a cabo en las fechas comprendidas entre el 13 de Marzo y el 15 de Abril de 2008. Fueron reclutados 18 participantes, 6 mujeres y 12 hombres con edades comprendidas entre los 25 y los 49 años. De estos participantes, 8 tenían el título de licenciatura o ingeniería, 5 el de master y 5 el de doctor; 9 participantes pertenecían al área de la Biblioteconomía y Documentación, 8 a Comunicación Audiovisual, y 1 a Informática.

4.3.3.2. Procedimiento

Los participantes fueron divididos en dos grupos, intentando que la distribución de perfiles, edades y género fuera lo más uniforme posible entre ambos. El grupo A llevó a cabo la prueba sobre un grafo ordenado mediante el algoritmo RAD-FRM, mientras que el grupo B lo hizo sobre el mismo grafo ordenado espacialmente mediante RAD (Fig.74).

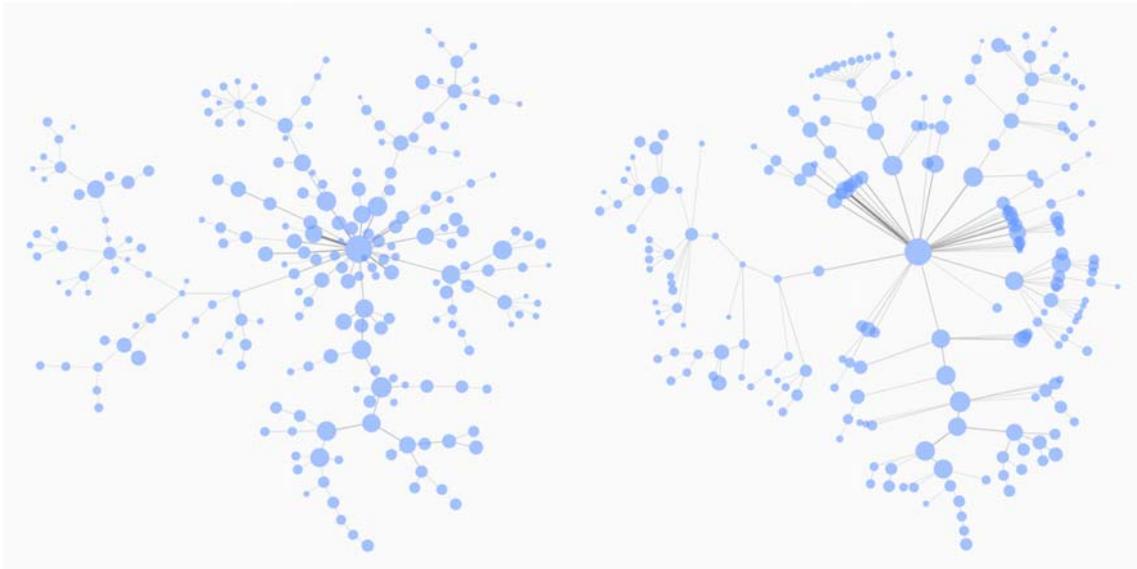


Fig.74. A la izquierda el grafo utilizado en la prueba con el grupo A de participantes, y a la derecha el utilizado con el grupo B.

Los participantes llevaron a cabo la prueba de forma individual, y previamente se les explicó, empleando ejemplos gráficos, la terminología básica sobre grafos, ya que es un conocimiento que no todos poseían y resultaba imprescindible para comprender las tareas que se les encomendarían.

Todos los participantes llevaron a cabo cuatro tareas consecutivas sobre la representación gráfica asignada a su grupo:

- Tarea 1: Contar el número de nodos que componen el camino que une dos nodos enfatizados gráficamente.
- Tarea 2: Contar el número de nodos directamente enlazados al nodo enfatizado gráficamente.
- Tarea 3: Contar el número de nodos directamente enlazados al nodo enfatizado (vecinos directos), o enlazados a alguno de sus vecinos directos.
- Tarea 4: Localizar un nodo de grado 5, es decir, con un número exacto de 5 nodos directamente enlazados.

Al completar las tareas 1, 2 y 3, los participantes debían dar la respuesta verbalmente y pulsar cualquier tecla. En el caso de la tarea 4, los participantes debían directamente hacer clic sobre el nodo localizado.

Durante la prueba se registró:

- El tiempo empleado en la consecución de las tareas.
- El grado de error en las respuestas. En el caso de las tareas 1, 2 y 3 este grado se entiende como la diferencia absoluta entre la respuesta del participante y la respuesta correcta. En el caso de la tarea 4, el grado de error se contabilizó de forma binaria (acierto o fallo).
- La exploración visual de los participantes. Dicha exploración se analizó de forma agregada, a través de representaciones de mapas de calor.

4.3.3.3. Resultados

4.3.3.3.1. Tarea 1: seguimiento visual

Tal y como muestra la tabla 4, los participantes tardaron significativamente más tiempo en completar la tarea con el grafo B que con el A, cometiendo un promedio de errores muy similar.

	Grupo A	Grupo B
Tiempo (promedio)	8,93	13,44
Errores (promedio)	0,13	0

Tabla 4 Tiempo empleado y errores cometidos en la ejecución de la tarea 1

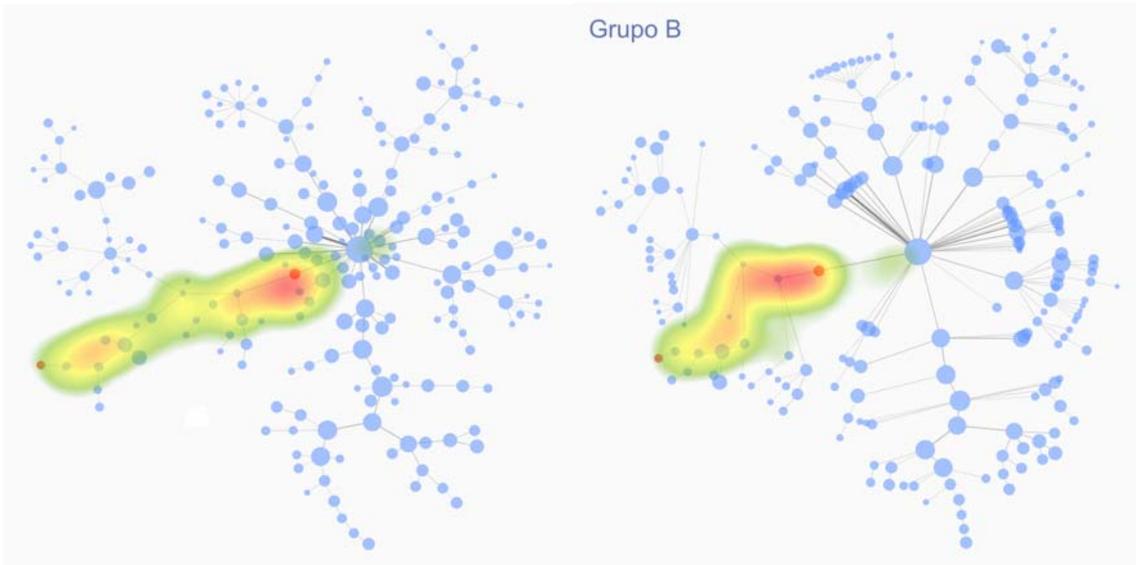


Fig.75 Mapas de calor de la tarea 1.

Como se puede observar en la figura 75, el camino de nodos a recorrer en el grafo A, aunque con longitudes de enlaces similares, presenta mayor continuidad, entendida como una menor desviación angular entre enlaces que forman el camino, lo que implica tener que realizar un número menor de fijaciones y ‘sacadas’ para completar la tarea.

De este modo, los resultados confirman la importancia que el criterio estético de continuidad entre enlaces tiene en la usabilidad visual de estas representaciones, condicionando la eficiencia con la que los usuarios pueden realizar tareas de seguimiento visual.

4.3.3.3.2. Tarea 2: identificar el grado de un nodo

En esta segunda tarea no es posible apreciar diferencias significativas entre ambos grafos (Tabla 5), ni en términos de tiempo empleado ni de errores cometidos.

	Grupo A	Grupo B
Tiempo (promedio)	10,94	9,87
Errores (promedio)	0,33	0,40

Tabla 5 Tiempo empleado y errores cometidos en la ejecución de la tarea 2

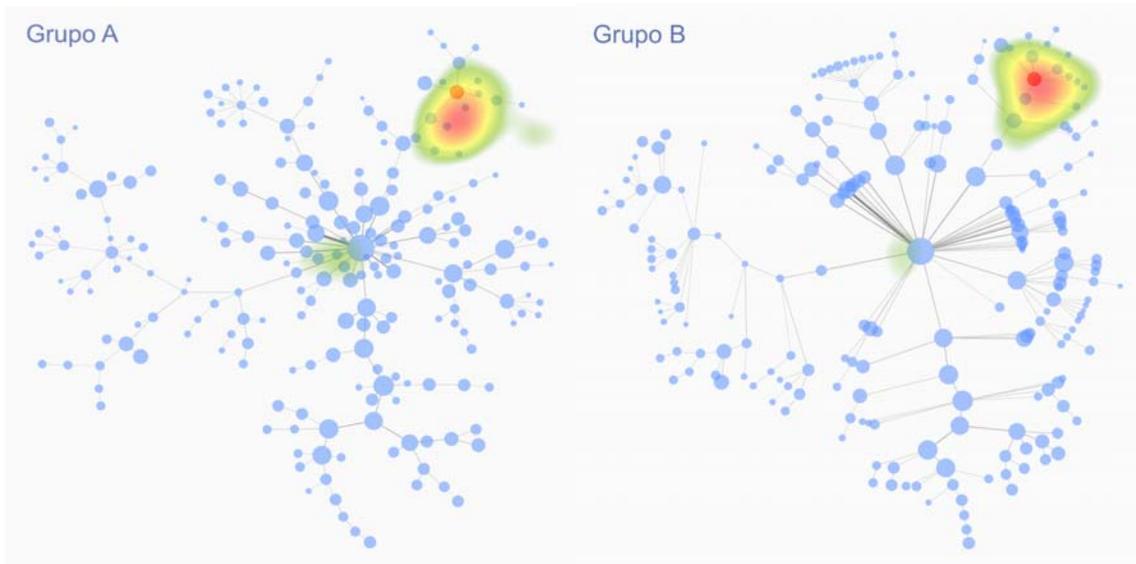


Fig.76 Mapas de calor de la tarea 2.

Como se puede apreciar en la figura 76, en ambos grafos los nodos vecinos al nodo enfatizado presentan longitudes de enlaces similares, y en ningún caso se produce solapamiento entre ellos, lo que explica la similitud de los resultados obtenidos. No obstante, la ligera ventaja obtenida en el grafo B en términos de tiempo destinado a la tarea, nos lleva a plantearnos la necesidad de, en futuras de investigaciones, analizar con mayor profundidad la influencia que criterios como la continuidad entre nodos enlazados directamente a un nodo común tiene en la usabilidad visual de la representación.

4.3.3.3.3. Tarea 3: grado y seguimiento visual

En la ejecución de la tercera tarea los participantes emplearon menos tiempo y cometieron significativamente menos errores con el grafo A (Tabla 6). Además, la complejidad de la tarea provocó que los participantes emplearan más tiempo y cometieran más errores que en las tareas anteriores.

	Grupo A	Grupo B
Tiempo (promedio)	17,86	19,97
Errores (promedio)	0,88	2,17

Tabla 6 Tiempo empleado y errores cometidos en la ejecución de la tarea 3

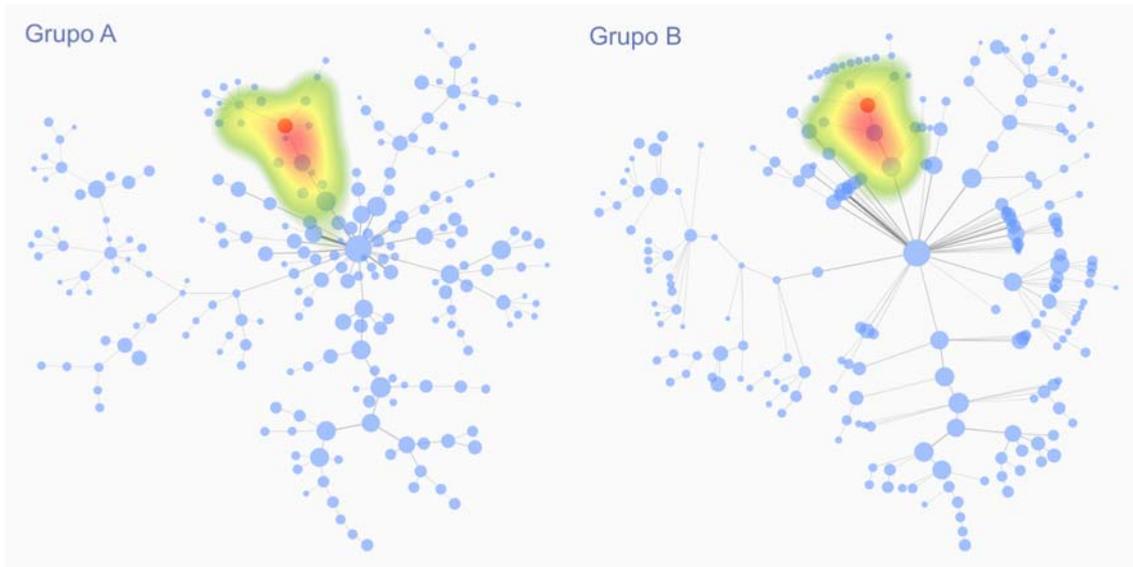


Fig.77 Mapas de calor de la tarea 3.

Aunque no resulta fácil inferir la razón exacta por la que el grupo B obtiene peores resultados que el A, una posible explicación se puede encontrar en la excesiva proximidad en el grafo B de algunos de los nodos a contabilizar (Fig.77). Este hecho sugiere la necesidad de, además del solapamiento entre nodos, considerar el exceso de proximidad entre nodos como una barrera más de usabilidad visual. No obstante, esta es una posibilidad que requiere de futuras investigaciones.

4.3.3.3.4. Tarea 4: identificación de nodos por su grado

En esta última tarea, la de mayor complejidad de todas, si bien el porcentaje de participantes que seleccionaron un nodo incorrecto es similar en ambos grupos, cabe destacar que los participantes del grupo A

tardaron significativamente menos tiempo en completar la tarea (Tabla 7).

	Grupo A	Grupo B
Tiempo (promedio)	23,04	27,77
Participantes que fallaron	3	2

Tabla 7 Tiempo empleado y fallos la ejecución de la tarea 4

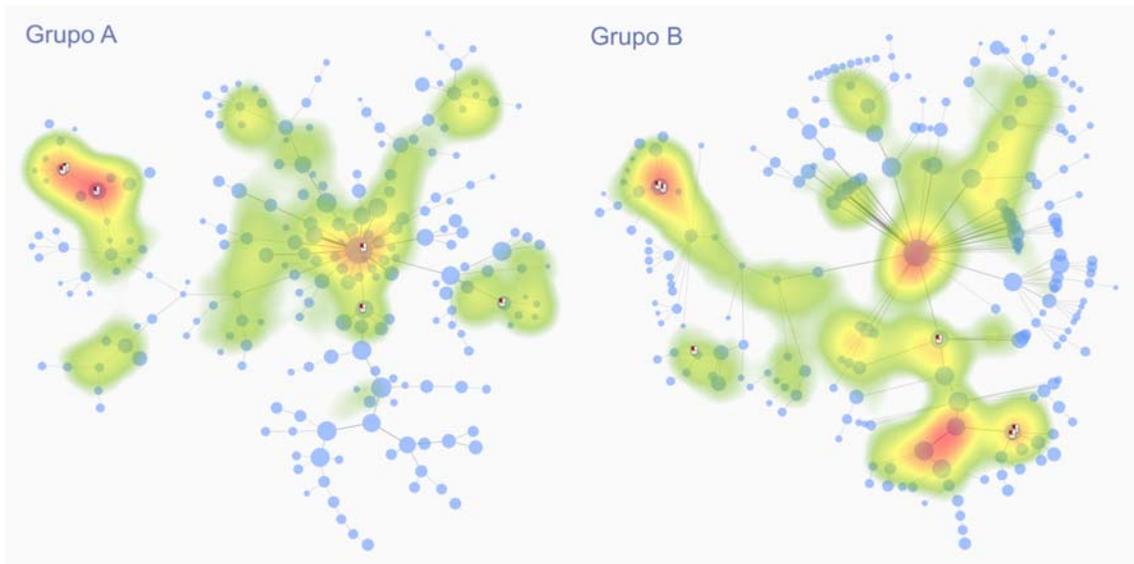


Fig.78 Mapas de calor de la tarea 4.

Dada la naturaleza abierta de esta tarea resulta muy complicado inferir una razón concreta que explique por qué resultó más sencilla para los participantes del grupo A. No obstante, es muy probable que la causa se encuentre en la interrelación de diferentes criterios estéticos, como el grado de solapamiento entre nodos, su proximidad espacial, o la variabilidad de la longitud de los enlaces.

4.3.3.4. Discusión

Los resultados de este segundo experimento confirman la influencia que el criterio estético de continuidad entre enlaces tiene en la eficiencia del usuario cuando acomete tareas de seguimiento visual de caminos de nodos. Pero además, los resultados sugieren nuevas vías de investigación

sobre la influencia que los siguientes criterios estéticos tienen en la usabilidad visual:

- La continuidad entre nodos directamente enlazados a un nodo común, en tareas de exploración visual de los vecinos de dicho nodo.
- El exceso de proximidad entre nodos, aún cuando no se produzca solapamiento, en tareas de identificación de nodos.
- La interrelación de criterios estéticos en la identificación de nodos por su grado.

Si analizamos los resultados obtenidos de forma agregada (Fig.79 y Fig.80), podemos observar una clara superioridad en la usabilidad visual del grafo ordenado mediante RAD-FRM (grupo A) frente a la del grafo ordenado mediante RAD (grupo B). Este hecho corrobora de forma empírica la validez de los criterios estéticos empleados en el anterior experimento, al vincular el cumplimiento de estos criterios con el rendimiento del usuario.

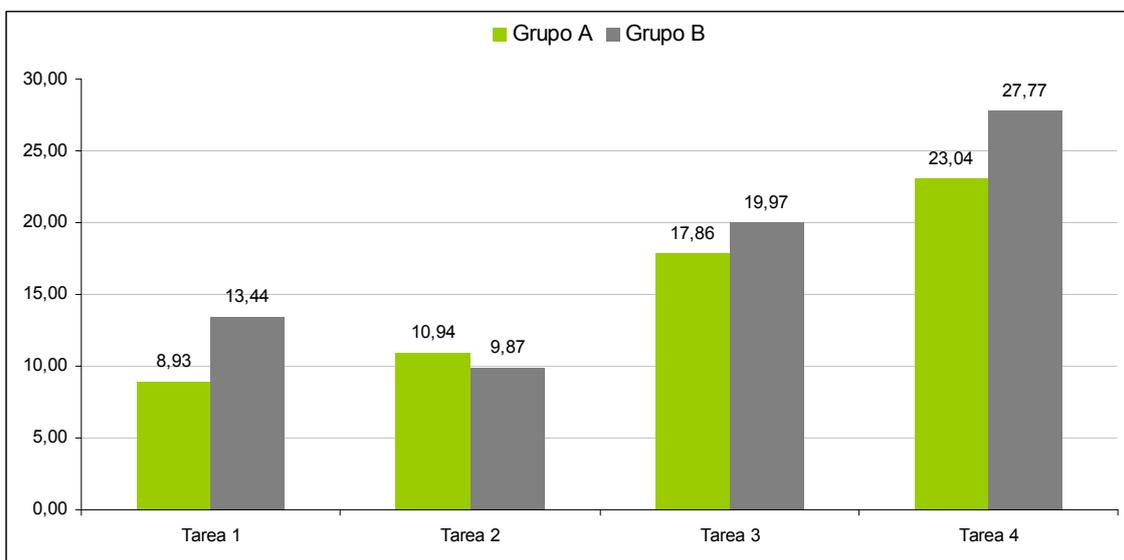


Fig.79 Tiempo promedio empleado por los participantes en la consecución de las tareas.

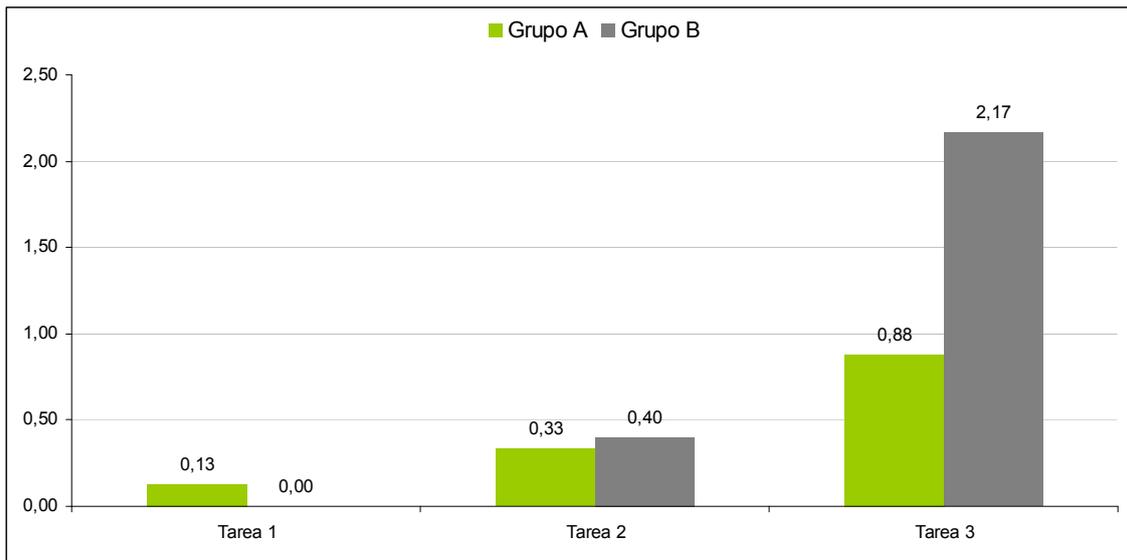


Fig.80 Grado de error cometido por los participantes en la consecución de las tareas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha aproximado un marco teórico para el estudio del factor humano en visualización de información, tomando como contexto disciplinar la Interacción Persona-Ordenador; se ha propuesto un marco metodológico para el diseño y evaluación de interfaces de visualización; y se ha propuesto y evaluado empíricamente un procedimiento algorítmico para la ordenación espacial de grafos. A raíz de los resultados obtenidos, podemos concluir:

- La investigación sobre visualización de información, entendida como un proceso cognitivo de creación perceptual mediado por interfaces gráficas, y destinado a ampliar nuestro conocimiento sobre fenómenos complejos subyacentes a grandes volúmenes de datos, no puede ser abordada desatendiendo la naturaleza psicológica y social de los usuarios.
- La Interacción Persona-Ordenador, disciplina enfocada al estudio de cómo las personas utilizan sistemas informáticos interactivos, y de cómo estos sistemas influyen en las personas y la sociedad, se presenta como el marco disciplinar más adecuado para afrontar la investigación sobre el factor humano en procesos de visualización de información.
- Los modelos teóricos que aporta la psicología cognitiva al estudio de la Interacción Persona-Ordenador, se demuestran como una poderosa herramienta predictiva y preceptiva acerca de los comportamientos interactivos más inmediatos del usuario. En el estudio de la visualización de información, resultan especialmente clarificadores los modelos acerca de la percepción visual: color, atención visual, percepción de patrones y formas, y reconocimiento de objetos.
- Cuanto más duradero es el comportamiento interactivo que pretende ser estudiado, menos individual puede considerarse, por lo

que modelos de la teoría cognitiva como el de Procesamiento Humano de Información, pierden capacidad explicativa. En estos casos, tal y como se ha argumentado en el presente trabajo, la Teoría de la Actividad emerge como una poderosa herramienta descriptiva, explicativa y generativa acerca de la función mediadora de las interfaces de visualización en el contexto de actividades socialmente compartidas y motivadas. Pero además, esta teoría no sólo se demuestra útil para analizar el uso de las interfaces de visualización, sino también para analizar la estructura de la actividad que refleja la información a visualizar.

- El marco metodológico propuesto para el desarrollo de interfaces de visualización, a diferencia de trabajos similares, presta una necesaria mayor atención a aquellas etapas cuyo impacto en la usabilidad resulta más inmediato, como son aquellas destinadas a la representación gráfica y la adición de interactividad. Además, se evidencia la dificultad que entraña la evaluación empírica con usuarios, debido principalmente a la complejidad de la función que estas interfaces pretenden facilitar: la comprensión.
- Los resultados del primer experimento demuestran que el procedimiento algorítmico propuesto utilizando una estrategia de “Simulated Sintergin” en dos etapas (RAD-FRM), es el que mejor relación eficacia-eficiencia presenta - de entre todos los algoritmos evaluados- en la ordenación de grafos no fragmentados de baja densidad de enlaces. Además, la estrategia de “Simulated Sintering” partiendo de una configuración inicial radial se demuestra efectiva cuando en la etapa de refinamiento se utilizan otros algoritmos iterativos (RAD-KK y RAD-FR), aunque estas combinaciones no logran la misma calidad estética que RAD-FRM.
- Los resultados del primer experimento demuestran además que, en grafos con alta densidad de enlaces, el algoritmo FRM - la modificación propuesta en el presente trabajo de FR- es el que mejor relación eficacia-eficiencia presenta. En este tipo de grafos, KK es el único que obtiene unos resultados estéticos comparables a FRM, pero consumiendo para ello mucho más tiempo en el proceso.

- El principal problema de evaluar la eficacia de un algoritmo de ordenación espacial a través de heurísticas en forma de criterios estéticos, es que muchos de estos criterios son incompatibles entre sí. Los resultados del primer experimento evidencian este hecho, dada la correlación negativa observada entre criterios como “Minimizar la varianza de la longitud de los enlaces” (KK) o “No desperdiciar el espacio disponible” (distribución uniforme de los nodos en FR), y el criterio de “Minimizar los cruces entre enlaces”. Ante estas situaciones, el trabajo propone la ponderación de los criterios estéticos en base a las evidencias empíricas que los soporten como tales, las tareas visuales que la representación pretenda satisfacer y las características topológicas del grafo.
- En esta línea, los resultados del segundo experimento confirman empíricamente la influencia que el criterio estético de continuidad entre enlaces tiene en la eficiencia del usuario cuando acomete tareas de seguimiento visual sobre representaciones de grafo. Además, el hecho de que el rendimiento general de los usuarios acometiendo tareas sobre el grafo ordenado mediante RAD-FRM sea superior, corrobora la validez de los criterios estéticos utilizados en el primer experimento.

El desarrollo, resultados y conclusiones del presente trabajo abren nuevos interrogantes y, consecuentemente, futuras líneas de investigación, algunas de las cuales recogemos a continuación:

- Además de los modelos teóricos analizados en el presente trabajo - Teoría Cognitiva y Teoría de la Actividad-, sería recomendable estudiar más profundamente la aplicabilidad de diferentes modelos en la investigación sobre visualización de información, como podrían ser el Enfoque Etnometodológico, la Acción Situada, el Enfoque Ecológico o la Cognición Externa.
- Aunque el marco metodológico propuesto para el desarrollo de interfaces de visualización se ha intentado que fuera de carácter unificado y exhaustivo, sería recomendable extenderlo con la inclusión de nuevas técnicas y métodos, principalmente en las

etapas de adquisición, transformación, extracción y reducción de información.

- El procedimiento algorítmico propuesto para la ordenación de enlaces mediante técnicas de “atado”, como se ha indicado en el capítulo 4, se encuentra aún en una fase temprana de investigación. En futuros trabajos pretendemos indagar sobre el grado de usabilidad visual de estas representaciones, identificando en qué tipos de grafos y para qué tareas visuales puede resultar más adecuado ordenar enlaces que poderlos.
- A raíz de los buenos resultados obtenidos utilizando en la ordenación espacial de nodos la estrategia de “Simulated Sintering” partiendo de una configuración radial, y refinando el resultado mediante un algoritmo de tipo “Force-directed”, en futuros trabajos pretendemos proponer un procedimiento algoritmo que, utilizando la misma estrategia, sea aplicable a grafos de topología general. Para ello se deberá utilizar un algoritmo inicial de bajo coste que, al contrario que RAD, no sólo sea capaz de aproximar ordenaciones en grafos de baja densidad de enlaces y apariencia jerárquica o semi-jerárquica.
- Aunque FRM como algoritmo iterativo orientado a topologías generales ha demostrado resultados superiores a FR y KK en grafos de alta densidad de enlaces, sigue siendo susceptible de mejora. Para ello creemos que el algoritmo debería manejar, entre sus variables, la distancia más corta entre cada par de nodos a través de los enlaces, tal y como sucede en KK.
- Aunque los procedimientos algorítmicos propuestos han sido evaluados comparativamente con aquellos que, como demuestran estudios previos, ofrecen mejores resultados en la mayoría de topologías, sería deseable en futuros trabajos ampliar el número de algoritmos en la comparación.
- Los resultados del experimento segundo no sólo confirman la importancia que el criterio de continuidad entre enlaces tiene en la

usabilidad visual de los grafos, sino que además sugieren la necesidad de indagar más profundamente sobre la importancia de otros criterios normalmente no contemplados en este tipo de evaluaciones, como la continuidad entre nodos directamente enlazados a un nodo común o el exceso de proximidad entre nodos.

BIBLIOGRAFÍA

Accot, J.; Zhai, S. (1997). Beyond Fitts' Law: Models for Trajectory-Based HCI Tasks. CHI 1997, Atlanta, USA, 22-27 March, pp. 295-302.

Andrews, K.; Heidegger, H. (1998). Information slices: Visualising and exploring large hierarchies using cascading, semicircular discs. IEEE Information Visualization Symposium 1998, Late Breaking Hot Topics Paper, pp. 9-12.

Bezdek, J.C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum, NY, 1981.

Baddeley, A.D.; Hitch, G.J. (1974). Working memory. En: Bower, G.A. The Psychology of Learning and Motivation, Academic Press, 1974, pp. 47-89.

Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory?. En: Trends in Cognitive Sciences, vol. 4, n. 11, November 2000, pp. 417-423.

Baddeley, A.D. (2001a). Is Working Memory Still Working?. En: American Psychologist, 56, pp. 849-864.

Baddeley, A.D. (2001b). The concept of episodic memory. En: Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 356, n. 1413, pp. 1345-1350.

Baeza-Yates, R.; Ribeiro-Neto, B. (1999). Modern information retrieval. Addison Wesley Longman Publishing Co.

Baeza-Yates, R. (2004). Excavando la web. En: El profesional de la información, vol. 13, n.1, pp. 4-10.

Bannon, L.J.; Bødker, S. (1991). Beyond the Interface: Encountering Artifacts in Use. En: Carroll, J. (ed.). Designing Interaction: Psychology at the human-computer interface. New York: Cambridge U.P., 1991.

Barnes, J.; Hut, P. (1986). A Hierarchical $O(N \log N)$ Force-Calculation Algorithm. En: Nature, vol. 324, pp. 446-449, 1986.

Battista, G.; Eades, P.; Tamassia, R.; Tollis, I.G. (1994). Annotated Bibliography on Graph Drawing Algorithms. En: Computational Geometry: Theory and Applications, vol. 4, pp. 235-282, 1994.

Baudisch, P.; Good, N.; Bellotti, V.; Schraedley, P. (2002). Keeping things in context: a comparative evaluation of focus plus context screens, overviews, and zooming. En: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves. Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 259-266, 2002.

Beaudouin-Lafon, M. (2004). Designing interaction, not interfaces. Proc. Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI 2004, pp. 15-22, Gallipoli (Italy), May 2004. ACM Press.

Bedny, G.Z.; Seglin, M.H.; Meister, D. (2000). Activity theory: history, research and application. En: Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2000, Vol. 1, n. 2, pp. 168-206.

Bedny, G.Z.; Harris, S.R. (2005). The Systemic-Structural Theory of Activity: Applications to the Study of Human Work. En: Mind, Culture and Activity, vol. 12, n. 2, pp. 128-147.

Berendt, B.; Hotho, A.; Stumme, G. (2002). Towards semantic Web mining. En: Ian Horrocks & James A. Hendler (Eds.), Proceedings of the First International Semantic Web Conference on The Semantic Web, (pp.264-278), London: Springer-Verlag. (Lecture Notes In Computer Science, 2342)

Bernard, M.A. (1981). On the Automated Drawing of Graphs. En: Proceedings of the Third Caribbean Conference on Combinatorics and Computing.

The University of the West Indies, Barbados, pp. 43-55, 1981. Disponible en:

http://www2.sta.uwi.edu/~mbernard/research_files/CCCC1981.pdf

(Consulta: 1 de Noviembre de 2008)

Bevan, N.; Kirakowski, J.; Maissel, J. (1991). What is Usability?. Proceedings of the 4th International Conference on HCI, Stuttgart, September 1991. Elsevier.

Biederman, I. (1987). Recognition-by-Components: A Theory of Human Image Understanding. En: Psychological Review, Vol. 94, n. 2, pp. 115-147.

Boardman, R. (2000). Bubble trees: the visualization of hierarchical information structures. Conference on Human Factors in Computing Systems archive, CHI '00. The Hague, The Netherlands, pp. 315-316.

Bødker, S. (1989). A human activity approach to user interfaces. En: Human Computer Interaction, vol. 4, n. 3, pp. 171-195.

Bødker, S. (1990). Through the interface - A human activity approach to user interface design. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.

Börner, K.; Chen, C.; Boyak, K.W. (2003). Visualizing Knowledge Domains. Annual Review of Information Science and Technology, 2003, vol. 37, pp. 179-255.

Börner, K.; Sanyal, S.; Vespignani, A. (2007). Network Science. Annual Review of Information Science & Technology, Volume 41, Chapter 12, pp. 537-607.

Brandenburg, F.; Himsolt, M.; Rohrer, C. (1995). An Experimental Comparison of Force-Directed and Randomized Graph Drawing Algorithms. Proceedings of the Symposium on Graph Drawing, pp. 76-87.

Brave, S.; Nass, C. (2002). Emotion in human-computer interaction. In J. Jacko & A. Sears (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications* (chap. 4). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Broadbent, D.E. (1958). *Perception and communication*. London: Pergamon Press, 1958. 338 p.

Butler, K.A.; Jacob, R.J.K. (1998). Human-Computer Interaction: Introduction and Overview. CHI 98 Conference on Human Factors in Computing Systems, Los Angeles, California, United States, pp. 105-106, 1998.

Buzydlowski, J.W.; White, H.D.; Lin, X. (2001). Term co-occurrence analysis as an interface for digital libraries. In Katy Börner & Chaomei Chen (Eds.), *Visual interfaces to digital libraries [JCDL 2002 Workshop]* (pp. 133-144), London: Springer-Verlag. (Lecture Notes In Computer Science, 2539). Disponible en: <http://vw.indiana.edu/visual01/buzydlowski-et-al.pdf> (Consulta: 19 de Marzo de 2006)

Buzydlowski, J.W. (2003). A comparison of self-organizing maps and pathfinder networks for the mapping of co-cited authors. Unpublished Ph.D. thesis, Drexel University, Philadelphia, USA. Disponible: <http://dspace.library.drexel.edu/retrieve/503/Thesis.PDF> (Consulta: 13 de Agosto de 2005)

Byrne, A.; Hilbert, D. (1997). A Glossary of Color Science. En: Byrne, A., Hilbert, D. (Eds). *Readings on Color, Volume 1: The Philosophy of Color*. MIT Press, 1997. Disponible en: <http://tigger.uic.edu/~hilbert/Glossary.html> (Consulta: 7 de Abril de 2007)

Cañas, J.J. (2003). Ergonomía Cognitiva: El estudio del Sistema Cognitivo Conjunto. En: *Boletín Factores Humanos, Telefónica I+D*, n. 24, Mayo de 2003. Disponible en:

http://www.tid.es/documentos/boletin/numero24_5.pdf (Consulta: 14 de Abril de 2008)

Cañas, J.J.; Antolí, A.; Quesada, J.F. (2001). The role of working memory on measuring mental models of physical systems. En: *Psicológica*, vol. 22, n. 1, pp. 25-42.

Cañas, J.J.; Salmerón, L.; Gámez, P. (2001). El factor humano. En: Lorés, J. (Ed.). *La Interacción Persona-Ordenador*. AIPO: Lleida, 2001. ISBN 84-607-2255-4. Disponible en: <http://griho.udl.es/ipo/index.html> (Consulta: 21 de Abril de 2007)

Card, S.K.; English, W.K.; Burr, B.J. (1978). Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys and text keys for text selection on a CRT. En: *Ergonomics*, vol. 21, pp. 601-613.

Card, S.K. (1982). User Perceptual Mechanisms in the Search of Computer Command Menus. CHI'82 Conference of Human Factor in Computer Science, New York: ACM, pp. 190-196.

Card, S.K.; Moran, T.; Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1983.

Card, S.K.; Mackinlay, J. (1997). The Structure of the Information Visualization Design Space. En: *Proceedings of the 1997 IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis '97)*, pp. 92.

Carriere, J. Kazman, R. (1995). Research Report: Interacting with Huge Hierarchies: Beyond Cone Trees. En: *Proceedings of Information Visualization '95*, p. 74-81.

Carroll, J.M. (1997). Human-Computer Interaction: Psychology as a Science of Design. *Annual Review of Psychology*, 48, pp. 61-83, 1997.

Carroll, J.M. (2001). Human-Computer Interaction, the Past and the Present. En: Carroll (Ed.). Human-Computer Interaction in the New Millennium. Addison Wesley Professional. ISBN-10: 0-201-70447-1.

Carroll, J.M. (2003). Introduction: Toward a Multidisciplinary Science of Human-Computer Interaction. En: Carroll, J.M. (Ed.). HCI Models, Theories and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science. Morgan Kaufman Publishers: San Francisco (USA). ISBN 1-55860-808-7.

Chang, D., Dooley, L., Tuovinen, J.E. (2002). Gestalt Theory in Visual Screen Design - A New Look at an Old Subject. 7th World Conference on Computers in Education, Copenhagen, July 29–August 3, 2001.

Chen, C. (1997). Structuring and visualising the WWW by generalised similarity analysis. En: Mark Bernstein, Kasper Østerbye & Leslie Carr (Eds.) Conference on Hypertext and Hypermedia, Proceedings of the eighth ACM conference on Hypertext. Southampton, United Kingdom, April 06 - 11, 1997 (pp. 177 - 186). New York, NY: ACM Press.

Chen, C. (1998). Generalised similarity analysis and pathfinder network scaling. En: Interacting with Computers, Vol. 10, n. 2, pp. 107-128.

Chen, C.; Czerwinski, M. (1998). From latent semantics to spatial hypertext: An integrated approach. En: Proceedings of the 9th ACM Conference on Hypertext and Hypermedia (Hypertext '98), (Pittsburgh, PA., 1998), ACM Press, pp. 77-86.

Chen, C.; Czerwinski, M. (2000). Empirical evaluation of information visualizations: an introduction. En: International Journal of Human-Computer Studies, 53, pp. 631-635.

Chen, C. (1999). Visualising Semantic Spaces and Author-Co-citation Networks in Digital Libraries. En: Information Processing and Management, vol. 35, pp. 401-420.

Chen, C. (2004). *Information Visualization: Beyond the Horizon*. Springer, 316 pp.

Chen, C. (2005). Top 10 Unsolved Information Visualization Problems. En: *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, n. 4, July 2005, pp. 12-16.

Chen, C. (2006). CiteSpace II: Detecting and Visualizing Emerging Trends and Transient Patterns in Scientific Literature. En: *Journal of the American Society for Information Science & Technology*, vol. 57, n.3, pp. 359-377.

Christian, K.; Kules, B.; Shneiderman, B.; Youssef, A. (2000). A comparison of voice controlled and mouse controlled web browsing. *Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies*. Arlington, Virginia, United States, 2000, pp.72-79. ISBN 1-58113-314-8.

Chung, W., Chen, H., Nunamaker, J.F. (2003). Business intelligence explorer: a knowledge map framework for discovering business intelligence on the Web. In *Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03) - Track1 - Volume 1*, January 6-9, 2003, (pp. 10.2). Washinton, DC: IEEE. Disponible en: <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/hicss/2003/1874/01/187410010b.pdf> (Consulta: 19 de Marzo de 2006)

Cockburn, A.; Gutwin, C.; Greenberg, S. (2007). A Predictive Model of Menu Performance. *CHI 2007*, April 28-May 3, 2007, San Jose, CA, USA, pp. 627-636.

Cockburn, A.; Karlson, A.; Bederson, B.B. (2008). A Review of Overview+Detail, Zooming, and Focus+Context Interfaces. En: *ACM Computing Surveys*, Vol. 41, No. 1, Article 2, December 2008.

Collins, C. (2007). DocuBurst: Radial Space-Filling Visualization of Document Content. Technical Report KMDI-TR-2007-1, Knowledge Media Design Institute, 2007. Disponible en: <http://kmdi.utoronto.ca/publications/documents/KMDI-TR-2007-1.pdf> (Consulta: 10 de Noviembre de 2008)

Cowan, N. (1988). Evolving Conceptions of Memory Storage, Selective Attention, and Their Mutual Constraints Within The Human Information-Processing System. En: *Psychological Bulletin*, vol. 104, n. 2, pp. 163-191, 1988.

Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. En: Miyake, A.; Shah, P. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. New York, NY: Cambridge University Press, 1999.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. En: *Behavioral and Brain Sciences* (2001), 24, pp. 87-114, Cambridge University Press.

Cui, W.; Zhou, H.; Qu, H.; Wong, P.C.; Li, X. (2008). Geometry-Based Edge Clustering for Graph Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. Of INFOVIS'08)* vol. 14, n. 6, pp. 1277-1284.

Davidson, R.; Harel, D. (1989). Drawing graphs nicely using simulated annealing. Technical Report CS89-13, Department of Applied Mathematics and Computer Science, The Weizmann Institute, Rehovot, Israel, July, 1989.

Davidson, R.; Harel, D. (1996). Drawing graphs nicely using simulated annealing. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 15, n.4, Octubre 1996, pp. 301-331.

Dearholt, D.; Schvaneveldt, R. (1990). Properties of pathfinder networks. En: Schvaneveldt, R. (Ed.), Pathfinder associative networks: Studies in knowledge organization (pp. 1-30). Ablex Publishing Corporation.

Deerwester, S.; Dumais, S.T.; Furnas, G.W.; Landauer, T.K.; Harshman, R. (1990). Indexing by Latent Semantic Analysis. En: Journal of the American Society of Information Science, 41 (6), pp. 391-407.

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. En: Numerische Mathematik, vol. 1, pp. 269-271. Disponible en: <http://www-m3.ma.tum.de/foswiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf> (Consulta: 23 de Julio de 2009).

Dillon, A.; Morris, M. (1999). P3: modeling and measuring the human determinants of information systems usage. Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, Paper presented at the Annual Meeting of HFES in Texas, Santa Monica, CA: HFES, September.

Dillon, A. (2001). Beyond Usability: Process, Outcome and Affect in human computer interactions. Lazerow Lecture 2001, at the Faculty of Information Studies, University of Toronto, March 2001. Disponible en: http://www.ischool.utexas.edu/~adillon/publications/beyond_usability.html (Consulta: 17 de Abril de 2007)

Dillon, A. (2002). HCI and the technologies of Information. En: Carroll, J.M. (Ed.). HCI and the Millennium. New York: ACM Press/Addison Wesley, pp. 457-474.

Ding, C.; He, X. (2004). K-means clustering via principal component analysis. Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning. Banff, Alberta, Canada, pp. 29.

Dumas, J. (2007). The great leap forward: The birth of the usability profession (1988-1993). *Journal of Usability Studies*, 2 (2), February 2007, pp. 54-60.

Duncan, J.; Humphreys, G. W. (1989). Visual Search and Stimulus Similarity. En: *Psychological Review*, vol. 96, n. 3, pp. 433-458.

Eades, P. (1984). A Heuristic for Graph Drawing. En: *Congressus Numerantium*, vol. 42, pp. 149-160, 1984.

Ehrenstein, W.H.; Spillmann, L.; Sarris, V. (2003). Gestalt issues in modern neuroscience. En: *Axiomathes*, Vol. 13, n.3-4, pp. 433-458.

Ellis, G.; Dix, A. (2006). An explorative analysis of user evaluation studies in information visualisation. En: *Proceedings of the 2006 Conference on Beyond Time and Errors: Novel Evaluation Methods For information Visualization (Venice, Italy, May 23, 2006)*, pp.1-7.

Engelhardt, J. (2002). *The Language of Graphics: A framework for the analysis of syntax and meaning in maps, charts and diagrams*. Tesis Doctoral, Institute for Logic, Language and Computation. Universidad de Amsterdam, 2002. ISBN 90-5776-089-4. Disponible en: <http://www.yuriweb.com/> (Consulta: 21 de Octubre de 2008)

Fein, R.M.; Olson, G.M.; Olson, J.S. (1993). A mental model can help with learning to operate a complex device. En: INTERACT '93 and CHI '93 conference companion on Human factors in computing systems. Amsterdam, The Netherlands, pp. 157-158, ISBN:0-89791-574-7.

Fischer, G. (2001). User Modeling in Human-Computer Interaction. En: User Modeling and User-Adapted Interaction (UMUAI), vol. 11, n. 1/2, pp 65-86, 2001.

Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. En: Journal of Experimental Psychology, vol. 47, n. 6, pp. 381-391.

Fitts, P.M.; Peterson, J.R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. En: Journal of Experimental Psychology, vol. 67, n.2, pp.103-112.

Floyd, R.W. (1962). Algorithm 97: Shortest Path. Communications of the ACM 5, pp. 345.

Folmer, E.; Bosch, J. (2004). Architecting for usability: a survey. En: Journal of Systems and Software. Febrero 2004, v. 70, n. 1. pp. 61-78.

Fowler, R.H.; Wilson, B.A.; Fowler, W.A.L. (1992). *Information Navigator: an information system using associative networks for display and retrieval*. Edinburg, TX: University of Texas-Pan American, Department of Computer Science. (Technical Report NAG9-551, No. 92-1).

Freitas, C.M.D.S. et al. (2002). On Evaluating Information Visualization Techniques. Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, Trento, Italy, pp. 373-374.

Freitas, C. M. D. S. et al. (2002b). Evaluating Usability of Information Visualization Techniques. IHC 2002 - 5th Workshop on Human Factors in Computer Systems, Brazilian Computer Society Press.

Fruchterman, T.M.J.; Reingold, E.M. (1991). Graph Drawing by Force-directed Placement. En: Software: Practice and Experience, Vol. 21, n.11, pp. 1129-1164.

Fry, B. (2004). Computational Information Design. Tesis Doctoral, Program in Media Arts and Sciences, School of Architecture and Planning, Massachusetts Institute of Technology. Disponible en: <http://benfry.com/phd/> (Consulta: 21 de Octubre de 2008).

Furnas, G.W. (1986). Generalized fisheye views. En: Marilyn Mantei & Peter Orbeton (Eds.). Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems, Boston, Massachusetts, United States, April 13-17, 1986, (pp. 16-23). New York, NY: ACM Press.

Goldberg, J.H.; Wichansky, A.M. (2003). Eye tracking in usability evaluation: A Practitioner's Guide. En: Hyona, J., Radach, R., Duebel, H (Eds.). The mind's eye: cognitive and applied aspects of eye movement research (pp. 573-605). Boston, North-Holland / Elsevier.

Golub, G.H.; Vorst, H.A. van der (2000). Eigenvalue computation in the 20th century. En: Journal of Computational and Applied Mathematics, 123, (2000), pp. 35-65.

González, M.P.; Pascual, A.; Lorés, J. (2006). Evaluación Heurística. En: Lorés, J. (Ed.) (2001). Introducción a la Interacción Persona-Ordenador. AIPO: Asociación Interacción Persona-Ordenador, 2001. Disponible en: <http://www.aipo.es/libro/libroe.php> (Consulta: 1 de Junio de 2009).

Graham, M.; Kennedy, J.; Benyon, D. (2000). Towards a methodology for developing visualizations. En: En: International Journal of Human-Computer Studies, 2000, vol. 53, pp. 789-807.

Gray, W.D.; Young, R.M.; Kirschenbaum, S.S. (1997). Introduction to This Special Issue on Cognitive Architectures and Human-Computer Interaction. En: Human-Computer Interaction, vol. 12, 1997, pp. 301-309.

Grinstein, G.; Trutschl, M.; Cvek, U. (2001). High-Dimensional Visualizations. 7th Data Mining Conference-KDD 2001, San Francisco, California, 2001. Disponible en: http://www.cs.uml.edu/~mtrutsch/research/High-Dimensional_Visualizations-KDD2001-color.pdf (Consulta: 20 de Octubre de 2008)

Grover, L.K. (1987). Standard Cell Placement Using Simulated Sintering. Proceedings of the 24th ACM/IEEE Design Automation Conference, Miami Beach, Florida, United States, pp. 56-59.

Grudin, J. (2005). Three Faces of Human-Computer Interaction. IEEE Annals of the History of Computing, October-December 2005, pp. 46-62.

Guerrero-Bote, V.; Moya-Anegón, F.; López-Pujalte, C.; Herrero-Solana, V. (2003). Comparison of neural models for document clustering. En: International Journal of Approximate Reasoning, Vol. 34, n. 2, 2003, pp. 287-305.

Guerrero-Bote, V.; Zapico-Alonso, F.; Espinosa-Calvo, M.E.; Gómez-Crisóstomo, R.; Moya-Anegón, F. (2006). Binary Pathfinder: An improvement to the Pathfinder algorithm. En: Information Processing & Management, 42 (6), December 2006, 1484-1490.

Guiard, Y.; Bourgeois, F.; Mottet, D.; Beaudouin-Lafon, M. (2001). Beyond the 10-bit Barrier: Fitts' Law in Multi-Scale Electronic Worlds.

Proceedings of IHM-HCI 2001, Lille, France, September 10-14, 2001, pp. 573-587.

Gutwin, C.; Fedak, C. (2004). Interacting with big interfaces on small screens: a comparison of fisheye, zoom, and panning techniques. In Proceedings of the 2004 conference on graphics interface. London, Ontario, Canada, May 17-19, 2004. (pp. 145-152). London, ON, Canada: University of Waterloo, Canadian Human-Computer Communications Society.

Hachul, S.; Jünger, M. (2006). An Experimental Comparison of Fast Algorithms for Drawing General Large Graphs. En: Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3843, pp. 235-250.

Hadany, R.; Harel, D. (2001). A multi-scale algorithm for drawing graphs nicely. En: Discrete Applied Mathematics, 113(1), pp. 3-21, 2001.

Han, K.; Ju, B.H. (2003). A fast layout algorithm for protein interaction Networks. En: Bioinformatics, Vol. 19, n. 15, pp. 1882-1888.

Ham, F.; (2005). Interactive visualization of large graphs. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. ISBN 90-386-0704-0

Harel, D.; Koren, Y. (2002a). Drawing Graphs with Non-Uniform Vertices. Proc. Working Conf. on Advanced Visual Interfaces (AVI'2002), Trento, Italy, ACM Press, pp. 157-166.

Harel, D.; Koren, Y. (2002b). A Fast Multi-Scale Method for Drawing Large Graphs. En: Journal of Graph Algorithms and Applications, vol. 6., n.3, pp.179-202.

Hartson, H.R. (1998). Human-computer interaction: Interdisciplinary roots and trends. En: Journal of Systems and Software, Noviembre 1998, v. 43, n. 2, pp. 103-118.

Hassan-Montero, Y.; Herrero-Solana, V. (2006a). Interfaz visual para recuperación de información basada en análisis de metadatos, escalamiento multidimensional y efecto ojo de pez. En: El Profesional de la Información, 2006, vol. 15, n. 4, pp. 278-289.

Hassan-Montero, Y.; Herrero-Solana, V. (2006b). Improving Tag-Clouds as Visual Information Retrieval Interfaces. InSciT 2006: Mérida, Spain. October 25-28, 2006. Disponible en:

http://www.nosolousabilidad.com/hassan/improving_tagclouds.pdf

(Consulta: 20 de Octubre de 2008)

Hassan-Montero, Y.; Herrero-Solana, V. (2007). Eye-Tracking en Interacción Persona-Ordenador. En: No Solo Usabilidad, nº 6, 2007.

<nosolousabilidad.com>. ISSN 1886-8592

Hassan-Montero, Y.; Herrero-Solana, V.; Guerrero-Bote, V. (2010). Usabilidad de los tag-clouds: estudio mediante eye-tracking. En: Scire: representación y organización de conocimiento, pendiente de publicación.

Hassan-Montero, Y.; Ortega-Santamaría, S. (2009). Informe APEI sobre Usabilidad. Gijón: Asociación Profesional de Especialistas en Información, 2009, 73pp. ISBN: 978-84-692-3782-3. Disponible en:

<http://eprints.rclis.org/16415/> (Consulta: 30 de Agosto de 2009).

Hartson, H.R. (1998). Human-computer interaction: Interdisciplinary roots and trends. En: Journal of Systems and Software, Noviembre 1998, v. 43, n. 2, pp. 103-118.

Hayama, T.; Kanai, T.; Kunifuji, S. (2003). Personalized environment for skimming documents. En: Lecture Notes in Computer Science, 2774(2), 771-778.

Healey, C.G.; Booth, K.S.; Enns, J.T. (1996). High-Speed Visual Estimation Using Preattentive Processing. En: ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), vol. 3, n. 2, pp. 107-135.

Herrero-Solana, V.; Moya-Anegón, F. (1999). Science in America Latina: a comparison of bibliometric and scientific-technical indicators. En: Scientometrics, 1999, vol. 46, n. 2, pp. 299-320.

Herrero-Solana, V. (2000). Modelos de representación visual de la información bibliográfica: aproximaciones multivariantes y conexionistas. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 2000.

Herrero-Solana, V.; Hassan Montero, Y. (2006). Metodologías para el desarrollo de Interfaces Visuales de recuperación de información: análisis y comparación. En: Information Research, vol. 11, n. 3, paper 258. Disponible en: <http://InformationR.net/ir/11-3/paper258.html> (Consulta 14 de Abril de 2008)

Hick, W.E. (1952). On the rate of gain of information. En: Quarterly Journal of Experimental Psychology, vol. 4, pp. 11-36.

Himsolt, M. (1995). Comparing and evaluating layout algorithms within GraphEd. En: Journal of Visual Languages and Computing, vol. 6.

Hofmann, T. (1999). Probabilistic Topic Maps: Navigating through Large Text Collections. En: Lecture Notes in Computer Science, vol. 1642, Proceedings of the Third International Symposium on Advances in Intelligent Data Analysis, pp. 161-172.

Hollan, J.; Hitchins, E.; Kirsh, D. (2000). Distributed Cognition: Toward a New Foundation for Human-Computer Interaction Research. En: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 7, No. 2, June 2000, pp. 174-196.

Holten, D. (2006). Hierarchical Edge Bundles: Visualization of Adjacency Relations in Hierarchical Data. En: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 12, n. 5, September/October.

Holten, D.; Wijk, J.J. (2009). Force-Directed Edge Bundling for Graph Visualization. 11th Eurographics/IEEE-VGTC Symposium on Visualization (Computer Graphics Forum; Proceedings of EuroVis 2009), pp. 983-990.

Hornbæk, K.; Bederson, B.B.; Plaisant, C. (2002). Navigation patterns and usability of zoomable user interfaces with and without an overview. En: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, vol. 9, n.4, pp. 362-389.

Horowitz, T.S. (2006). Revisiting the variable memory model of visual search. En: Visual Cognition, Vol. 14, n. 4-8, pp. 668-684.

Horowitz, T. S.; Wolfe, J. M. (1998). Visual search has no memory. En: Nature, Vol. 394, n. 6693, pp. 575-577.

Howes, A.; Young, R.M. (1997). The Role of Cognitive Architecture in Modelling the User: Soar's Learning Mechanism. En: Human-Computer Interaction, vol. 12, 1997.

Huang, W.; Eades, P.; Hong, S.H. (2008). Beyond Time and Error: A Cognitive Approach to the Evaluation of Graph Drawings. Proceedings of the 2008 conference on Beyond time and errors: novel evaluation methods for Information Visualization, Florence, Italy, Article No. 3.

Hurvich, L. M.; Jameson, D. (1957). An opponent-process theory of color vision. En: Psychol. Rev. n. 64, pp. 384-404.

Hutchins, E. (2000). Distributed cognition. En: International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences (IEBS). Disponible en: <http://eclectic.ss.uci.edu/~drwhite/Anthro179a/DistributedCognition.pdf> (Consulta: 28 de Marzo de 2008)

Hutchins, E.; Klausen, T. (1996). Distributed Cognition in an Airline Cockpit. En: Engeström and Middleton (Eds.). Cognition and communication at work. New York: Cambridge University Press. pp. 15-34

Hyman, R. (1953). Stimulus information as a determinant of reaction time. En: Journal of Experimental Psychology, vol. 45, pp. 188-196.

Irani, P.; Ware, C. (2000). Diagrams Based on Structured Object Perception. En: Advanced Visual Interfaces (AVI 2000), Palermo, Italy, pp. 61-67. Disponible en:

<http://ccom.unh.edu/vislab/PDFs/Geon.pdf> (Consulta: 4 de Mayo de 2007)

Irani, P.; Ware, C. (2000b). Should the Elements of Diagrams Be Rendered in 3D?. En: IEEE Information Visualization 2000, IEEE Computer Society, Los Alamitos, California. Disponible en:

<http://citeseer.ist.psu.edu/491628.html> (Consulta: 4 de Mayo de 2007)

Irani, P.; Tingley, M., Ware, C. (2001). Using Perceptual Syntax to Enhance

Semantic Content in Diagrams. En: IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, n.5, pp. 76-85.

Jacob, R.J.K. (1995). Eye Tracking in Advanced Interface Design. En: Virtual Environments and Advanced Interface Design, ed. by W. Barfield and T.A. Furness, pp. 258-288, Oxford University Press, New York (1995).

Jacob, R.J.K.; Karn, K.S. (2003). Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises (Section Commentary). En: The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research, ed. by J. Hyona, R. Radach, and H. Deubel, pp. 573-605, Amsterdam, Elsevier Science (2003).

Janecek, P.; Pu, P. (2005). An evaluation of semantic fisheye views for opportunistic search in an annotated image collection. En: International Journal of Digital Libraries, vol. 5., n.1, pp. 42-56.

John, B.E.; Kieras, D.E. (1996). The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast. En: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 3, n. 4, December 1996, pp. 320-351.

John, B. E. (2003). Information Processing and Skilled Behavior. En: Carroll (Ed.). Human-Computer Interaction in the New Millenium. Addison Wesley Professional. ISBN-10: 0-201-70447-1.

Jordan, P.W. (1998). Human factors for pleasure in product use. En: Applied Ergonomics, Vol. 29, nº 1, pp. 25-33.

Jorge-Botana, G.; León, J.A.; Olmos, R.; Hassan-Montero, Y. (2010). Visualizing polysemy using LSA and the predication algorithm. En: Journal of the American Society for Information Science & Technology. Pendiente de publicar.

Kamada, T.; Kawai, S. (1989). An Algorithm for Drawing General Undirected Graphs. Information Processing Letters, 31, pp.7-15, 1989.

Kaptelinin, V. (1995). Activity Theory: Implications for Human-Computer Interaction. En: Nardi, B.A. (Ed). Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction. MIT, Cambridge, MA, USA, 1995, pp. 103-116. ISBN:0-262-14058-6.

Kaptelinin, V. (1995b). Computer-Mediated Activity: Functional Organs in Social and Developmental Contexts. En: Nardi, B.A. (Ed). Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction. MIT, Cambridge, MA, USA, 1995, pp. 45-68. ISBN:0-262-14058-6.

Kaptelinin, V.; Nardi, B.A. (2006). Acting with technology: activity theory and interaction design. Cambridge, MA: MIT Press, 2006. 333 pp. ISBN 0-262-11298-1.

Kaski, S. (1997). Data exploration using self-organizing maps. Espoo, Finland: Finnish Academy of Sciences. (Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics, Computing and Management in Engineering Series No. 82). Disponible: <http://www.cis.hut.fi/~sami/thesis/> (Consulta: 13 de Agosto de 2005)

Keim, D.A. (2002). Information Visualization and Visual Data Mining. En: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 8, n. 1, January-March 2002, pp. 1-8.

Kerr, N. (2003). Thread Arcs: An Email Thread Visualization. IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis 2003), pp. 27.

Klavans, R.; Boyack, K.W. (2009). Toward a Consensus Map of Science. En: Journal of the American Society for Information Science and Technology (2009), vol. 60, n. 2, pp. 455-476.

Koffka, K. (1935). Principles of Gestalt Psychology. Lund Humphries, London, 1935.

Kohonen, T. (1989). Self-organization and associative memory. (3rd ed.). Berlin : Springer-Verlag.

Koike, H. (1995). Fractal views: a fractal-based method for controlling information display. En: ACM Transactions on Information Systems, vol. 13, n.3, pp. 305-323.

Kopanakis, I.; Theodoulidis, B. (2003). Visual data mining modeling techniques for the visualization of mining outcomes. En: Journal of Visual Languages and Computing, 14(6), pp. 543-589.

Koren, Y.; Carmel, L.; Harel, D. (2002). Ace: A fast multiscale eigenvectors computation for drawing huge graphs. The Weizmann Institute of Science. Disponible en:
<http://eprints.kfupm.edu.sa/22464/> (Consulta: 10 de Mayo de 2009).

Kruskal, J.B. (1964). Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method. En: Psychometrika, 29(2), pp. 115-129.

Kumar, A.; Fowler, R. H. (1994). A spring modeling algorithm to position nodes of an undirected graph in three dimensions. Technical Report CS-94-7, May 1994. Disponible en:

<http://www.cs.panam.edu/research/technical-reports/CS-94-7.pdf>
(Consulta: 17 de Diciembre de 2008)

Kuutti, K. (1995). Activity Theory as a potential framework for human-computer interaction research. En: Nardi, B.A. (Ed). Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction. MIT, Cambridge, MA, USA, 1995, pp. 17-44. ISBN:0-262-14058-6.

Laird, J.E.; Newell, A.; Rosenbloom, P.S. (1987). SOAR: an architecture for general intelligence En: Artificial Intelligence, vol. 33, n. 1. September 1987, pp. 1-64.

Lam, H. (2008). A Framework of Interaction Costs in Information Visualization. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 14, n. 6, November 2008, pp. 1149-1156.

Lamping, J.; Rao, R.; Pirolli, P. (1995). A focus+context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies. En: Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems, New York, NY, USA, 1995, pp. 401-408.

Landauer, T.K.; Nachbar, D.W. (1985). Selection from alphabetic and numeric menu trees using a touch screen: Breadth, Depth and Width. CHI'85 Proceedings, ACM, April 1985, pp. 73-78.

Landauer, T. K.; Foltz, P. W.; Laham, D. (1998). Introduction to Latent Semantic Analysis. En: Discourse Processes, 25, pp. 259-284.

Lavie, T.; Tractinsky, N. (2004). Assessing dimensions of perceived visual aesthetics of web sites. En: International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 60, No. 3. (March 2004), pp. 269-298.

Lehman, J.F.; Laird, J.; Rosenbloom, P. (2006). A Gentle Introduction to SOAR, an architecture for human cognition: 2006 update. Disponible en: <http://ai.eecs.umich.edu/soar/sitemaker/docs/misc/GentleIntroduction-2006.pdf> (Consulta: 3 de Enero de 2008)

Leung, Y.K.; Apperley, M.D. (1994). Review and taxonomy of distortion-oriented presentation techniques. En: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 1(2), 126-160.

Leont'ev, A.N. (1978). Activity, consciousness, and personality. Englewood Cliffs, NJ; London: Prentice-Hall. Disponible en: <http://www.marxists.org/archive/leontev/works/1978/index.htm> (Consulta: 30 de Marzo de 2008)

Lewis, R.J. (1999). Cognitive Theory, SOAR. En: International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences. Amsterdam: Pergamon, Elsevier Science.

Lieberman, H. (2006). The Tyranny of Evaluation. Disponible en: <http://web.media.mit.edu/~lieber/Misc/Tyranny-Evaluation.html> (Consulta: 9 de Julio de 2009)

Lin, X. (1997). Map displays for information retrieval. En: Journal of the American Society for Information Science, vol. 48, n.1, pp. 40-54.

Lin, C.C.; Yen, H.C. (2007). On Balloon Drawings of Rooted Trees. En: Journal of Graph Algorithms and Applications, vol. 11, n. 2, pp. 431-452.

Luhn, H.P. (1958). The automatic creation of literature abstracts. En: IBM Journal of Research and Development, vol. 2, n. 2, pp. 159-165.

MacKenzie, I.S. (1992). Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction. En: Human-Computer Interaction, vol. 7, pp. 91-139, 1992.

MacKenzie, I.S. (2003). Motor Behavior Models for Human-Computer Interaction. En: Carroll, J.M. (Ed.). HCI Models, Theories and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science. Morgan Kaufman Publishers: San Francisco (USA). ISBN 1-55860-808-7.

Mackinlay, J. (1986). Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information. En: ACM Transactions on Graphics, Vol. 5, n. 2, Abril 1986, pp. 110-141.

Mackinlay, J. D., Robertson, G. G., Card, S. K. (1991). The perspective wall: detail and context smoothly integrated. En: Scott P. Robertson, Gary M. Olson & Judith S. Olson (Eds.). Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: reaching through technology. New Orleans, Louisiana, United States, April 27-May 2, 1991 (pp. 173-176). New York, NY: ACM Press.

Maeda, J. (2006). The Laws of Simplicity. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 100pp. ISBN 0-262-13472-1.

Marchionini, G. (2006). Toward Human-Computer Information Retrieval. En: Bulletin of the American Society for Information Science and Technology, June/July 2006. Disponible en: <http://www.asis.org/Bulletin/Jun-06/marchionini.html> (Consulta: 10 de Febrero de 2009)

Marcos-Mora, M.C. (2001). HCI (Human-Computer Interaction): concepto y desarrollo. En: El Profesional de la Información, 2001, junio, vol. 10, n. 6, pp. 4-16.

Marcos-Mora, M.C. (2004). Interacción en interfaces de recuperación de información: conceptos, metáforas y visualización. Gijón: Ediciones TREA. ISBN 84-9704-118-6.

McVay, J.C.; Kane, M.J. (2009). Conducting the train of thought: Working memory capacity, goal neglect, and mind wandering in an executive-control task. En: Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 35 (1), pp. 196-204.

Mehlenbacher, B.; Duffy, T.M.; Palmer, J. (1989). Finding information on a Menu: Linking Menu Organization to the User's Goals. En: Human-Computer Interaction, vol. 4, pp. 231-251.

Melançon, G.; Herman, I. (1998). Circular Drawings of Rooted Trees. Information Systems (INS): Report INS-R9817 December 1998. Disponible en:

<http://ftp.cwi.nl/CWIreports/INS/INS-R9817.pdf> (Consulta: 1 de Noviembre de 2008)

Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. En: *Psychological Review*, 63, pp. 81-97.

Miniotas, D. (2000). Application of Fitts' Law to Eye Gaze Interaction. CHI 2000, 1-6 Abril 2000, pp. 339-340.

Molich, R.; Nielsen, J. (1990). Improving a human-computer dialogue. En: *Communications of the ACM*, 3 (33), pp. 338-348, 1990.

Morse, E.; Lewis, M. (2000). Evaluating visualizations: using a taxonomic guide. En: *International Journal of Human-Computer Studies*, (2000) 53, pp. 637-662.

Moya-Anegón, F. (1994). Los sistemas integrados de gestión bibliotecaria: estructuras de datos y recuperación de información. Madrid: ANABAD.

Moya-Anegón, F.; Herrero-Solana, V. (1999). Investigaciones en curso sobre interfaces gráficos en dos y tres dimensiones para el acceso a la información electrónica. En: *Cuadernos de Documentación Multimedia*, (8). Disponible en: <http://www.ucm.es/info/multidoc/multidoc/revista/num8/moya.html> (Consulta: 15 de Agosto de 2005)

Moya-Anegón, F.; Herrero-Solana, V.; Vargas-Quesada, B.; Chinchilla-Rodríguez, Z.; Corera-Álvarez, E.; Muñoz-Fernández, F.J.; Guerrero-Bote, V.; Olmeda-Gómez, C. (2004). Atlas de la Ciencia Española: Propuesta de un sistema de información científica. En: *Revista Española de Documentación Científica*, Vol. 27, n.1, pp. 11-29.

Moya-Anegón, F.; Vargas-Quesada, B.; Chinchilla-Rodríguez, Z.; Corera-Álvarez, E.; Muñoz-Fernández, F.J.; Herrero-Solana, V. (2007). Visualizing the Marrow of Science. En: Journal of the American Society for Information Science and Technology, Vol. 58, n. 14, pp. 2167-2179.

Munzner, T.; Hoffman, E.; Claffy, K.; Fenner, B. (1996). Visualizing the Global Topology of the Mbone. Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Information Visualization, pp. 85-92, October 28-29 1996, San Francisco, CA, 1996. Disponible en:
<http://www-graphics.stanford.edu/papers/mbone/> (Consulta: 3 de Noviembre de 2008)

Murray, B. (1998). Data smog: newest culprit in brain drain. En: The APA Monitor Online, vol. 29, n. 3. Disponible en:
<http://www.apa.org/monitor/mar98/smog.html> (Consulta: 9 de Febrero de 2009)

Muter, P. (1996). Interface Design and Optimization of Reading of Continuous Text. En: van Oostendorp, H., de Mul, S. (Eds.). Cognitive aspects of electronic text processing. Norwood, N.J.: Ablex, 1996. Disponible en:
<http://cogprints.org/753/00/pmuter1.htm> (Consulta: 7 de Abril de 2007)

Mutton, P. (2005). Force Directed Layout of Diagrams. Ph.D. Thesis, University of Kent, Canterbury, Abril de 2005.

Myers, B.A. (1992). Survey On User Interface Programming. En: Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems, 3-7 May 1992, Monterey, CA, USA, pp. 195-202.

Myers, B.A. (1994). Challenges of HCI Design and Implementation. En: Interactions, January 1994, pp. 73-83.

Myers, B.A.; Hollan, J.; Cruz, I. (Eds.) (1996). Strategic Directions in Human Computer Interaction. En: ACM Computing Surveys, Vol. 28, n. 4, December 1996.

Myers, B.A. (2003). Graphical User Interface Programming. En: Ticker, A.B. (Ed.). The Handbook of Computer Science and Engineering (2nd ed.). CRC Press, 2003.

Nardi, B.A. (1995). Activity Theory and Human-Computer Interaction. En: Nardi, B.A. (Ed). Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction. MIT, Cambridge, MA, USA, 1995, pp. 7-16. ISBN:0-262-14058-6.

Nardi, B.A. (1995b). Studying context: a comparison of activity theory, situated action models, and distributed cognition. En: Nardi, B.A. (Ed). Context and consciousness: activity theory and human-computer interaction. MIT, Cambridge, MA, USA, 1995, pp. 69-102. ISBN:0-262-14058-6.

Newell, A.; Card, S. (1985). The prospects for psychological science in human-computer interaction. En: Human-Computer Interaction, vol. 1, pp. 209-242.

Newell, A. (1990). Unified Theories of Cognition. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Nielsen, J. (1994). Usability Engineering. Morgan Kaufmann, San Francisco, 1994. ISBN 0-12-518406-9.

Nielsen, J. (1994b). Guerrilla HCI: Using Discount Usability Engineering to Penetrate the Intimidation Barrier. Disponible en: http://www.useit.com/papers/guerrilla_hci.html (Consulta: 13 de Abril de 2007)

Nielsen, J. (1994c). Heuristic evaluation. En: Nielsen, J., Mack, R.L. (Eds.), Usability Inspection Methods. John Wiley & Sons, New York, NY.

Nielsen, J. (2003). Usability 101: Introduction to Usability, Useit.com Alertbox. Disponible en:
<http://www.useit.com/alertbox/20030825.html> (Consulta: 19 de Mayo de 2009)

Nisbett, R.E.; Wilson, T.D. (1977). Telling More than We Can Know: Verbal Reports on Mental Processes. En: Psychological Review, Vol. 84, n.3, pp. 231-259.

Noik, E.G. (1993). Layout-independent fisheye views of nested graphs. En: Proceedings of the 1993 IEEE Workshop on Visual Languages, August 24-27, 1993, Bergen, Norway. pp. 336-341. Washington, DC: IEEE Computer Society.

Norman, D. A. (2002). Emotion and Design: Attractive things work better. Interactions Magazine, ix (4), pp. 36-42. Disponible en:
http://www.jnd.org/dn.mss/emotion_design_at.html (Consulta: 13 de Abril de 2007)

Norman, D.A. (2005). Human-Centered Design Considered Harmful. En: Interactions, july - august 2005, pp. 14-19.

Norman, D. A. (2007). Cautious Cars and Cantankerous Kitchens: How Machines Take Control. En: The Design of Future Things. New York: Basic Books. (en prensa). Disponible en:
<http://www.jnd.org/dn.mss/1.1%20Cautious%20Cars.pdf> (Consulta: 9 de Abril de 2007)

Norman, D. A.; Draper, S. W. (Eds.) (1986). User centered system design: New perspectives on human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

North, C.; Shneiderman, B. (2000). Snap-together visualization: can users construct and operate coordinated visualizations?. En: International Journal of Human-Computer Studies, vol. 53, n.5, pp. 715-739.

North, C. (2006). Toward measuring visualization insight. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, May-June 2006, Vol. 26, n. 3, pp. 6-9.

Nowell, L.; Schulman, R.; Hix, D. (2002). Graphical Encoding for Information Visualization: An Empirical Study. En: *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization 2002 (InfoVis'02)*, pp. 43.

Orimo, E.; Koike, H. (1999). ZASH: a browsing system for multi-dimensional data. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages*, Washington, DC, USA, September 13 - 16, 1999, (pp. 266-286). Washington: IEEE Computer Society.

Palmer, S.; Rock, I. (1994). Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness. En: *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 1, n. 1, pp. 29-55.

Palmer, S.; Rock, I. (1994b). On the nature and order of organizational processing: A reply to Peterson. En: *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 1, n. 4, pp. 515-519.

Palmer, J. (1995). Attention in Visual Search: Distinguishing Four Causes of a Set-Size Effect. En: *Current Direction in Psychological Science*, vol. 4, n. 4, pp. 118-123.

Parker, G.; Franck, G.; Ware, C. (1998). Visualization of large nested graphs in 3D: navigation and interaction. En: *Journal of Visual Languages and Computing*, vol. 9, n.3, pp. 299-317.

Pavlo, A. (2006). Interactive, tree-based graph visualization. Master Thesis, Rochester Institute of Technology, 17 de Marzo de 2006. Disponible en:
<https://ritdml.rit.edu/dspace/handle/1850/1543> (Consulta: 21 de Julio de 2009)

Payne, S.J. (2003). Users' Mental Models: The Very Ideas. En: Carroll, J.M. (Ed.). HCI Models, Theories and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science. Morgan Kaufman Publishers: San Francisco (USA). ISBN 1-55860-808-7.

Pearson, K. (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. En: Philosophical Magazine, vol. 2, pp. 559-572.

Pérez Álvarez, M. (1985). Moda, Mito e Ideología de la Psicología Cognitiva. En: Papeles del Psicólogo, Mayo, nº20, 1985.

Perry, M. (2003). Distributed Cognition. En: Carroll, J.M. (Ed.). HCI Models, Theories and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science. Morgan Kaufman Publishers: San Francisco (USA). ISBN 1-55860-808-7.

Picard, R.W.; Klein, J. (2002). Computers that Recognise and Respond to User Emotion: Theoretical and Practical Implications. En: Interacting with computers, 14, 2, 2002.

Pierce, B.J.; Parkinson, S.R.; Sisson, N. (1992). Effects of semantic similarity, omission probability and number of alternatives in computer menu search. En: International Journal of Man-Machine Studies, vol. 37, pp. 653-677.

Plaisant, C. (2004). The Challenge of Information Visualization Evaluation. AVI '04, May 25-28, 2004, Gallipoli (LE), Italy, pp. 109-116.

Plumlee, M.D.; Ware, C. (2006). Zooming Versus Multiple Window Interfaces: Cognitive Costs of Visual Comparisons. En: ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 13, No. 2, August 2006, pp 1-31.

Polanco, X., Zartl, A. (2002). Information visualization. EICSTES Project. Deliverable 1.4. State of the art part c: WP9. Disponible en: http://eicstes.inist.fr/public/D1.4_Visualization_WP9.pdf (Consulta: 12 de Abril de 2005)

Purchase, H.C. (1998). The Effects of Graph Layout. Proceedings of the Australasian Conference on Computer Human Interaction, pp. 80-86.

Purchase, H.C. (2000). Effective information visualisation: a study of graph drawing aesthetics and algorithms. En: Interacting with Computers, vol. 13, pp. 147-162.

Purchase, H.C.; Carrington, D.; Alder, J. (2002). Empirical Evaluation of Aesthetics-based Graph Layout. En: Empirical Software Engineering, vol. 7, pp. 233-255.

Quirin, A.; Córdón, O.; Santamaría, J.; Vargas-Quesada, V.; Moya-Anegón, F. (2008a). A new variant of the Pathfinder algorithm to generate large visual science maps in cubic time. En: Information Processing and Management, 44 (4), July 2008, 1611-1623.

Quirin, A.; Córdón, O.; Guerrero-Bote, V.; Vargas-Quesada, B.; Moya-Anegón, F. (2008b). A Quick MST-Based Algorithm to Obtain Pathfinder Networks ($\infty, n-1$). En: Journal of the American Society for Information Science and Technology, 59(12), pp. 1912-1924, 2008.

Ranganath, C.; Blumenfeld, R.S. (2005). Doubts about double dissociations between short- and long-term memory. En: Trends in Cognitive Sciences, 9(8), August 2005, pp. 374-380.

Reingold, E.M.; Tilford, J.S. (1981). Tidier Drawing of Trees. En: IEEE Transactions on Software Engineering, SE-7, (2), pp. 223-228, 1981.

Rennison, E. (1994). Galaxy of news: an approach to visualizing and understanding expansive news landscapes. En: UIST 94, ACM Symposium on User Interface Software and Technology. (pp.3-12). New York, NY: ACM Press.

Ribera-Turró, M. (2005). Evolución y tendencias en la Interacción Persona-Ordenador. En: El Profesional de la Información, noviembre-diciembre 2005, Vol. 15, n. 6, pp. 414-422.

Rijsbergen, C.J. (1975). Information retrieval. London: Butterworths, 1975. Disponible: <http://www.dcs.gla.ac.uk/Keith/Preface.html> (Consulta: 14 de Mayo de 2005)

Robertson, G.; Mackinlay, J.; Card, S. (1991). Cone Trees: Animated 3D Visualizations of Hierarchical Information. En: Proceedings of ACM SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems '91, pp. 189-194.

Rodríguez-Tello, E.; Hao, J.K.; Torres-Jimenez, J. (2008). An effective two-stage simulated annealing algorithm for the minimum linear arrangement problem. En: Computers & Operations Research, vol. 35, pp. 3331-3346.

Rogers, Y. (1997). A brief introduction to Distributed Cognition. Preprint. Disponible en: <http://mcs.open.ac.uk/yr258/papers/dcog/dcog-brief-intro.pdf> (Consulta: 28 de Marzo de 2008)

Rogers, Y. (2004). New Theoretical approaches for Human-Computer Interaction. En: Annual Review of Information, Science and Technology, vol. 38, pp. 87-143. Disponible en: <http://www.informatics.sussex.ac.uk/research/groups/interact/publications/ARIST-Rogers.pdf> (Consulta: 31 de Marzo de 2008)

Rogers, Y.; Ellis, J. (1994). Distributed cognition: an alternative framework for analysing and explaining collaborative working: Organizational perspectives on collaborative working. En: Journal of Information Technology, 1994, vol. 9, n. 2, pp. 119-128.

Sackel, B. (1997). Human-Computer Interaction - Whence and whither?. Journal of the American Society for Information Science, 48 (11), pp. 970-986.

Salton, G.; Wong, A.; Yang, C.S. (1975). A Vector Space Model for Automatic Indexing. *Communications of ACM*, vol. 18, n. 11, November 1975.

Salton, G.; Buckley, C. (1988). Term-Weighting Approaches in Automatic Text Retrieval. En: *Information Processing & Management*, vol. 24, n.5, pp. 513-523.

Sarkar, M.; Brown, M.H. (1992). Graphical fisheye view of graphs. En: Penny Bauersfeld, John Bennett & Gene Lynch (Eds.). *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. Monterey, California, United States, May 03 - 07, 1992. pp. 83-91. New York, NY: ACM Press.

Schaffer, D. et al. (1996). Navigating hierarchically clustered networks through fisheye and full-zoom methods. En: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 3, n. 2, pp. 162-188.

Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. En: *The Bell System Technical Journal*, vol.27, pp. 379-423, 623-656, Julio, Octubre, 1948.

Shiloach, Y. (1976). Arrangements of Planar Graphs on the Planar Lattice. Ph.D. Thesis, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, 1976. Referenciado en: Battista et al. (1994)

Schneiderman, B. (1986). Eight Golden Rules of Interface Design. Disponible en:
<http://faculty.washington.edu/jtenenbg/courses/360/f04/sessions/schneidermanGoldenRules.html> (Consulta: 1 de Junio de 2009).

Shneiderman, B. (1992). Tree visualization with tree-maps: 2-d space-filling approach. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 11, n. 1, January 1992, pp. 92-99.

Shneiderman, B. (1996). The Eyes Have It: A Taxonomy for Information Visualizations. Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Visual Languages, pp. 336.

Shneiderman, B. (1999). Treemaps for space-constrained visualization of hierarchies. Documento no publicado (última actualización realizada el 17 de Junio de 2008 por Catherine Plaisant). Disponible en: <http://www.cs.umd.edu/hcil/treemap-history/> (Consulta: 4 de Noviembre de 2008)

Shneiderman, B. (2003). Leonardo's Laptop: Human needs and the new computing Technologies. Cambridge: MIT Press, 2003. ISBN 0-262-19476-7.

Shneiderman, B.; Plaisant, C. (2006). Strategies for evaluating information visualization tools: multi-dimensional in-depth long-term case studies. Proceedings of the 2006 AVI workshop on Beyond time and errors: novel evaluation methods for information visualization, Venice, Italy, pp. 1-7.

Sibert, L.E.; Jacob, R.J.K. (2000). Evaluation of Eye Gaze Interaction. Proc. ACM CHI 2000 Human Factors in Computing Systems Conference, pp. 281-288, Addison-Wesley/ACM Press (2000).

Sinha, R. (2003). Beyond cardsorting: Free-listing methods to explore user categorizations. En: Boxes & Arrows, December, n. 2007. Disponible en: http://www.boxesandarrows.com/view/beyond_cardsorting_free_listing_methods_to_explore_user_categorizations (Consulta: 25 de Diciembre de 2007).

Small, H; Garfield, E. (1985) The geography of science: disciplinary and nacional mappings. En: Journal of Information Science, vol. 11, pp. 147-159.

Spark-Jones, K.; Walker, S.; Robertson, S.E. (2000). A probabilistic model of information retrieval: development and comparative experiments (Part 2). En: *Information Processing and Management*, 36 (2000), pp. 809-840.

Spence, R.; Apperley, M. (1982). Data base navigation: an office environment for the professional. En: *Behaviour and Information Technology*, 1(1), 43-54.

Sperling, G. (1960). The Information available in brief visual presentations. En: *Psychological Monographs*, nº 74 (498).

Stasko, J.; Catrambone, R.; Guzdial, M.; McDonald, K. (2000). An evaluation of space-filling information visualizations for depicting hierarchical structures. En: *International Journal of Human-Computer Studies* (2000) 53, pp. 663-694.

Steinbach, M., Karypis, G., Kumar, V. (2000). A Comparison of Document Clustering Techniques. Technical Report 00-034. Disponible en: <http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/node/157> (Consulta: 15 de Enero de 2007).

Stephanidis, C. (2001). *User Interfaces for All: New perspectives into Human-Computer Interaction*. En: Stephanidis, C (Ed.), *User Interfaces for All - Concepts, Methods, and Tools*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. ISBN 0-8058-2967-9.

Storey, MA.D.; Wong, K.; Fracchia, F.D.; Müller, H.A. (1997). On integrating visualization techniques for effective software exploration. En: *Proceedings of the 1997 IEEE Symposium on Information Visualization*, October 18-25, pp. 38-45.

Storey, MA. D.; Fracchia, F.D.; Müller, H.A. (1999). Customizing a fisheye view algorithm to preserve the mental map. En: *Journal of Visual Languages and Computing*, 10(3), pp. 245-267.

Strumpen, V.; Hoffmann, H.; Agarwal, A. (2003). A Stream Algorithm for the SVD. MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, Technical Report, October 22, 2003. Disponible en:
<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/30429> (Consulta: 29 de Junio de 2008)

Tognazzini, B. (2003). First Principles of Interaction Design. Disponible en:
<http://www.asktog.com/basics/firstPrinciples.html> (Consulta: 1 de Junio de 2009)

Tolman, C.W. (1988). The basic vocabulary of Activity Theory. En: Activity Theory, vol. 1, pp. 14-20. Disponible en:
<http://www.comnet.ca/~pballan/AT2.htm> (Consulta: 31 de Marzo de 2008)

Treisman, A.M.; Gelade, G. (1980). A Feature-Integration Theory of Attention. En: Cognitive Psychology, n.12, pp. 97-136.

Treisman, A.M.; Gormican, S. (1988). Feature Analysis in Early Vision: Evidence from Search Asymmetries. En: Psychological Review, vol. 95, n. 1, pp. 15-28.

Tunkelang, D. (1999). A Numerical Optimization Approach to General Graph Drawing. Tesis Doctoral, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Enero de 1999. Disponible en:
<http://reports-archive.adm.cs.cmu.edu/anon/1998/CMU-CS-98-189.pdf>
(Consulta: 3 de Febrero de 2009)

Turetken, O.; Sharda, R. (2004). Development of a fisheye-based information search processing aid (FISPA) for managing information overload in the web environment. En: Decision Support Systems, 37(3), pp. 415-434.

Valiati, E.R.A.; Freitas, C.M.D.S.; Pimenta, M.S. (2008). Using multi-dimensional in-depth long-term case studies for information visualization

evaluation. Proceedings of the 2008 conference on Beyond time and errors: novel evaluation methods for Information Visualization, Florence, Italy, Article n. 9.

Vismara, L.; Battista, G.D.; Garg, A.; Liotta, G.; Tamassia, R.; Vargiu, F. (2000). Experimental studies on graph drawing algorithms. *Software: Practice and Experience*, vol. 30, pp. 1235-1284.

Walker, J.Q. (1990). A Node-Positioning Algorithm for General Trees. *Software: Practice and Experience*, vol. 20, n. 7, pp. 685-705, 1990.

Walshaw, C. (2003). A Multilevel Algorithm for Force-Directed Graph-Drawing. En: *Journal of Graph Algorithms and Applications*, vol. 7, no. 3, pp. 253-285.

Wang, Y.; Wang, Y. (2002). Cognitive Models of the Brain. En: *Proceedings of the First IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI'02)*, August 2002, Calgary, Alberta, Canada, pp.259-269.

Ware, C. (2001). Designing with a 2 1/2-D attitude. En: *Information Design Journal*, Vol. 10, n. 3, pp. 258-265.

Ware, C.; Purchase, H.; Colpoys, L.; McGill, M. (2002). Cognitive measurements of graph aesthetics. En: *Information Visualization*, vol. 1, n. 2, pp. 103-110.

Ware, C. (2003). Design as Applied Perception. En: Carroll, J.M. (Ed.). *HCI Models, Theories and Frameworks: Toward a Multidisciplinary Science*. Morgan Kaufman Publishers: San Francisco (USA). ISBN 1-55860-808-7.

Ware, C. (2004) *Information Visualization: Perception for Design*. (2nd Edition) Morgan Kaufman. December, 435 pages.

Ware, C. (2008). *Visual Thinking for Design*. Morgan Kaufman. 197 pages.

Webster, M.A. (1996). Human colour perception and its adaptation. En: Network: Computation in Neural Systems, vol. 7, n. 4, pp. 587-634.

Wehrend, S.; Lewis, C. (1990). A problem-oriented classification of visualization techniques. En: Proceedings IEEE Visualization '90, pp. 139-143.

Weiser, M.; Gold, R.; Brown, J.S. (1999). The origins of ubiquitous computing

research at PARC in the late 1980s. IBM Systems Journal, Vol 38, n. 4, 1999. Disponible en:

<http://www.research.ibm.com/journal/sj/384/weiser.pdf> (Consulta: 7 de Abril de 2007)

Wilson, T.D. (2006). A re-examination of information seeking behaviour in the context of activity theory. En: Information Research, vol. 11, n. 4.

Disponible en: <http://InformationR.net/ir/11-4/paper260.html> (Consulta: 30 de Marzo de 2008)

Wolfe, J.M. (2005). How Might the Rules that Govern Visual Search Constrain the Design of Visual Displays?. SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol. 36, n. 1, pp. 1395-1397. Disponible en:

http://search.bwh.harvard.edu/new/presentations/Wolfe_SID_2005.pdf (Consulta: 23 de Abril de 2007)

Wolfe, J.M. (2006). Guided Search 4.0: Current Progress with a Model of Visual Search. En: MIT Scene Understanding Symposium, Spring 2006. Disponible en:

<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Brain-and-Cognitive-Sciences/9-459Spring-2006/02566B5F-515F-4D29-9E22-74FE6B0BBB45/0/1445paper2.pdf> (Consulta: 17 de Abril de 2007)

Wolfe, J.M; Álvarez, G.A., Horowitz, T.S. (2000). Attention is fast but volition is slow. En: Nature, Vol. 406, n. 6797, pp. 691.

Wolfe, J. M.; Cave, K. R.; Franzel, S. L. (1989). Guided Search: An alternative to the Feature Integration model for visual search. En: Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance, vol. 15, n. 3, pp. 419-433.

Wolfe, J. M.; Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it?. En: Nature Reviews: Neuroscience, Vol. 5, n. 6, pp. 495-501.

Wolfe, J.M.; Klempe, N.; Dahlen, K. (2000). Postattentive vision. En: Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 26, n.2, pp. 693-716.

Woodman, G.F.; Vecera, S.P.; Luck, S.J. (2003). Perceptual organization influences visual working memory. En: Psychonomic Bulletin & Review, Vol. 10, n. 1, pp. 80-87.

Wünsche, B.; Lobb, R. (2001). A scientific visualization schema incorporating perceptual concepts. Proceedings of ICVNZ'01, pp. 31-36.

Xu, K. (2007). How Human Brain Understand Visualisation and Graph Visualisation Evaluation. Presentación COMP4048 Information Visualisation. National ICT Australia. Disponible en: <http://www.cs.usyd.edu.au/~visual/comp4048/> (Consulta: 17 de Abril de 2008)

Yang, J.; Ward, M.O.; Rundensteiner, E.A. (2002). InterRing: An Interactive Tool for Visually Navigating and Manipulating Hierarchical Structures. IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis 2002), 2002, pp. 77.

Yang, C.; Chen, H.; Hong, K. (2003). Visualization of large category map for Internet browsing. En: Decision Support System, 35(1), pp. 89-102.

Yee, K.P.; Fisher, D.; Dhamija, R.; Hearst, M. (2001). Animated Exploration of Dynamic Graphs with Radial Layout. IEEE Symposium on Information Visualization, 22-23 October 22, San Diego, pp. 43-50.

Yi, J.S.; Kang, Y.; Stasko, J.T.; Jacko, J.A. (2008). Understanding and characterizing insights: how do people gain insights using information visualization? . Proceedings of the 2008 conference on Beyond time and errors: novel evaluation methods for Information Visualization, Florence, Italy, article No. 4.

Zhai, S. (2006). Evaluation is the worst form of HCI research except all those other forms that have been tried. Disponible en:
<http://www.almaden.ibm.com/u/zhai/papers/EvaluationDemocracy.htm>
(Consulta: 9 de Julio de 2009)

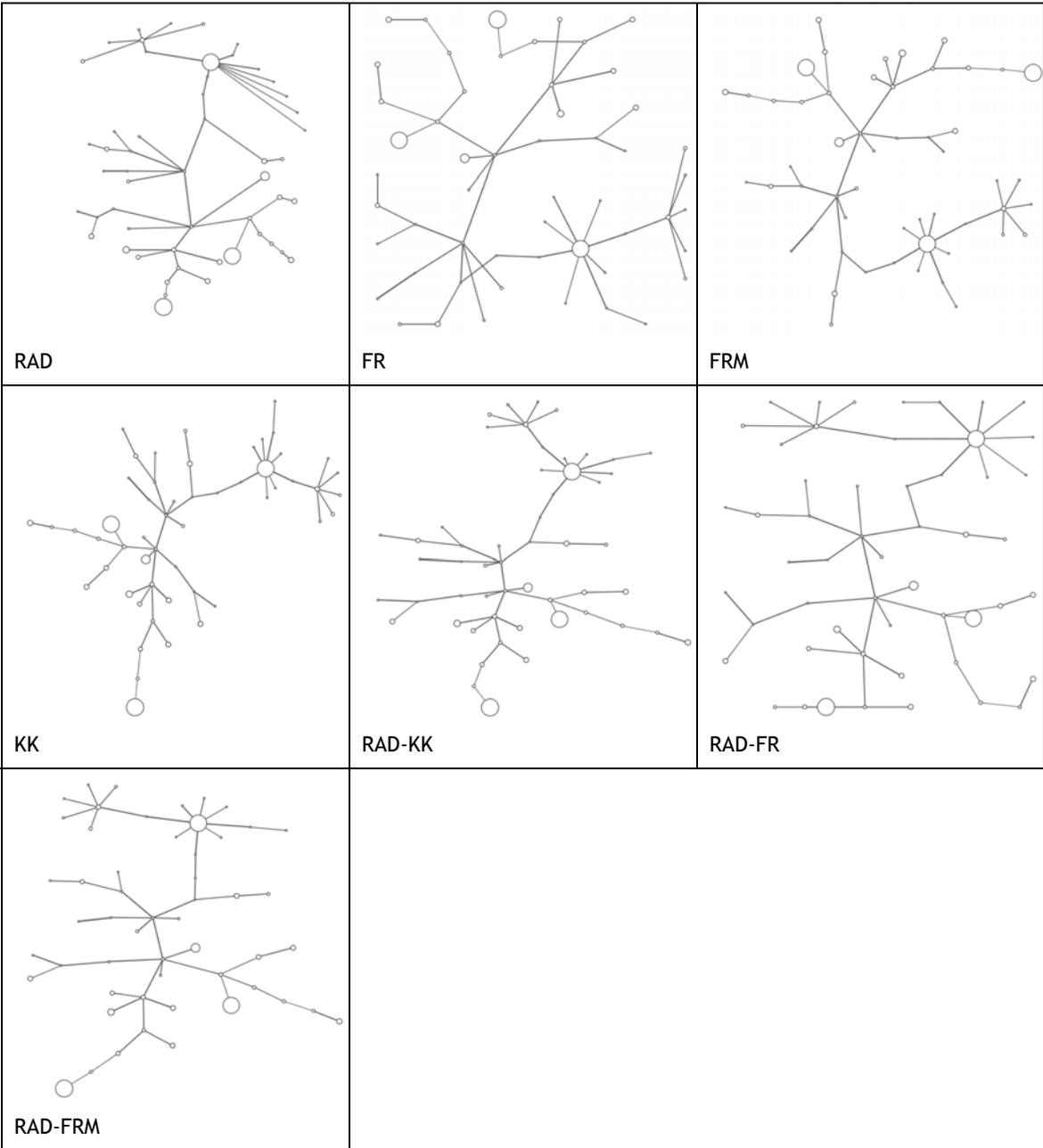
Zhang, P.; Dran, G.M. (2000). Satisfiers and Dissatisfiers: A Two-Factor Model for Website Design and Evaluation. En: Journal of the American Society for Information Society, vol. 51, n. 14, pp. 1253-1268.

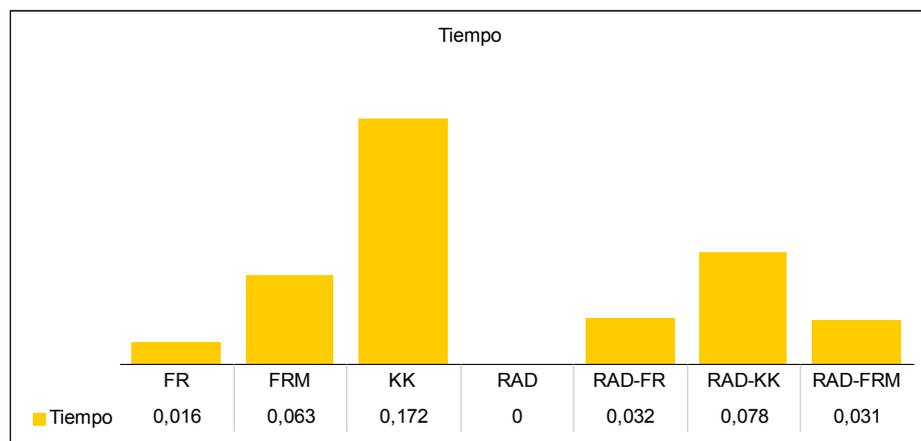
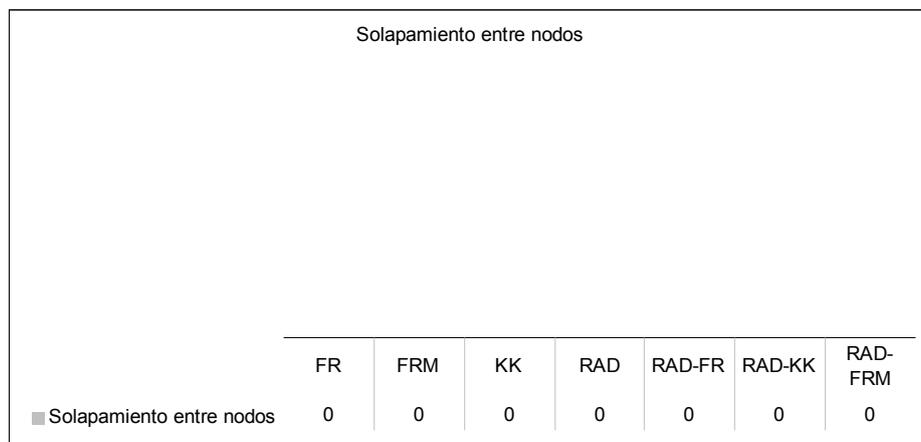
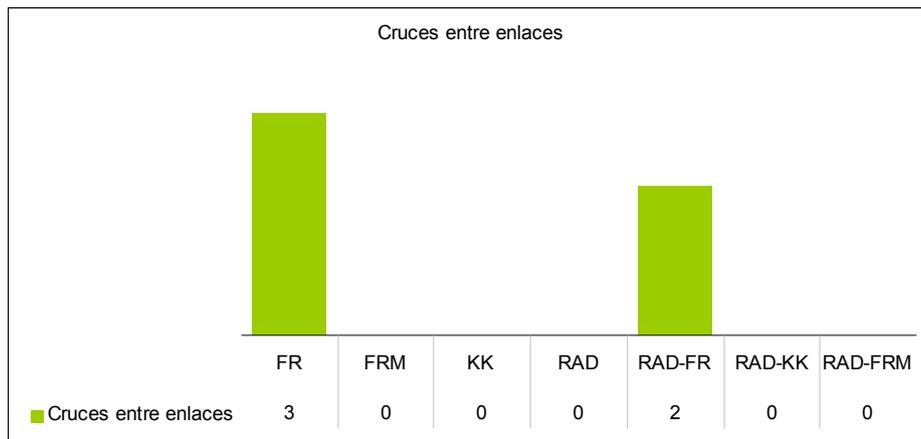
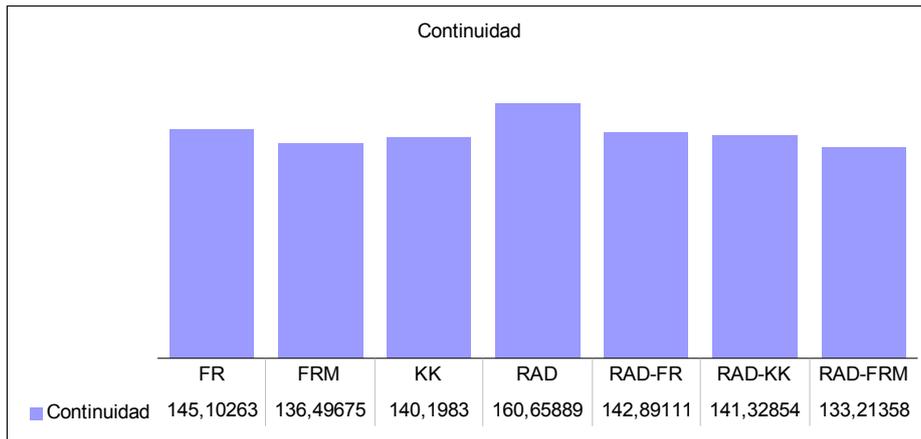
Zhu, W.; Chen, C. (2007). Storylines: Visual exploration and analysis in latent semantic spaces. En: Computers & Graphics, 31(3), pp. 338-349.

Zhou, W.; Huang, J. (2008). Fast Multi-level Algorithm for Drawing Large Undirected Graphs. Internet Computing in Science and Engineering, ICICSE'08, 28-29 Enero, pp. 110-117.

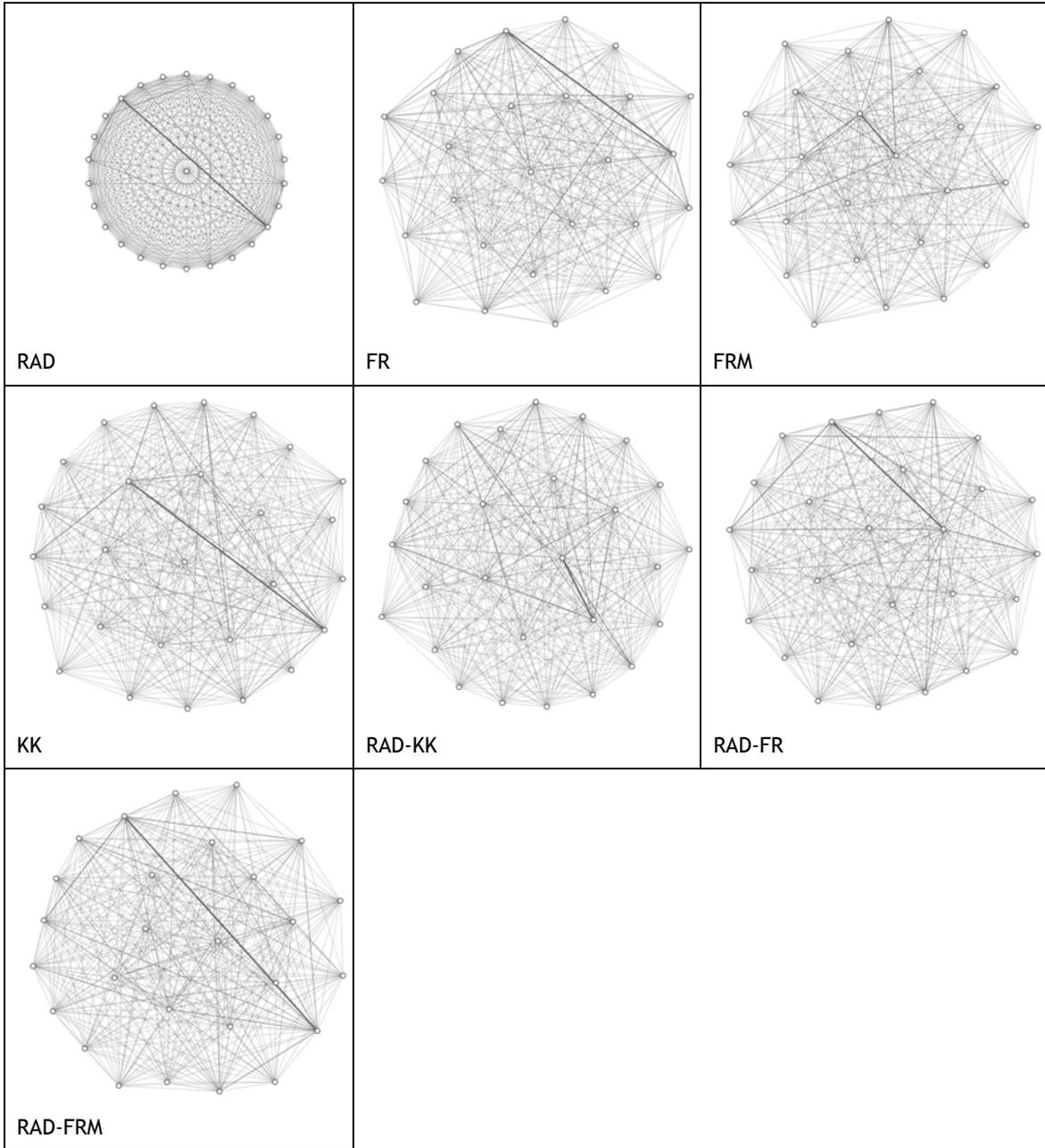
Zuk, T. et al (2006). Heuristics for information visualization evaluation. Proceedings of the 2006 AVI, workshop on "Beyond time and errors: novel evaluation methods for information visualization", Venice, Italy, 2006, pp. 1-6.

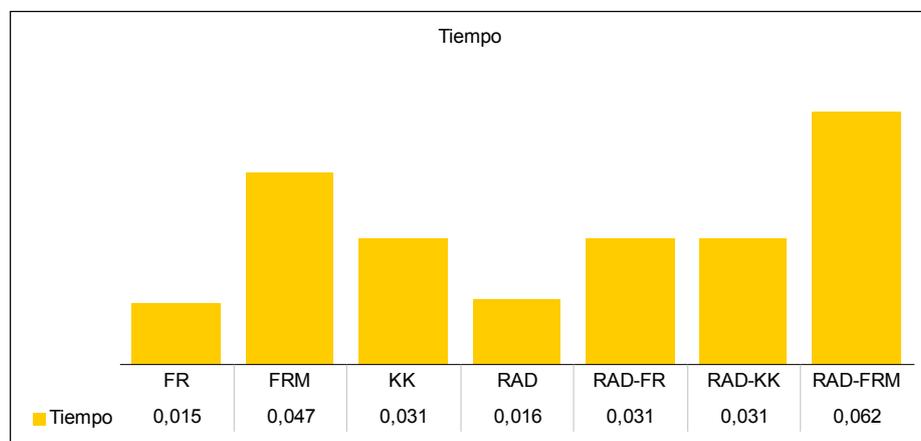
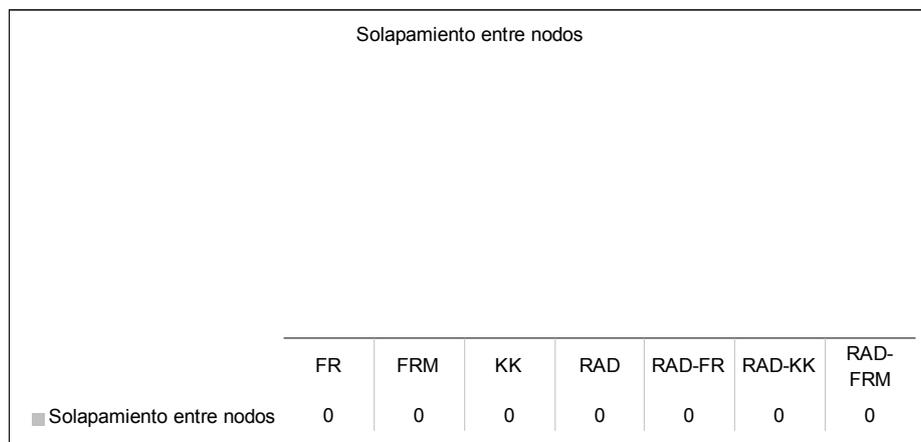
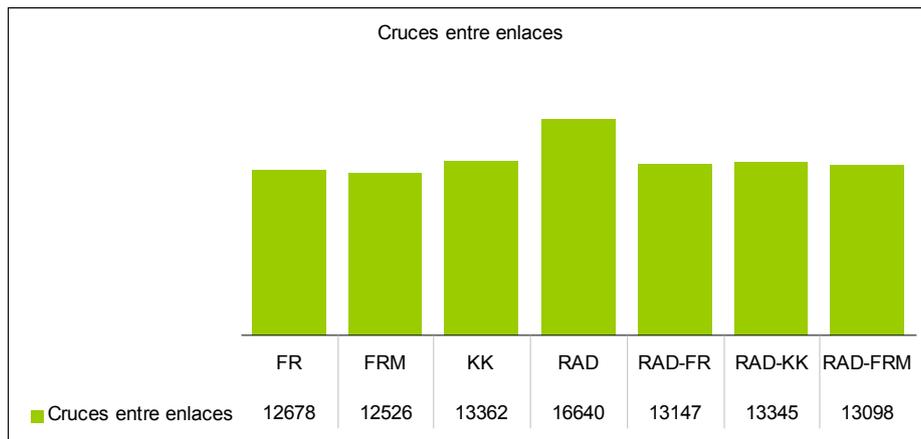
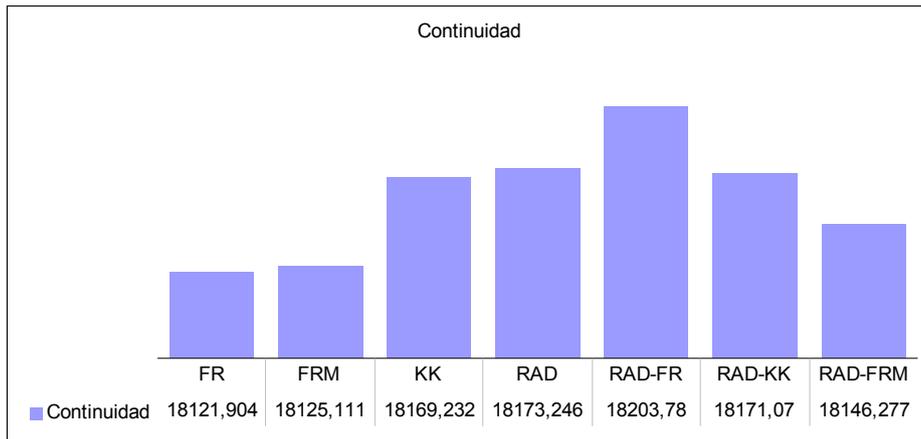
Net1



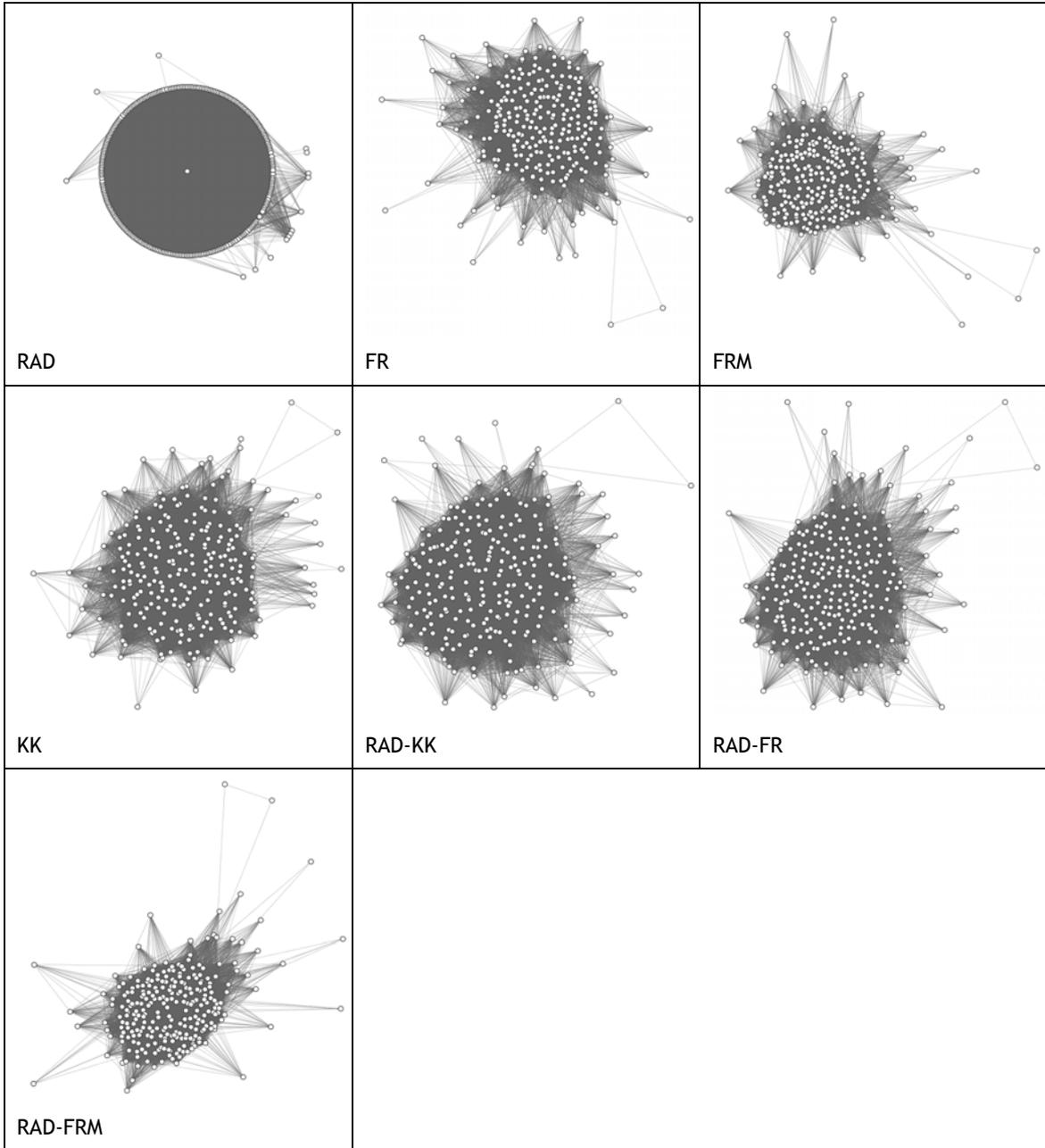


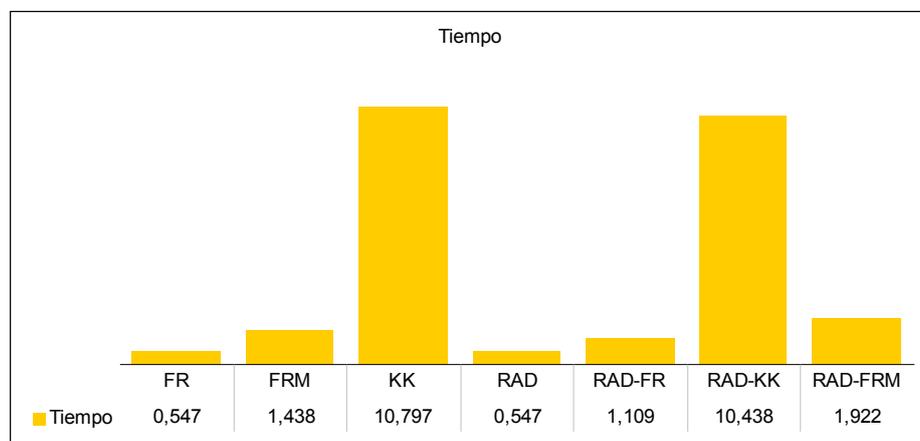
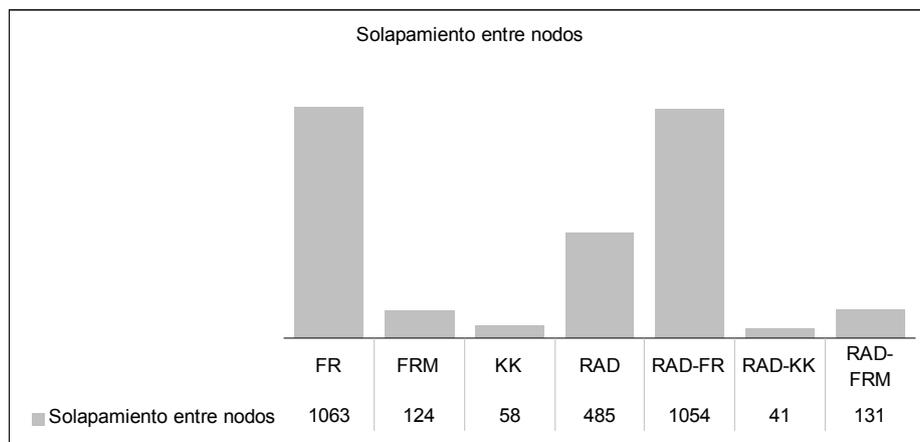
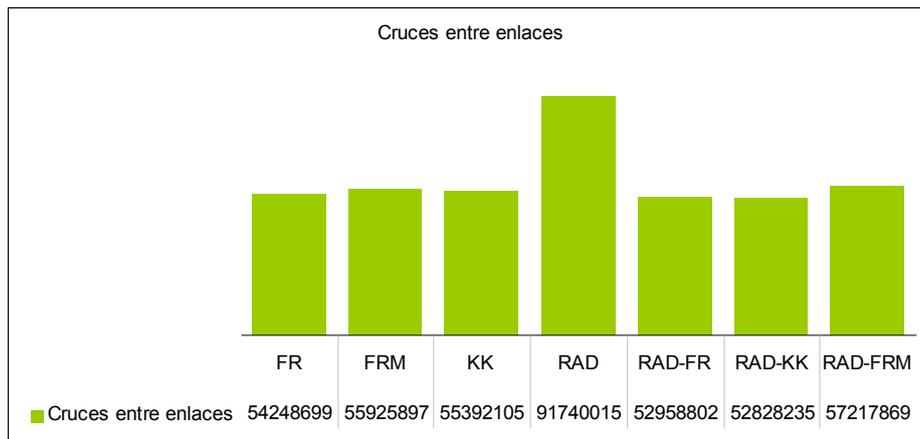
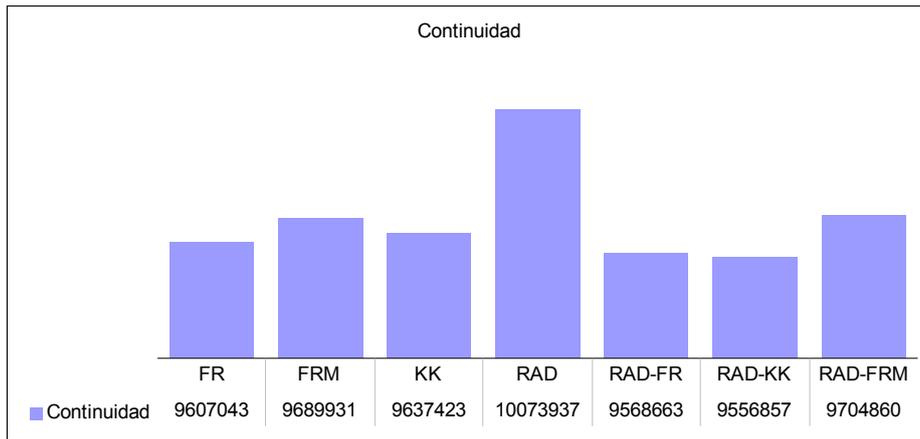
Net2



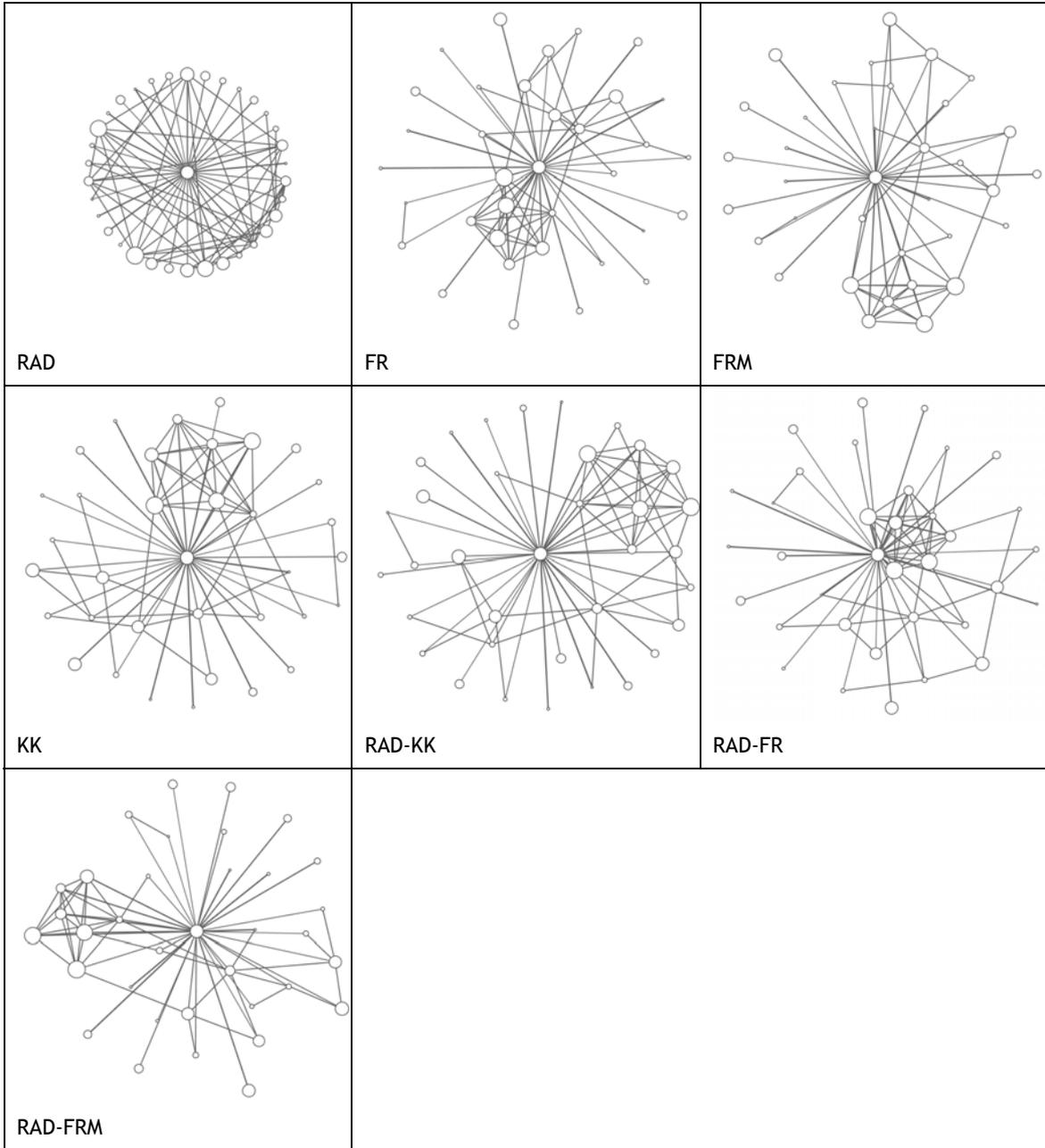


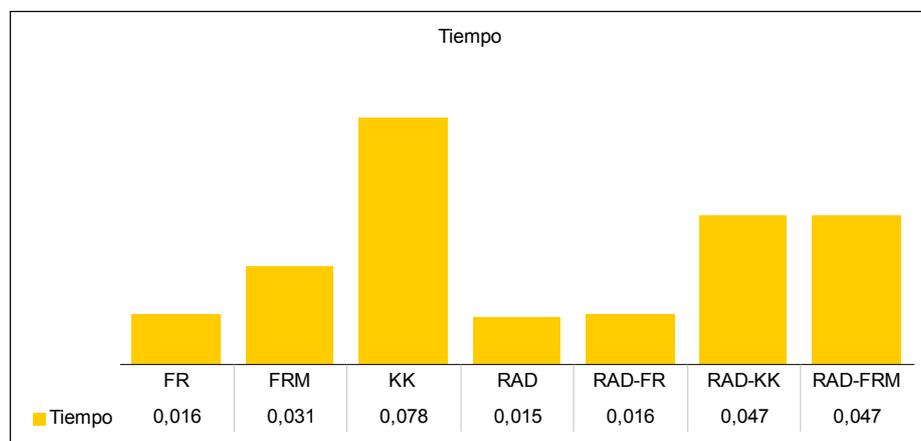
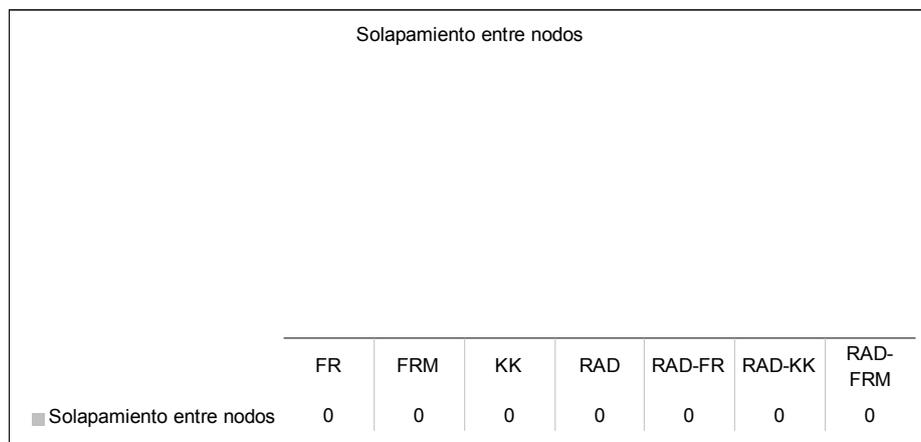
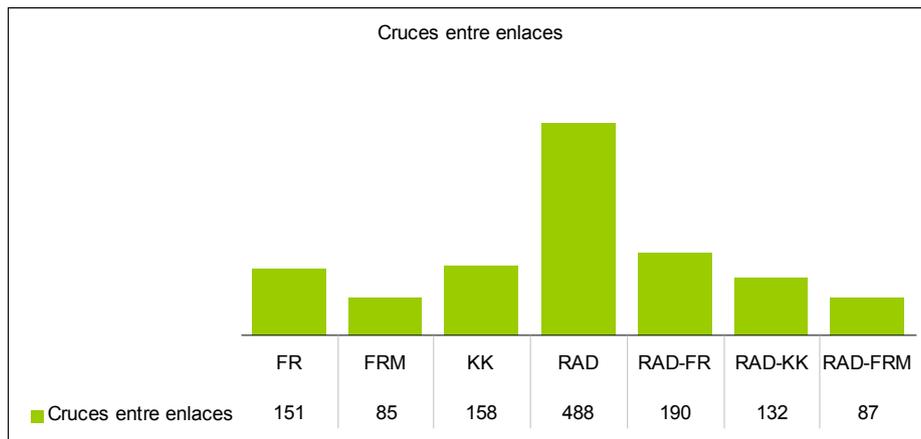
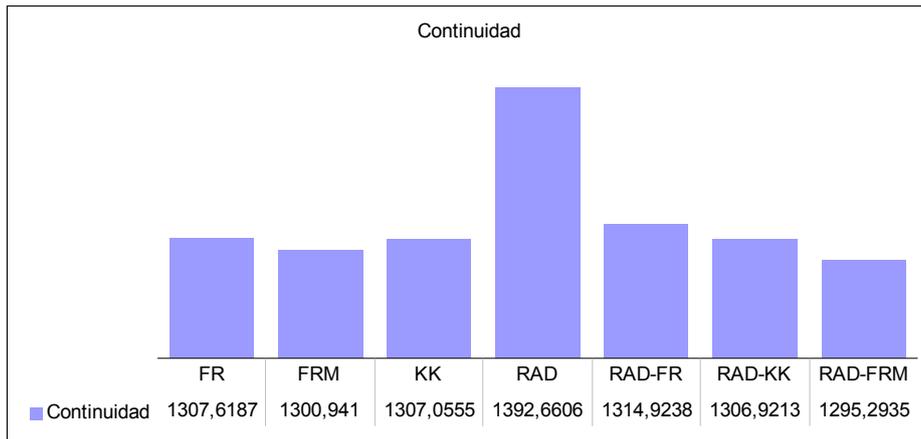
Net3



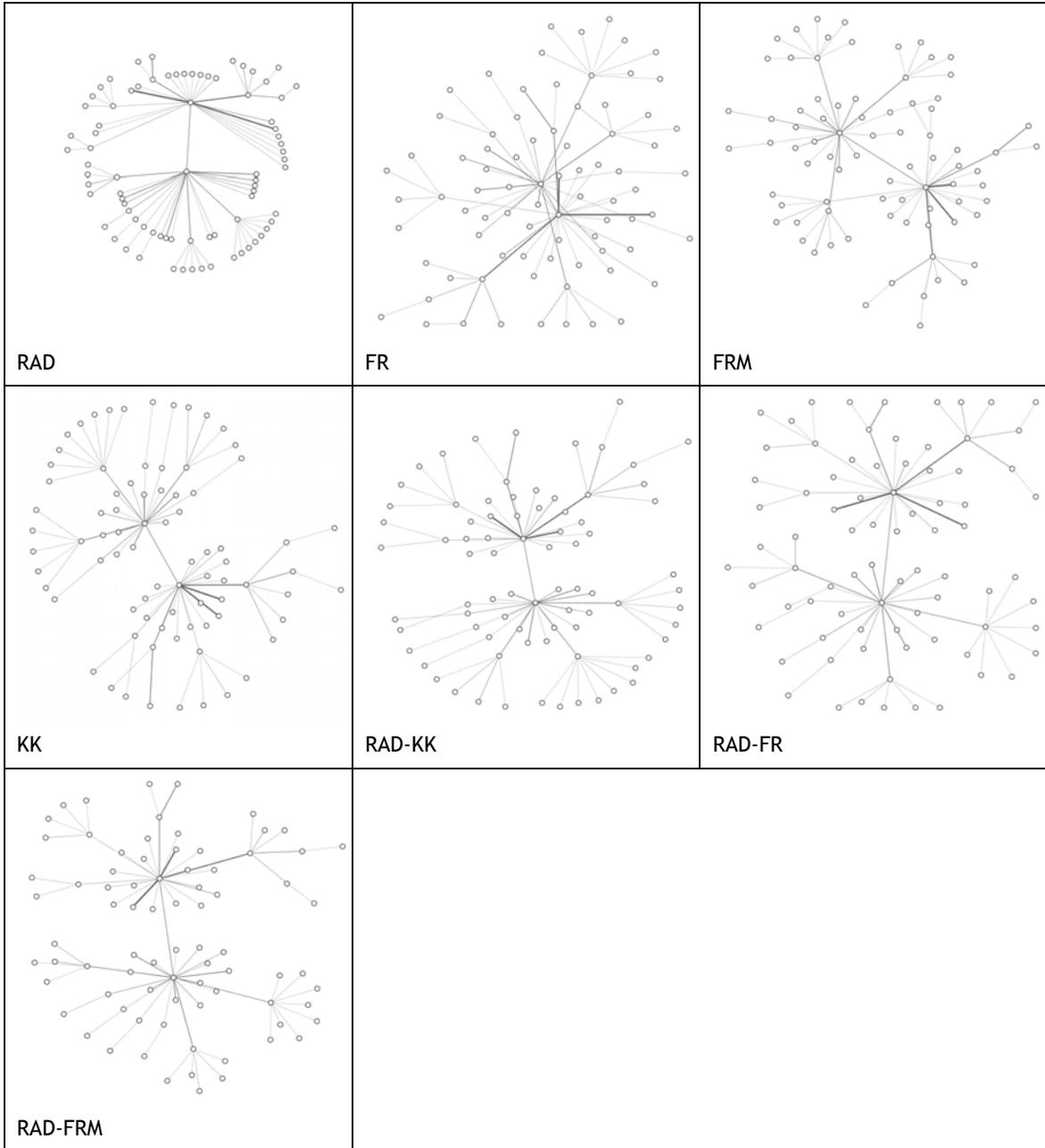


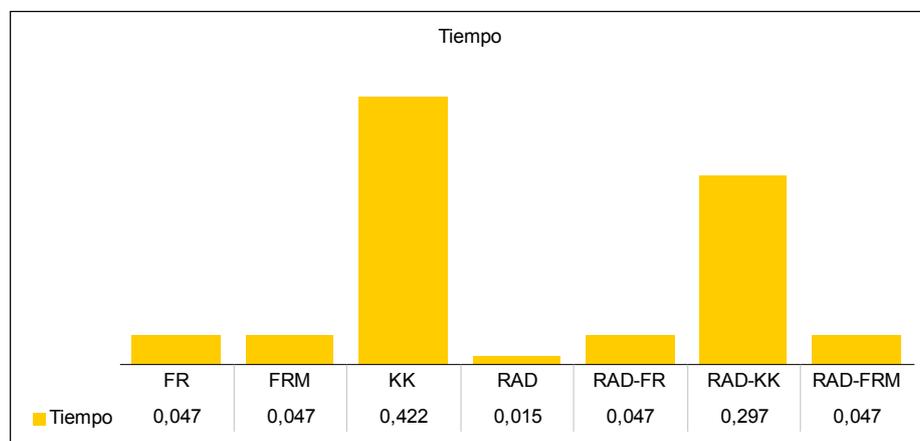
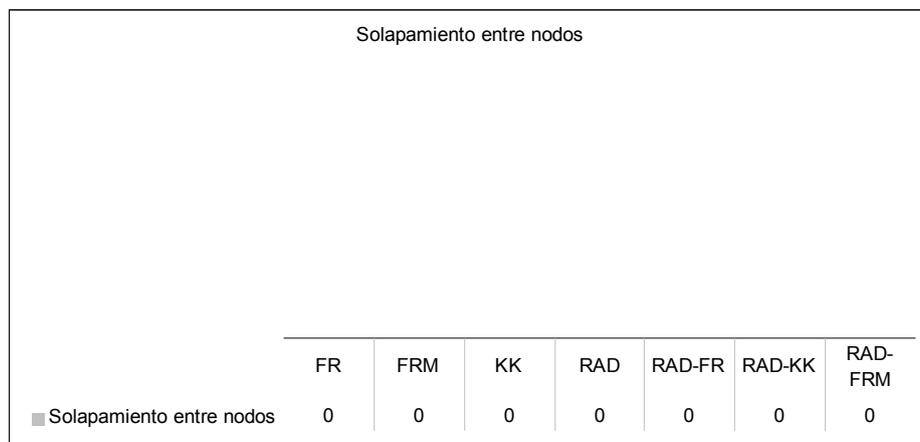
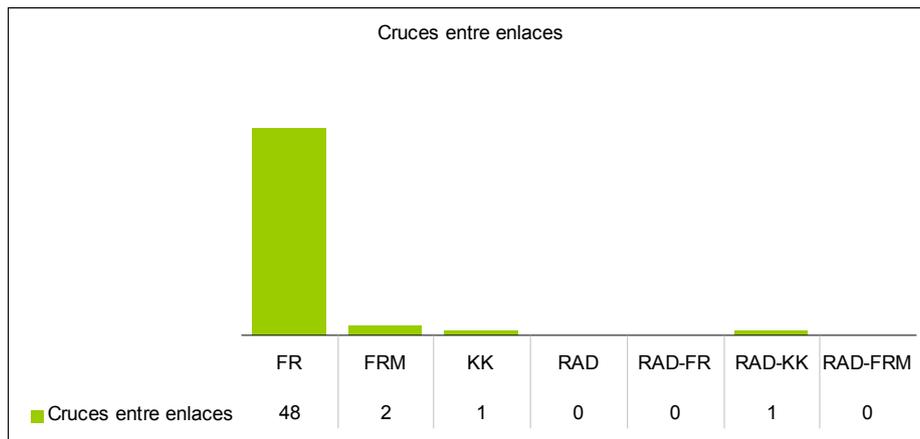
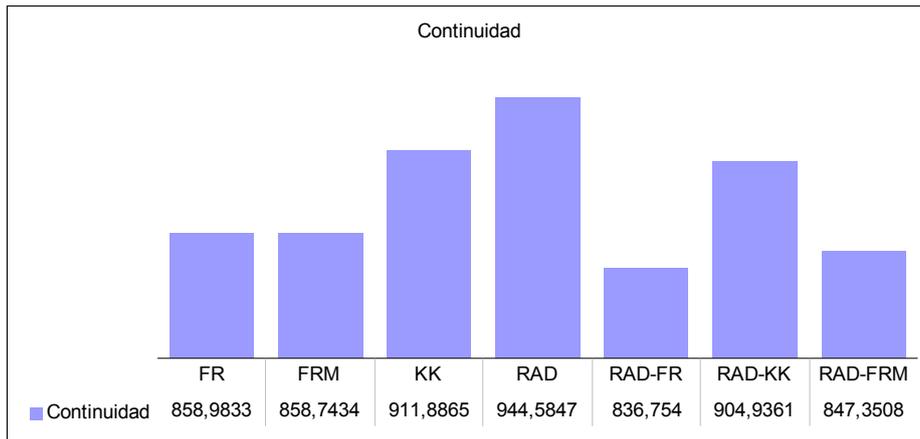
Net4



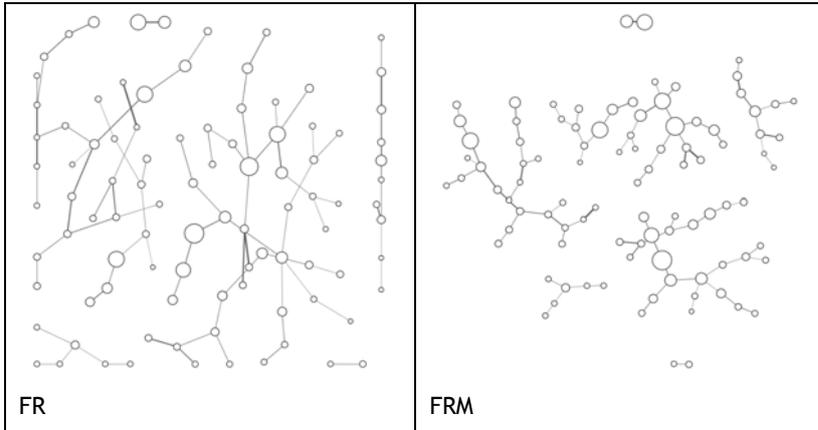


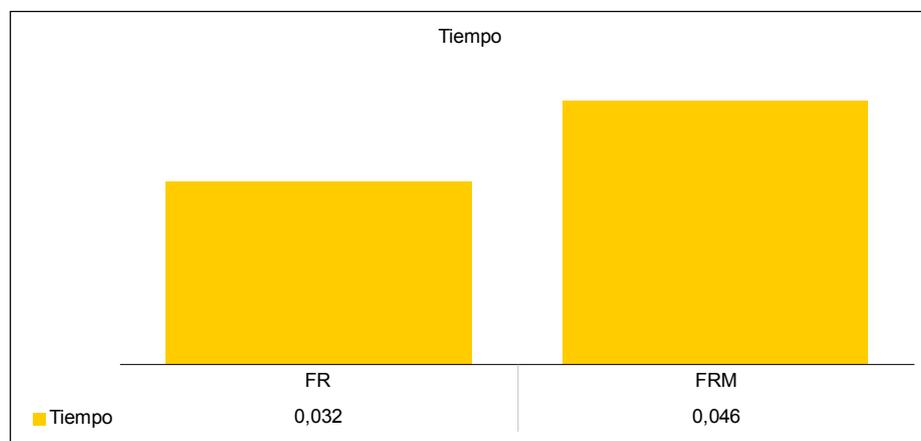
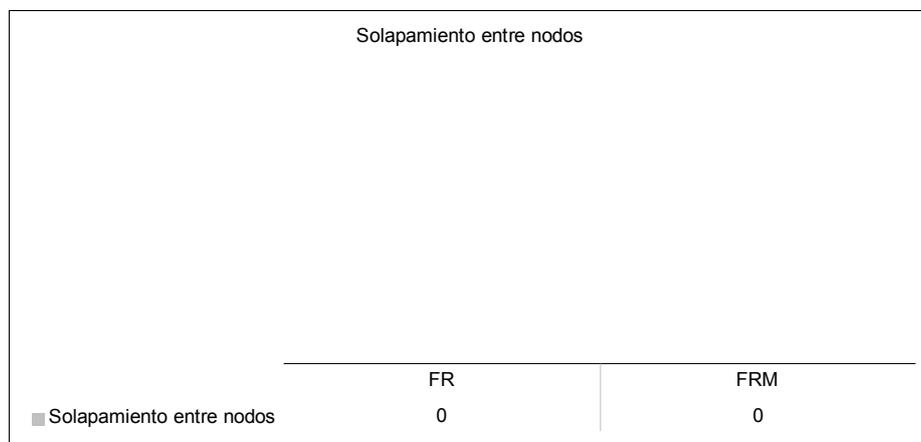
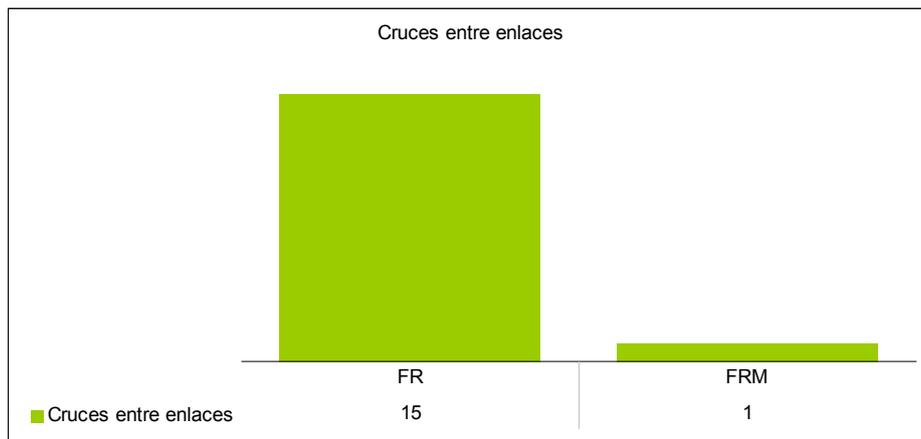
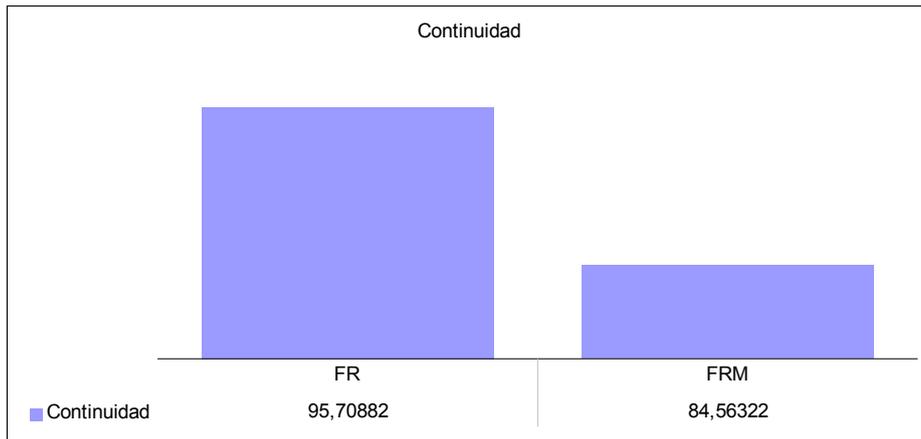
Net5



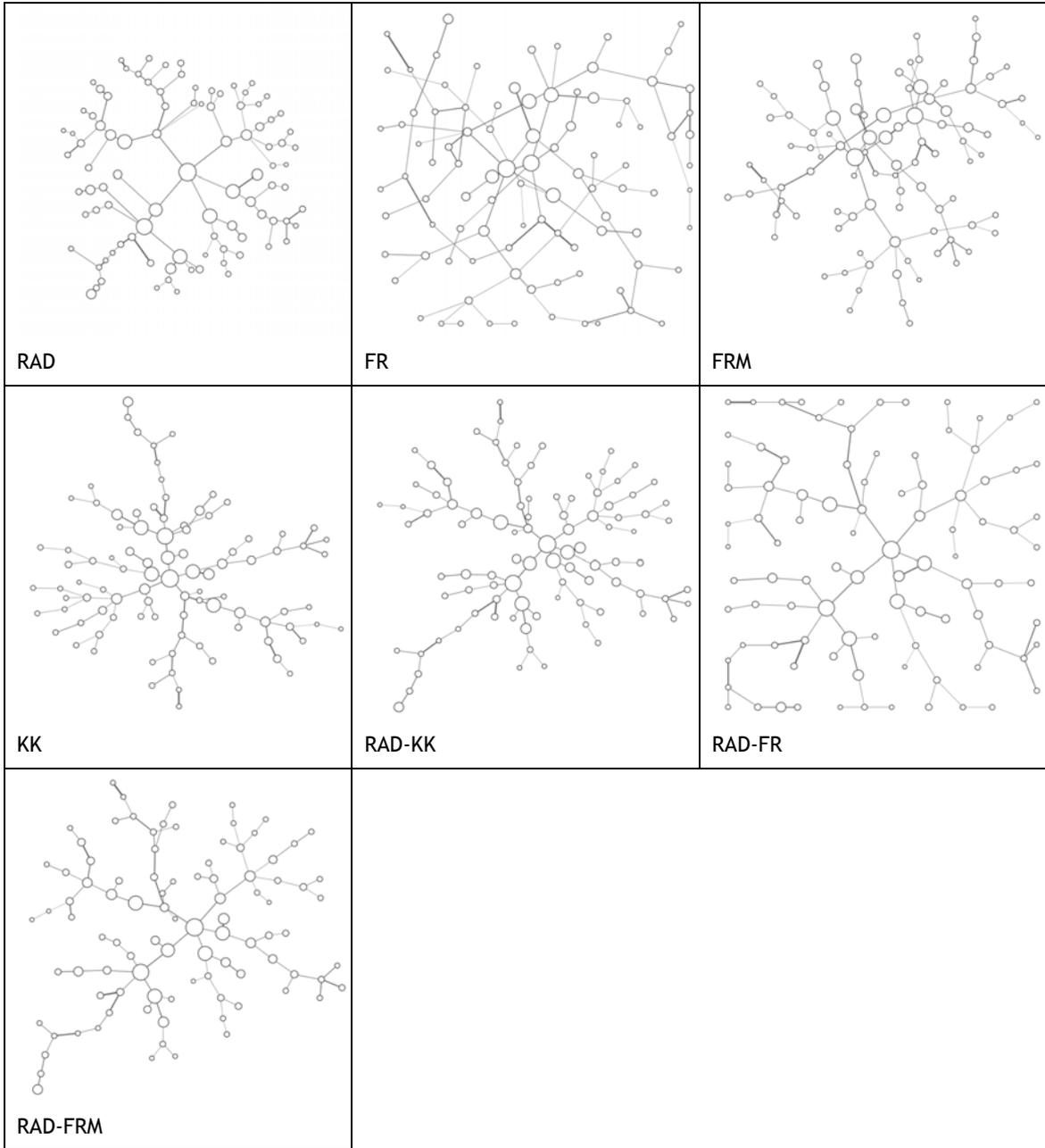


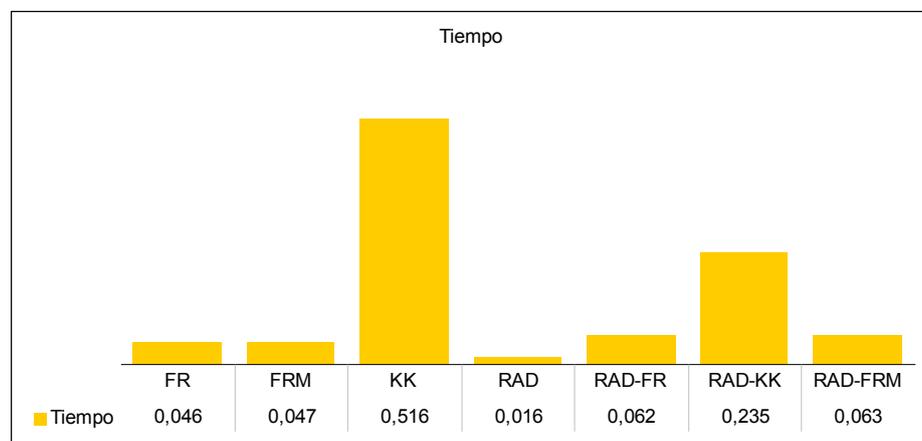
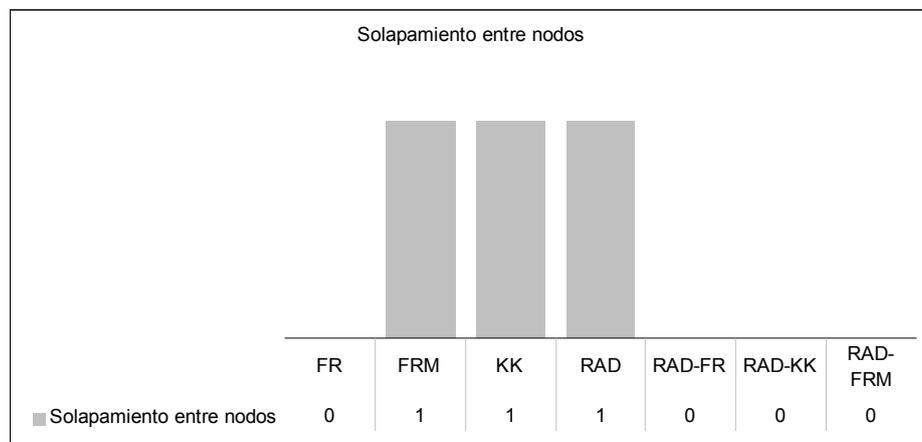
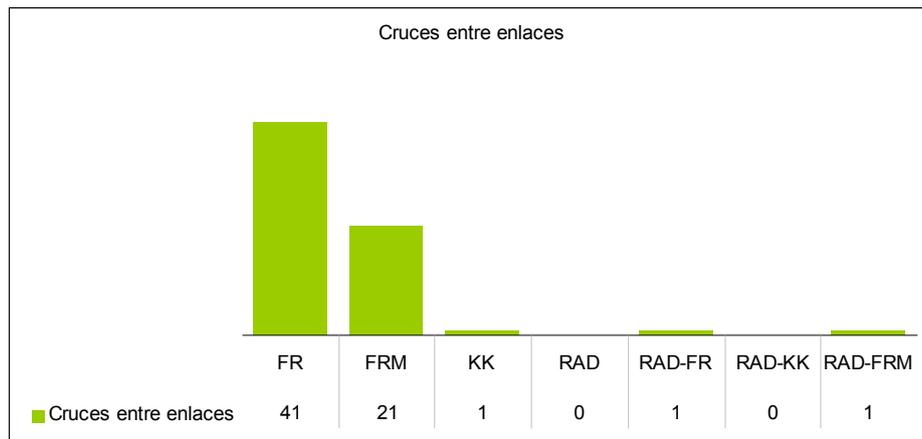
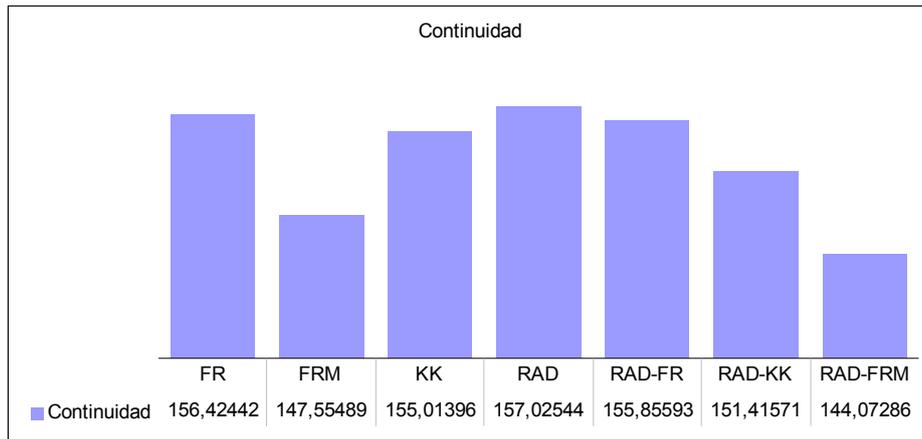
Net6



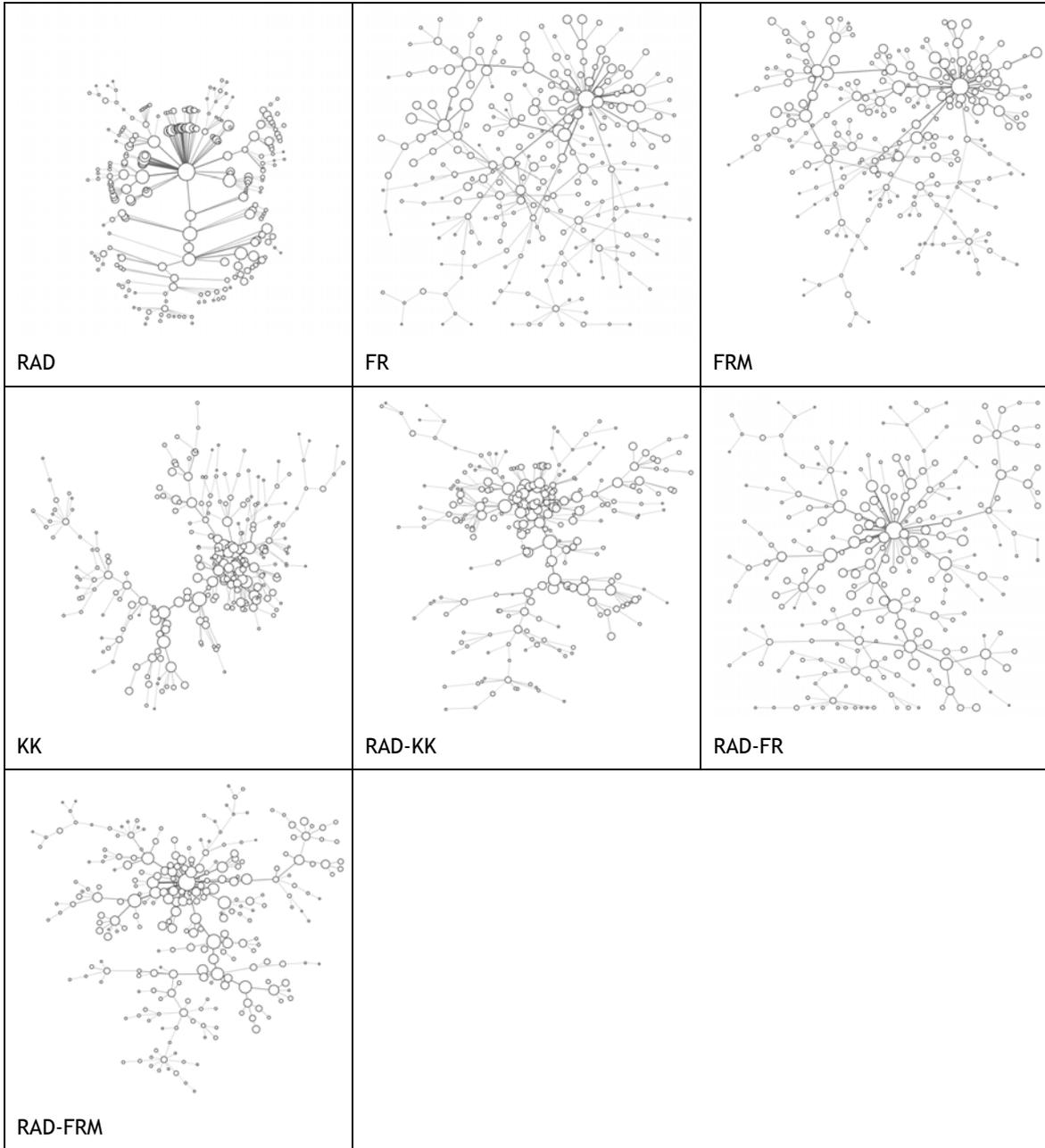


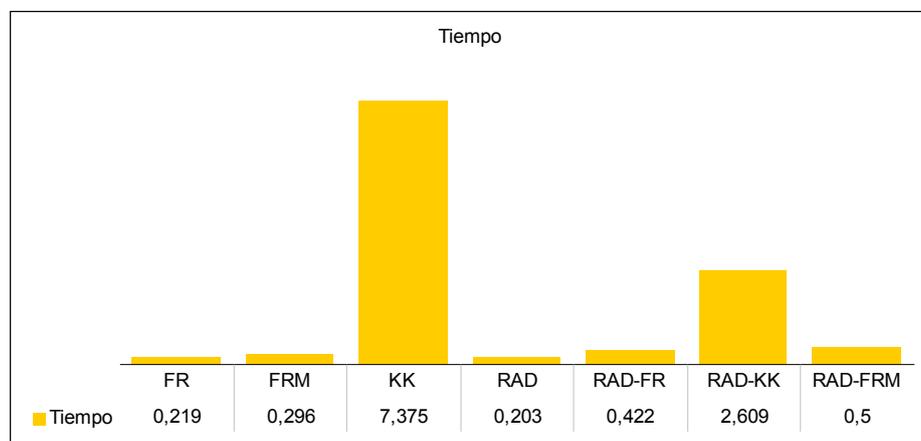
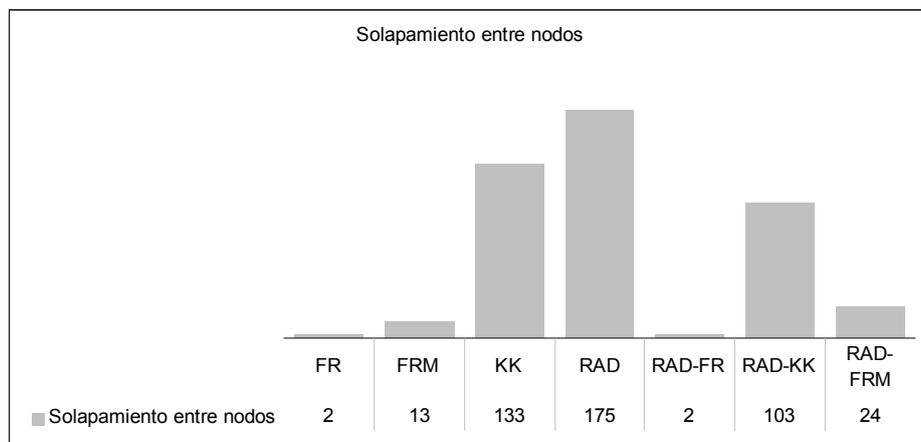
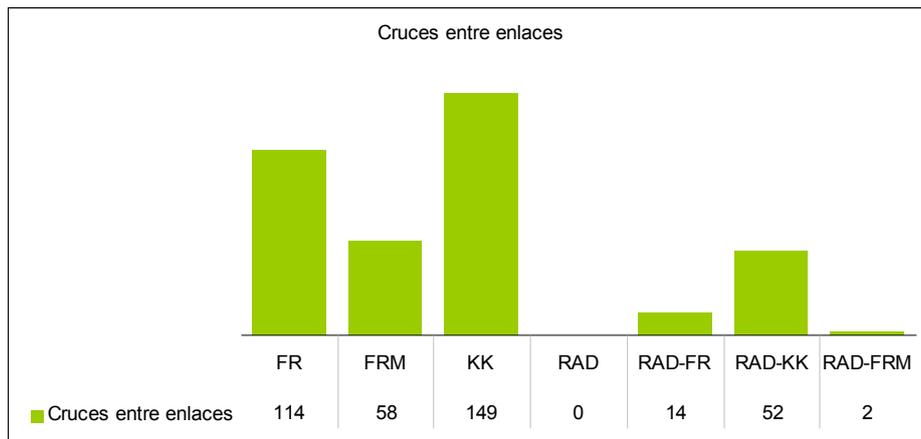
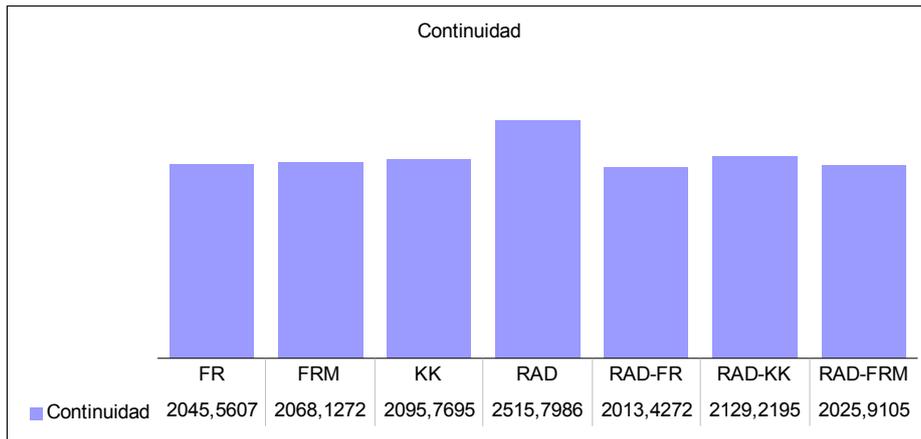
Net7



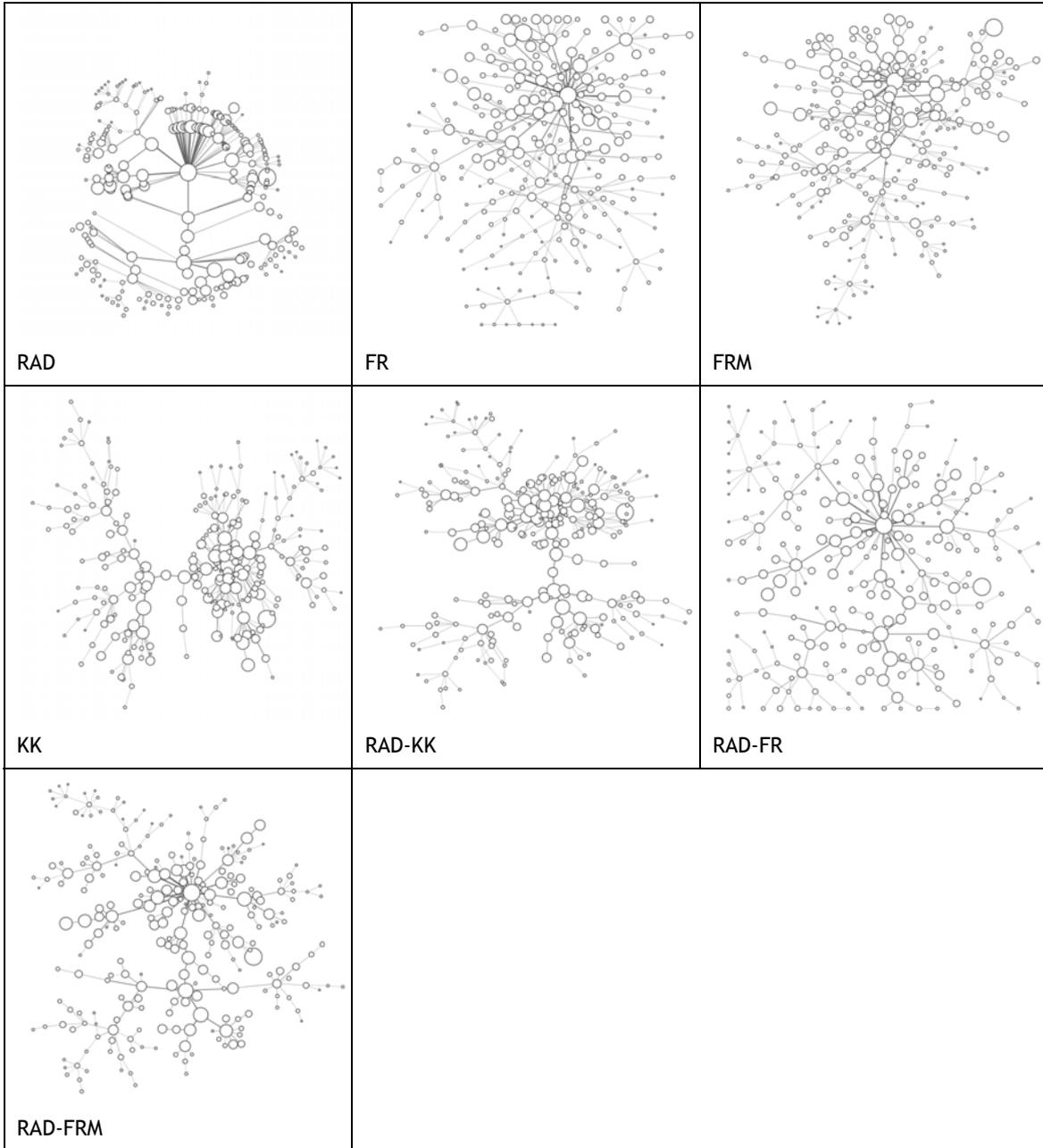


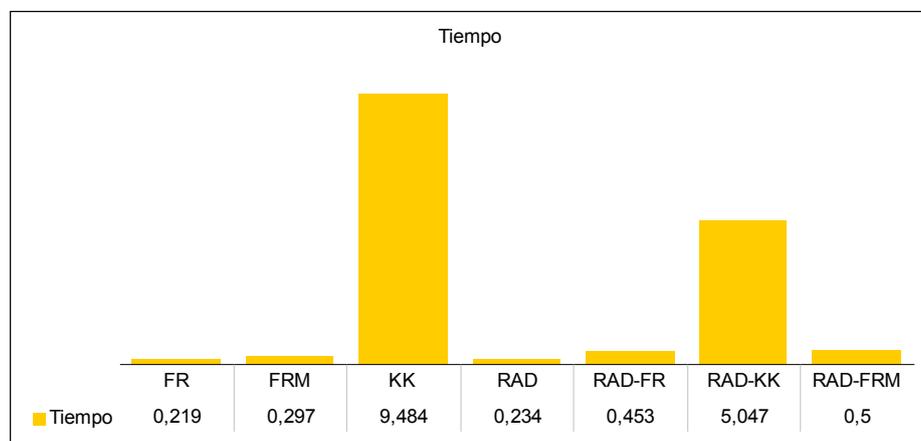
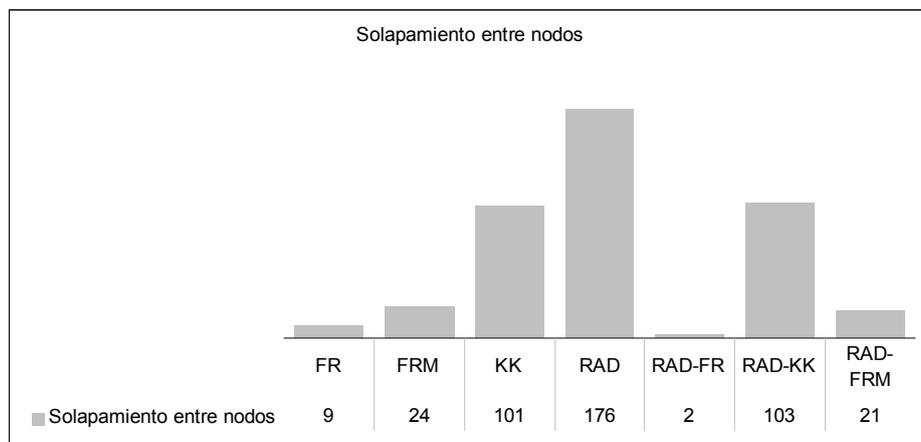
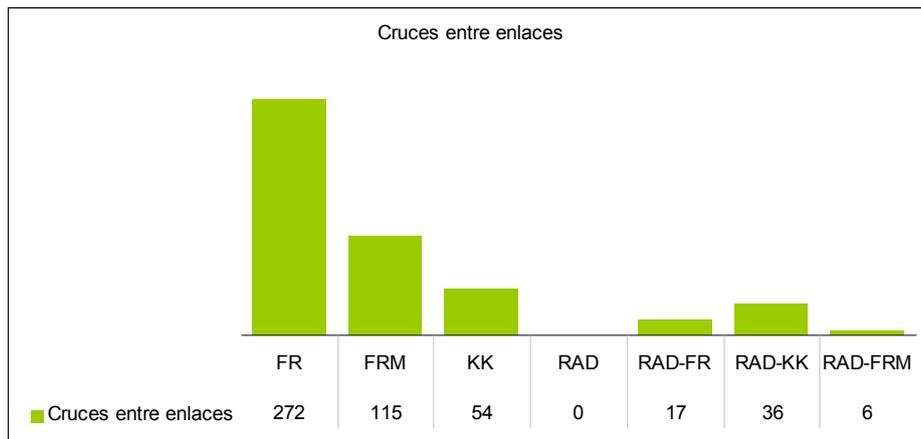
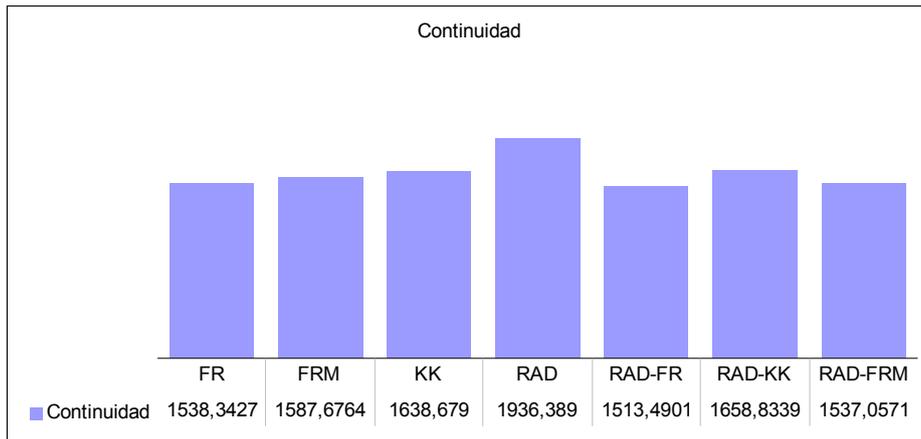
Net8



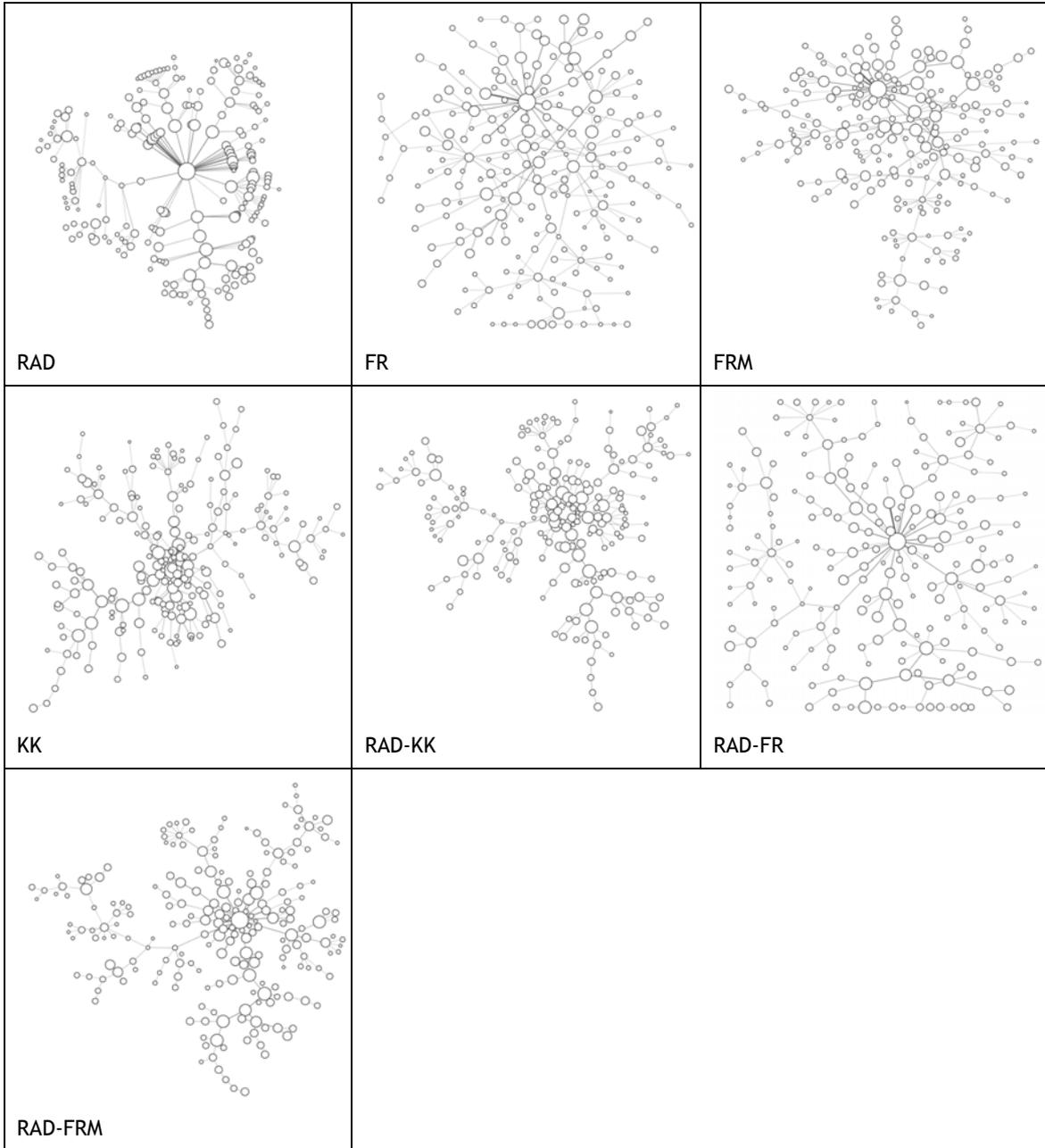


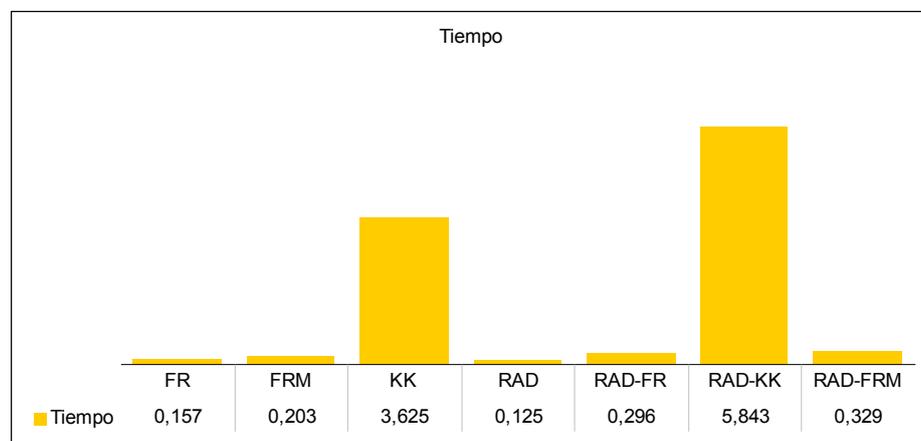
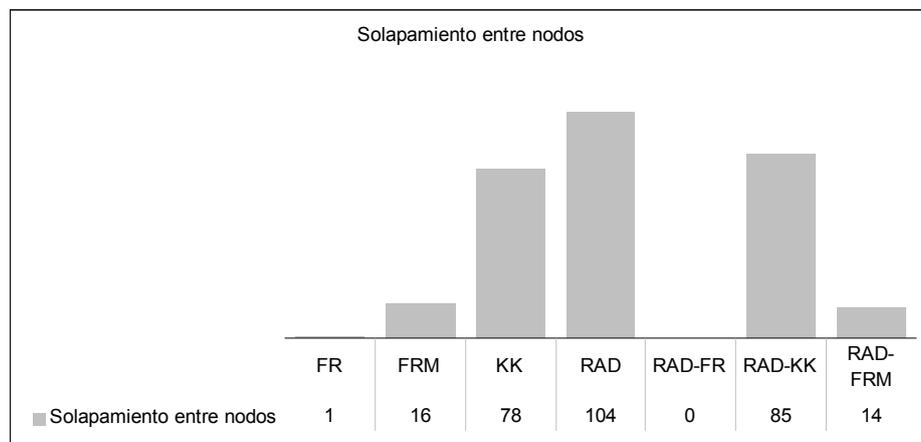
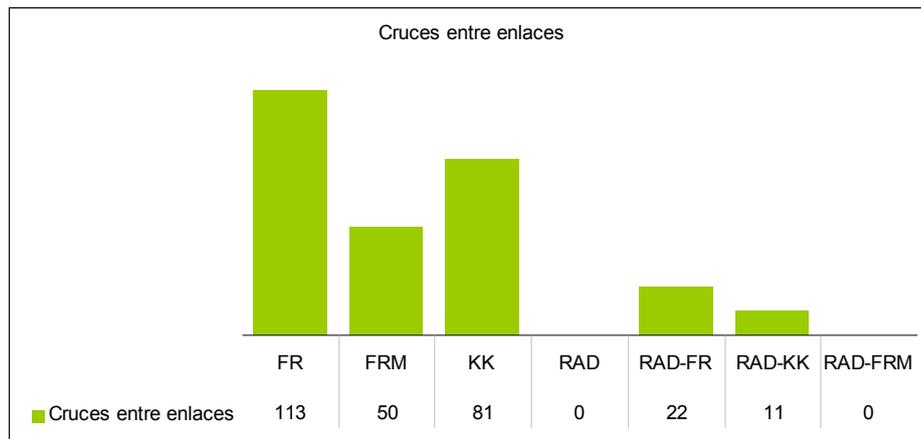
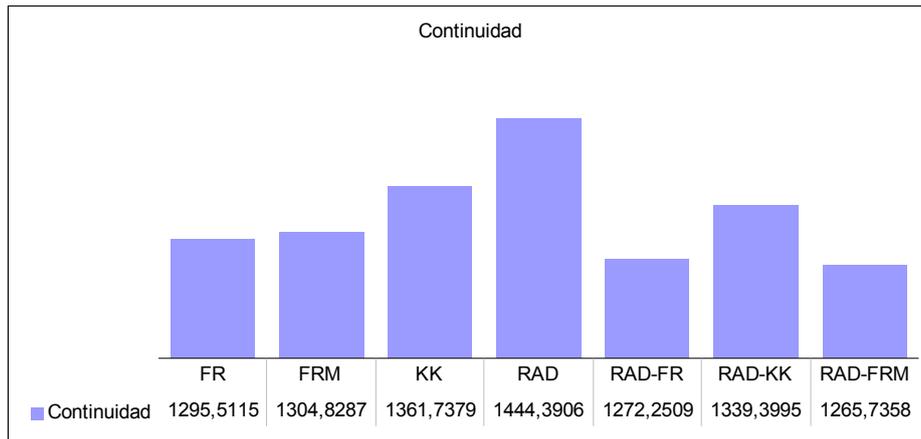
Net9



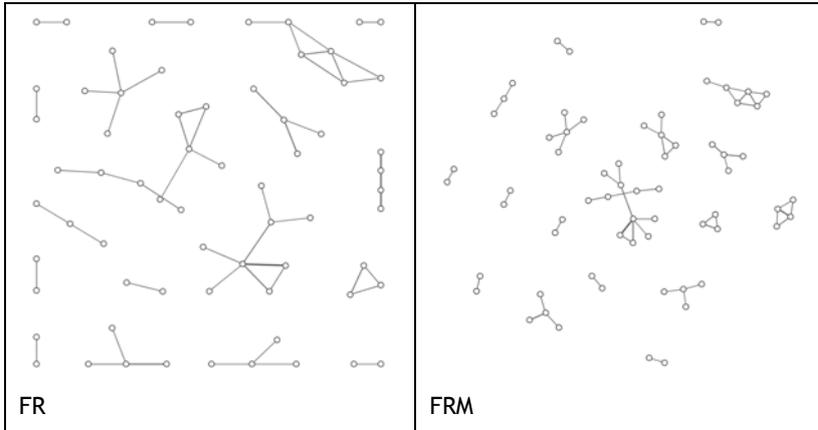


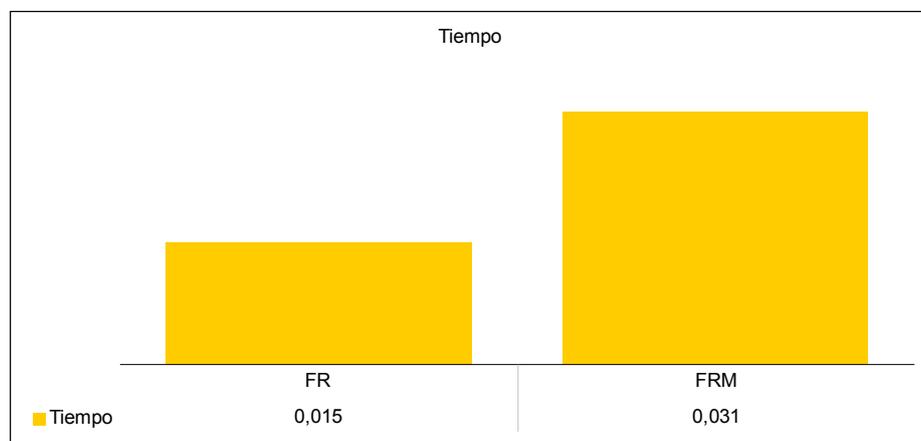
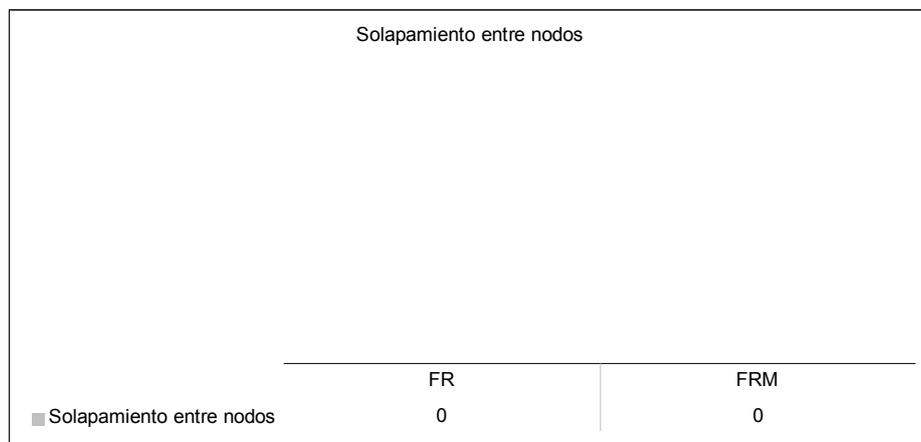
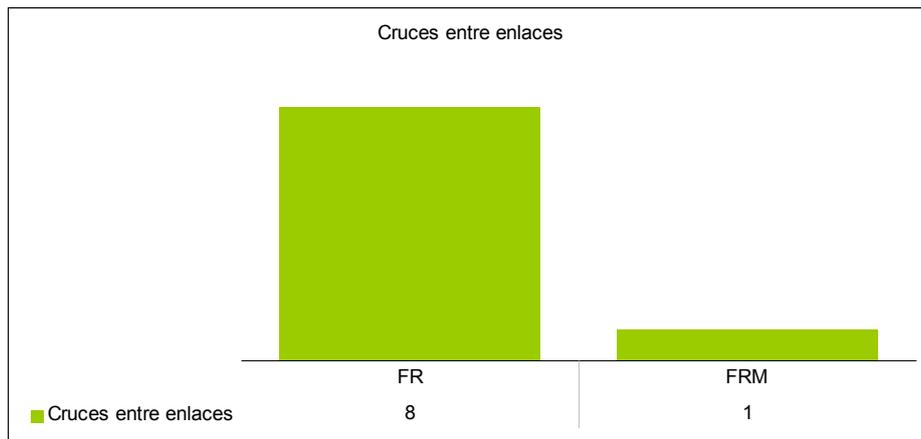
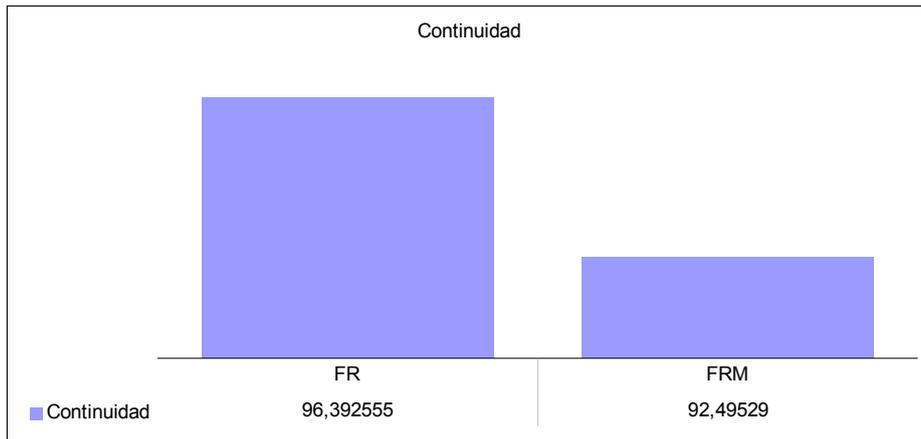
Net10



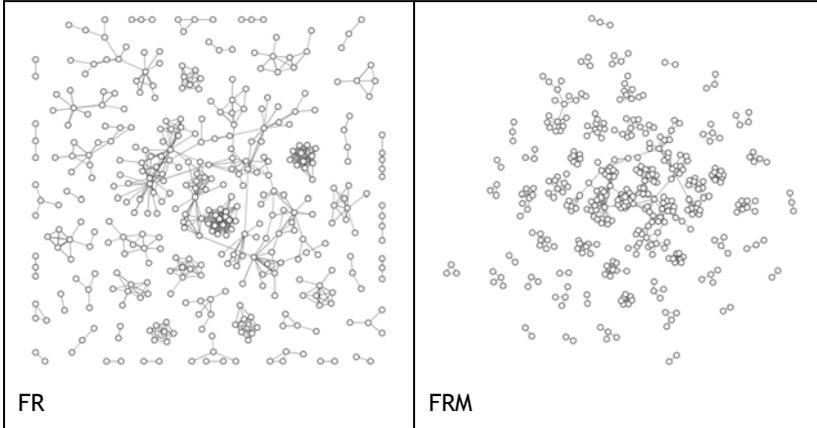


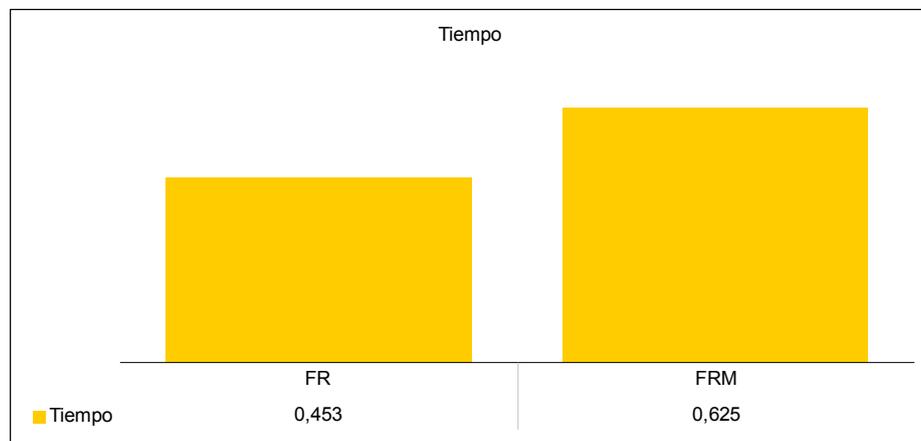
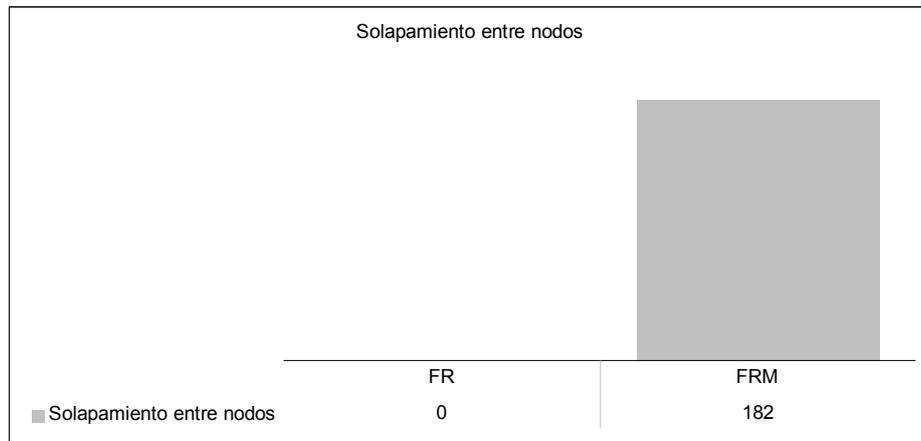
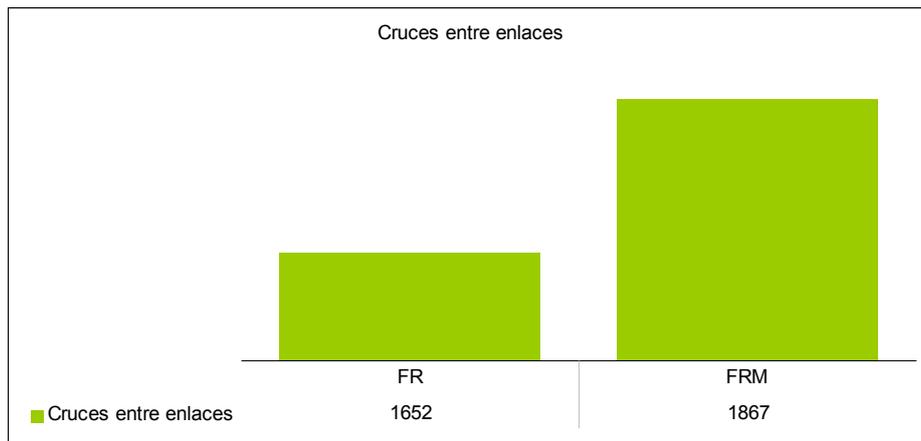
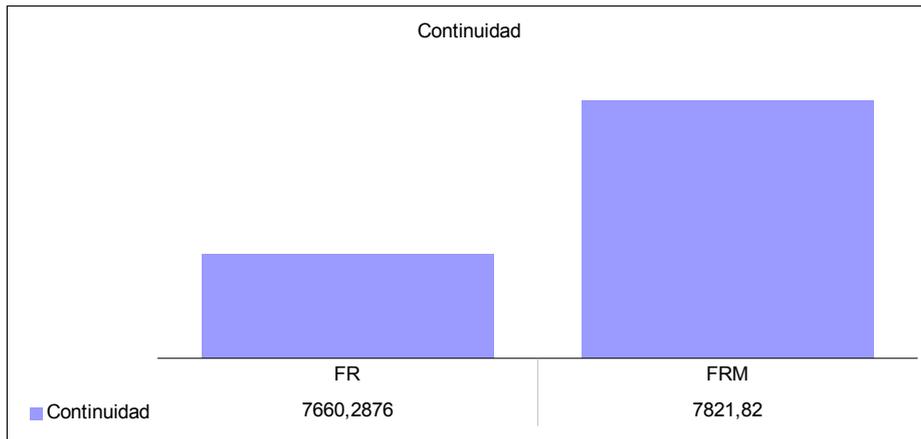
Net11



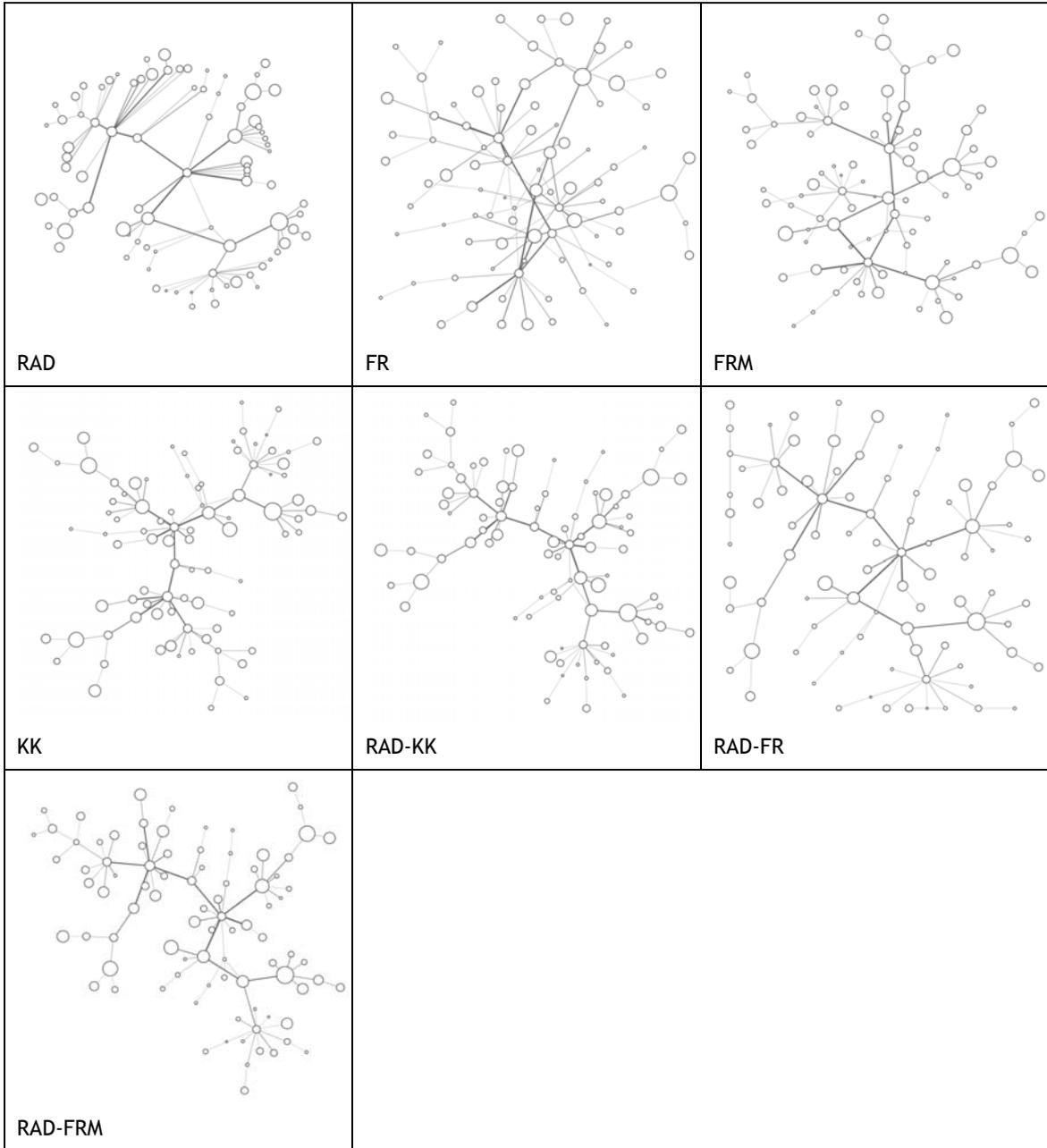


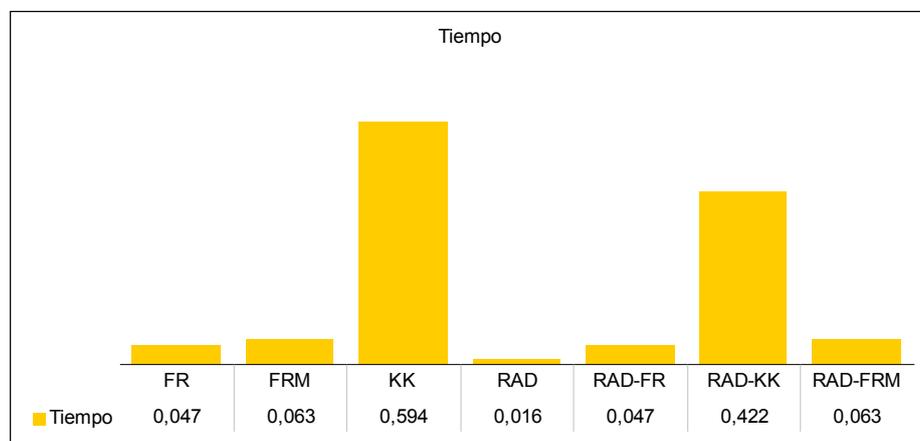
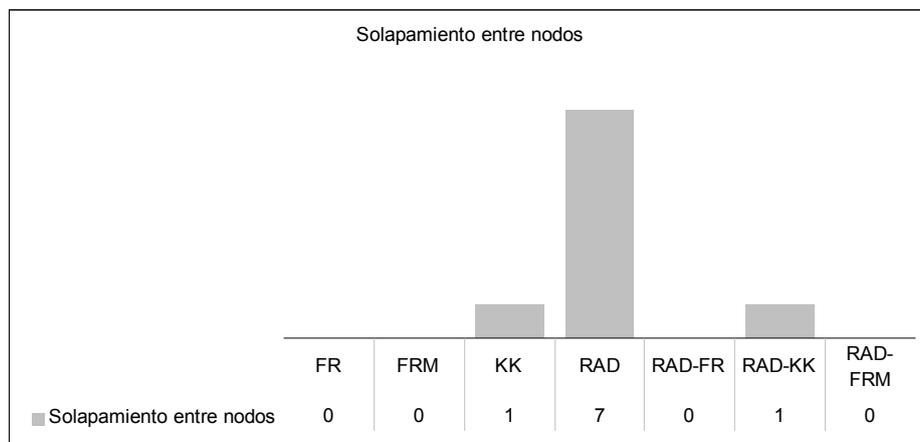
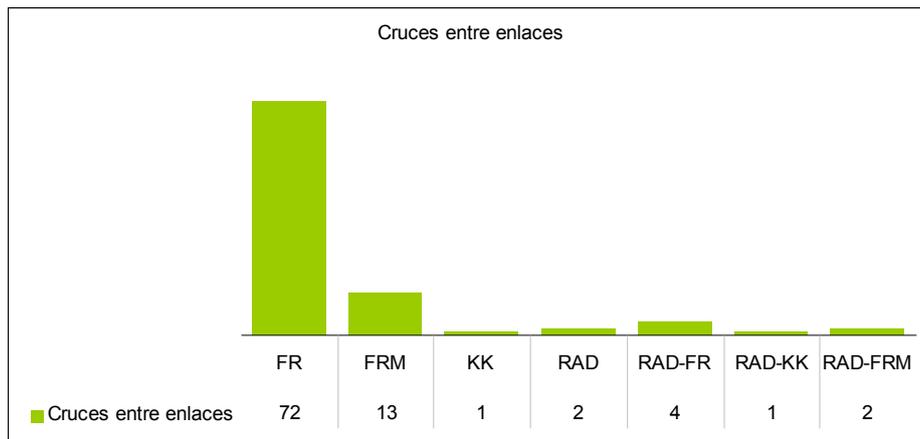
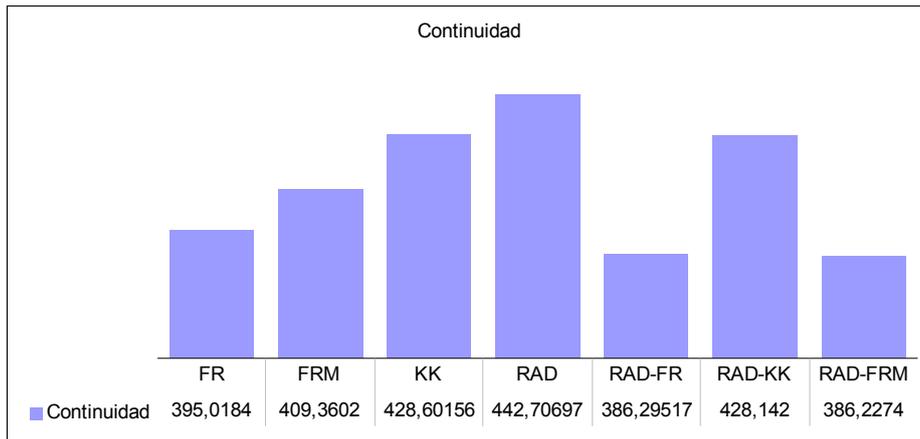
Net12



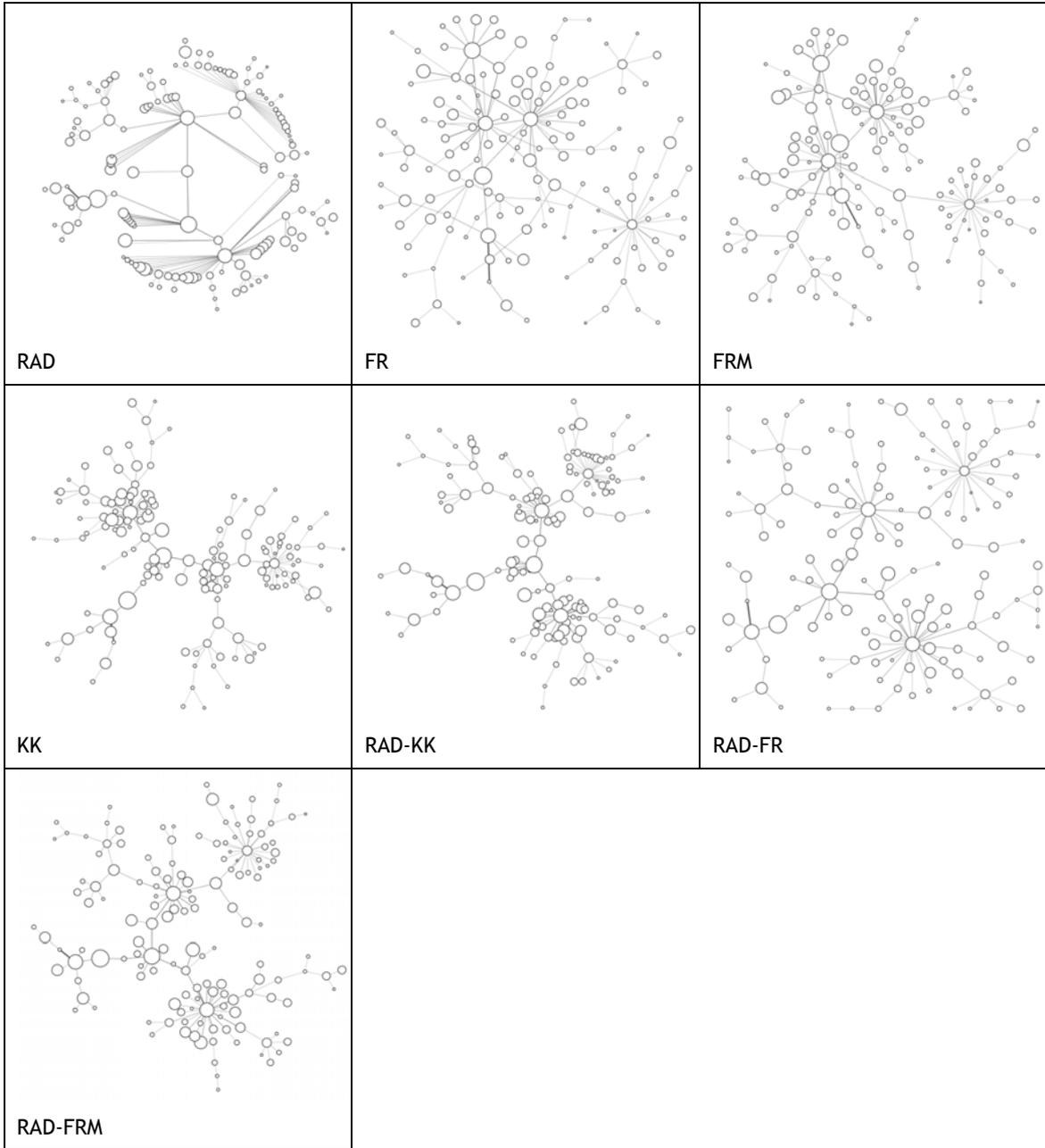


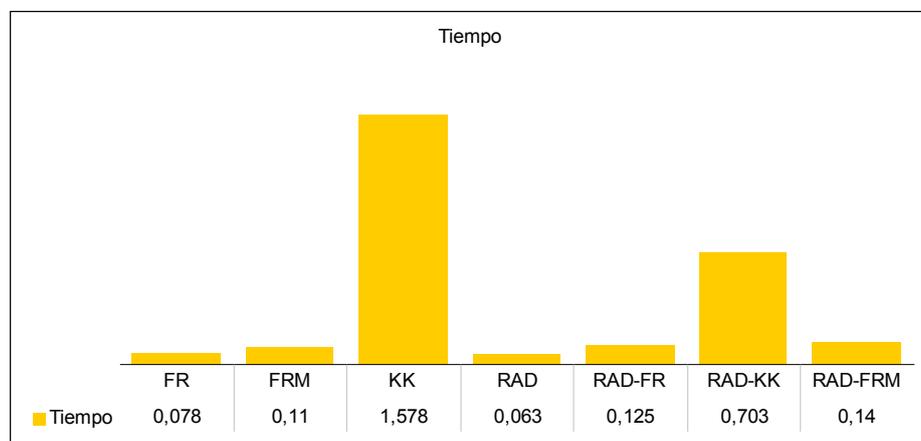
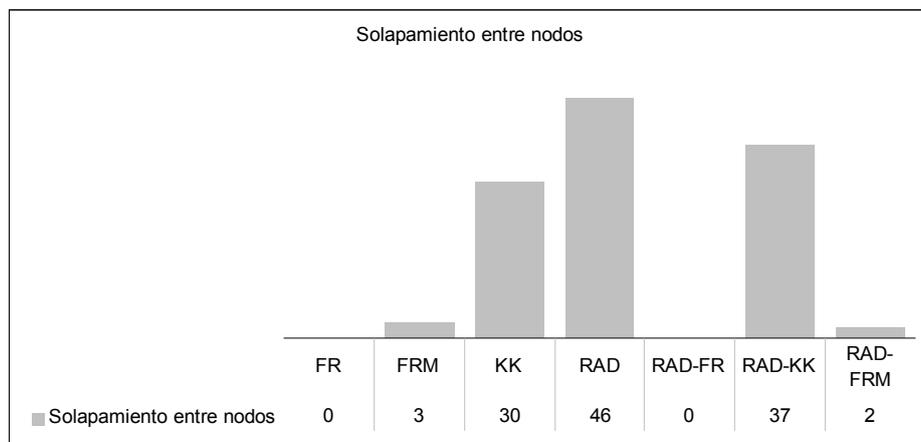
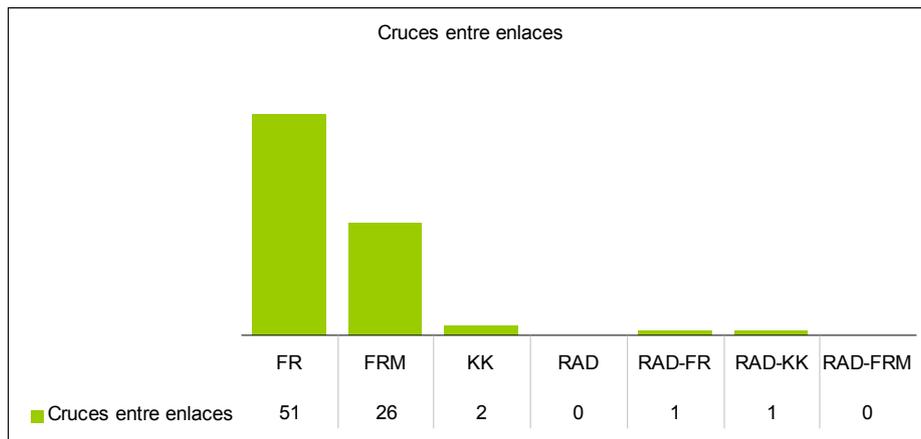
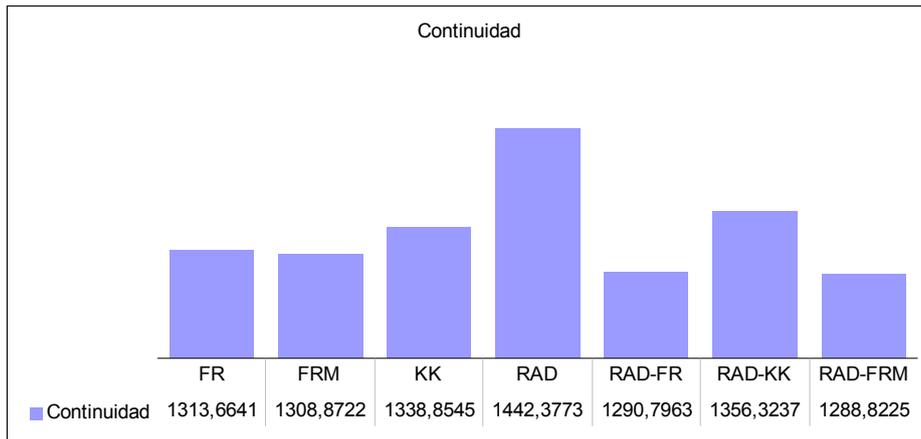
Net13



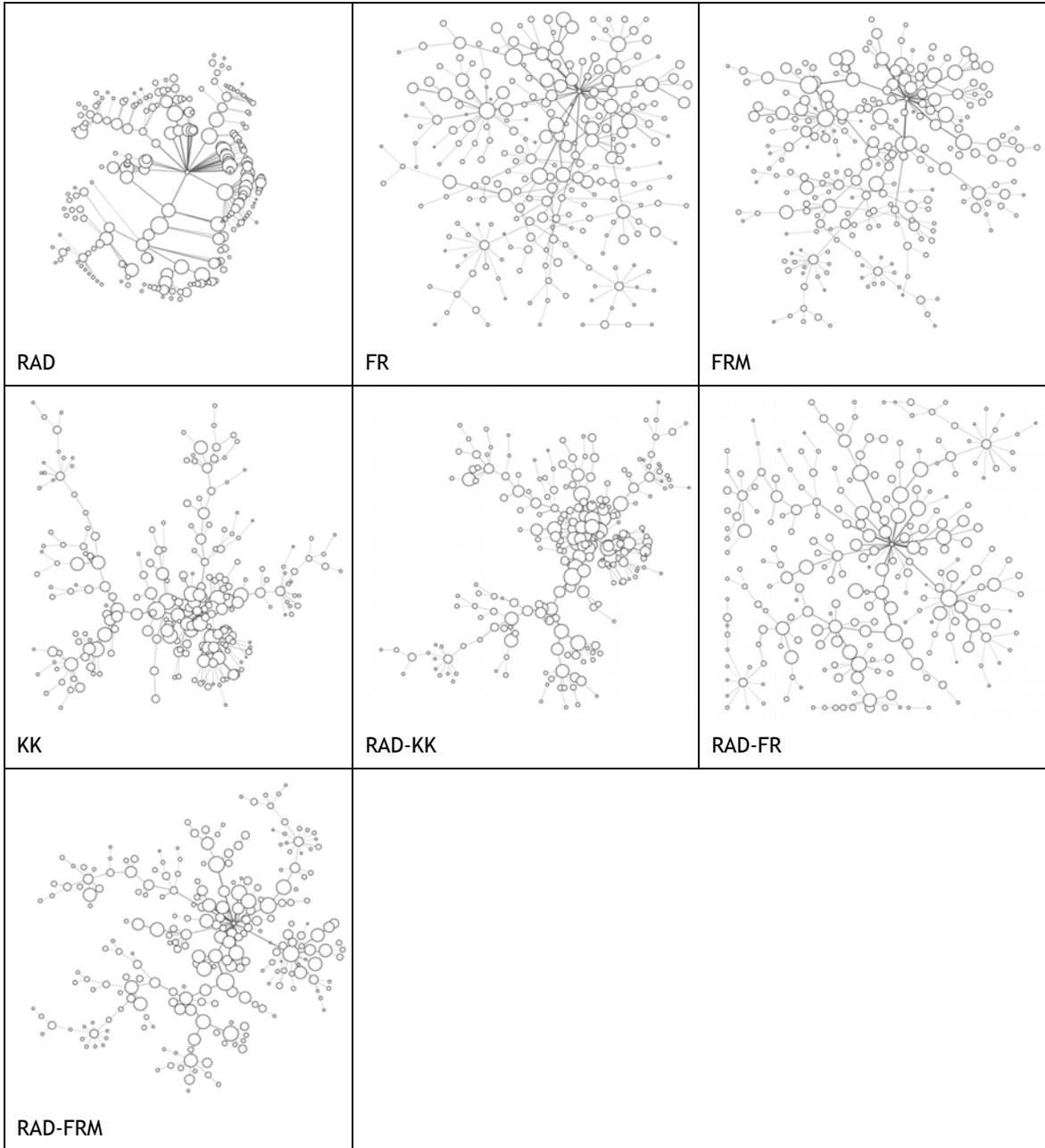


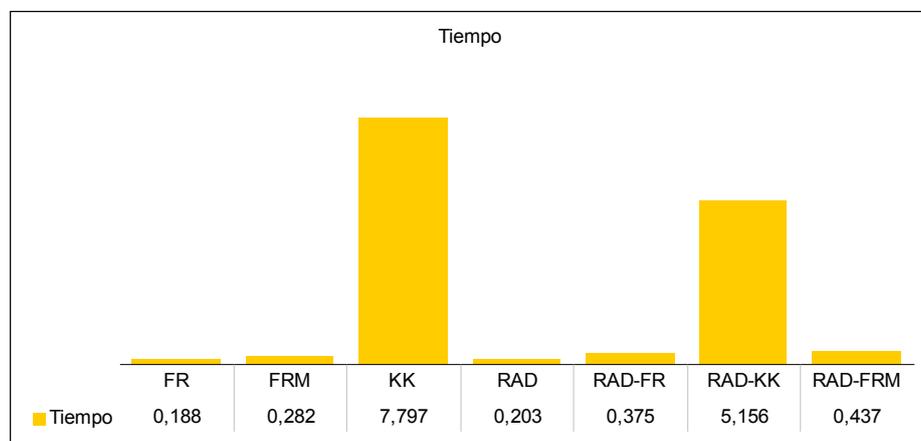
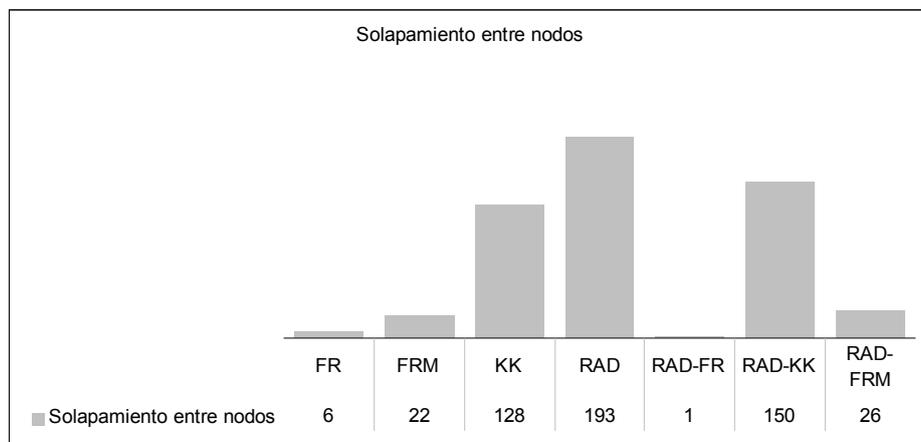
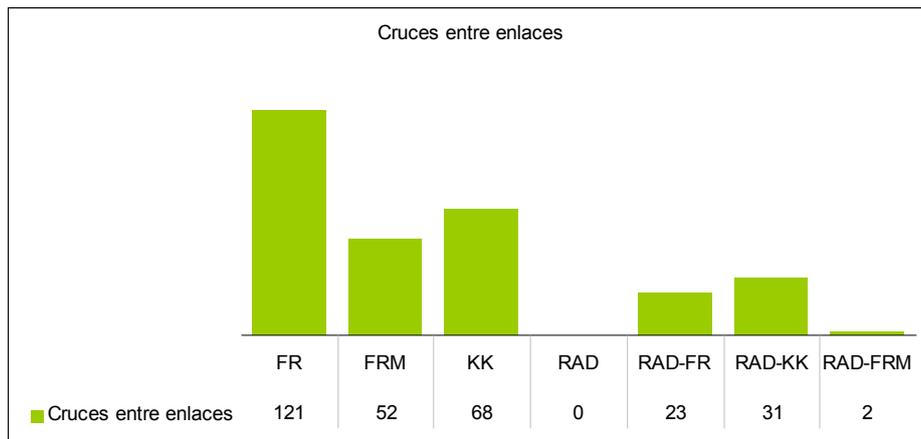
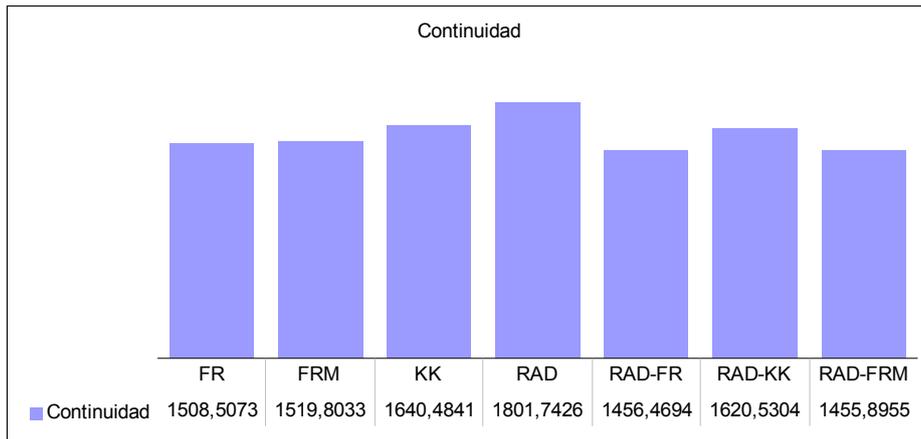
Net14



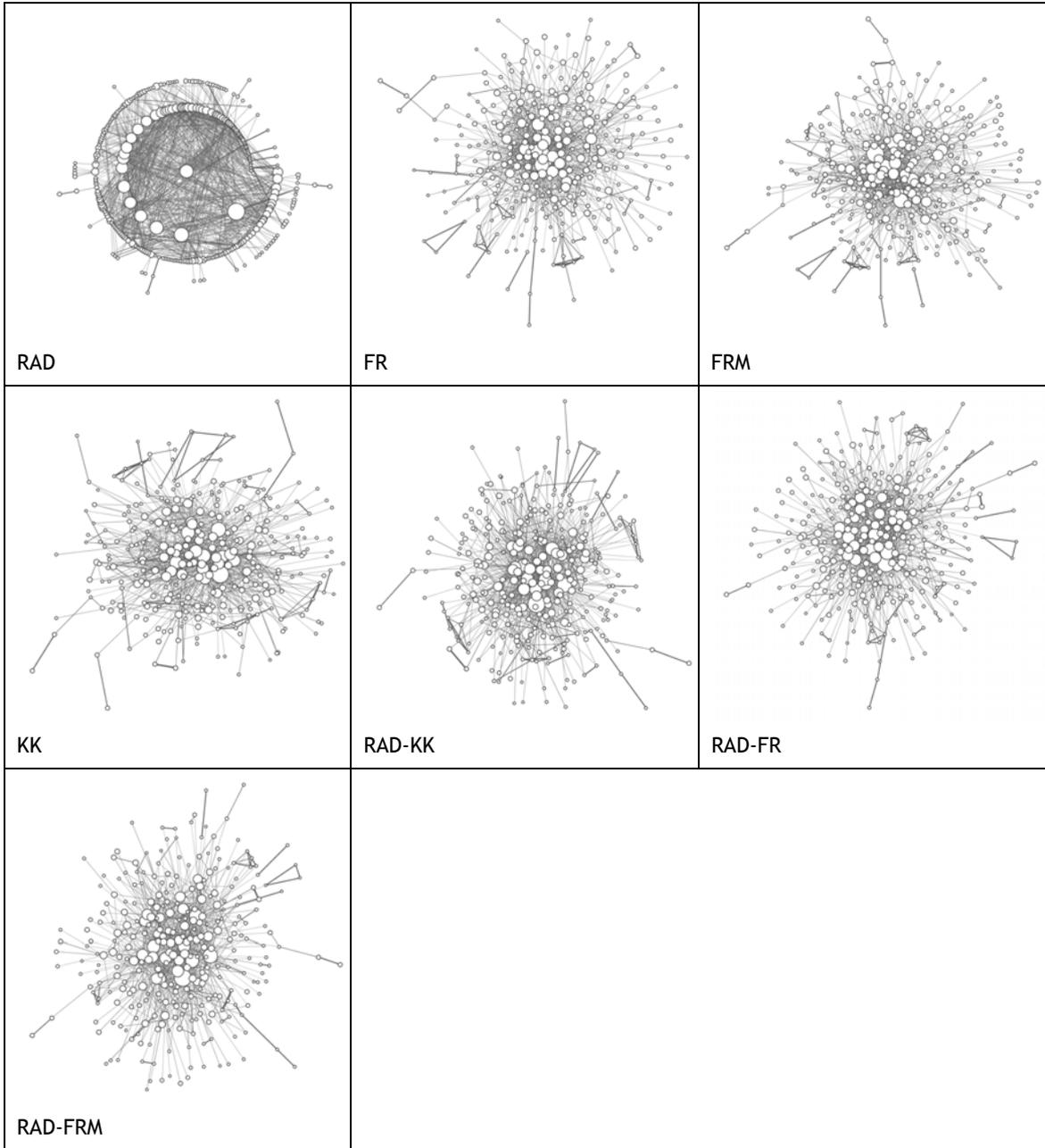


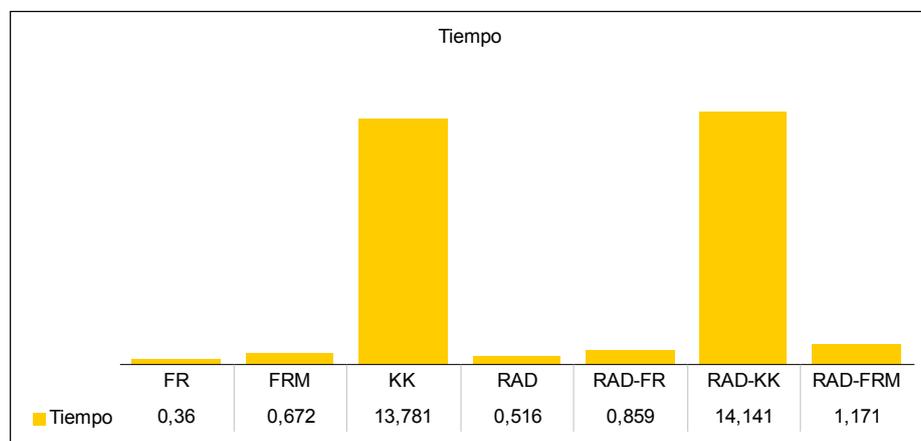
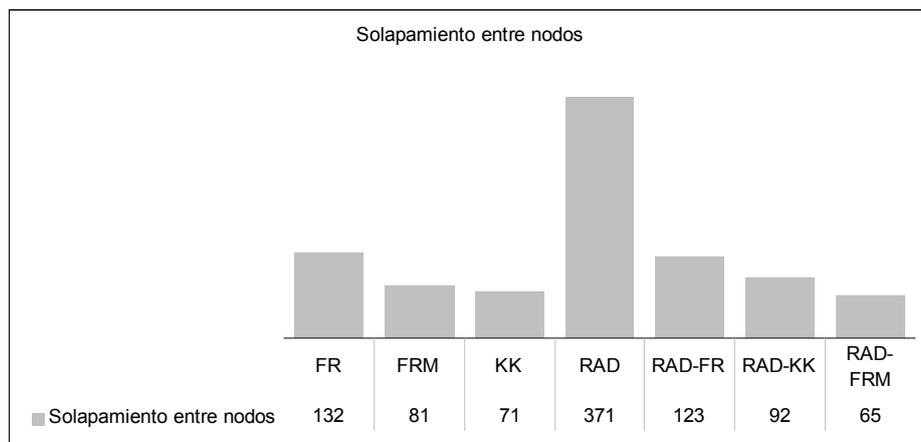
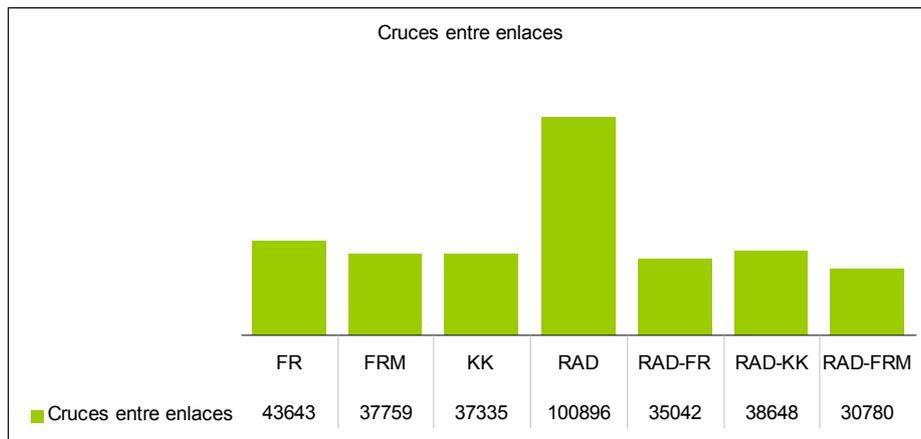
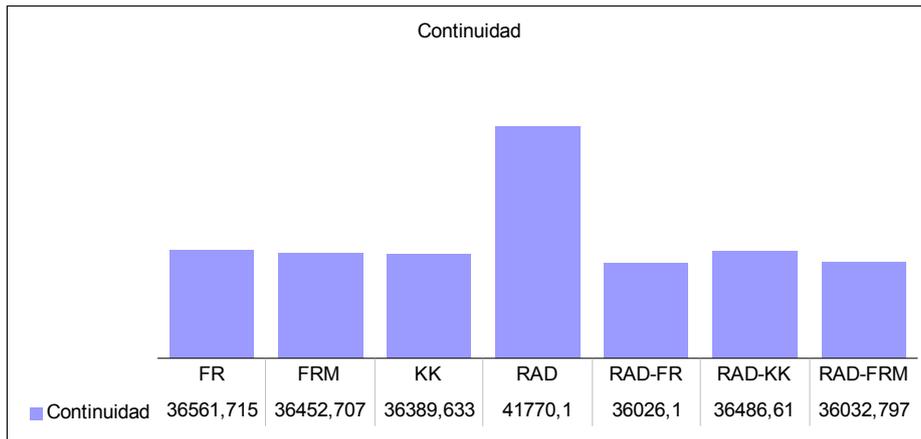
Net15



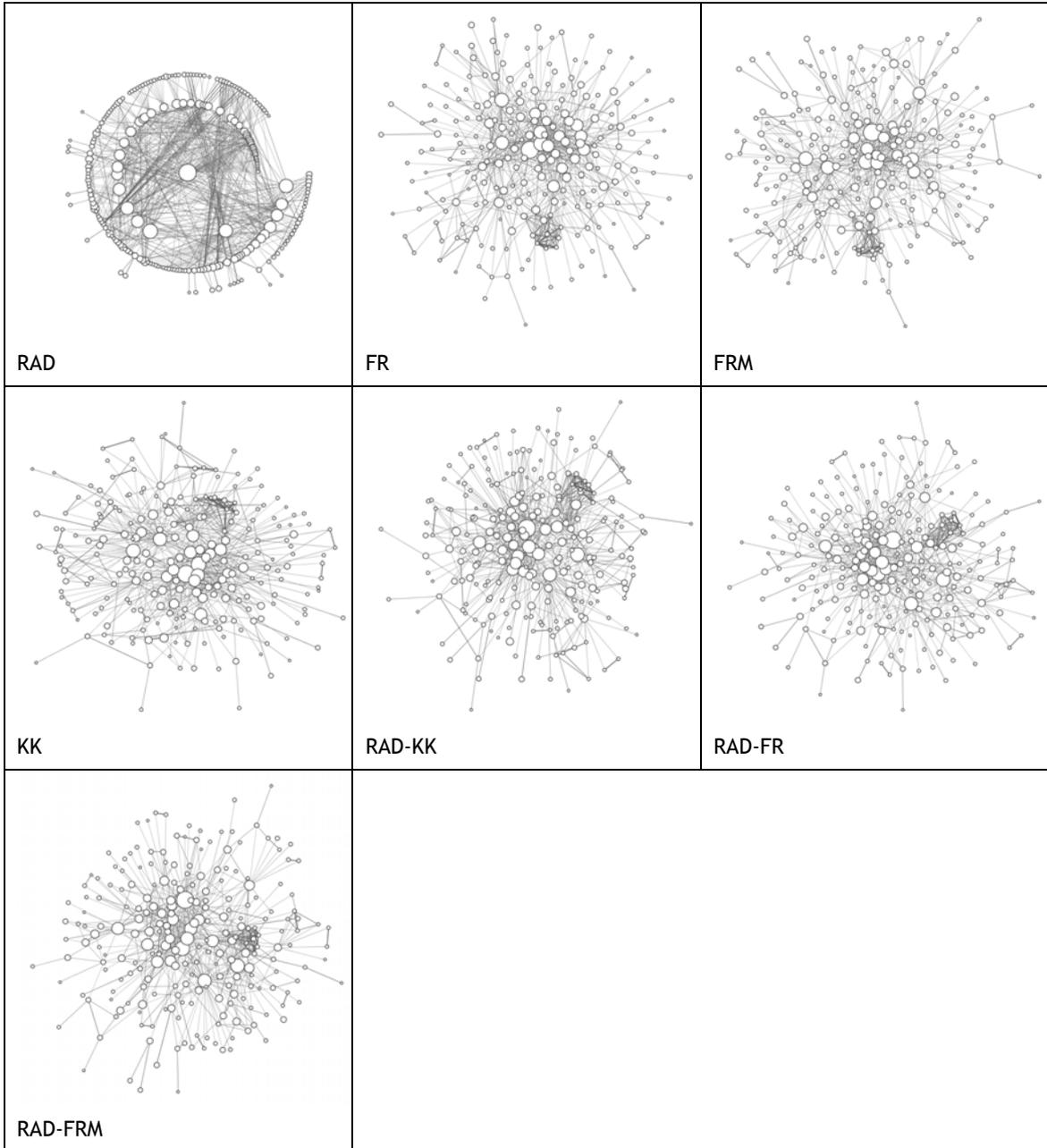


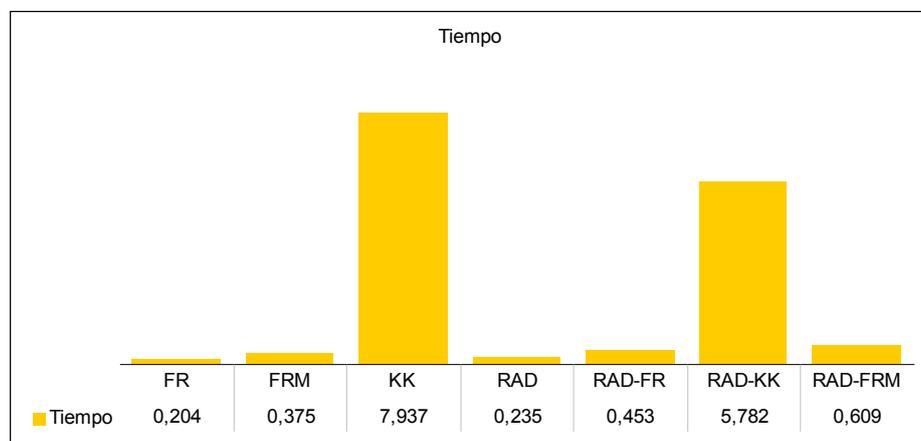
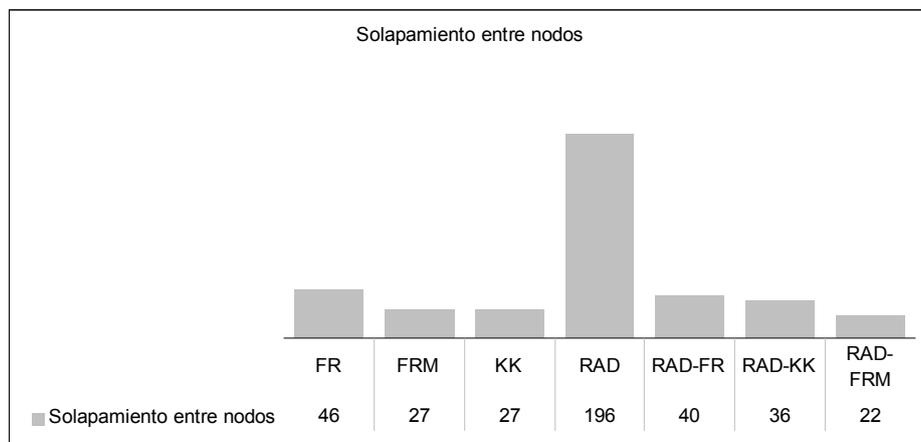
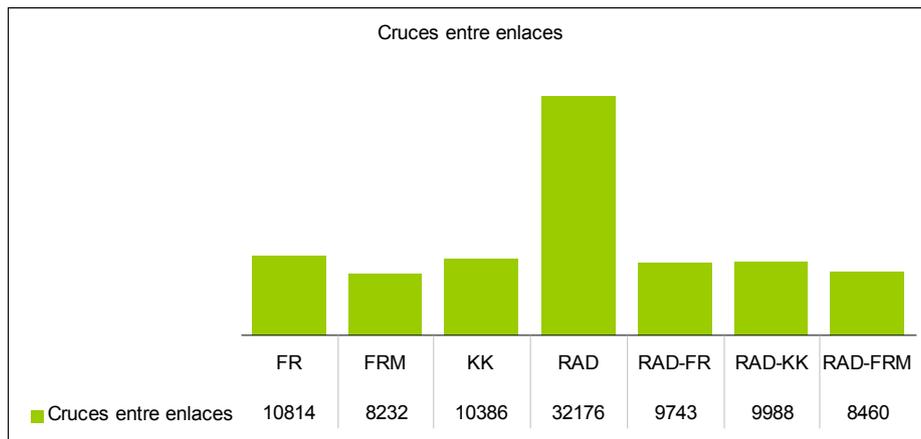
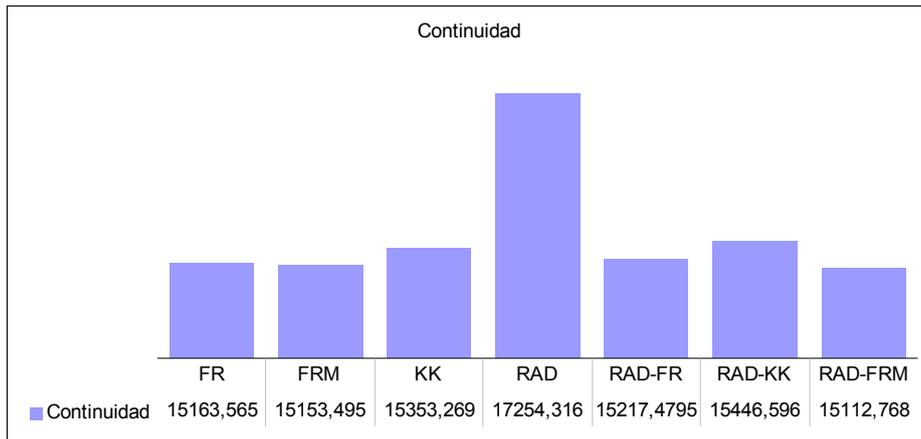
Net16



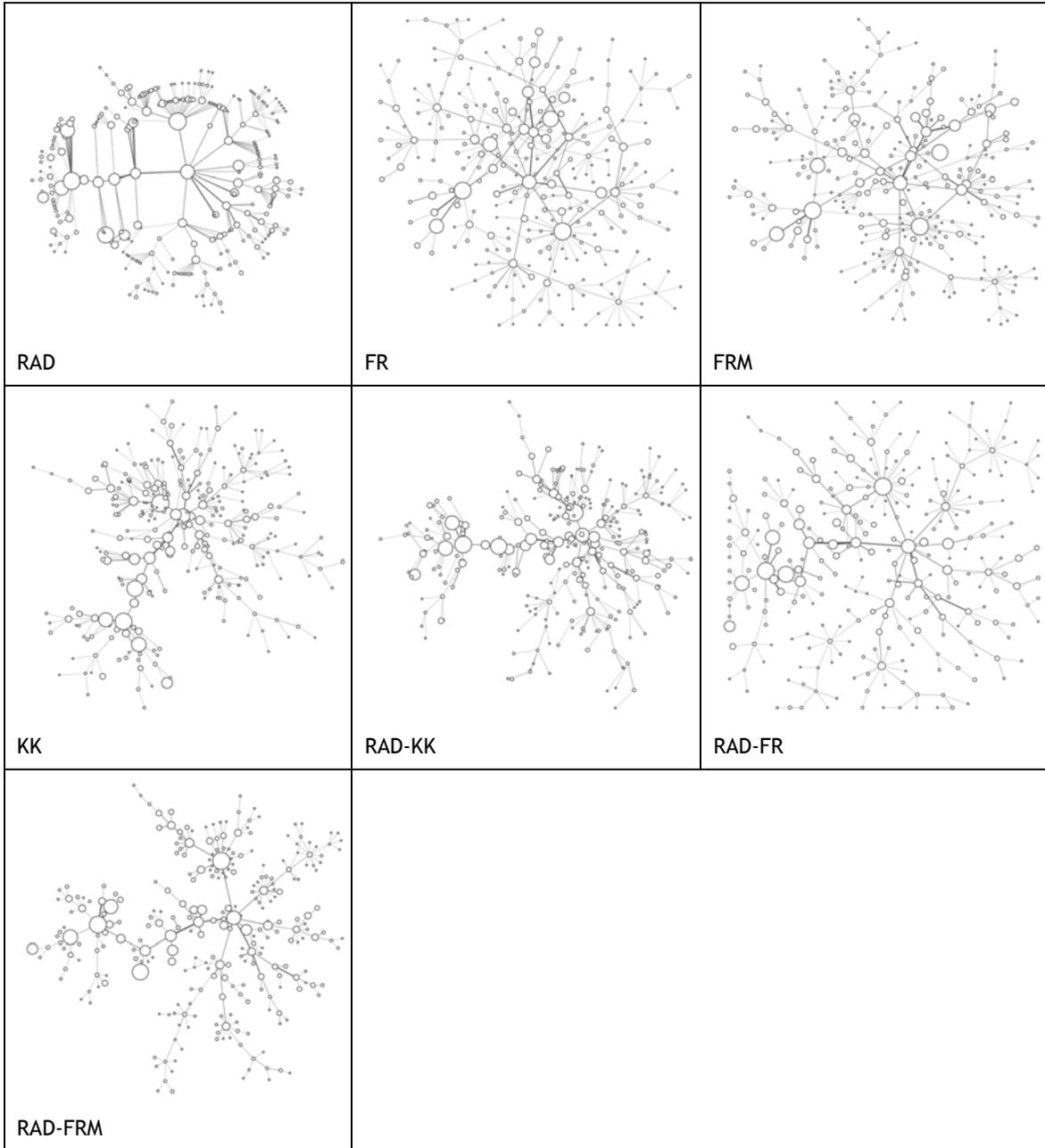


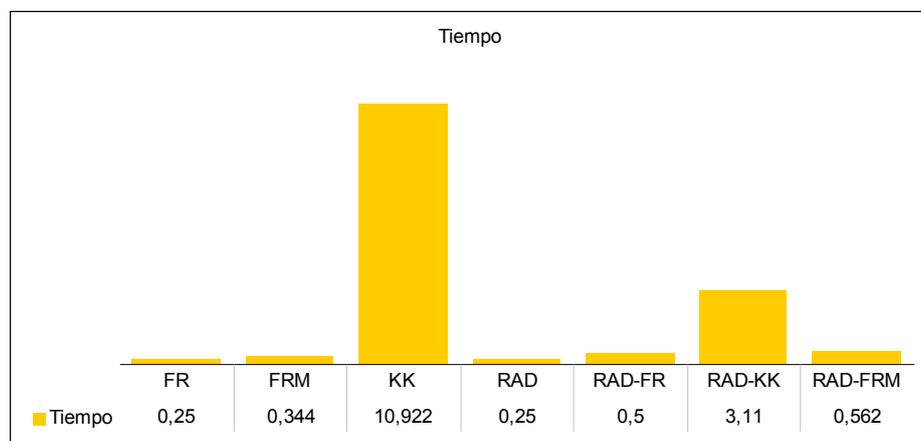
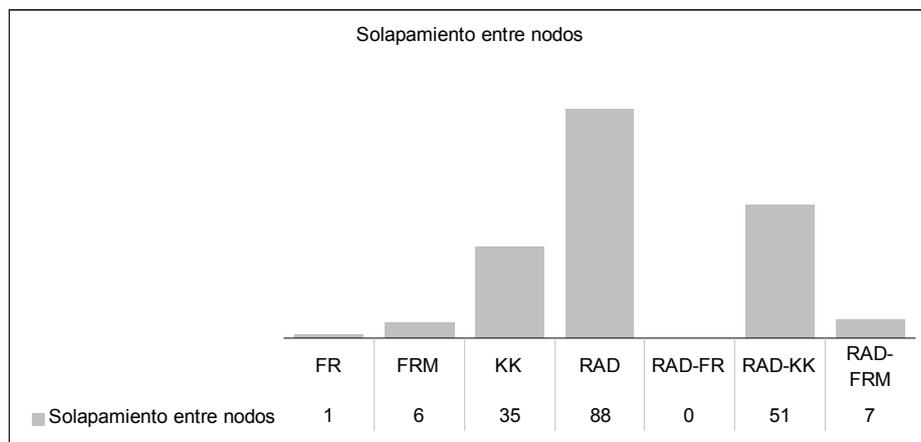
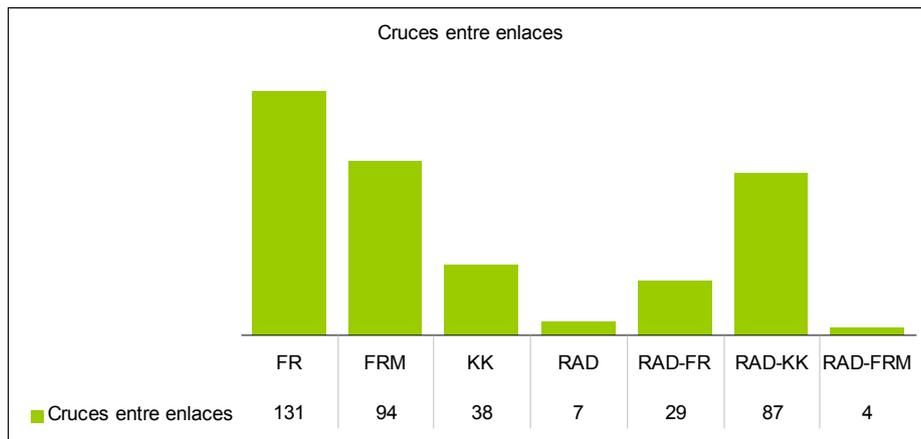
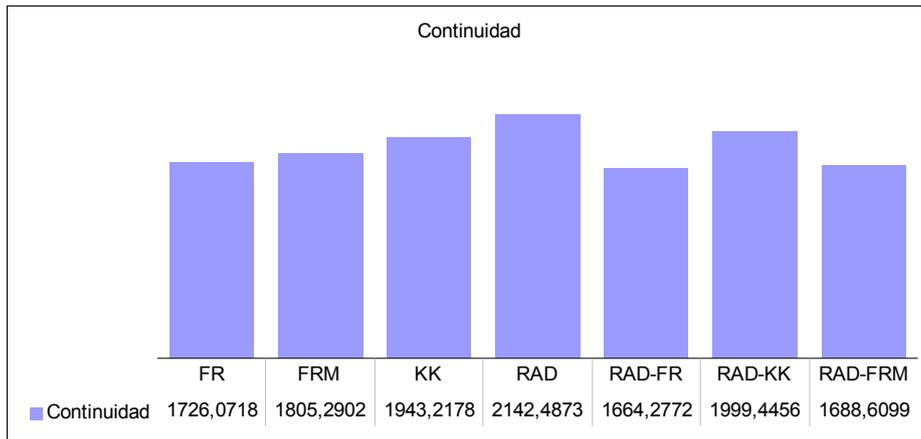
Net17



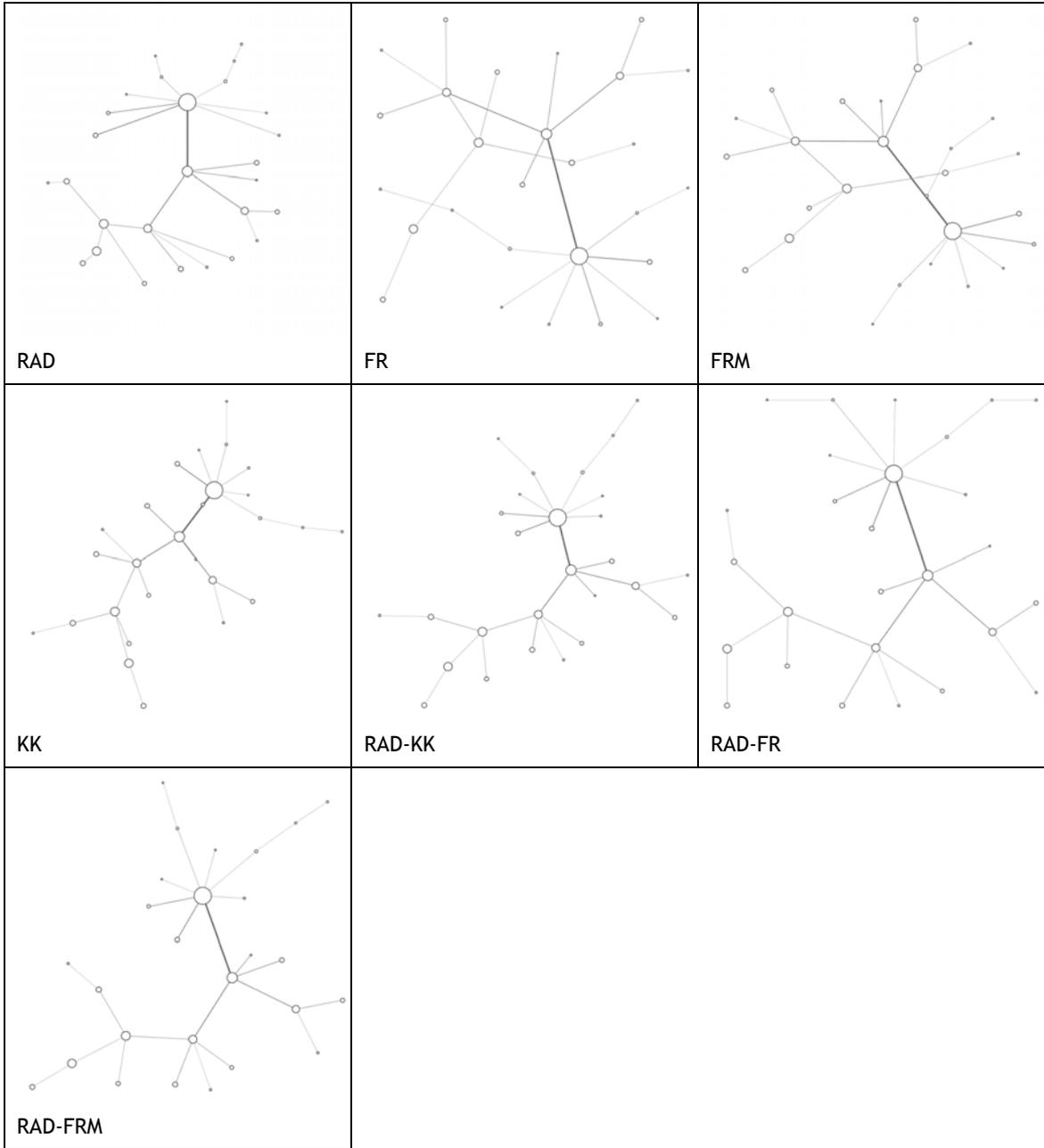


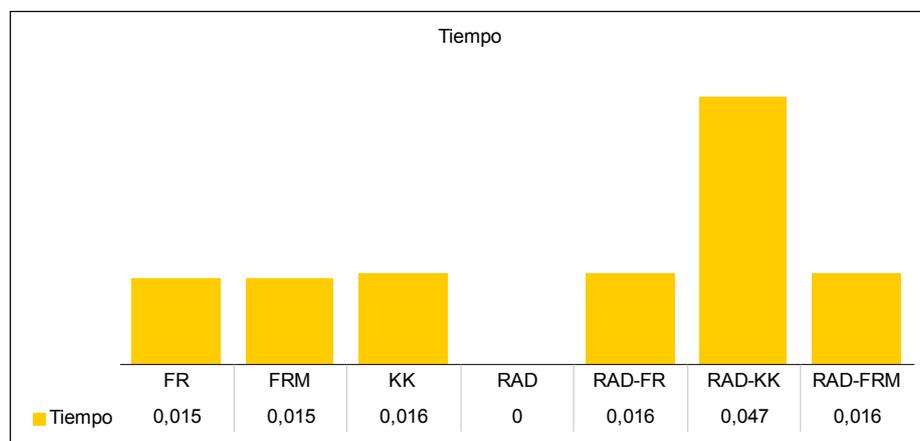
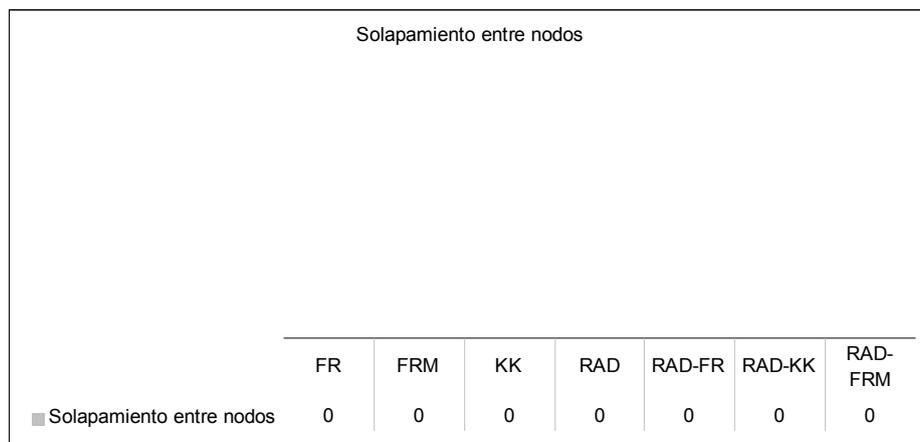
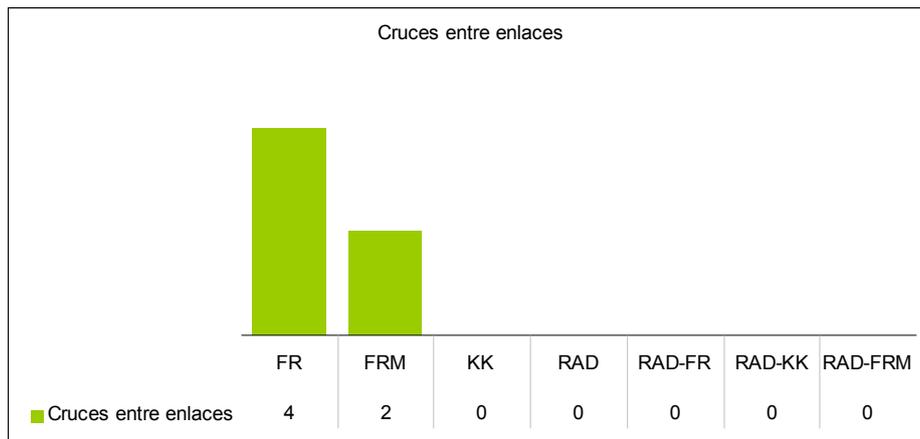
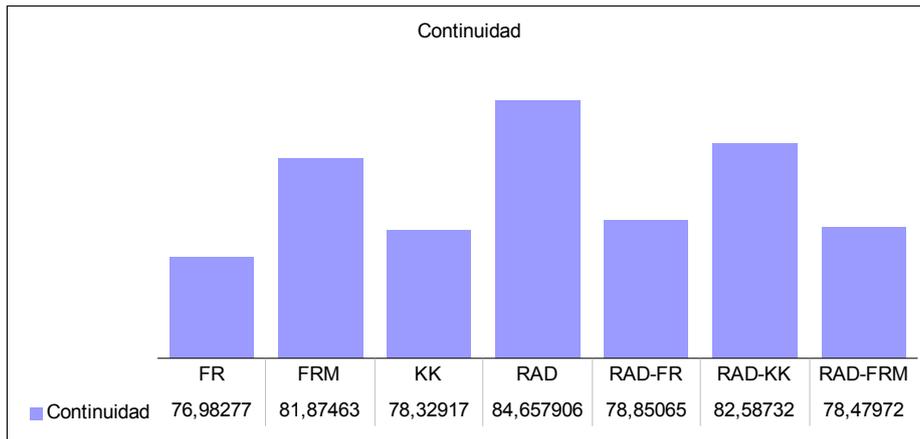
Net18



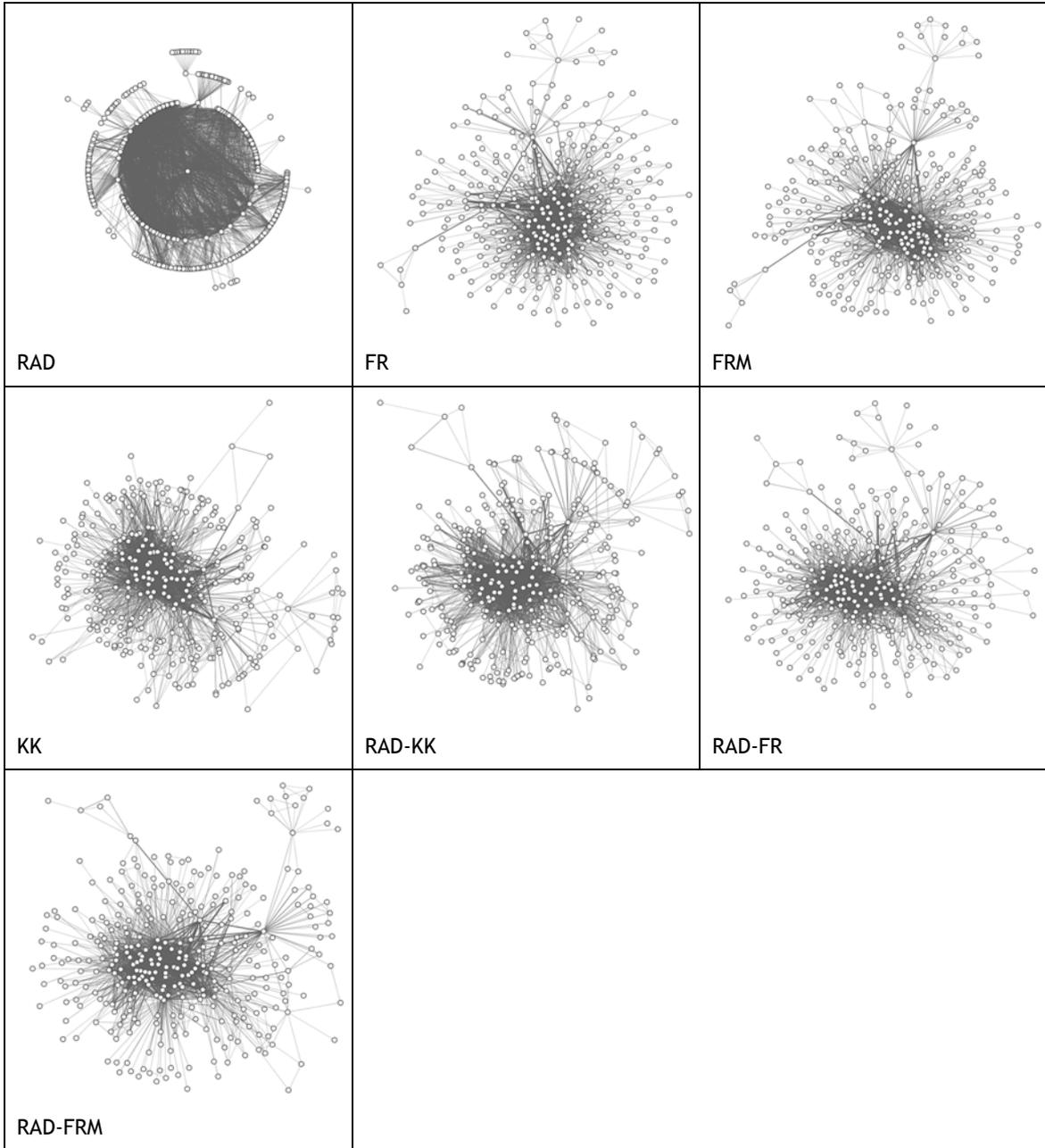


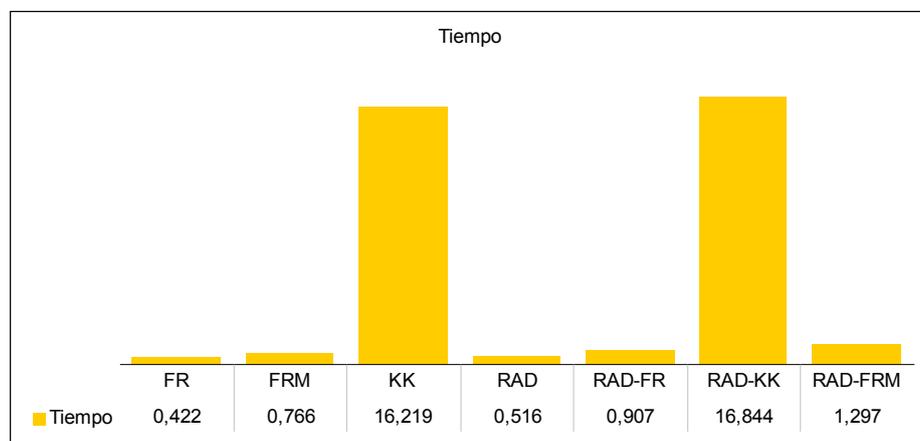
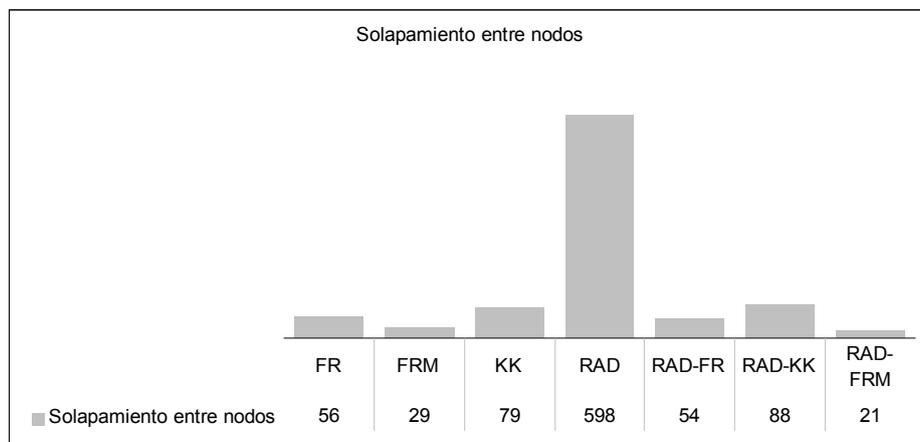
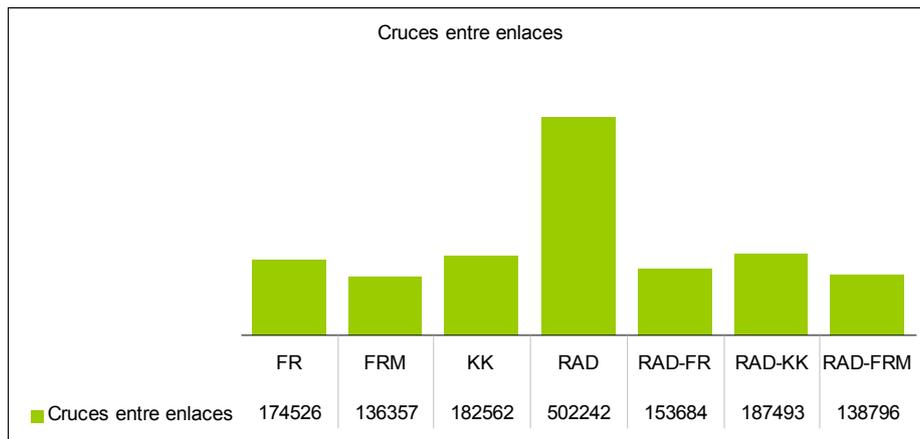
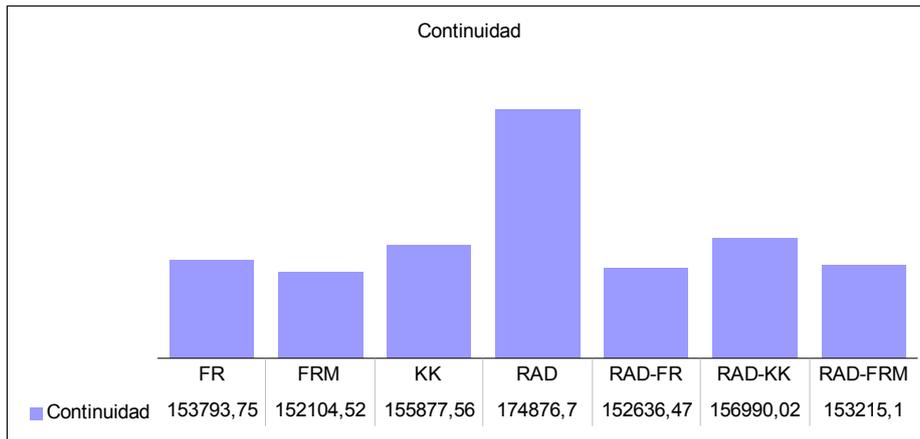
Net19



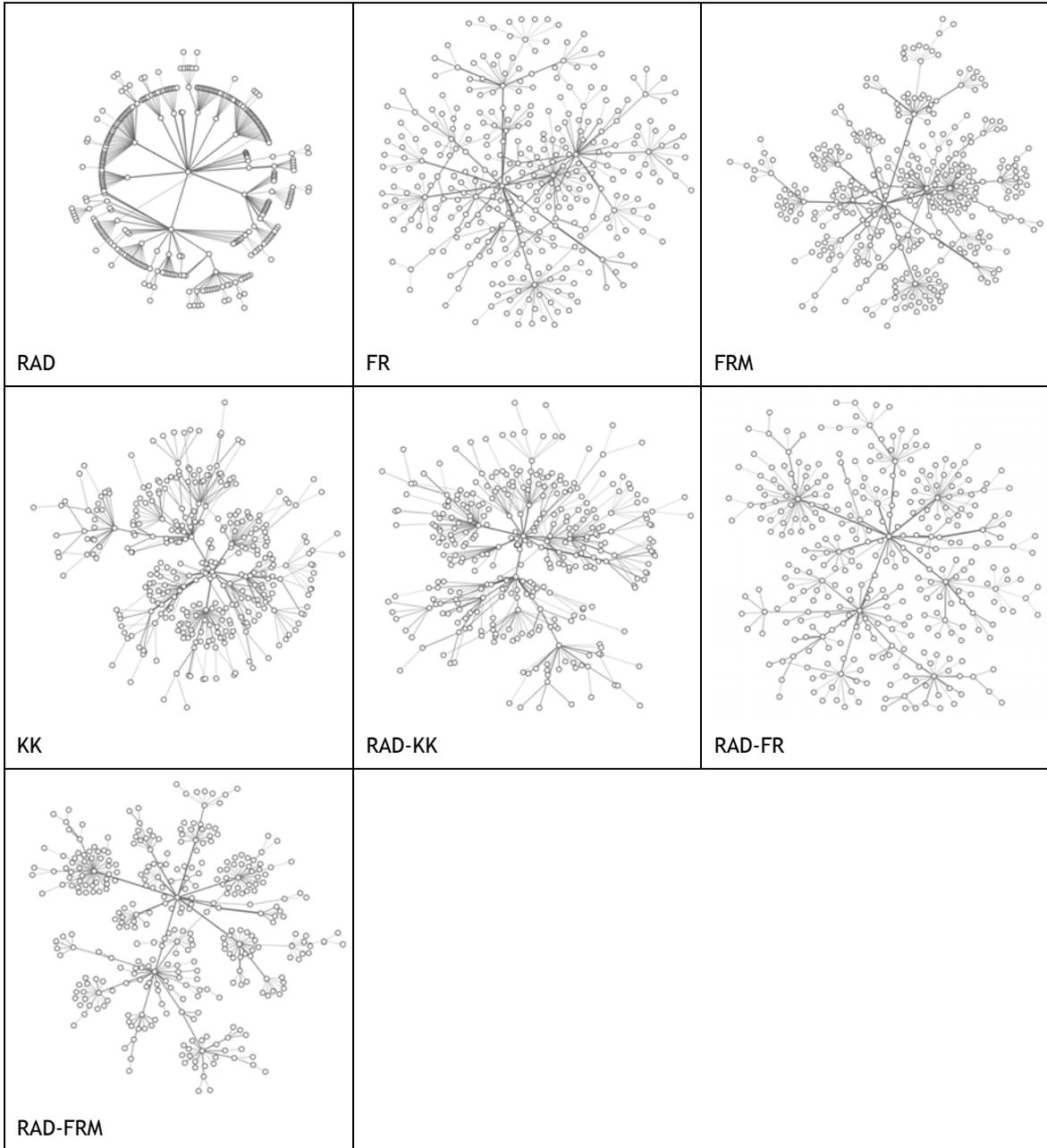


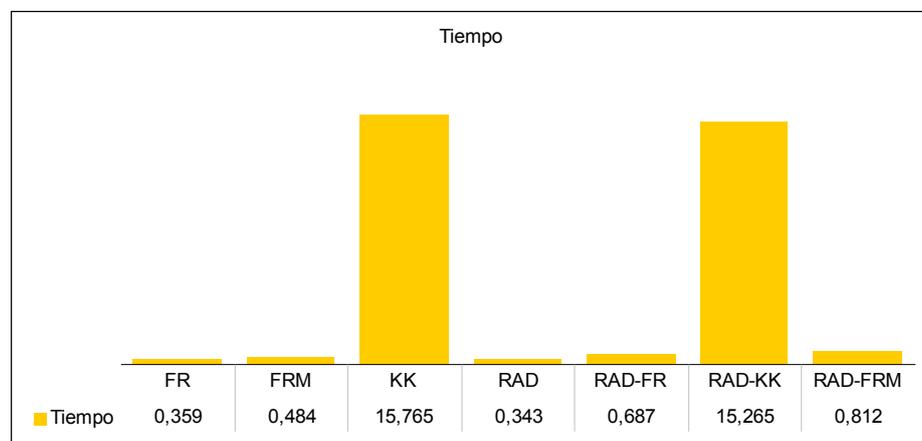
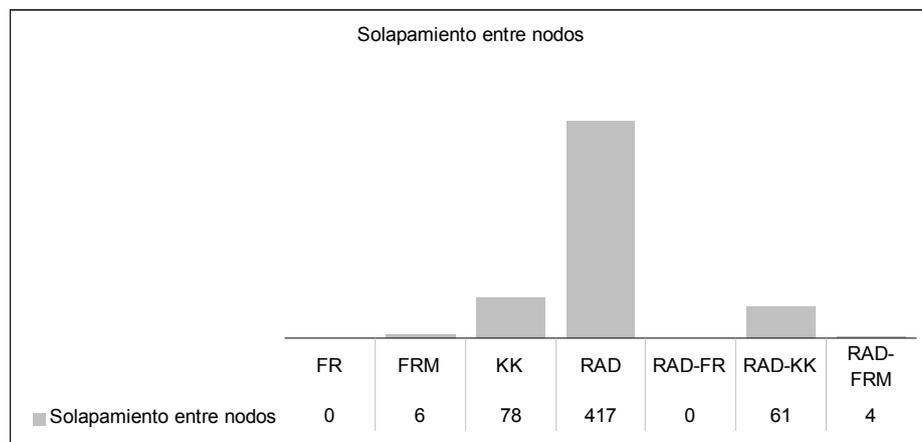
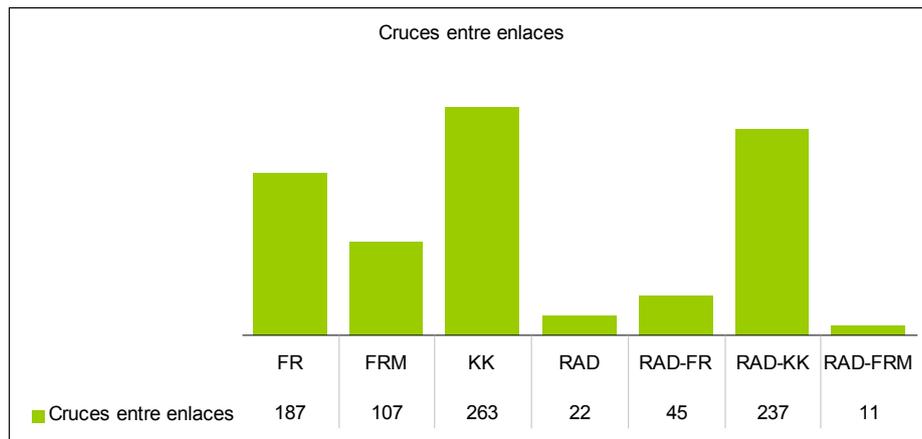
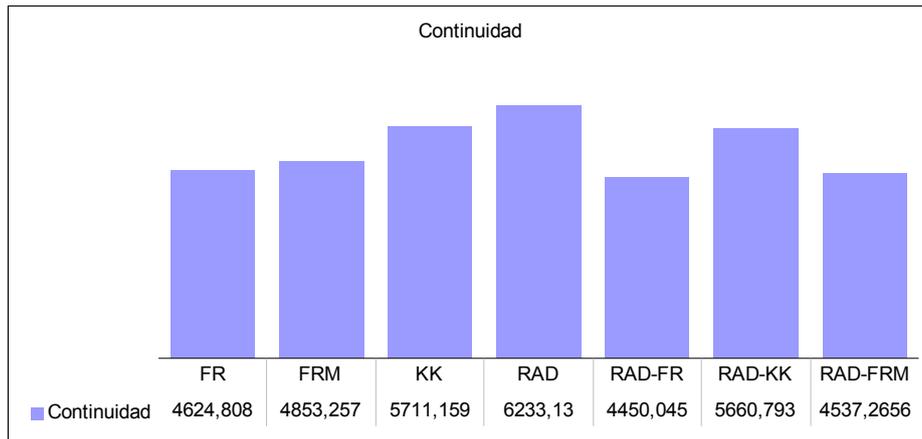
Net20



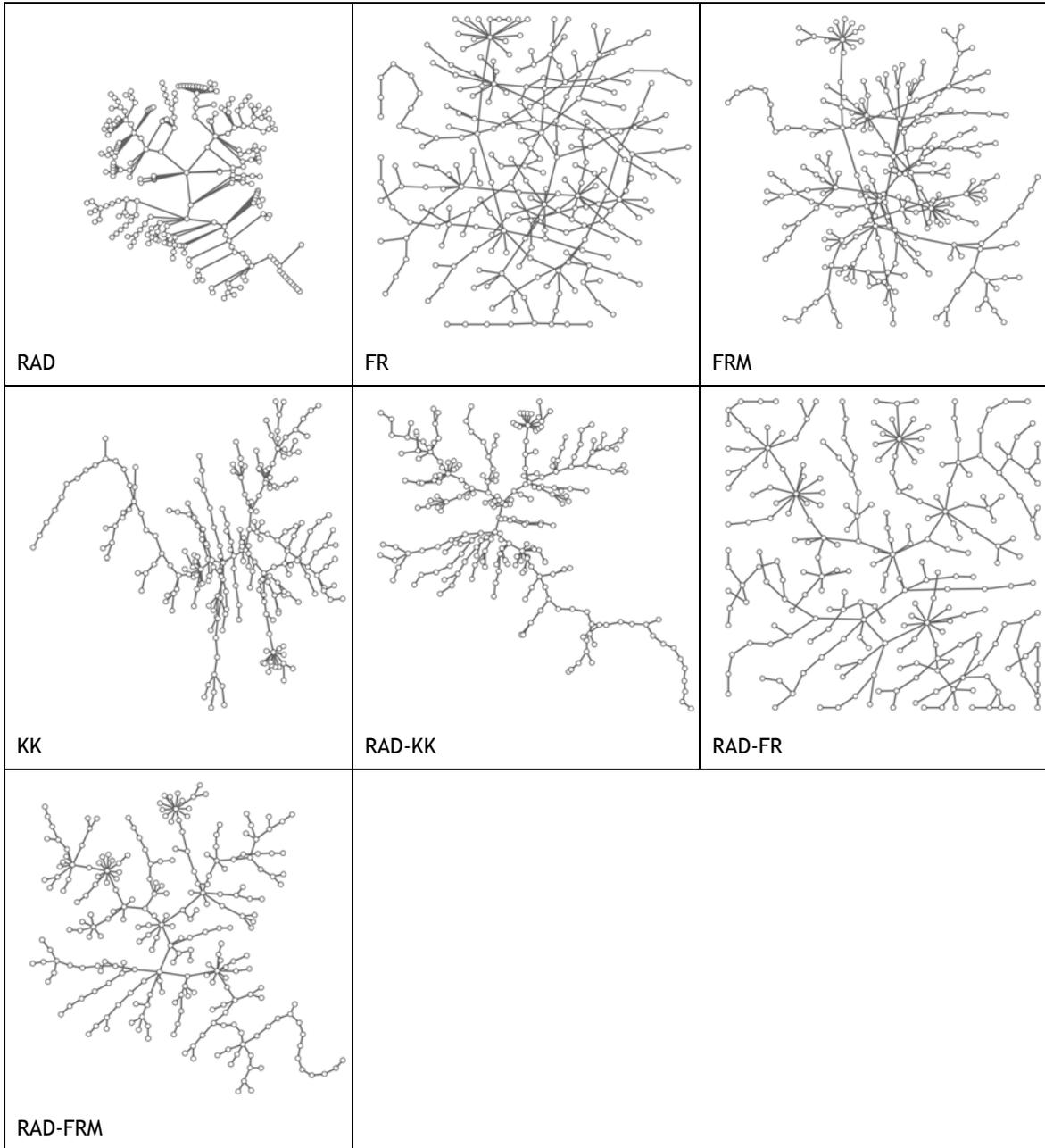


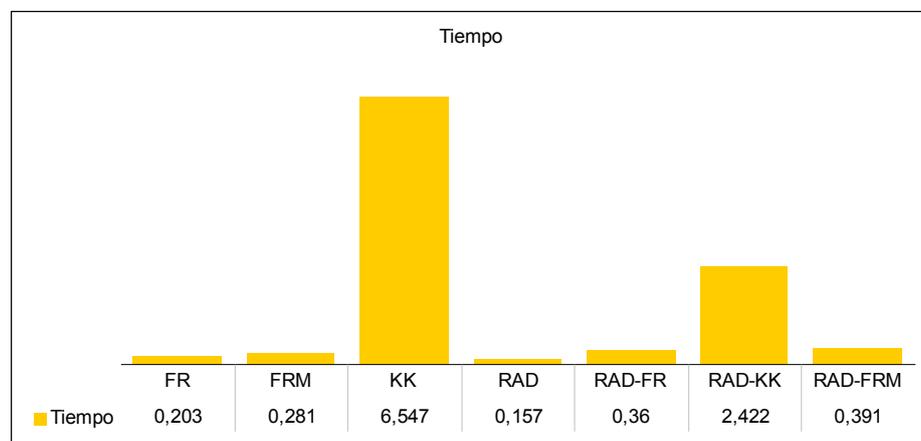
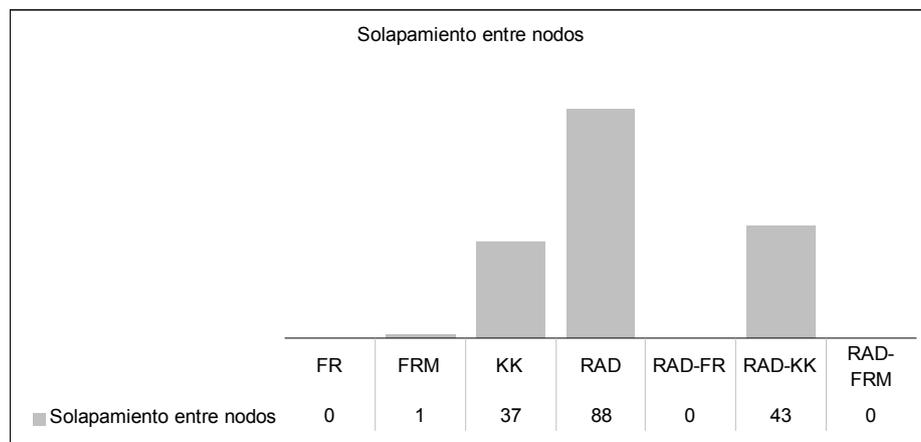
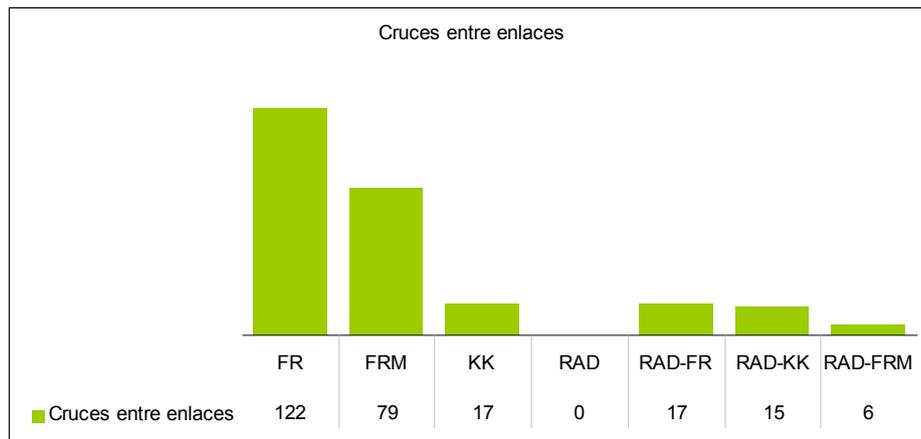
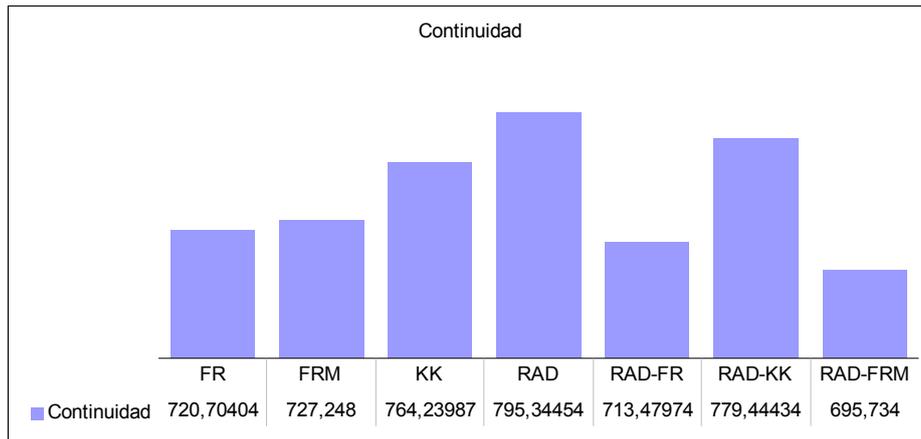
Net21



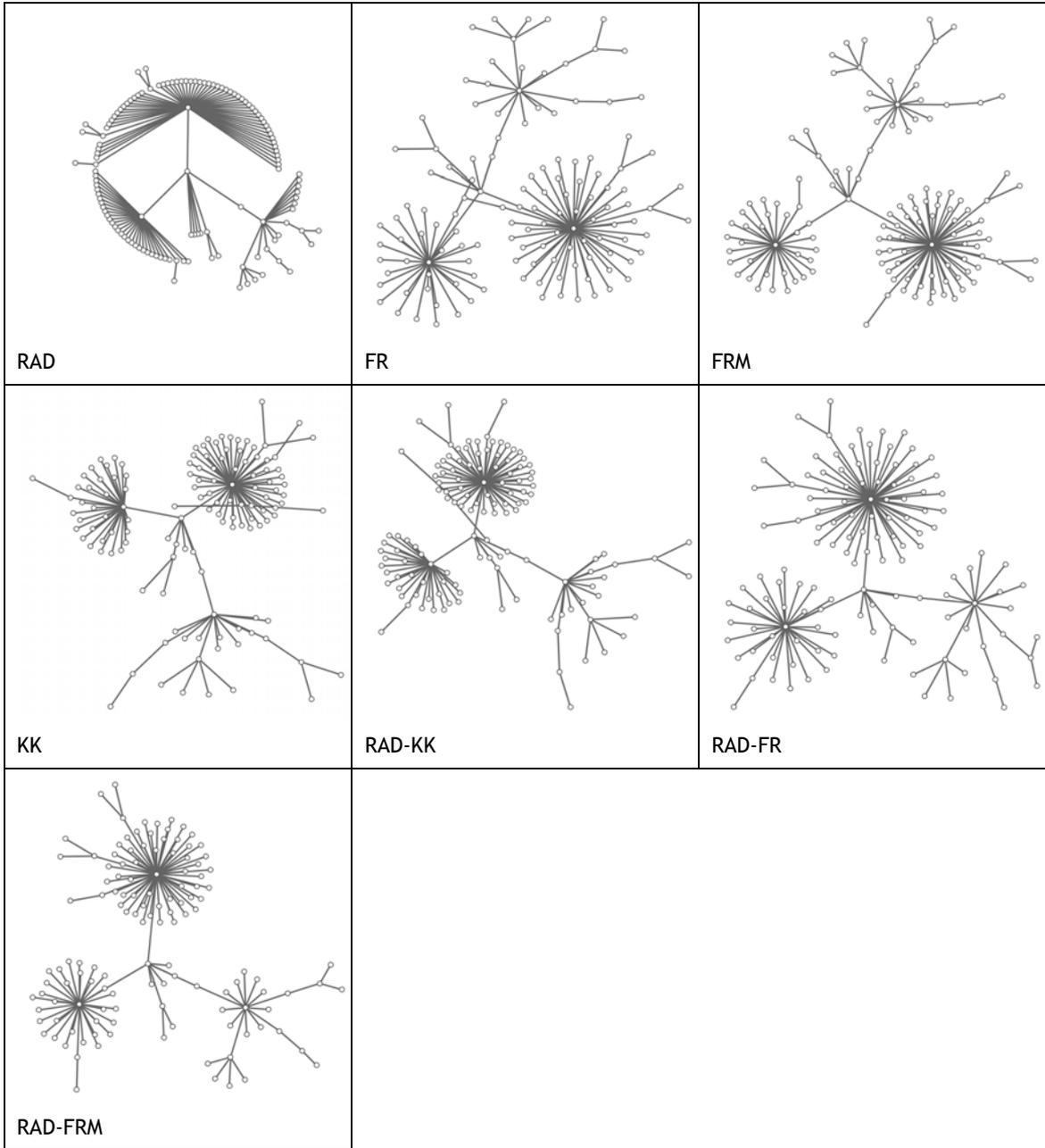


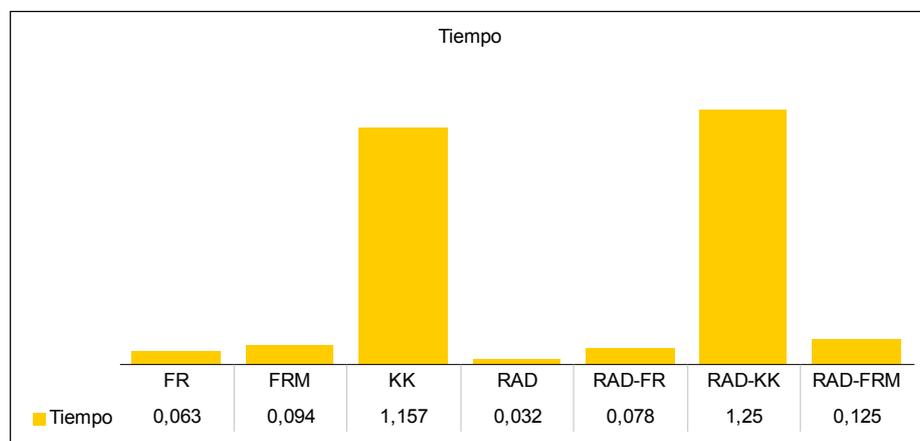
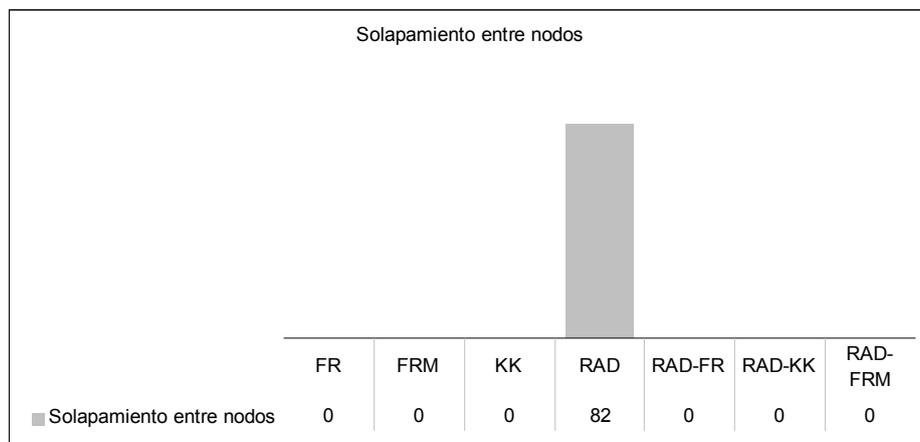
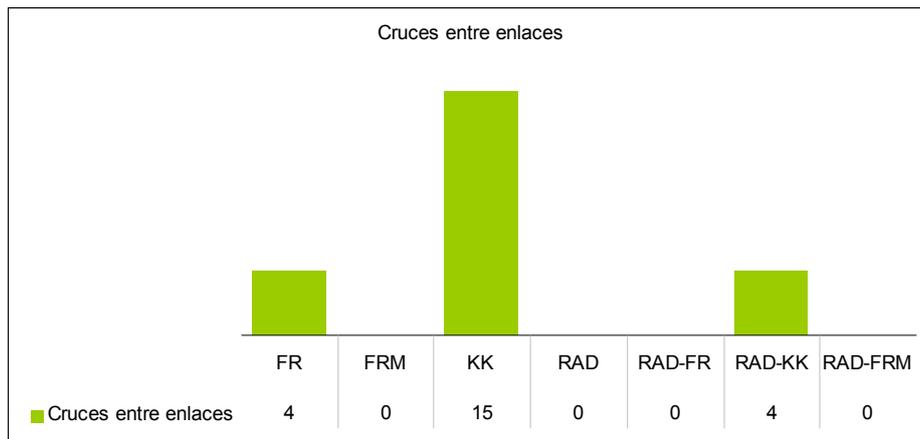
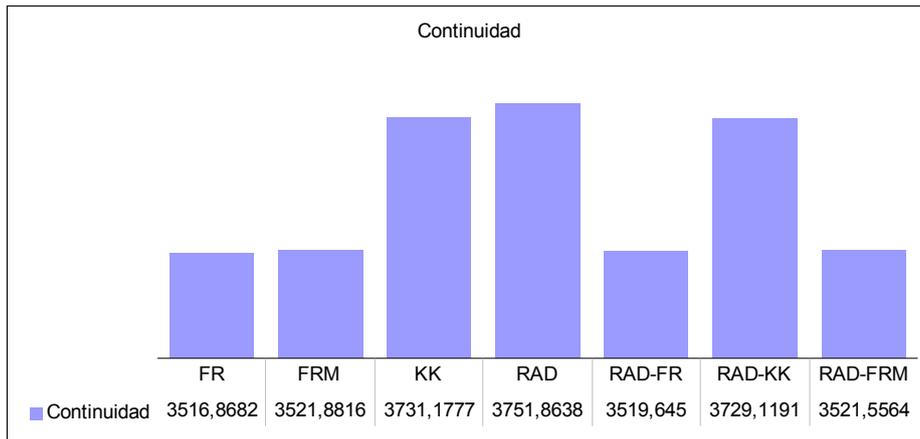
Net22



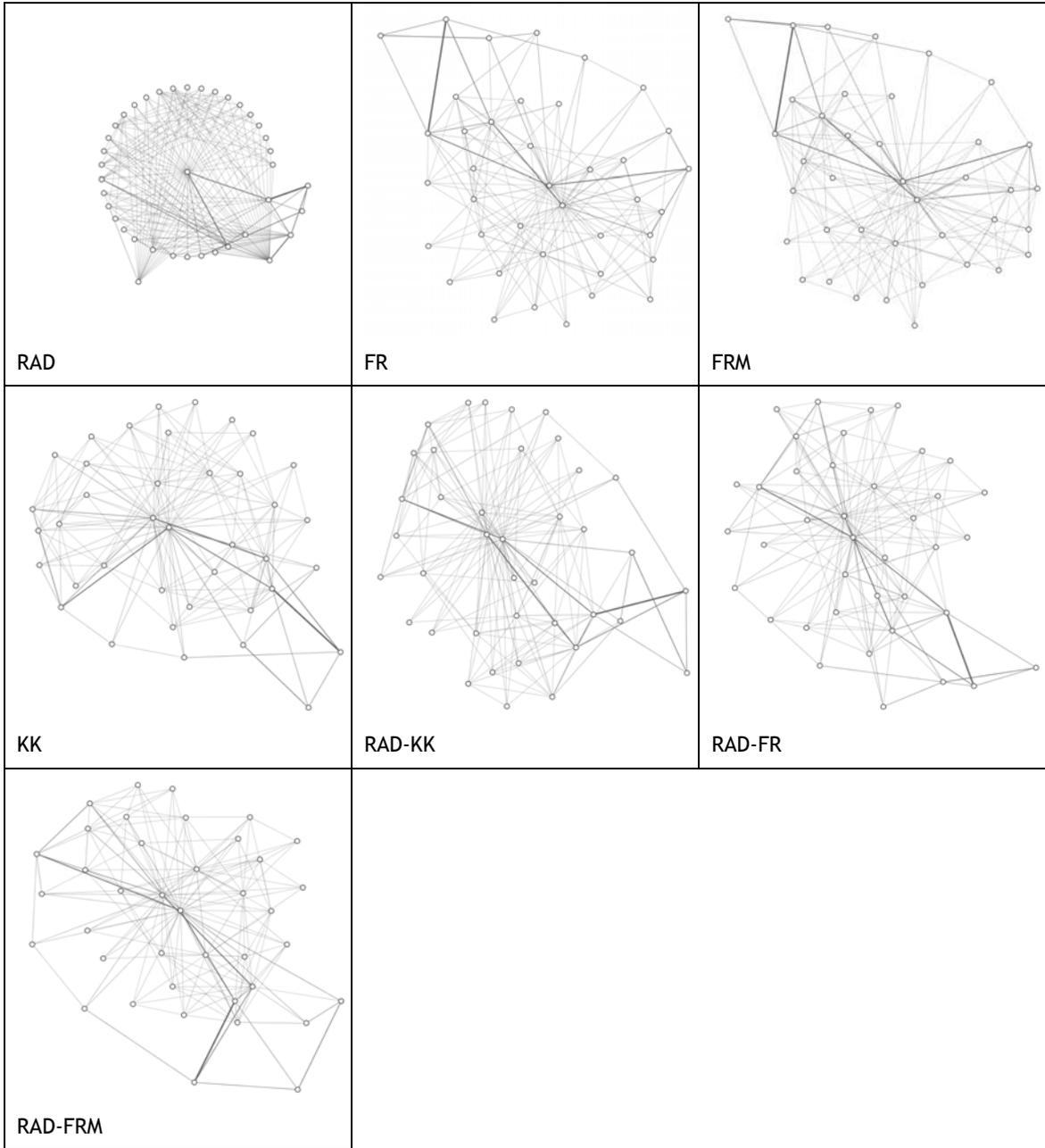


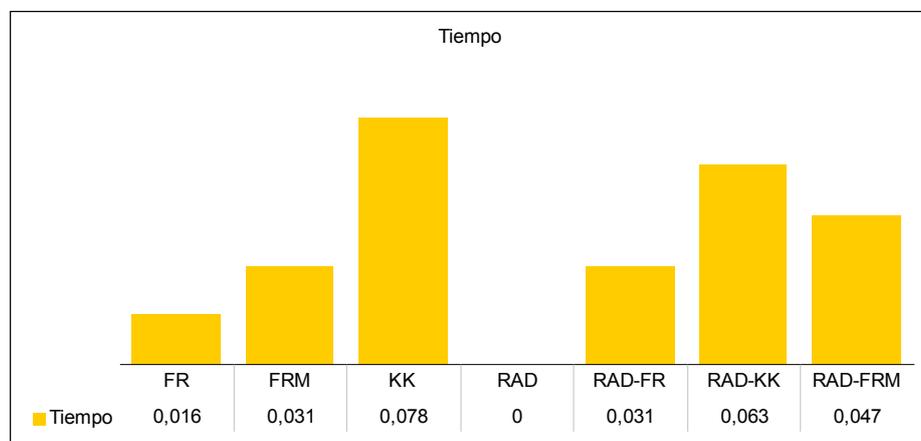
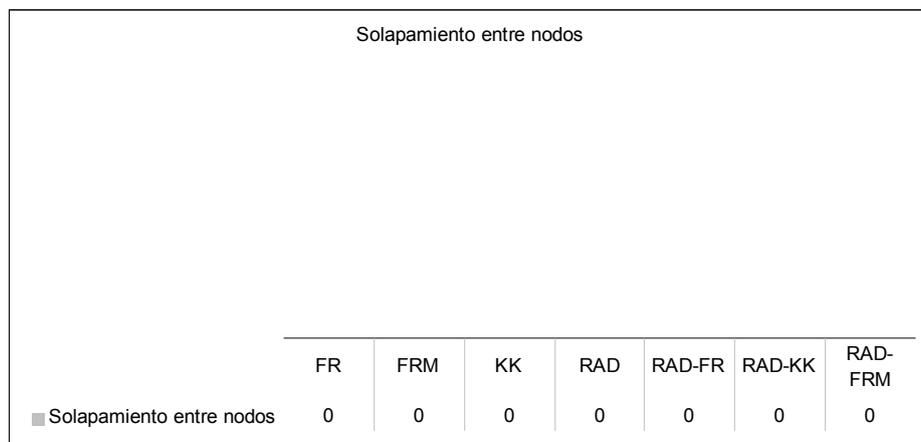
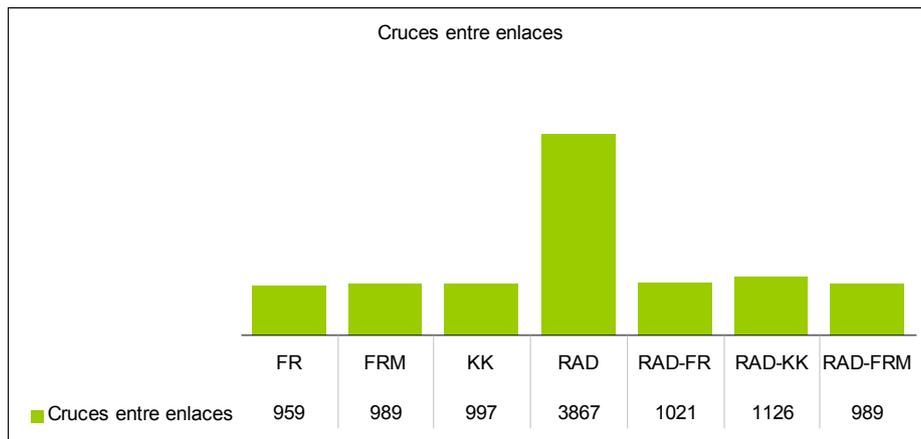
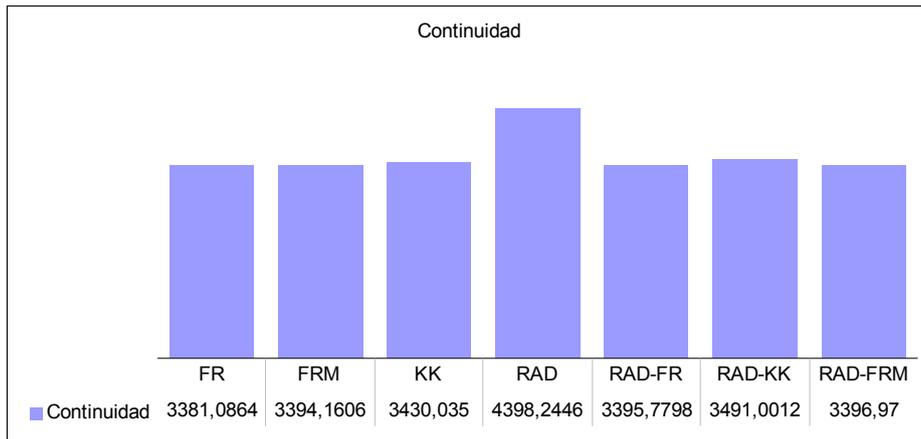
Net23



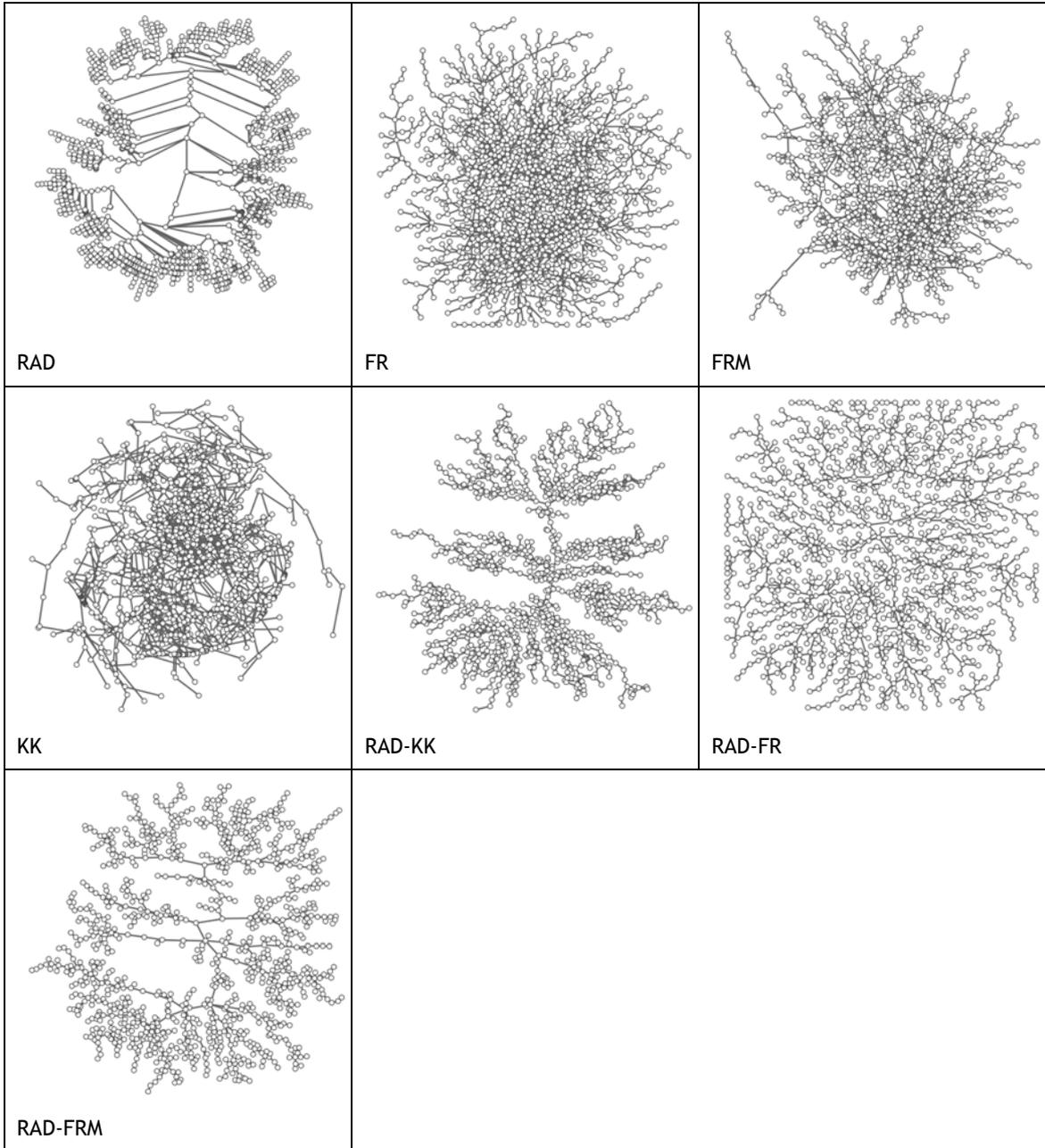


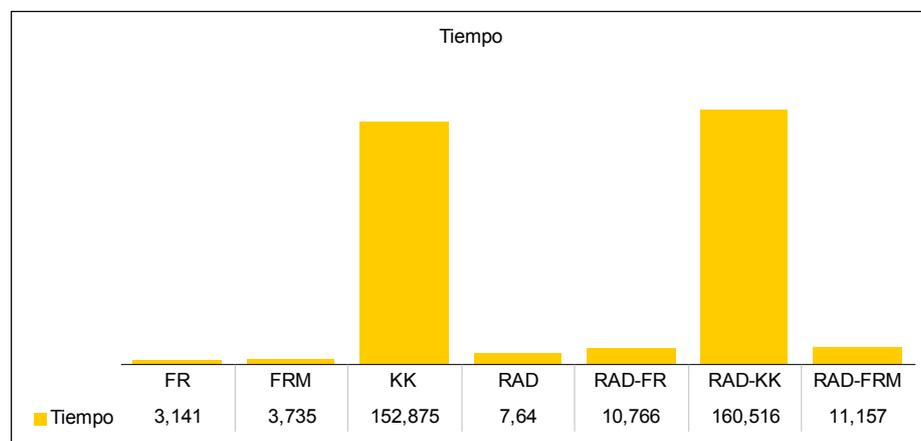
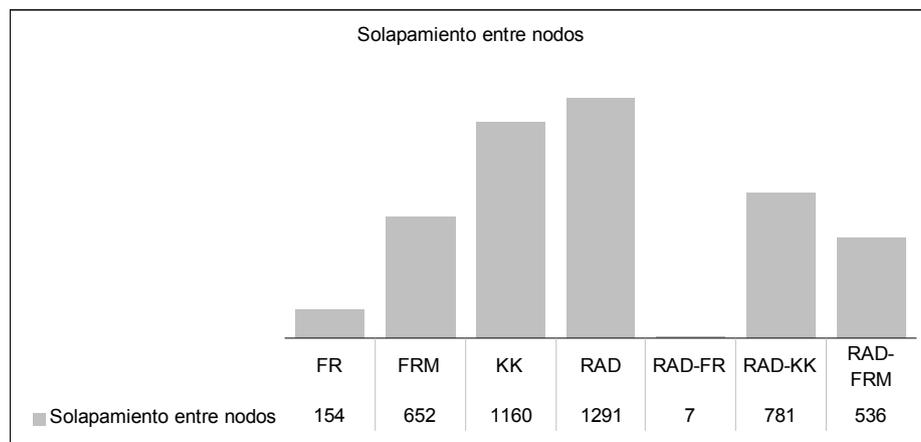
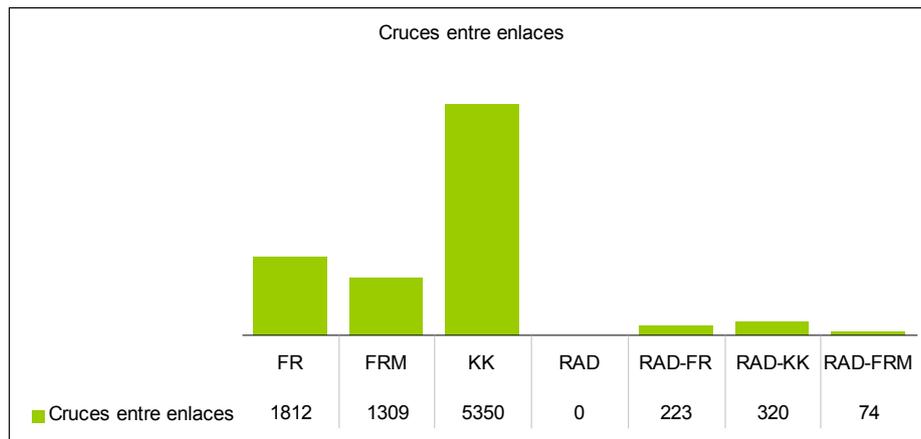
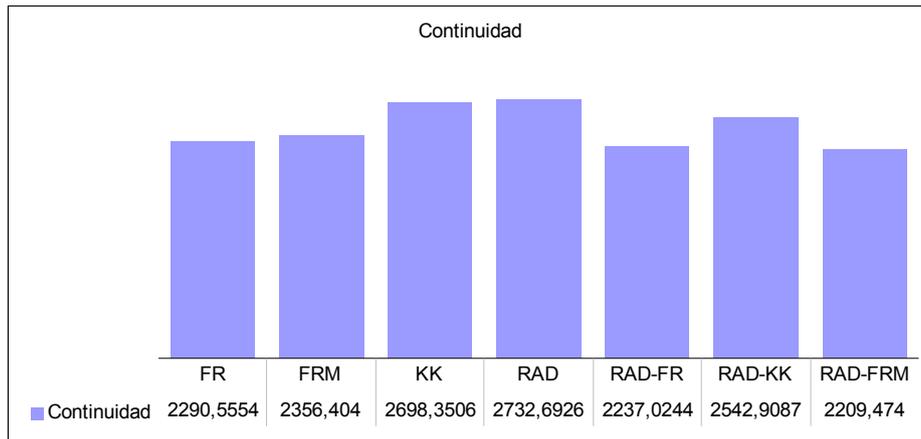
Net24



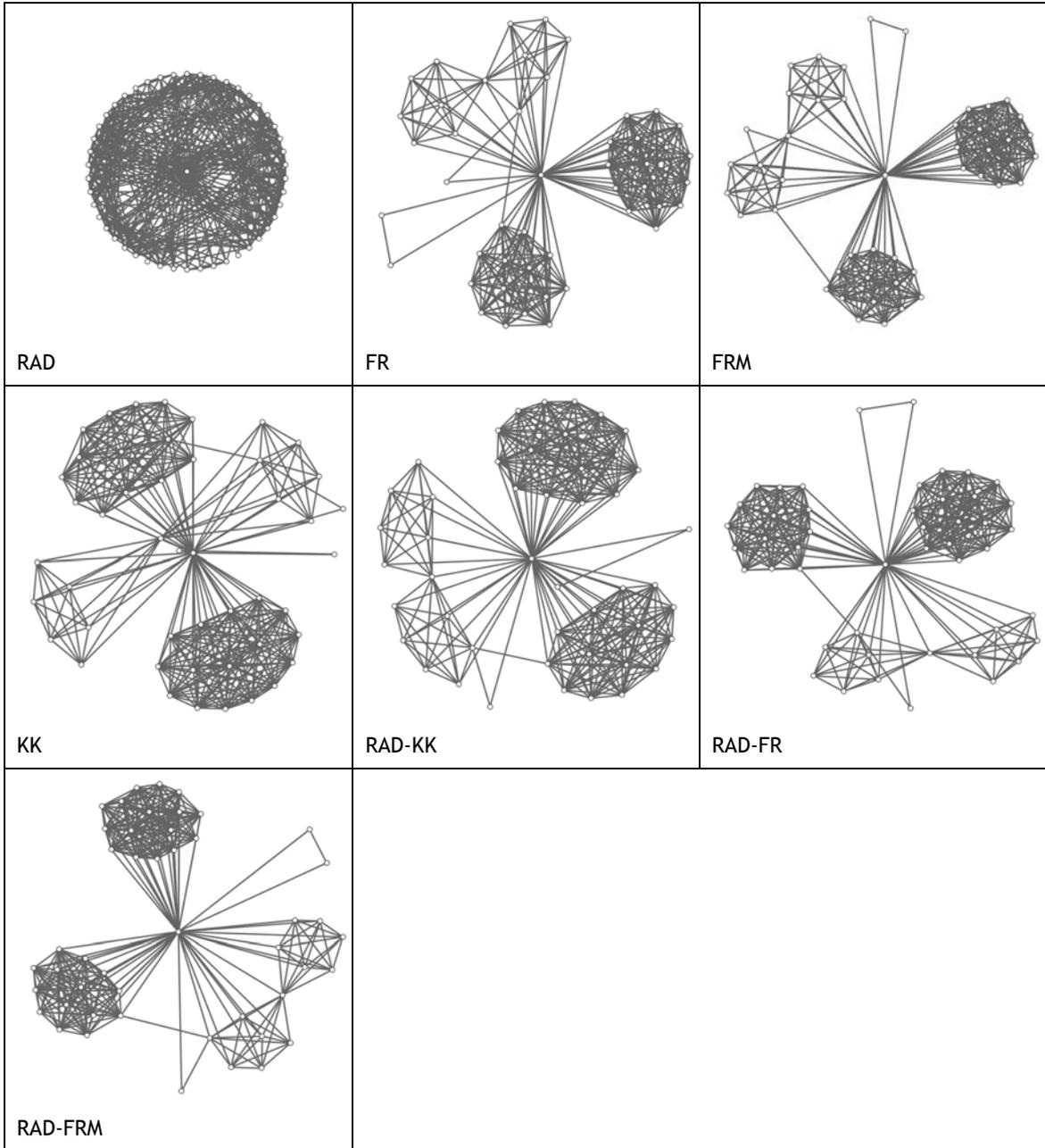


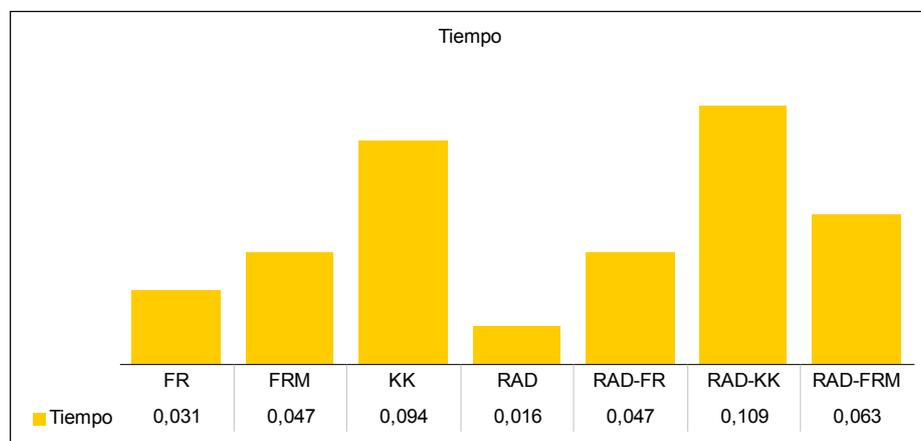
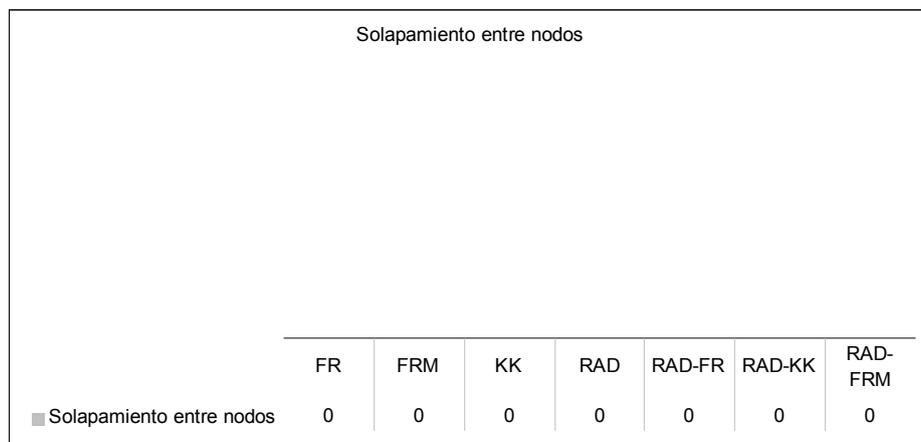
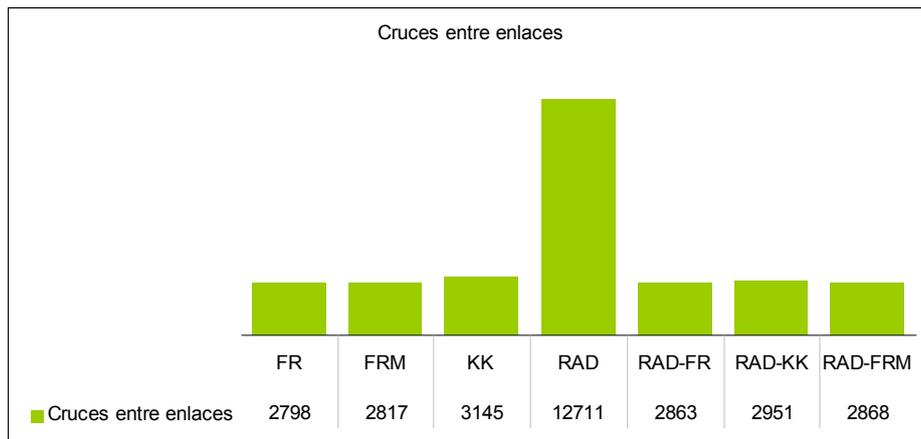
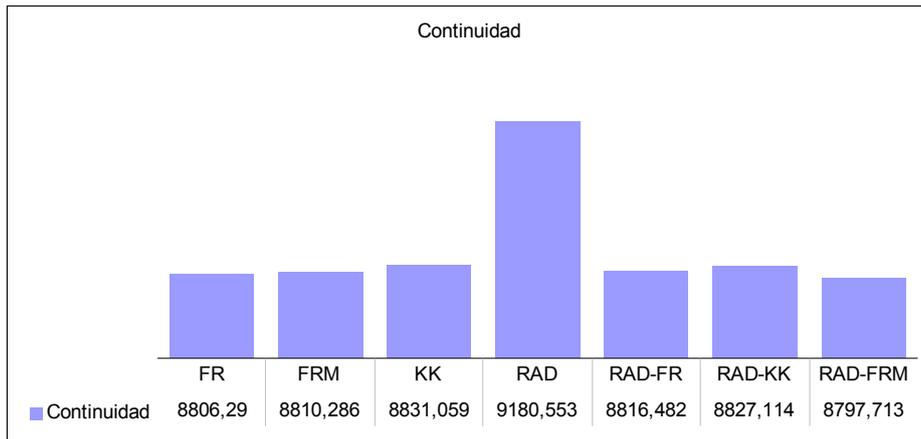
Net25



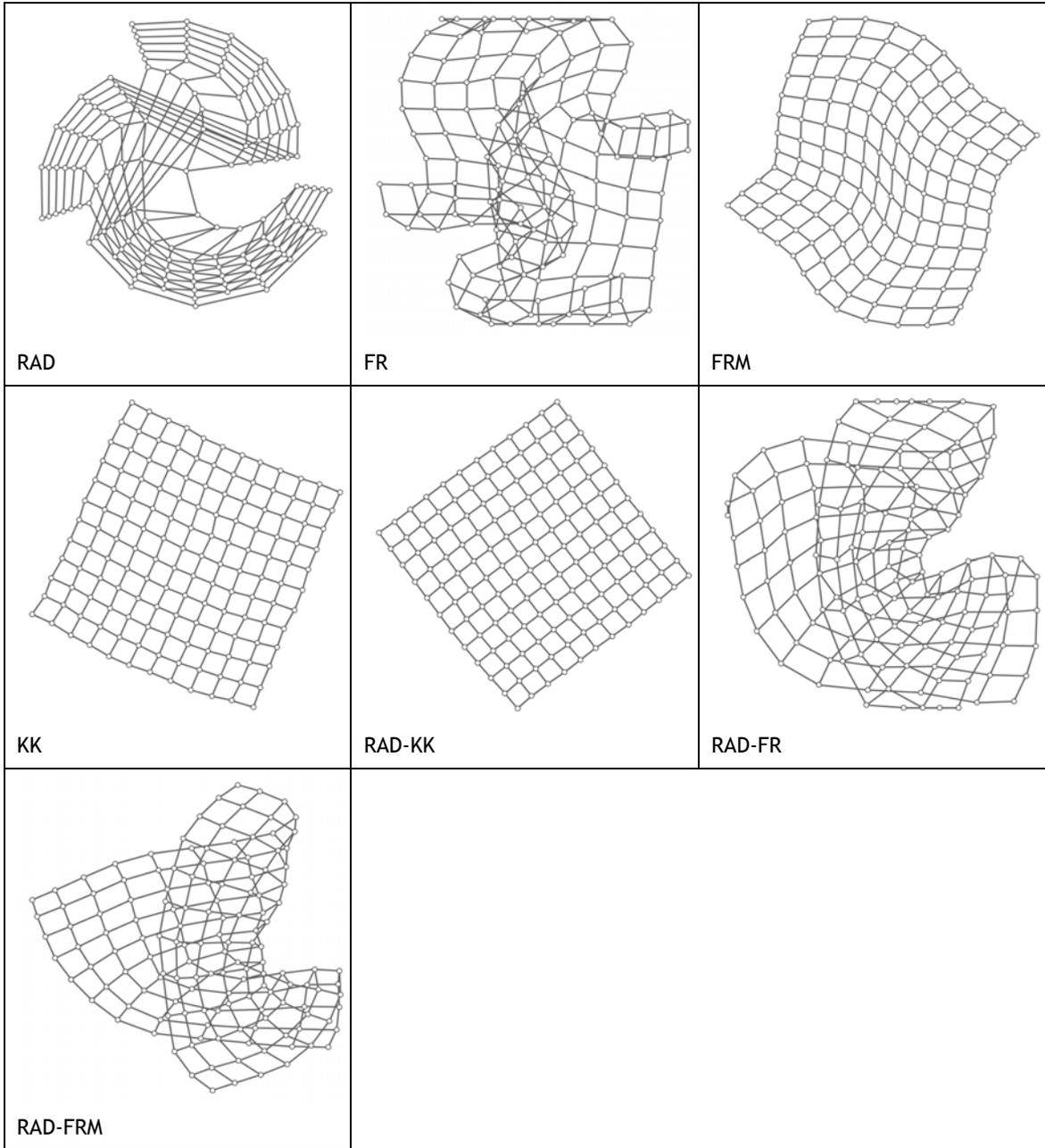


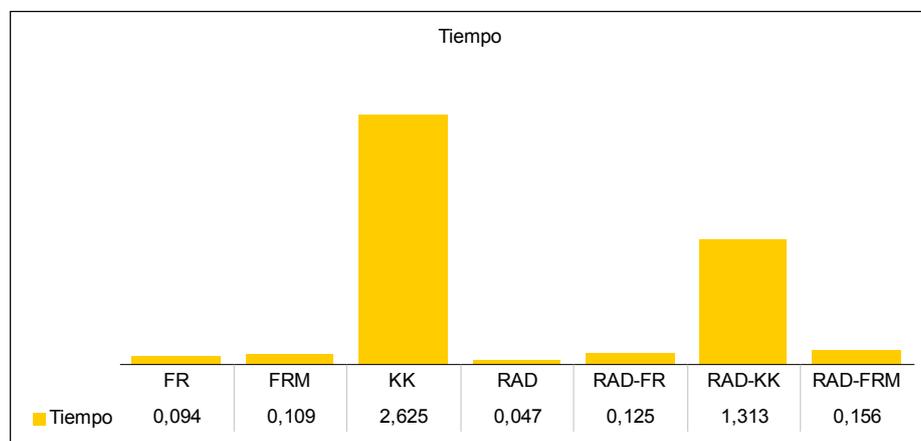
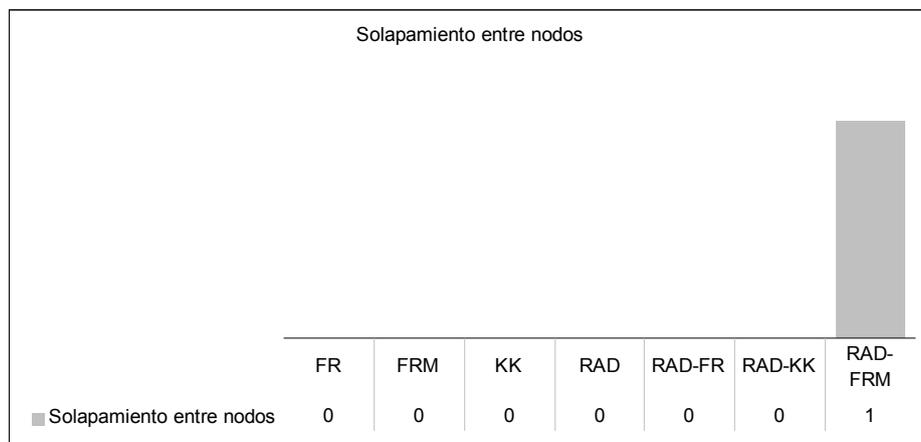
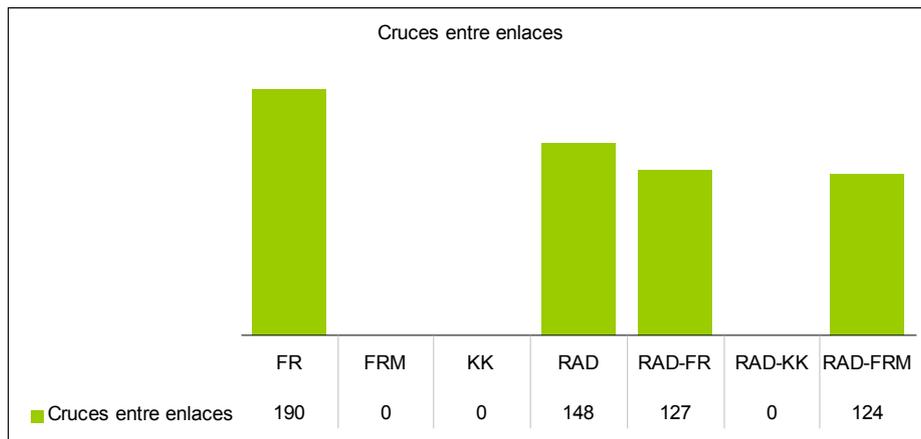
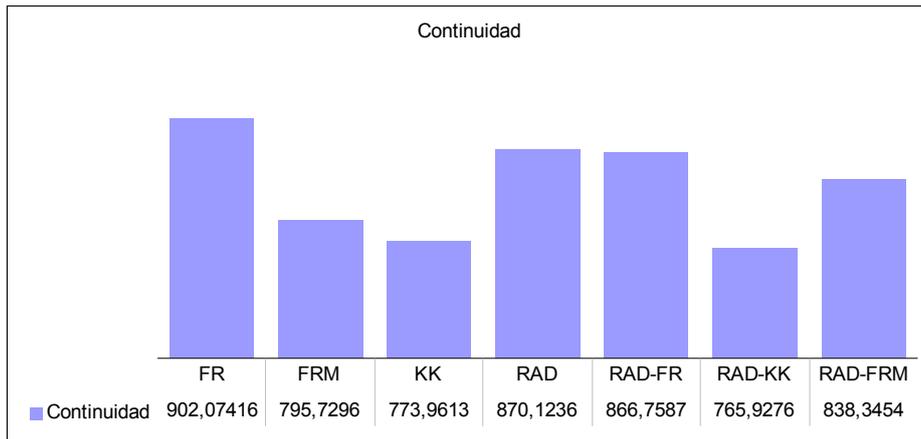
Net26



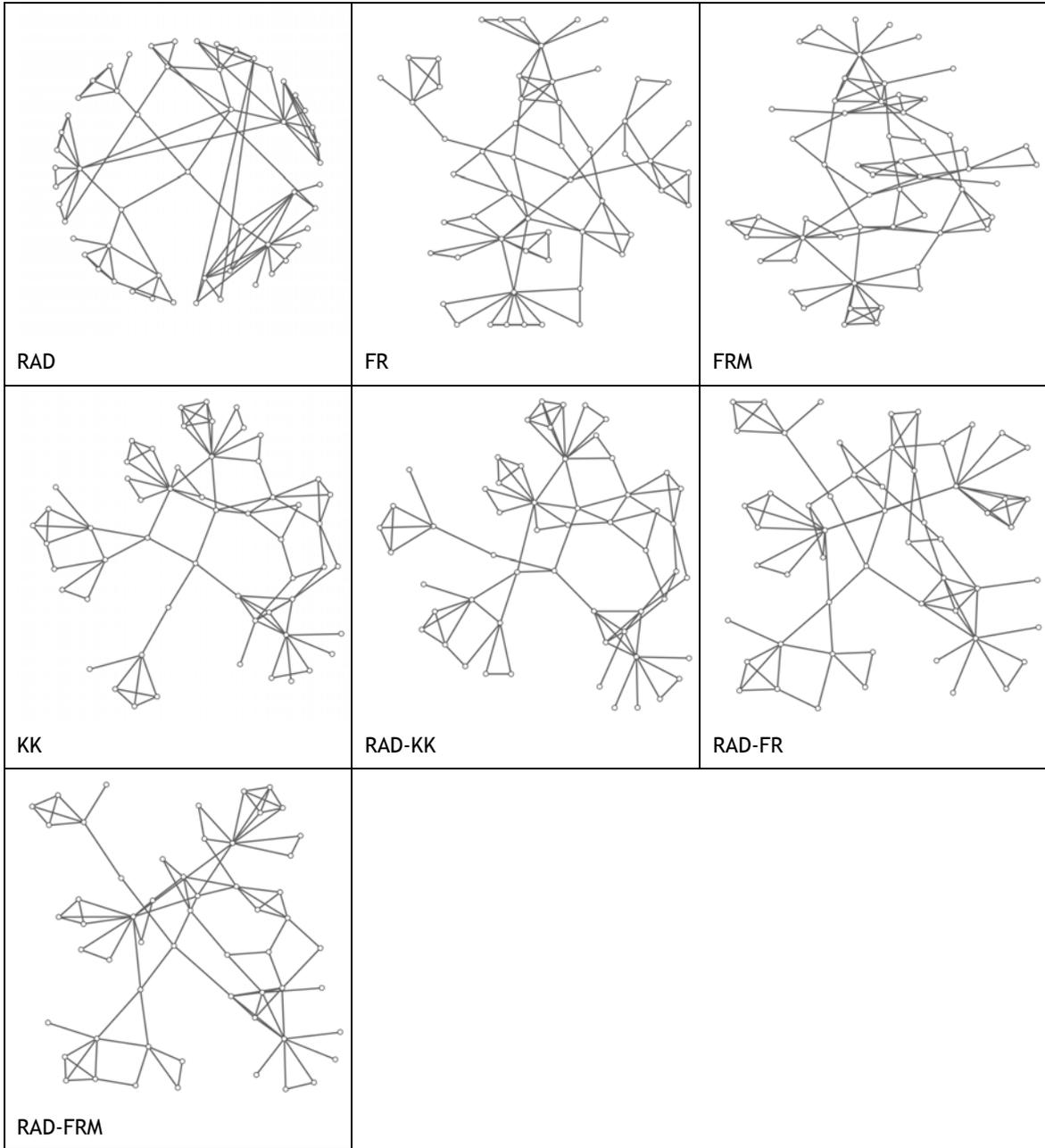


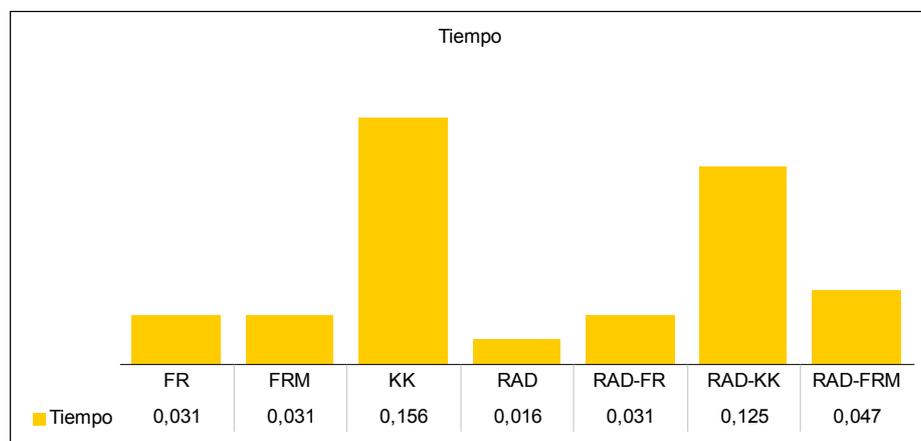
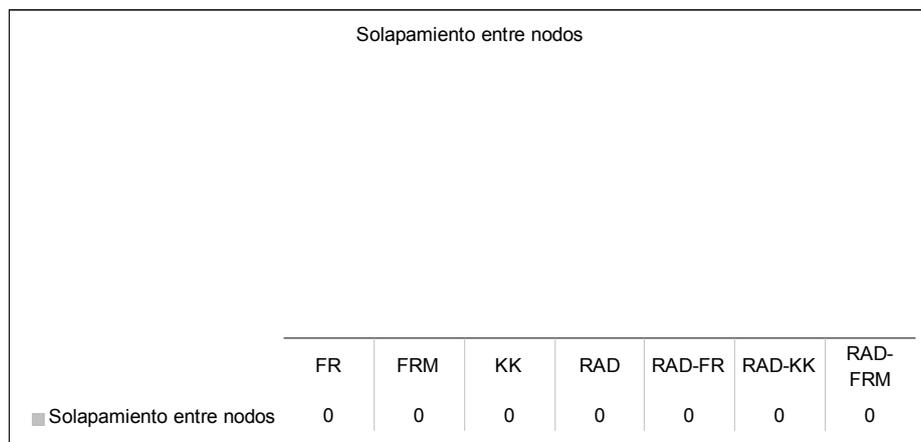
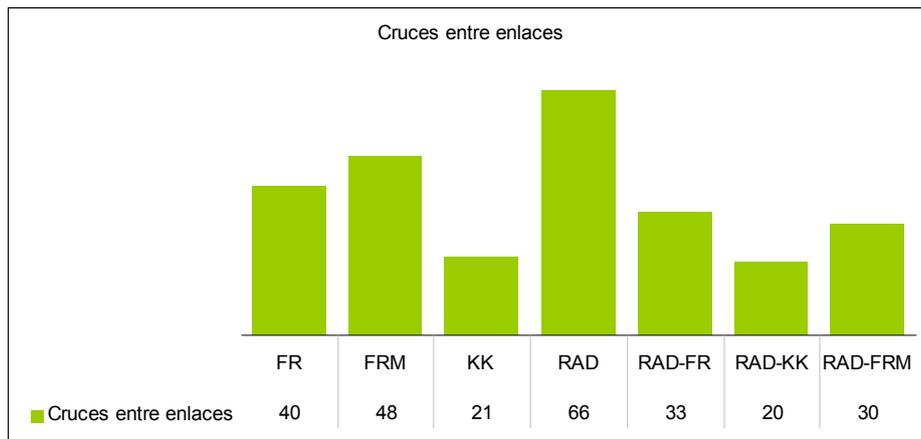
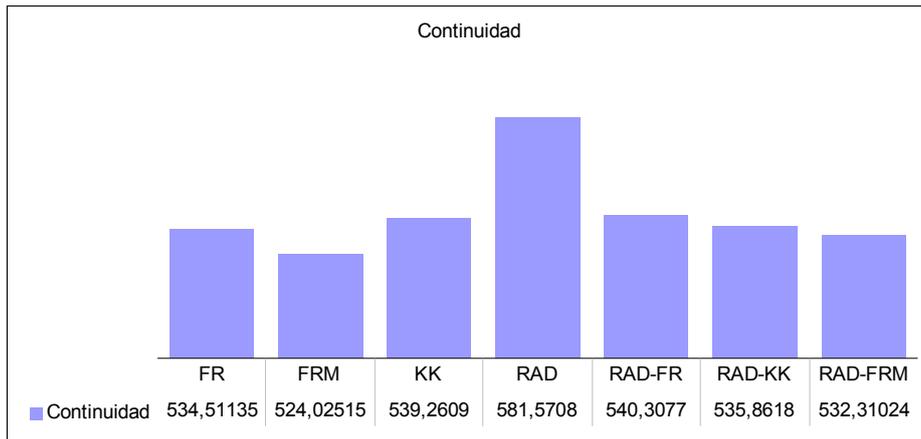
Net27



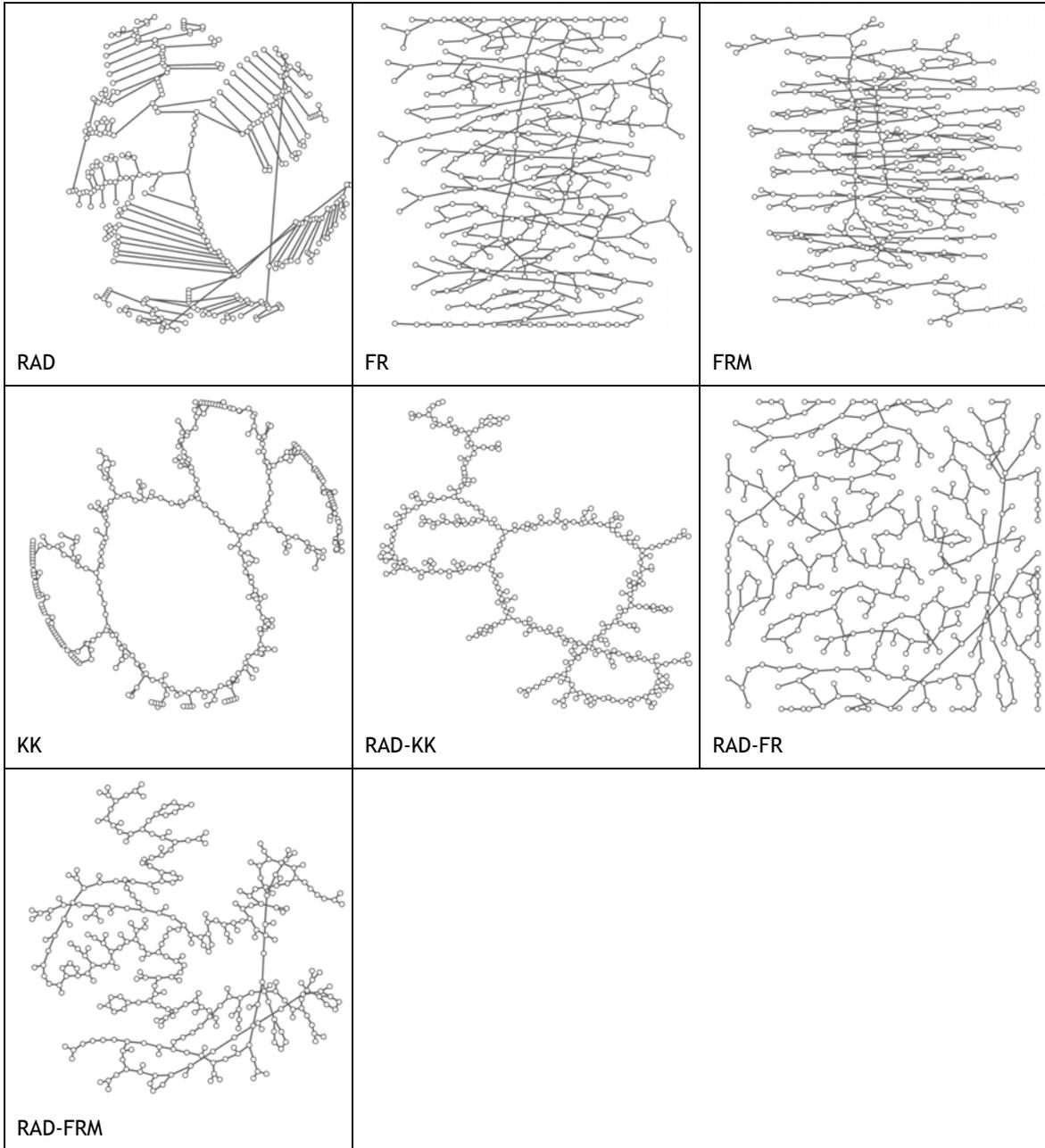


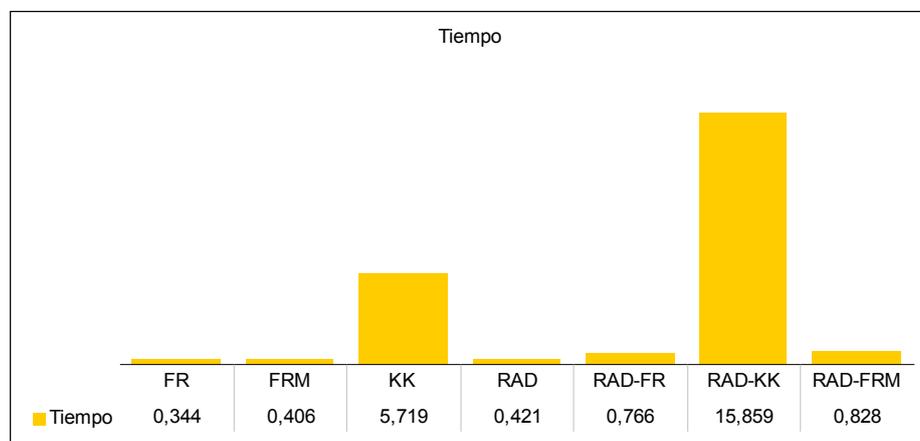
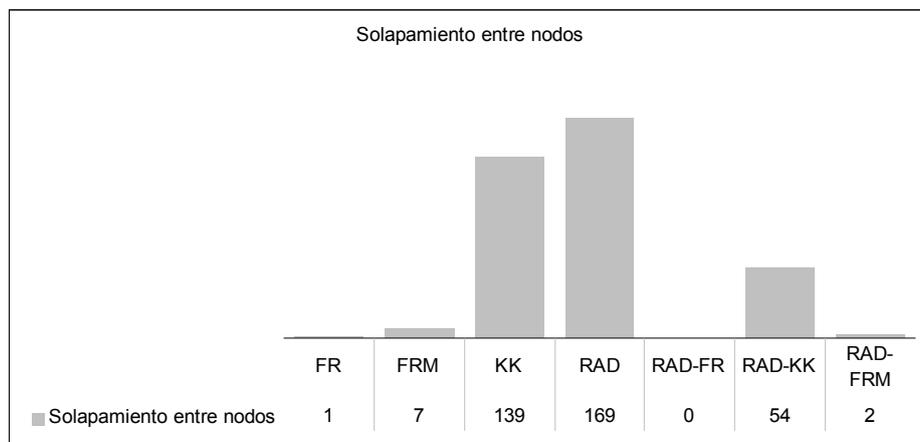
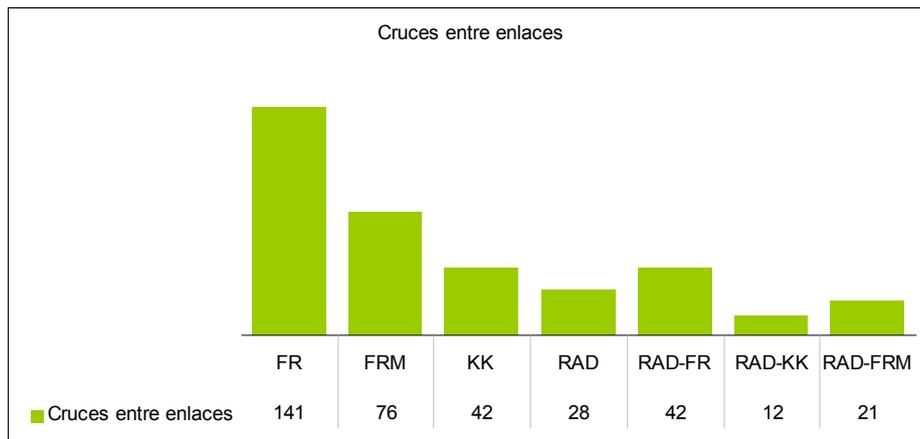
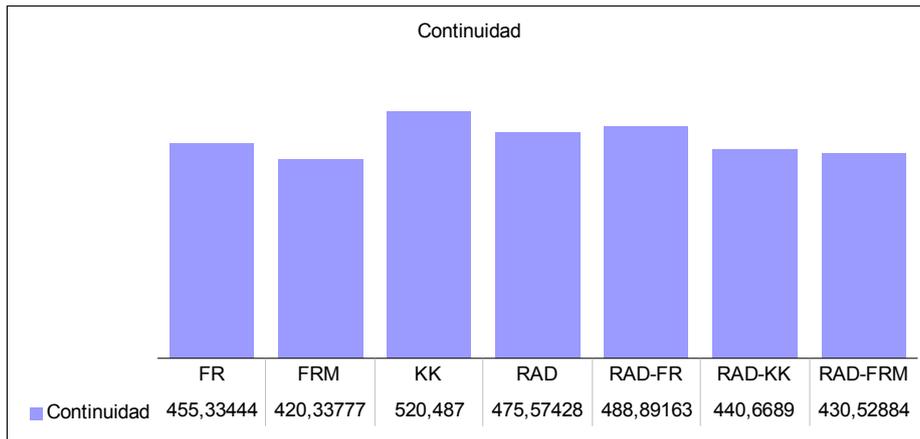
Net28



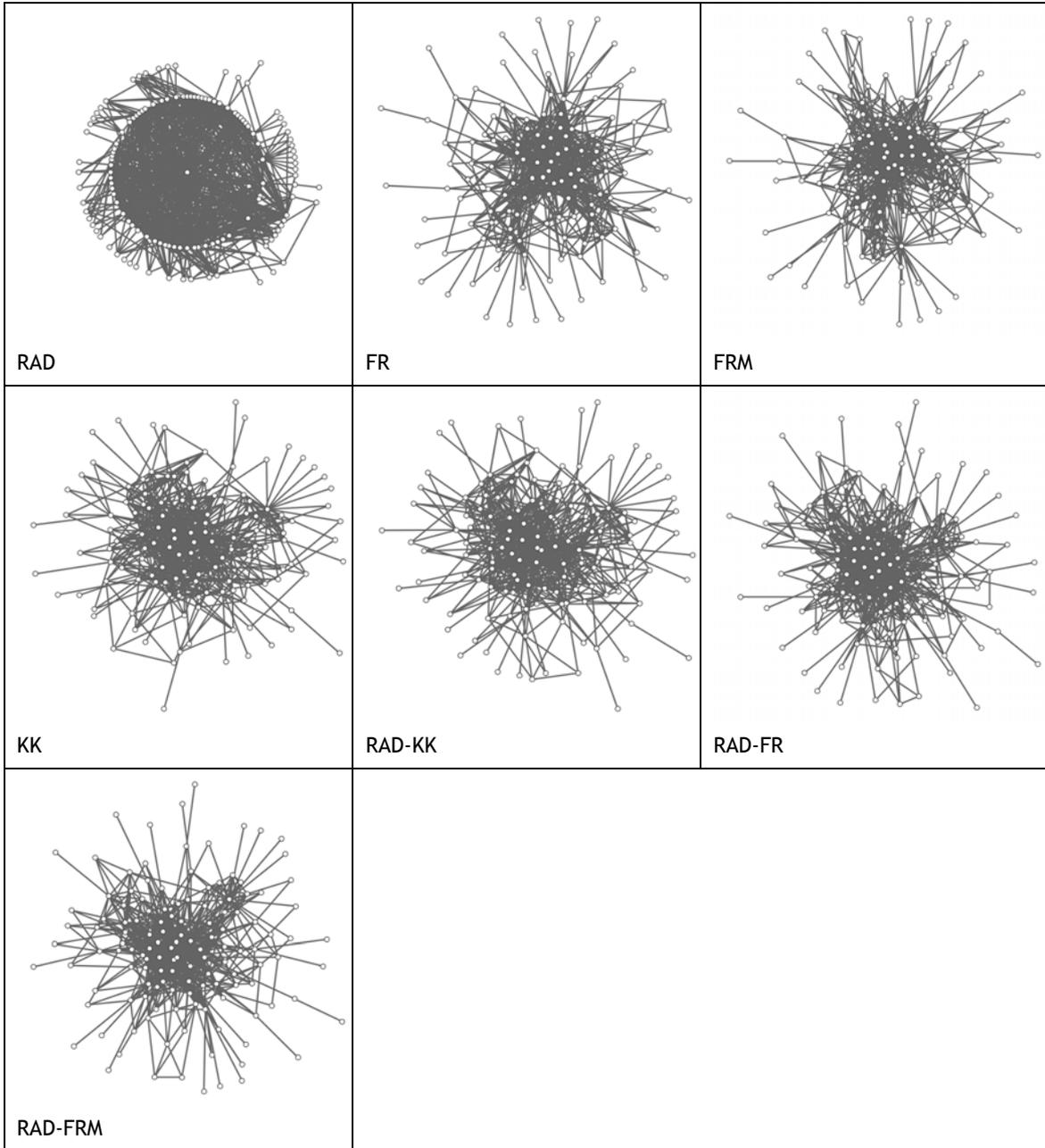


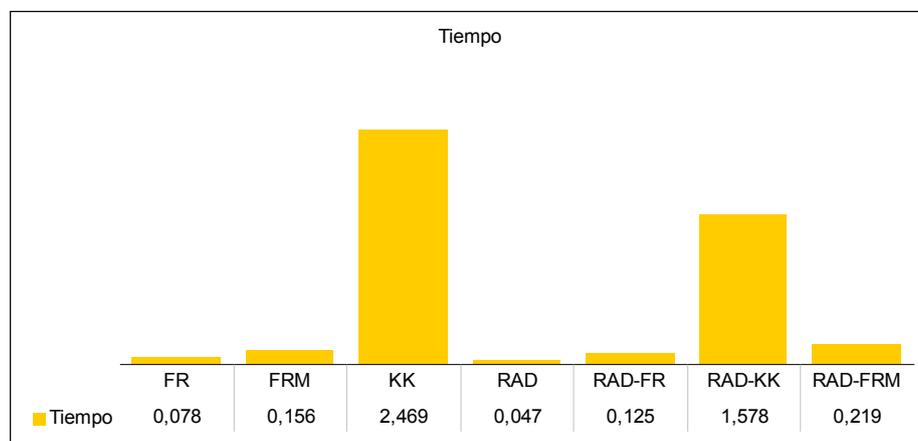
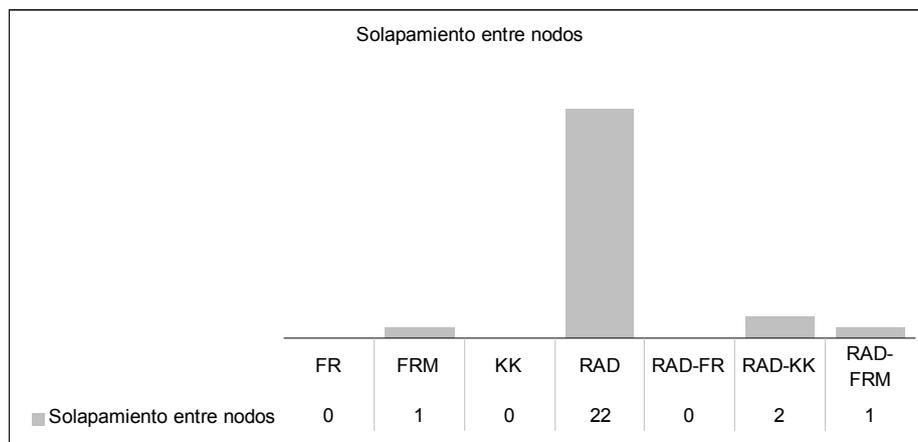
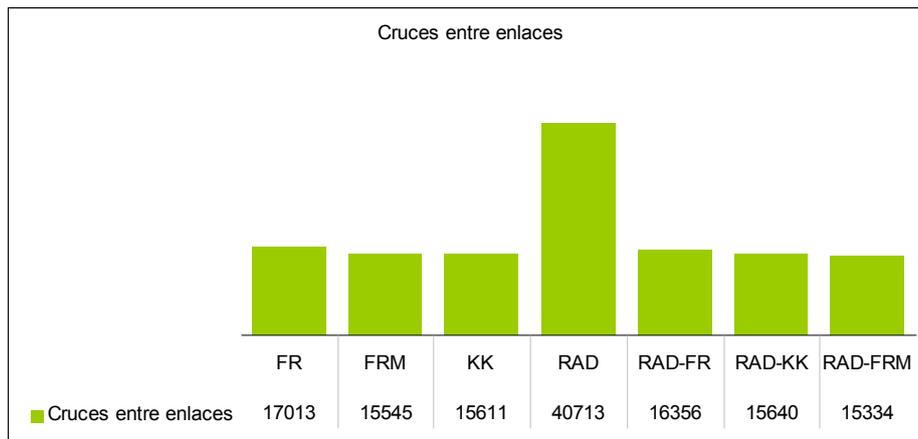
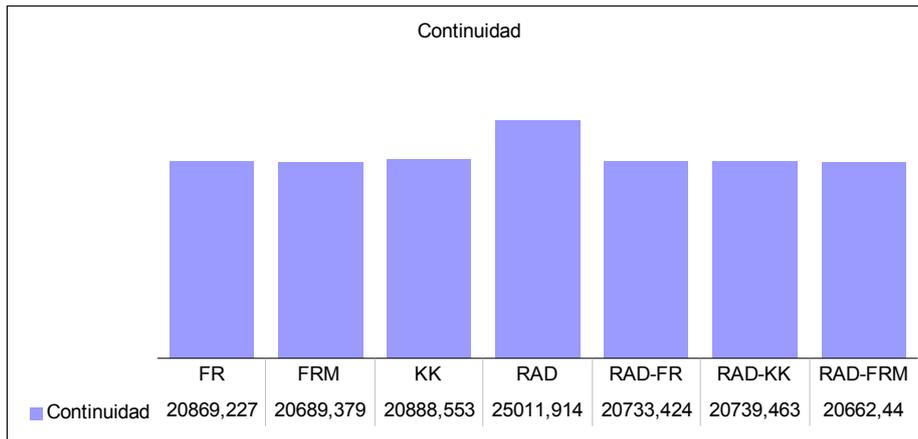
Net29



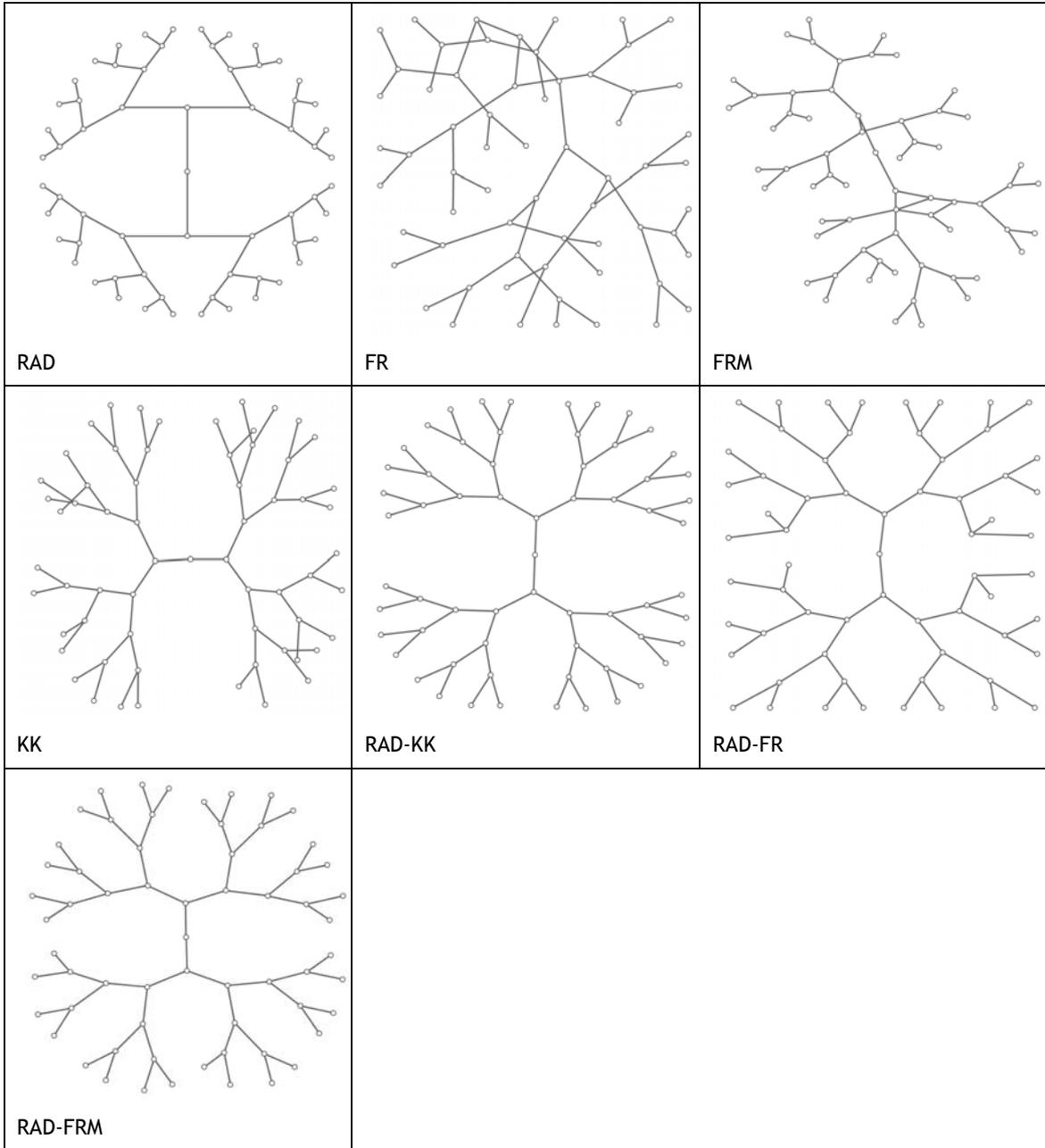


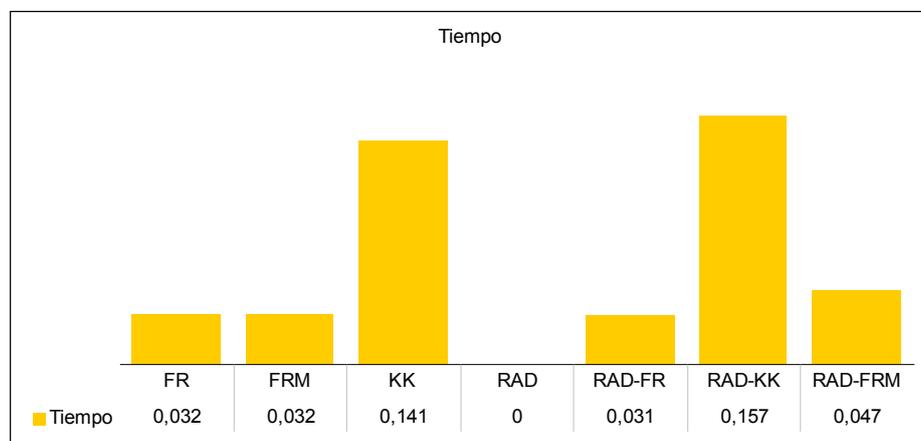
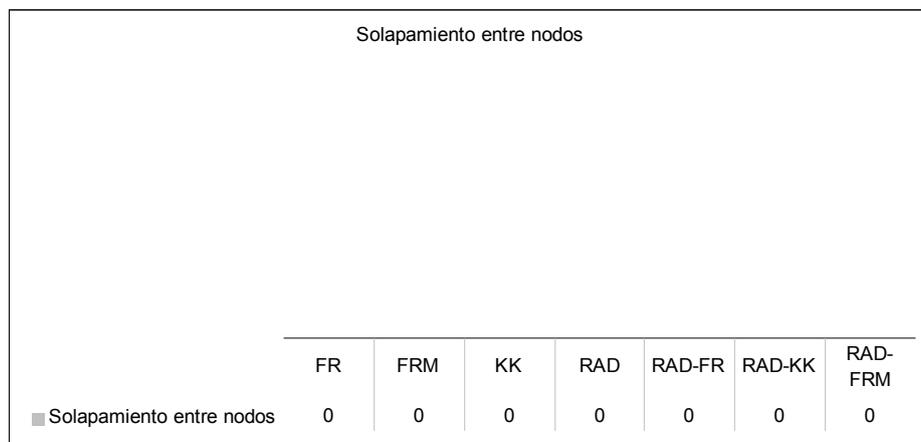
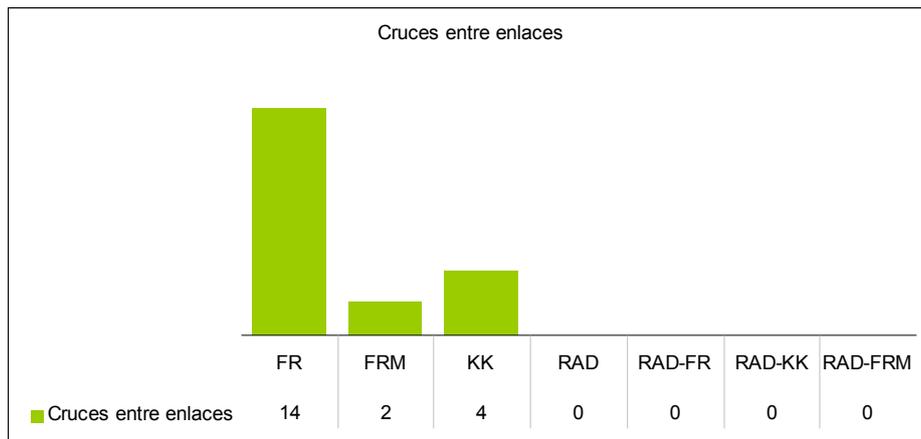
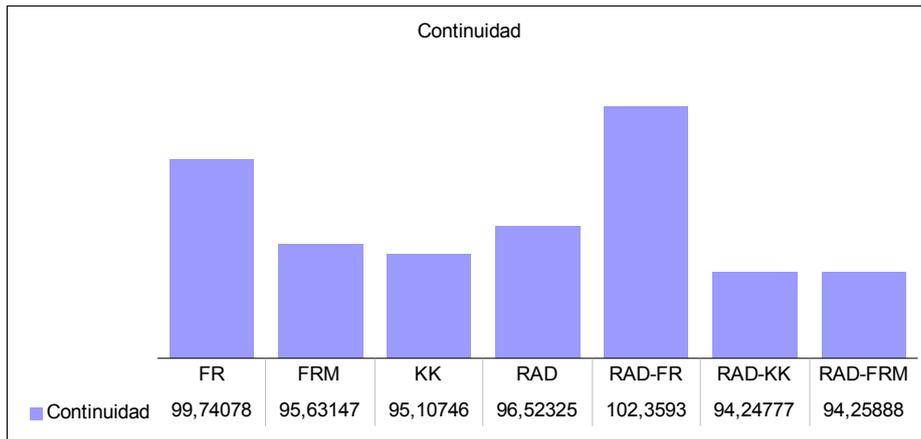
Net30



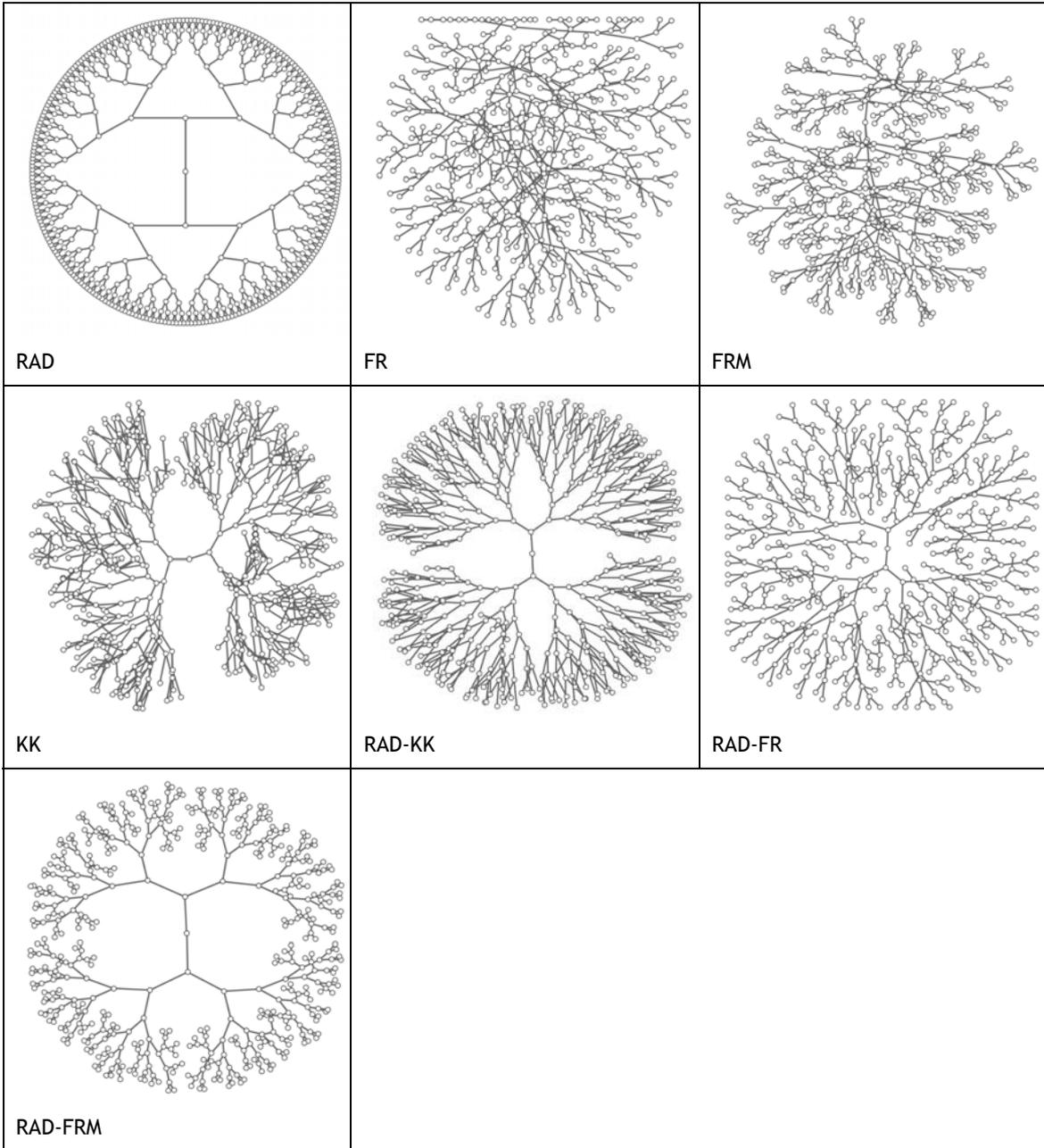


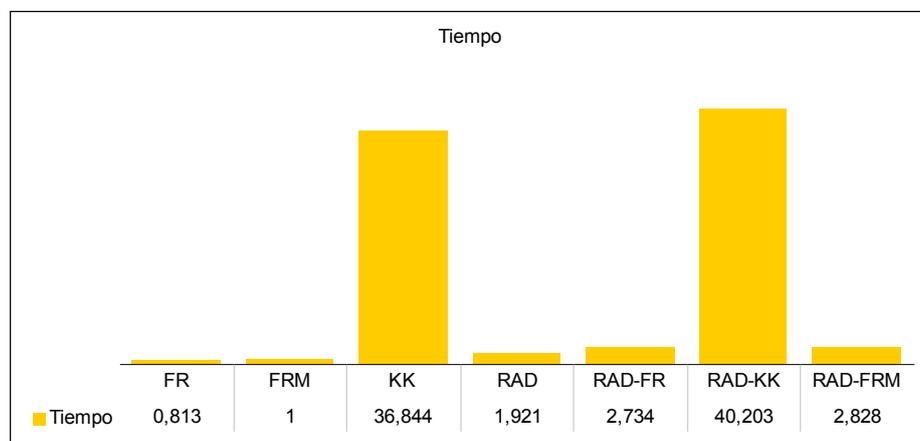
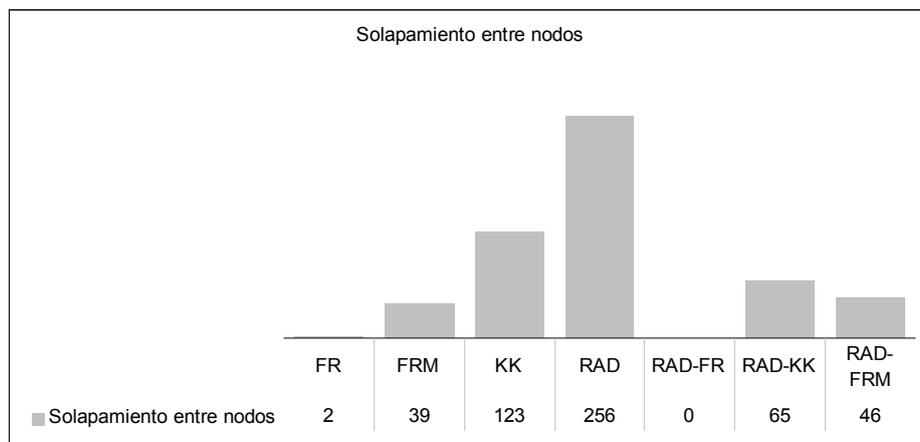
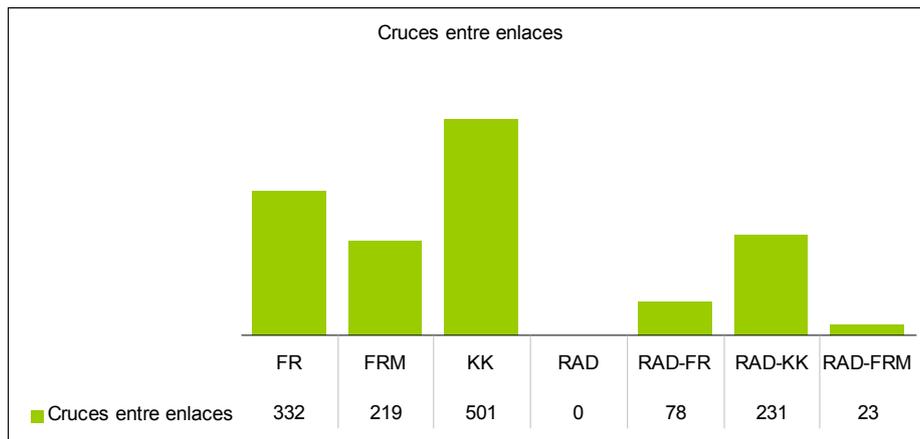
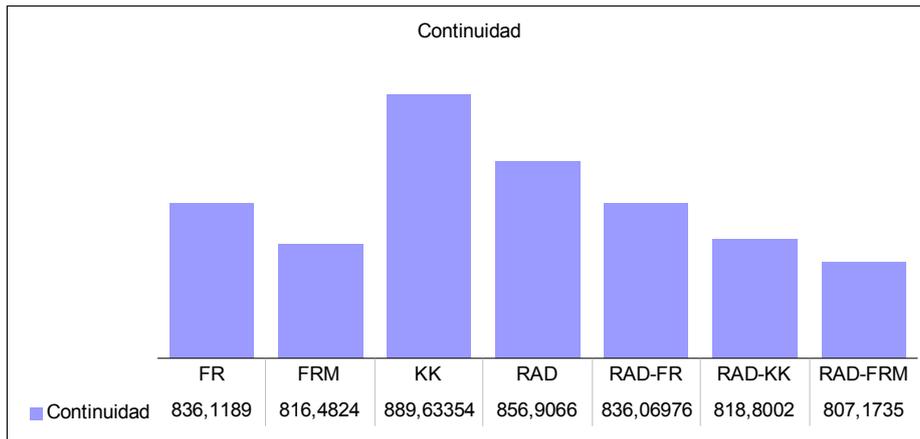
Net31



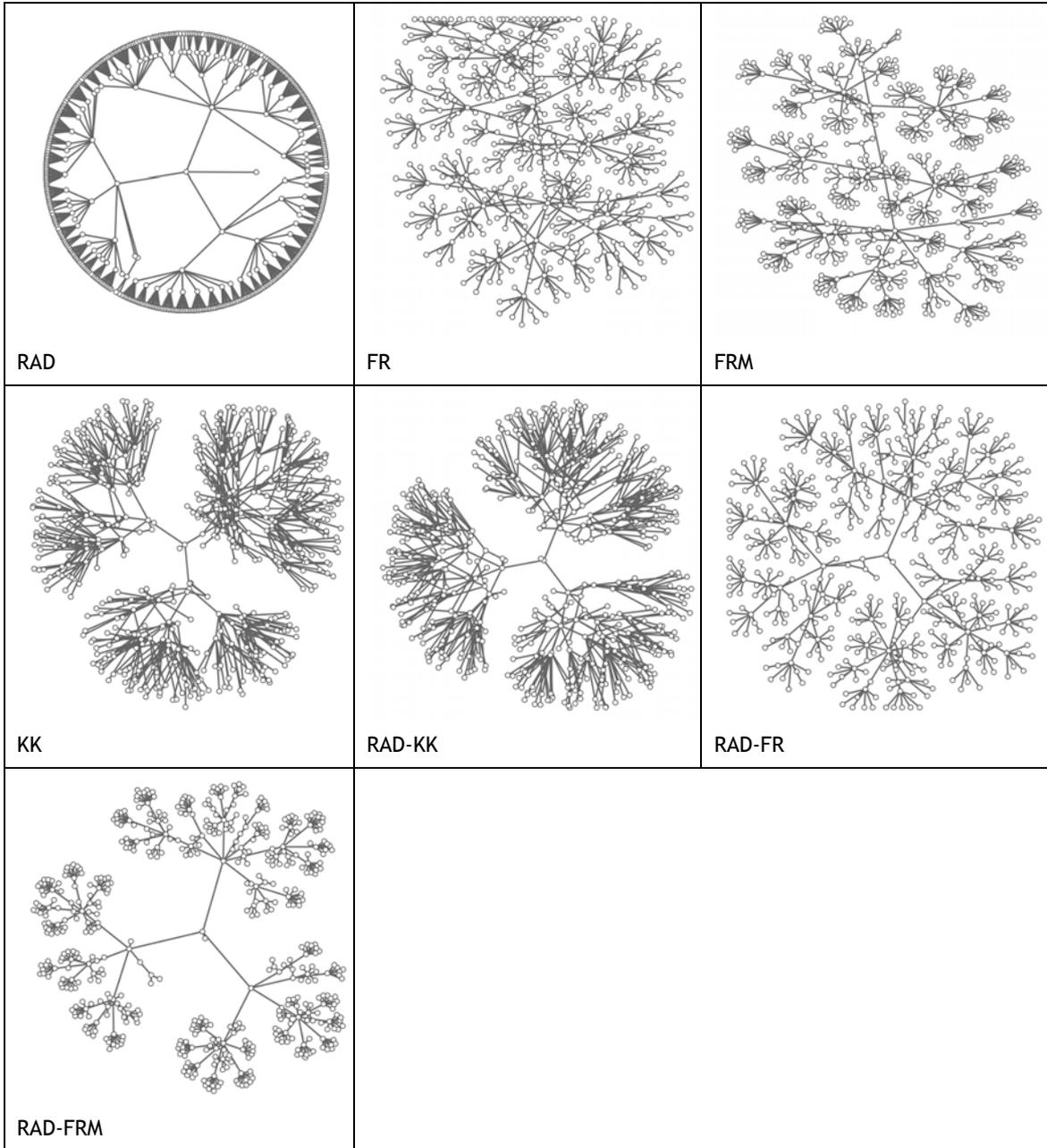


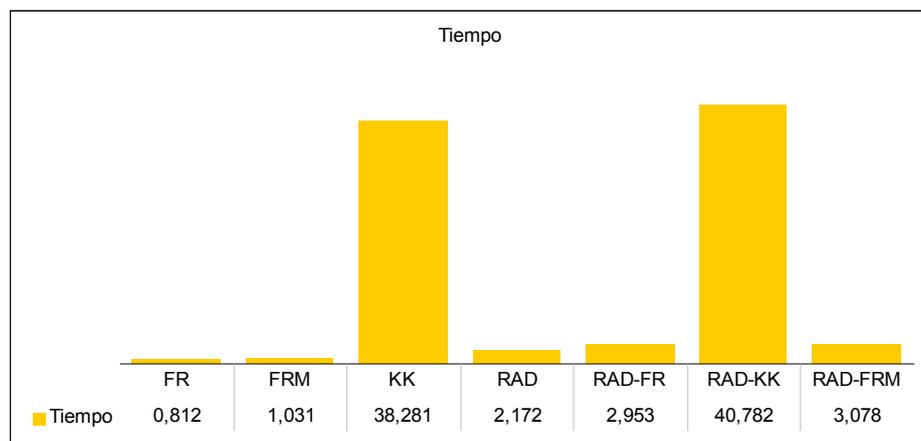
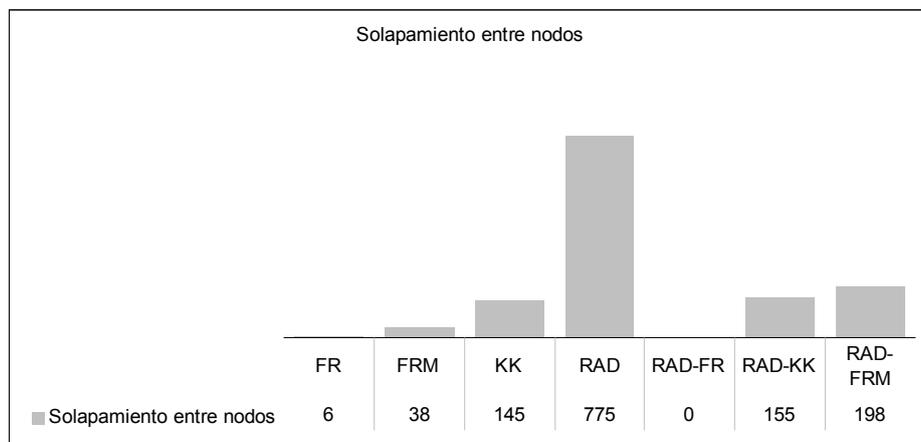
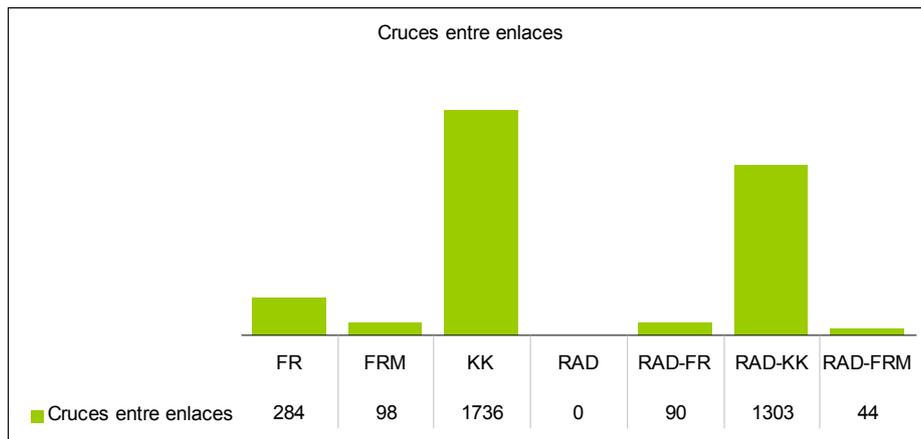
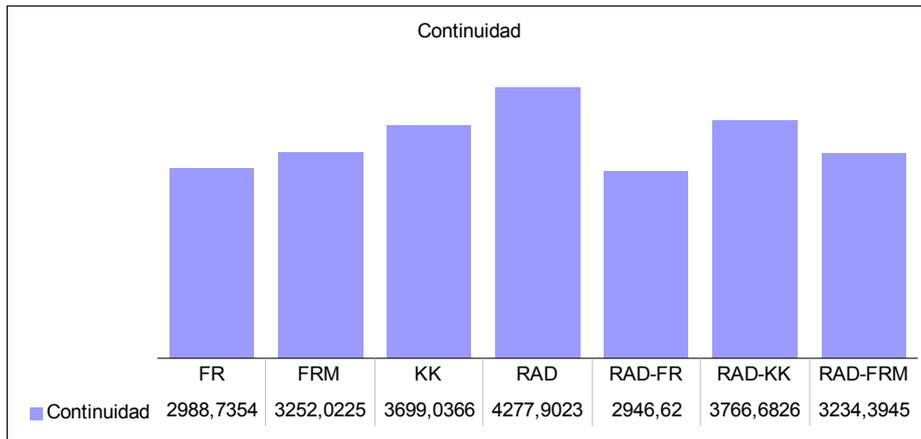
Net32



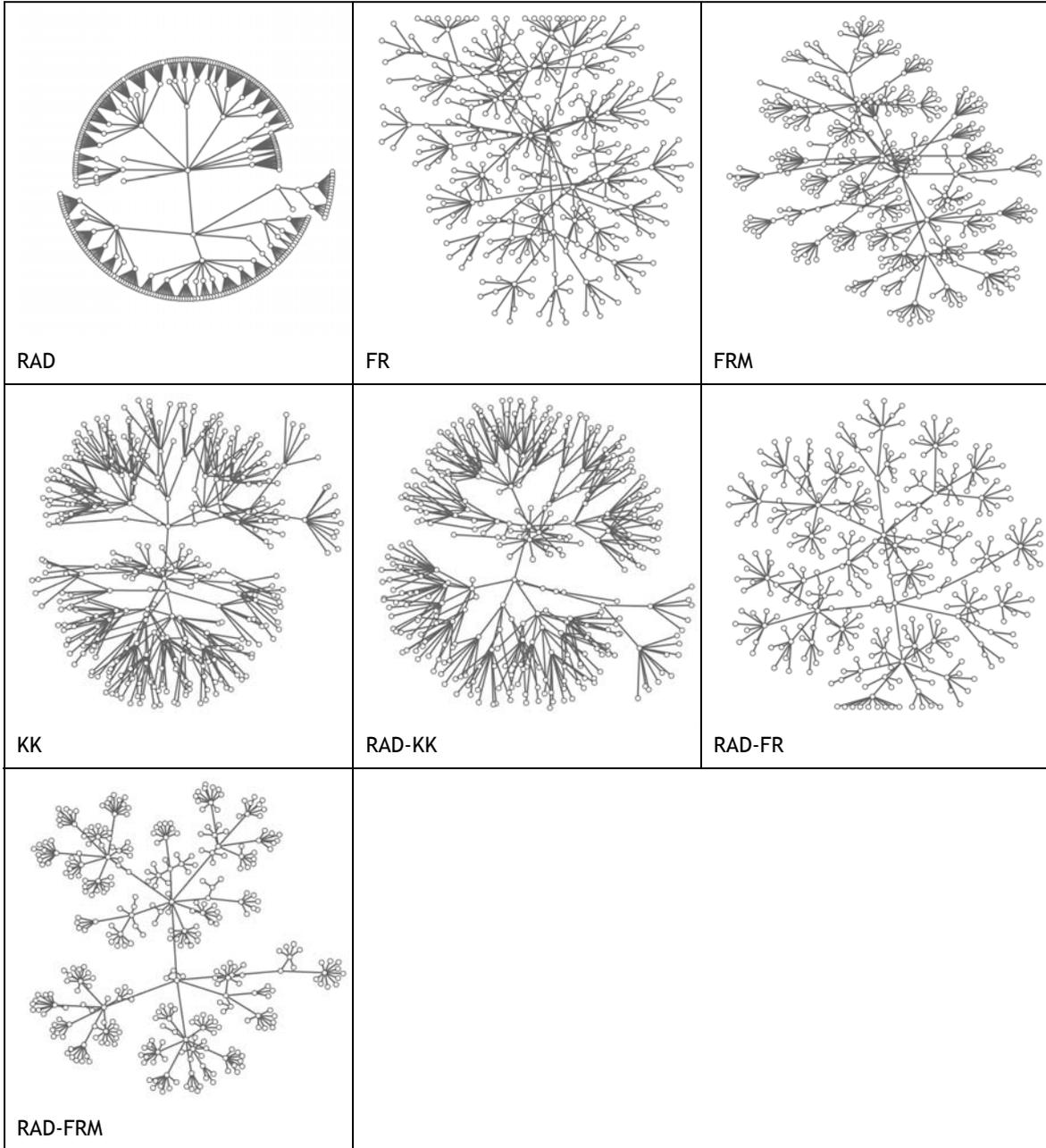


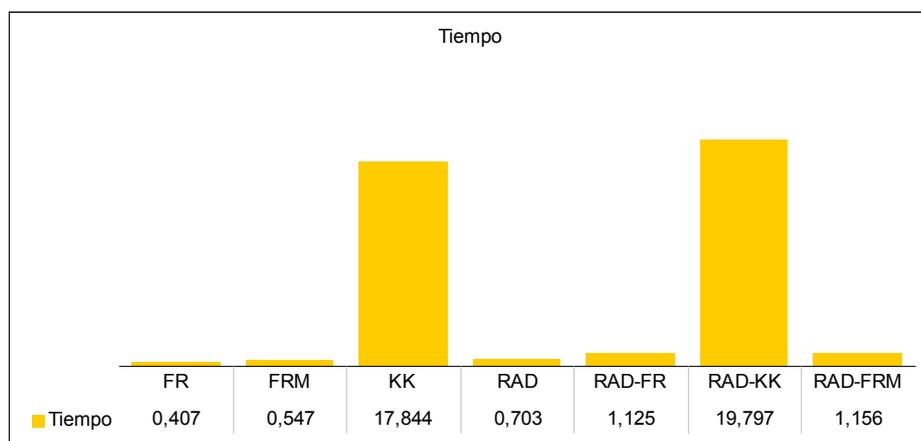
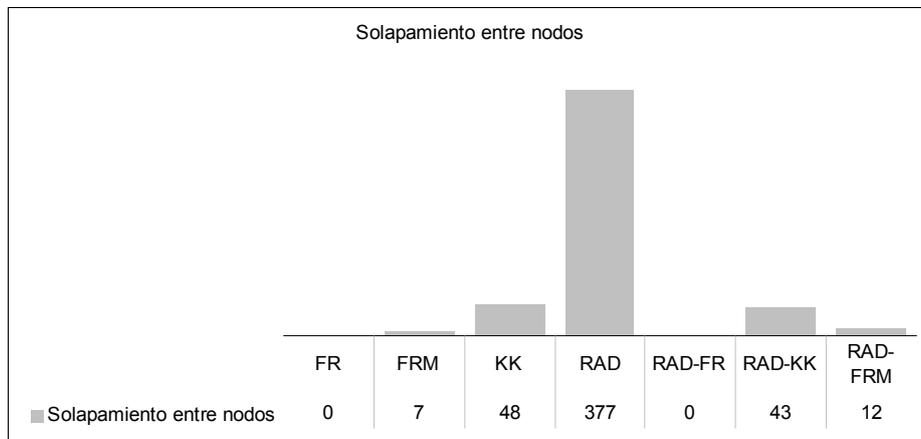
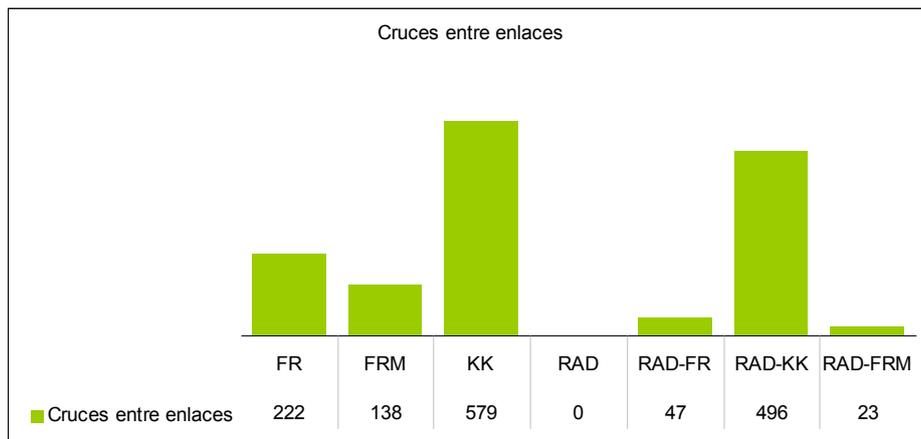
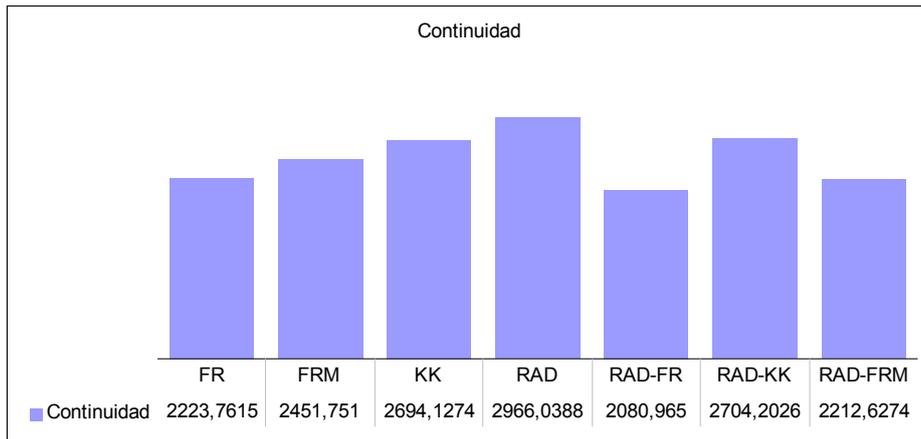
Net33



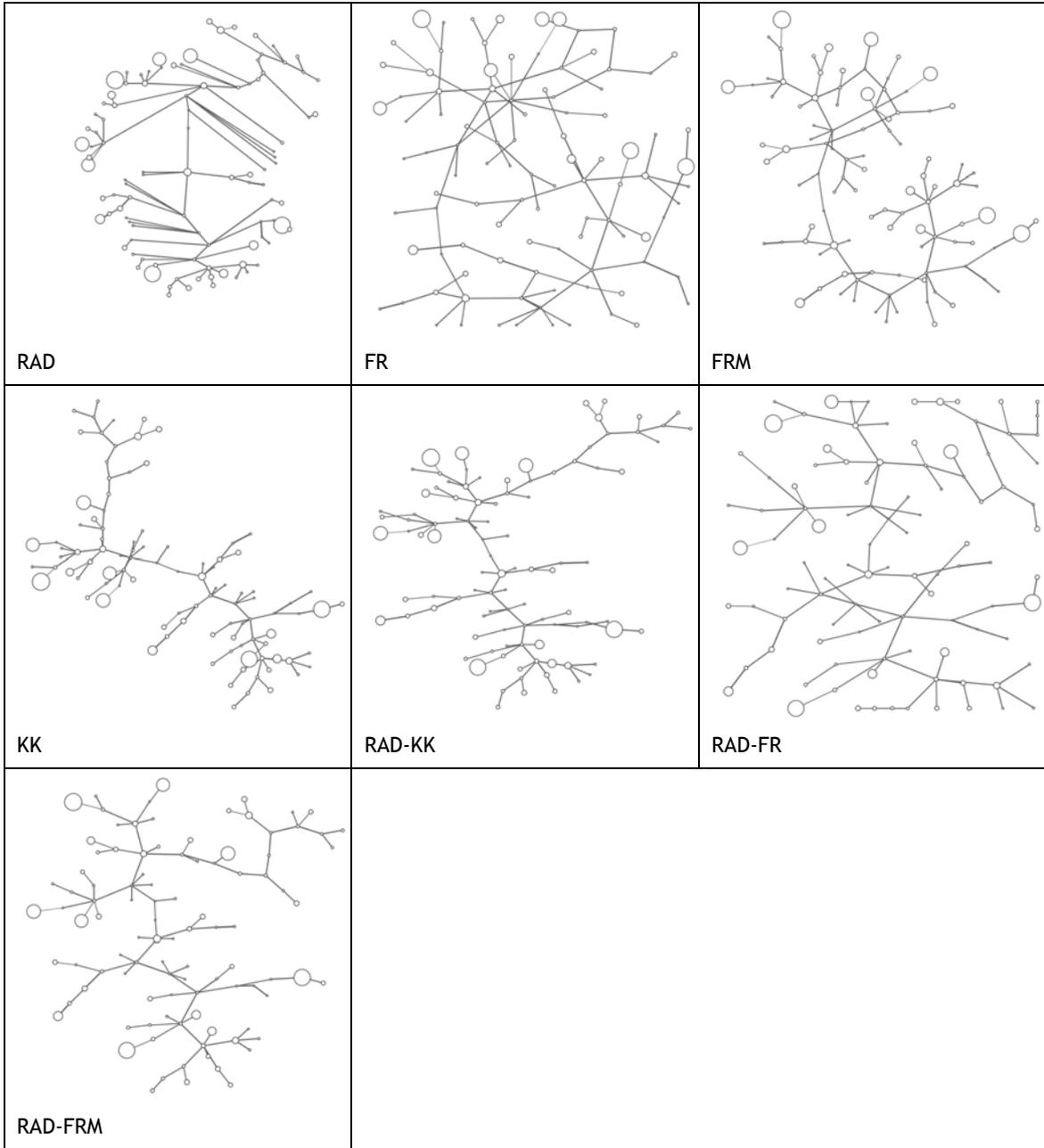


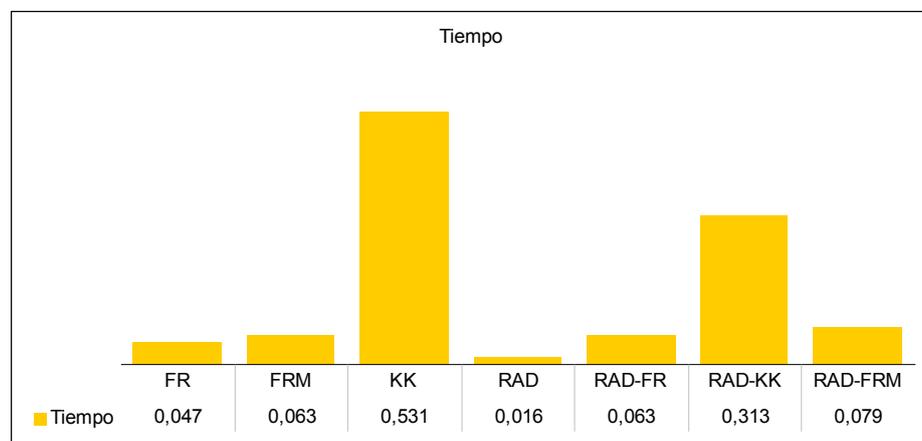
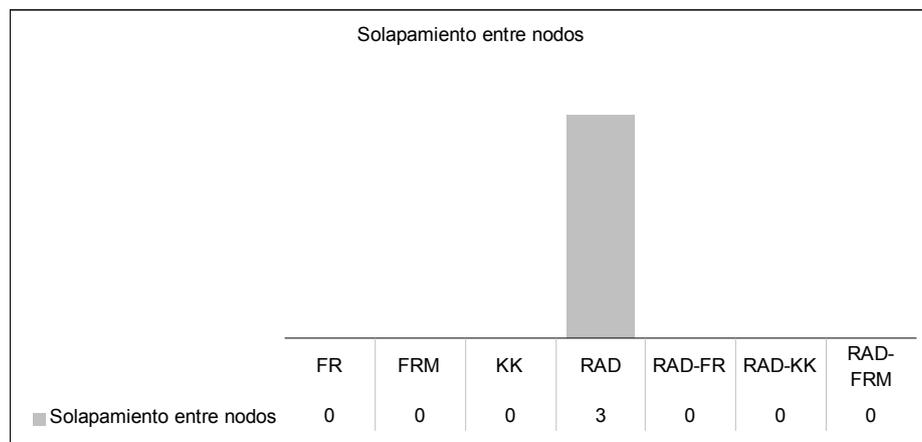
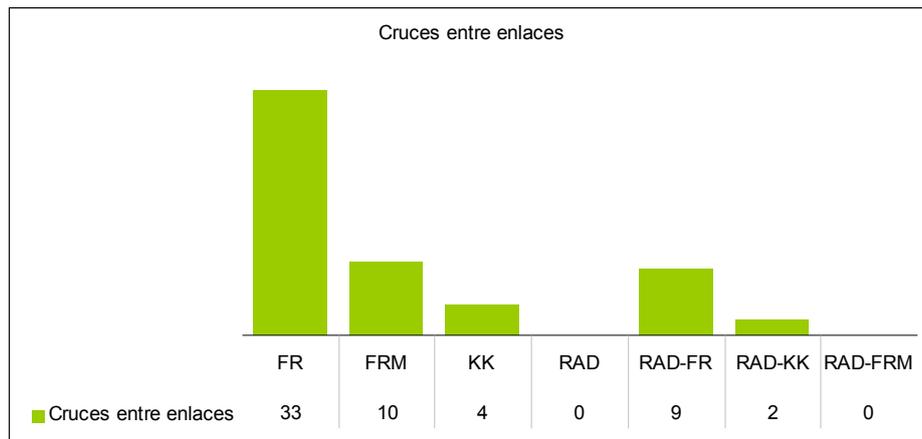
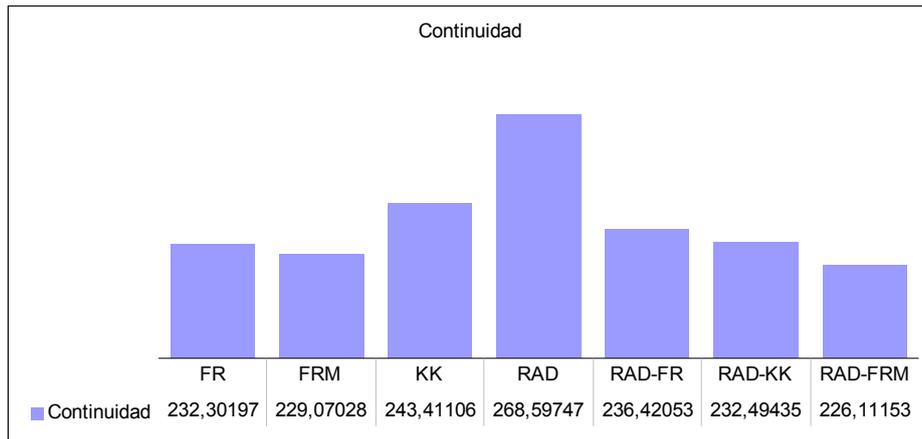
Net34



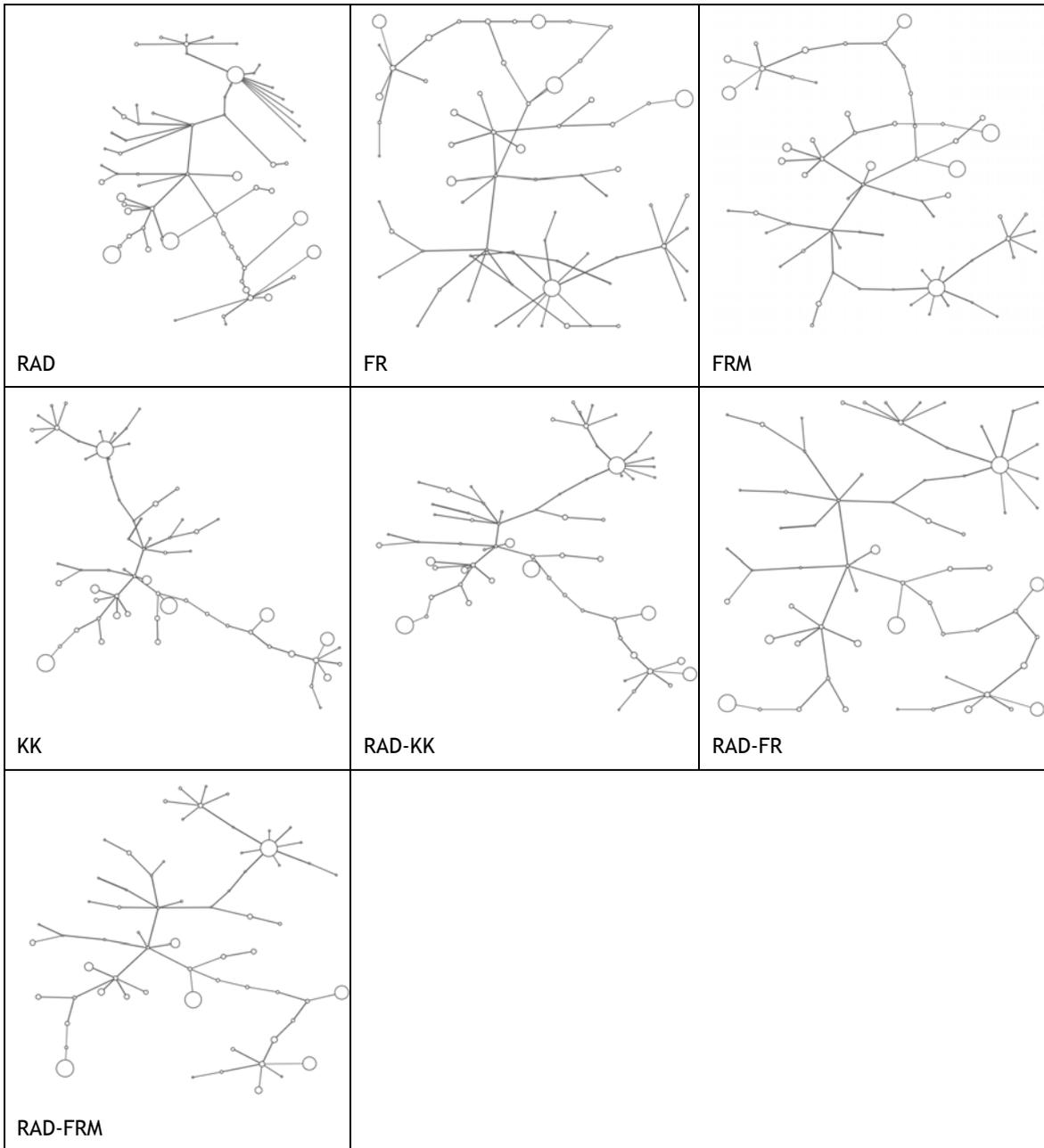


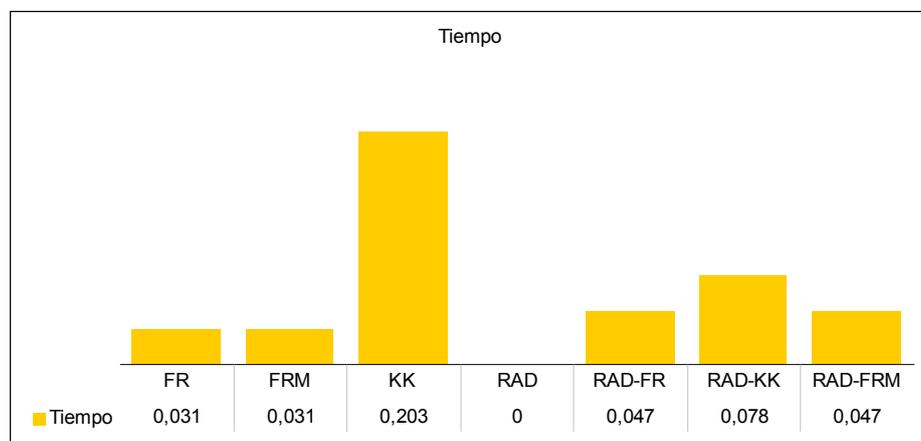
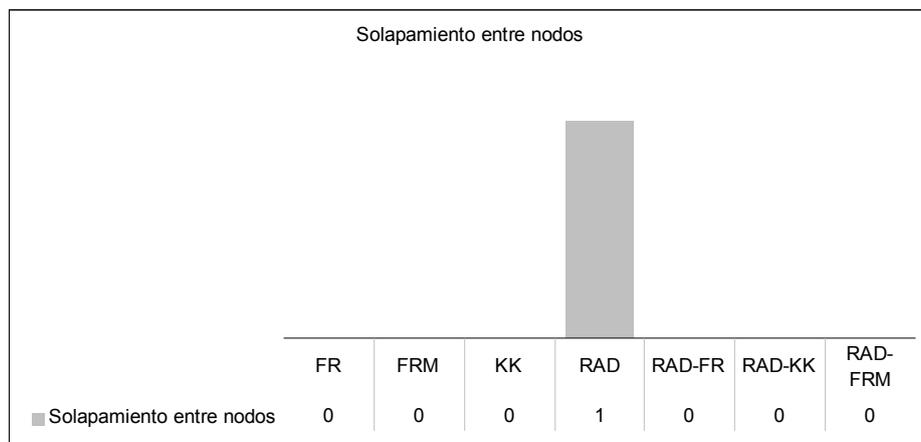
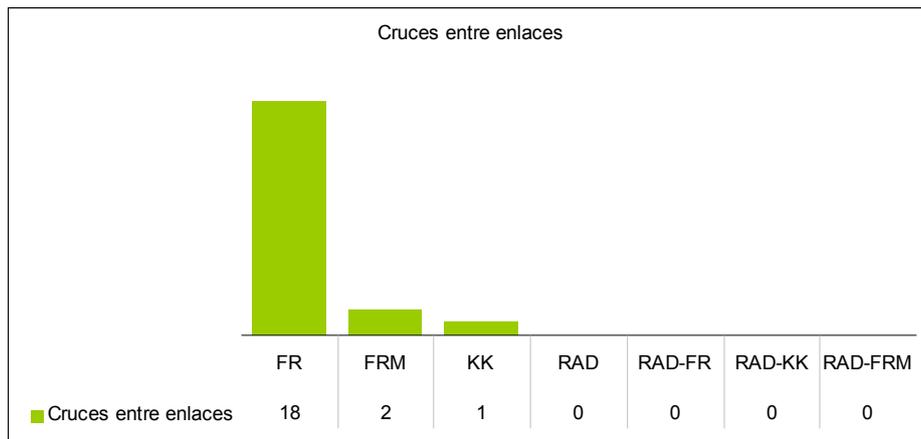
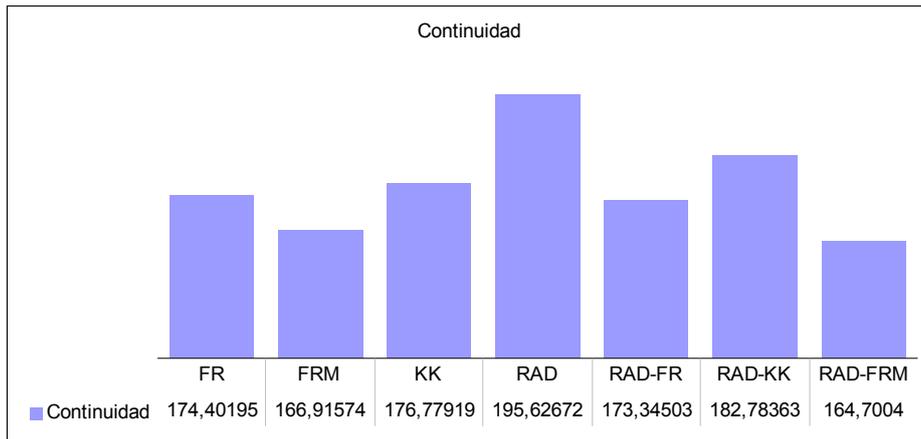
Net35



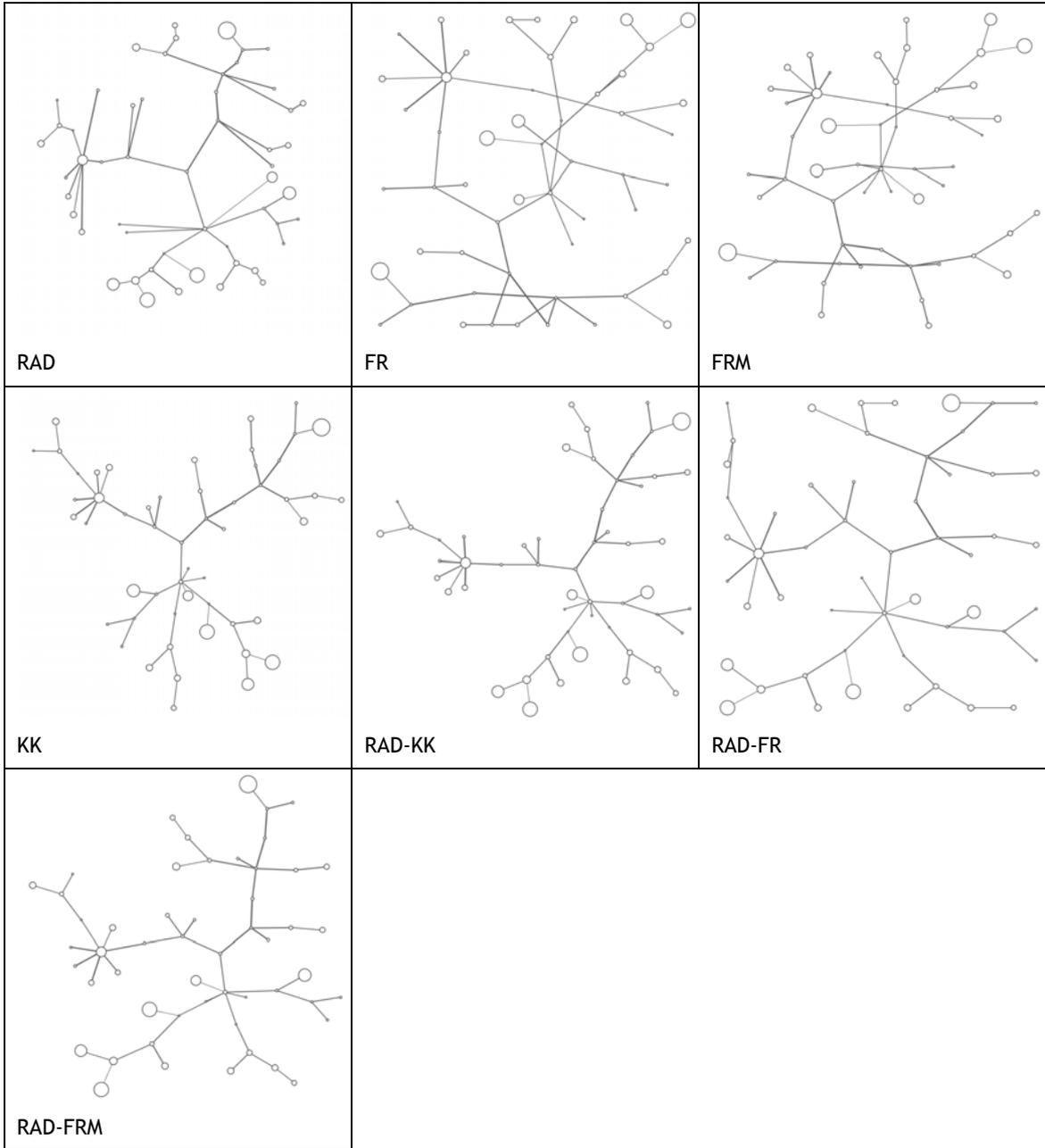


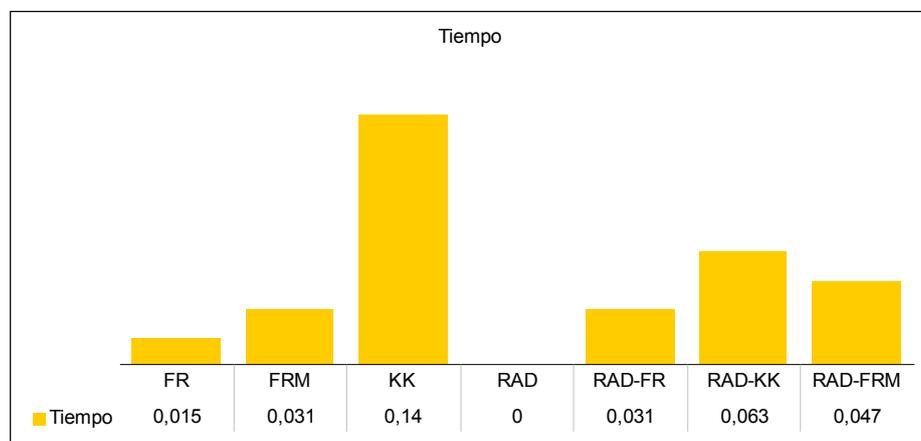
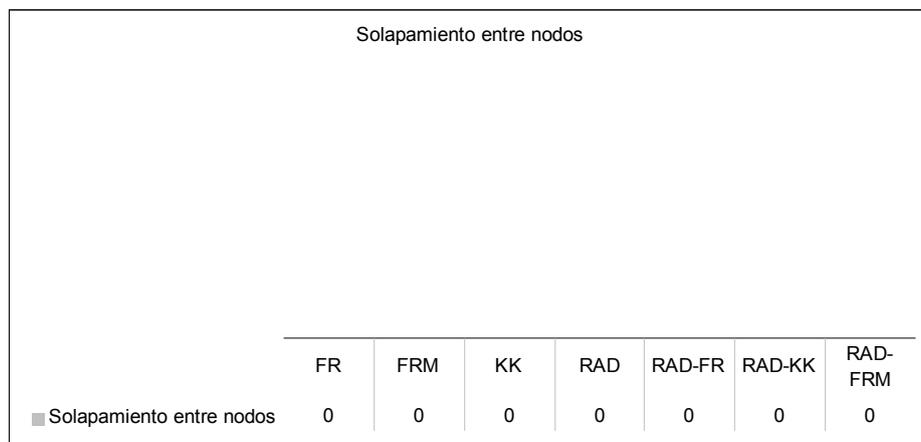
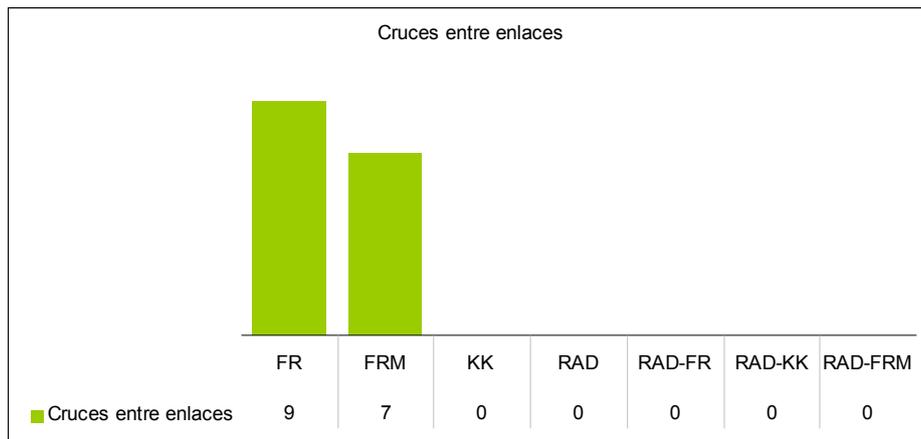
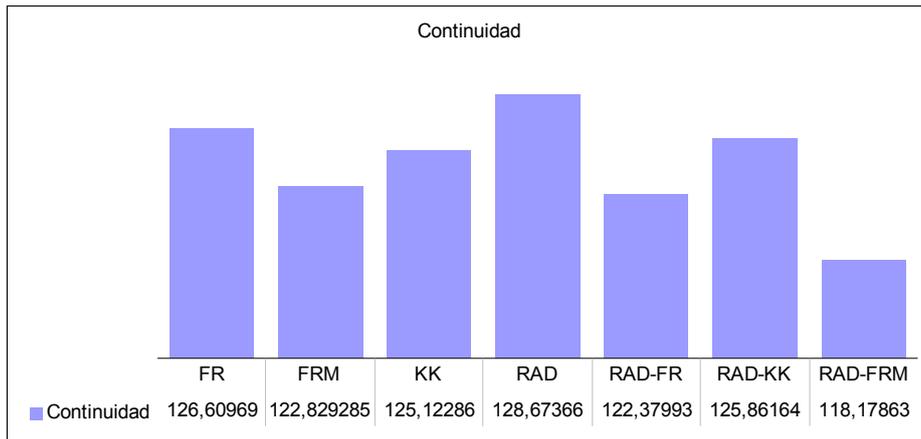
Net36



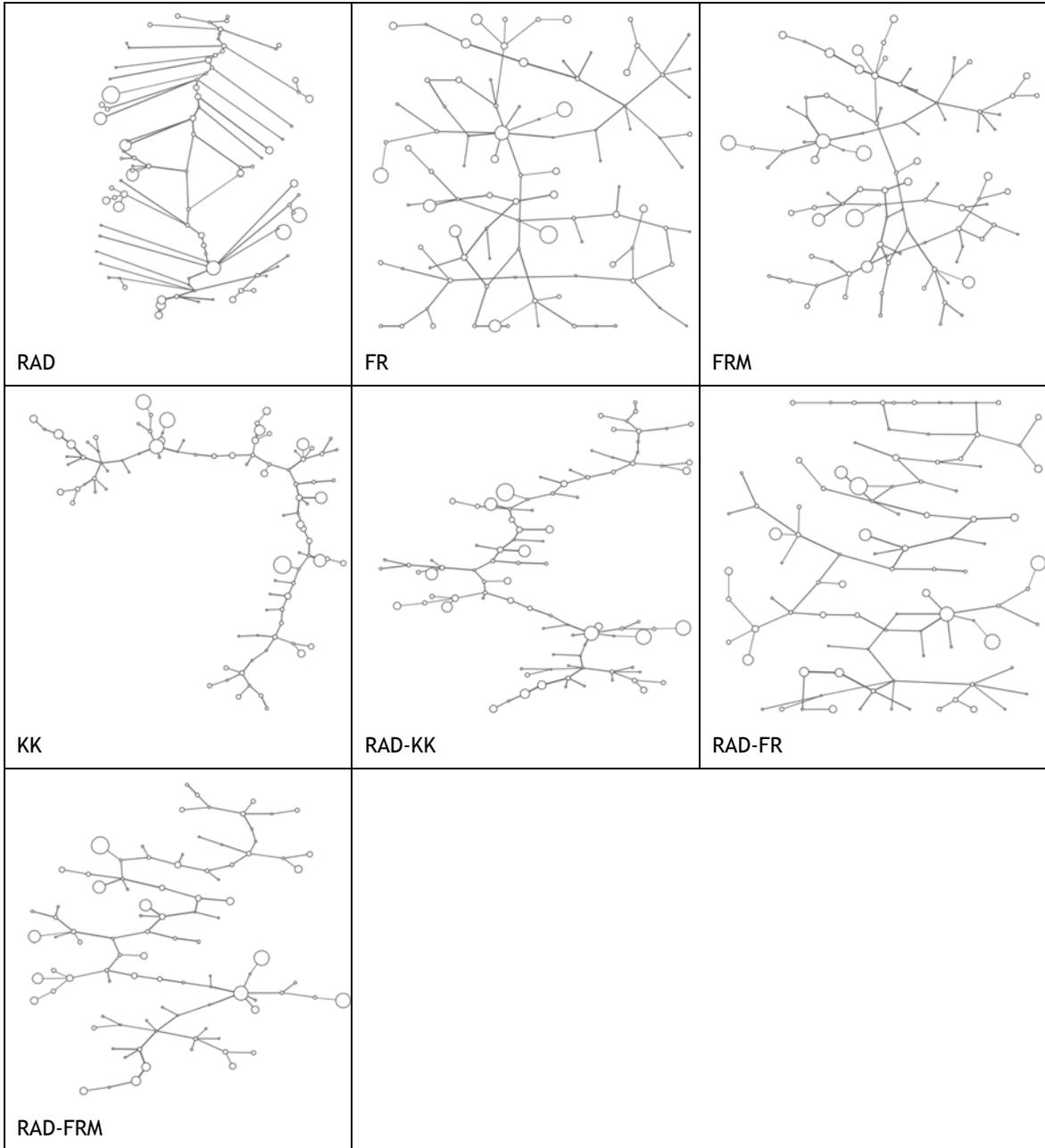


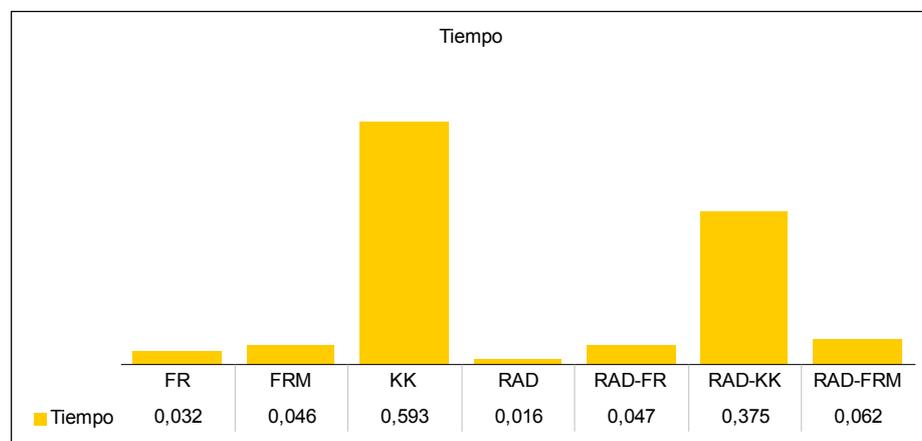
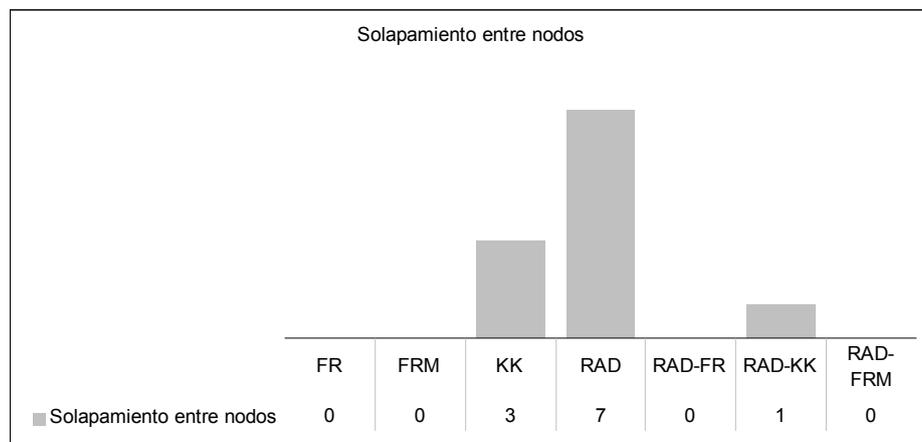
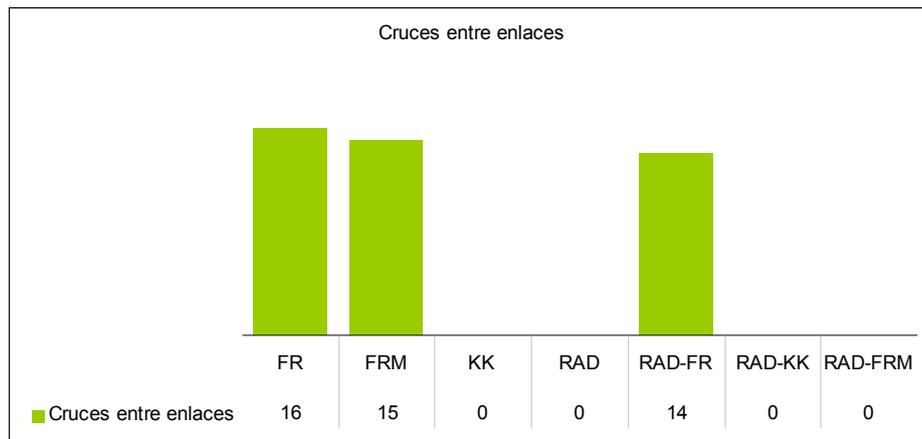
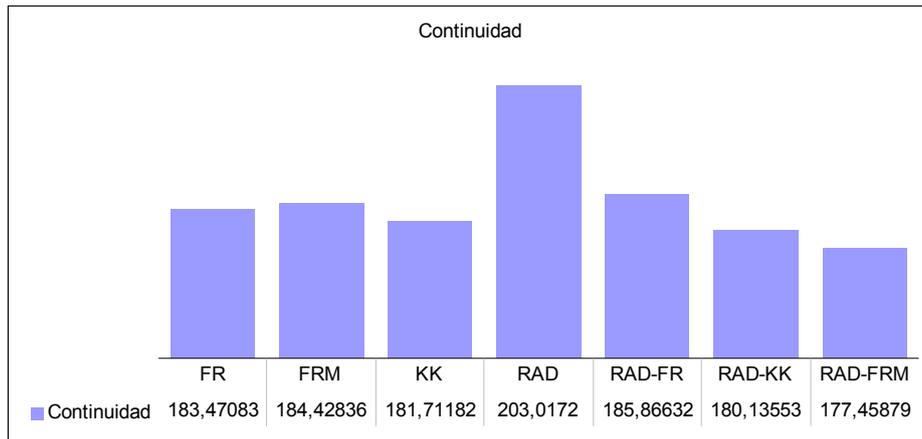
Net37



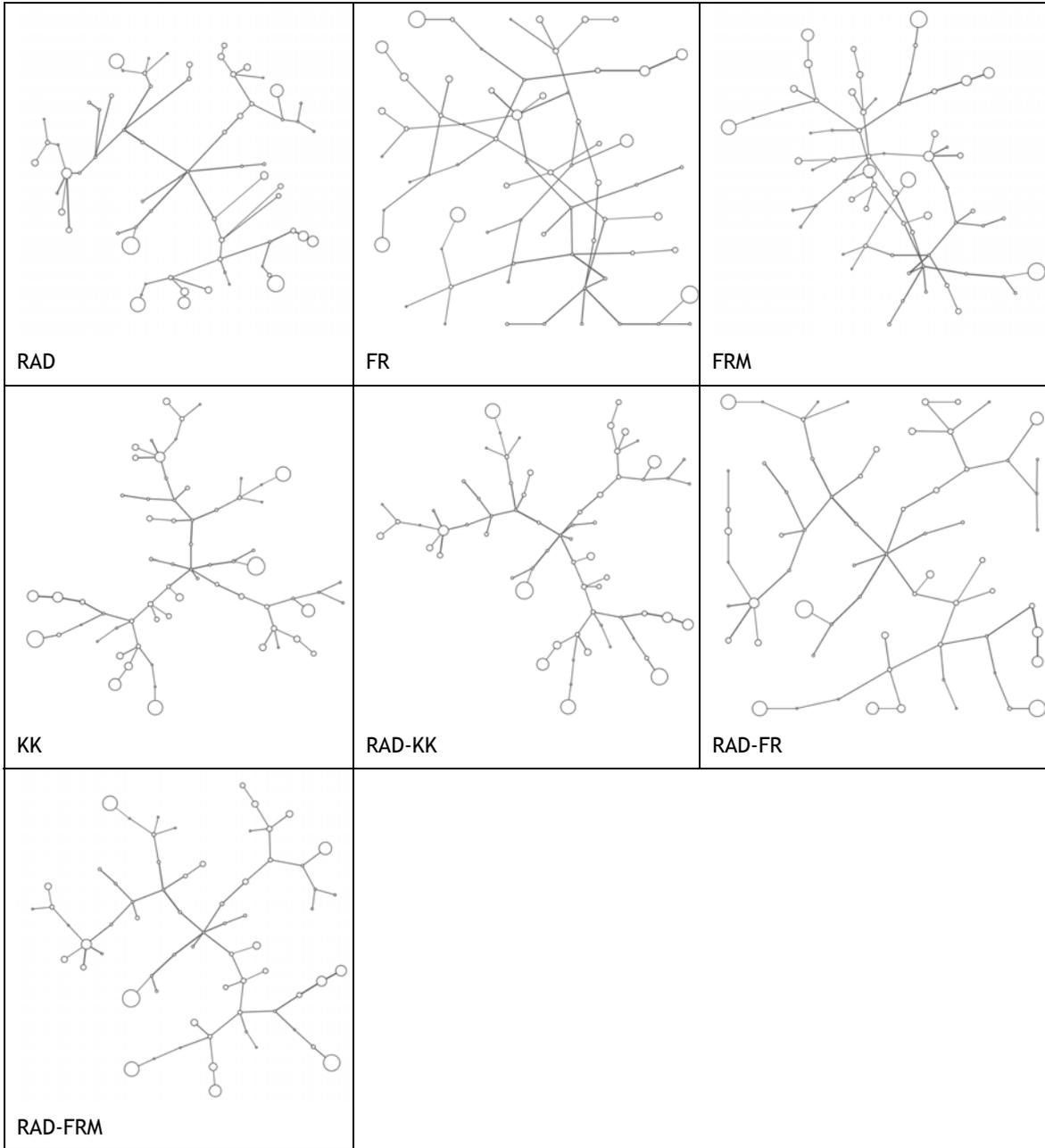


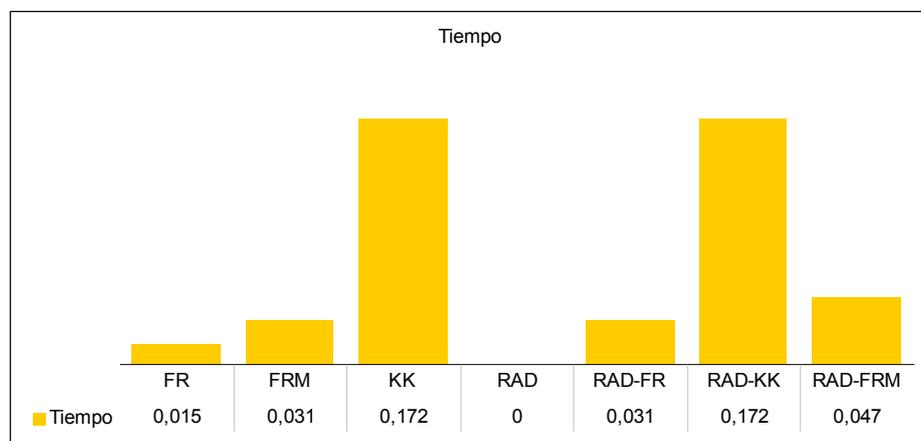
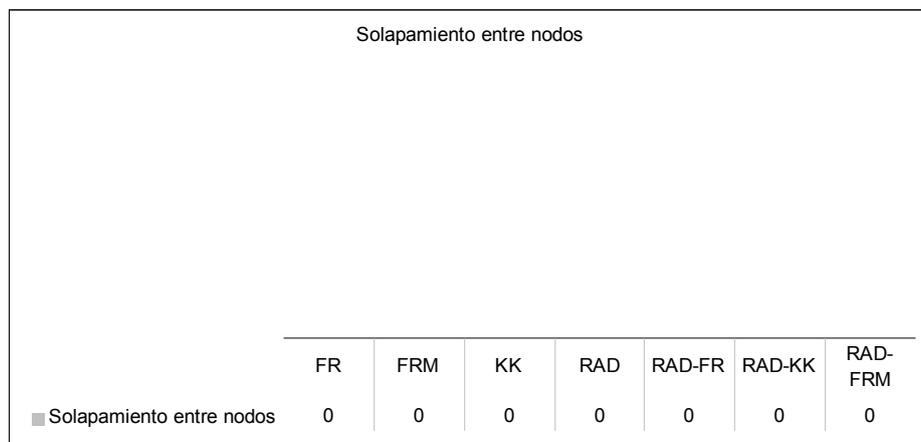
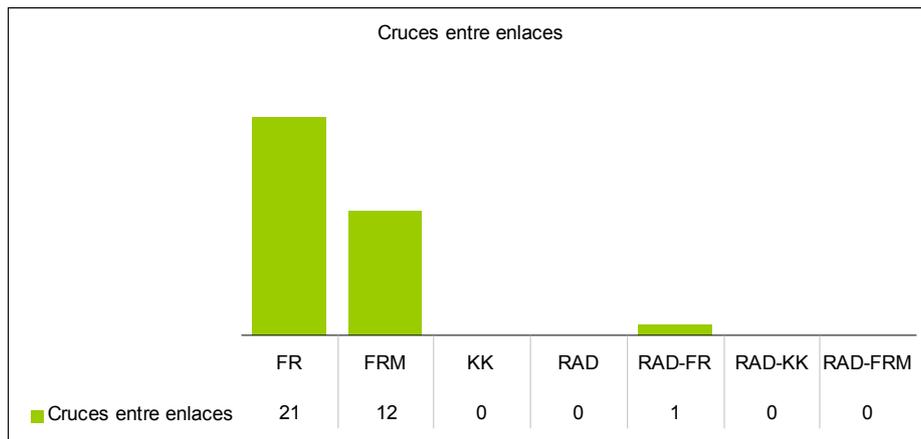
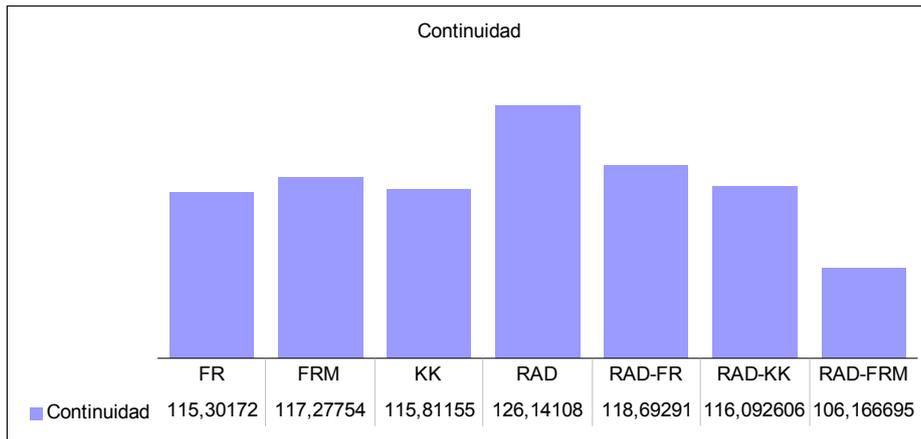
Net38



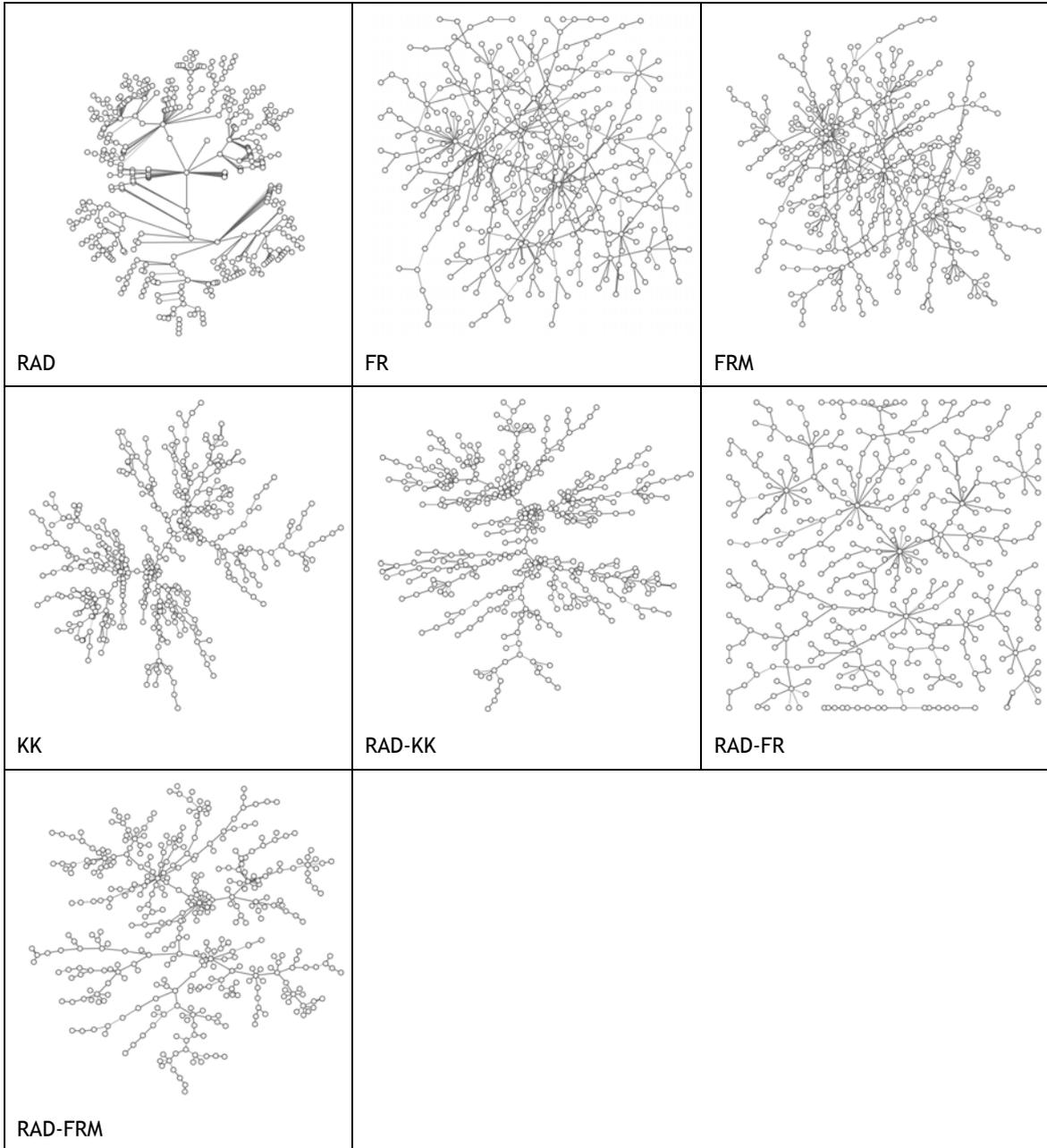


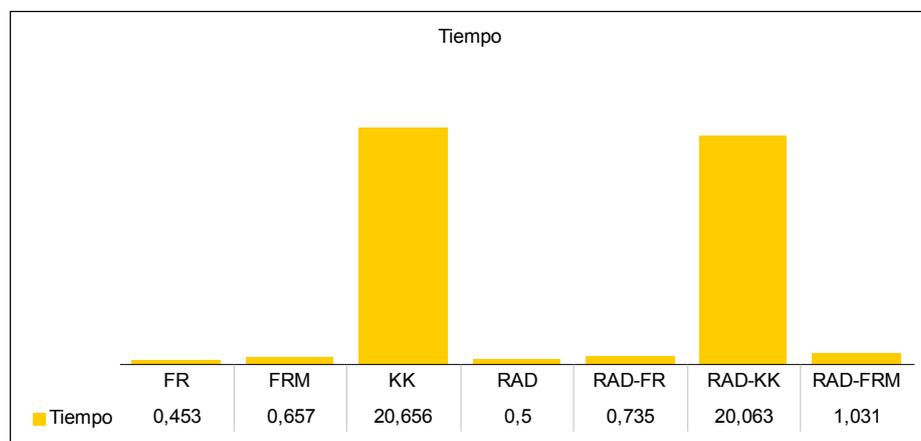
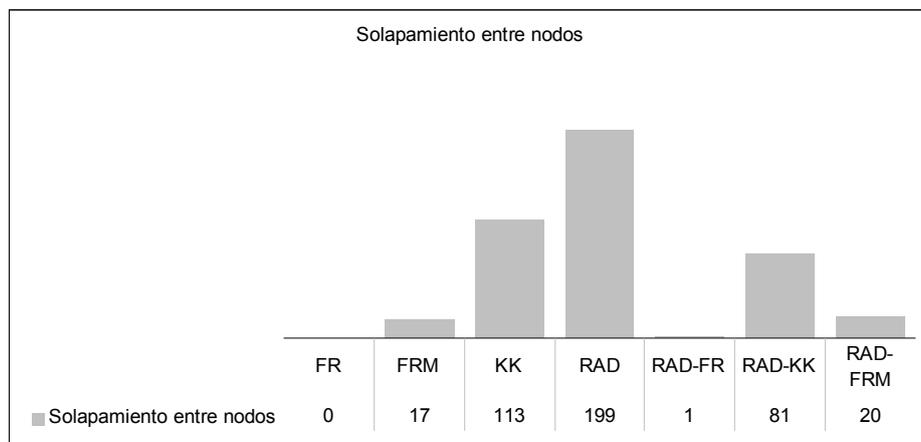
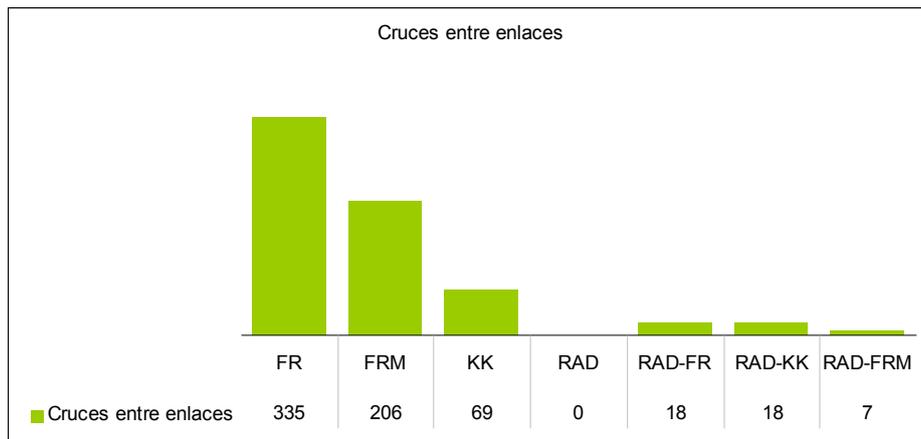
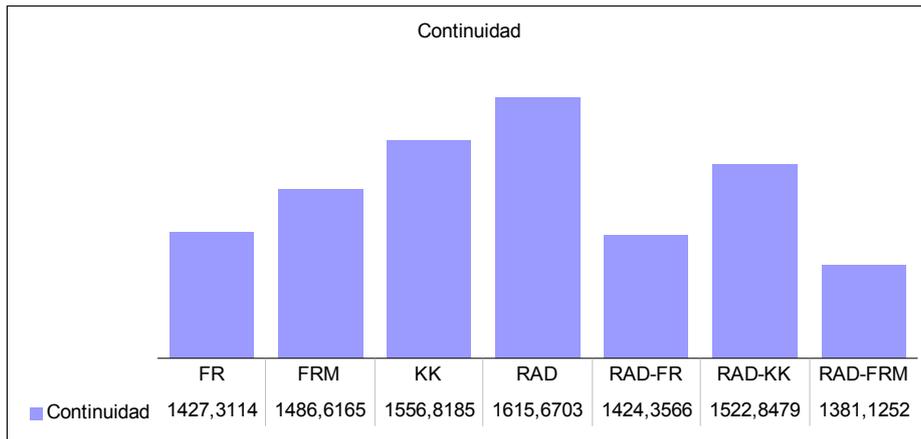
Net39



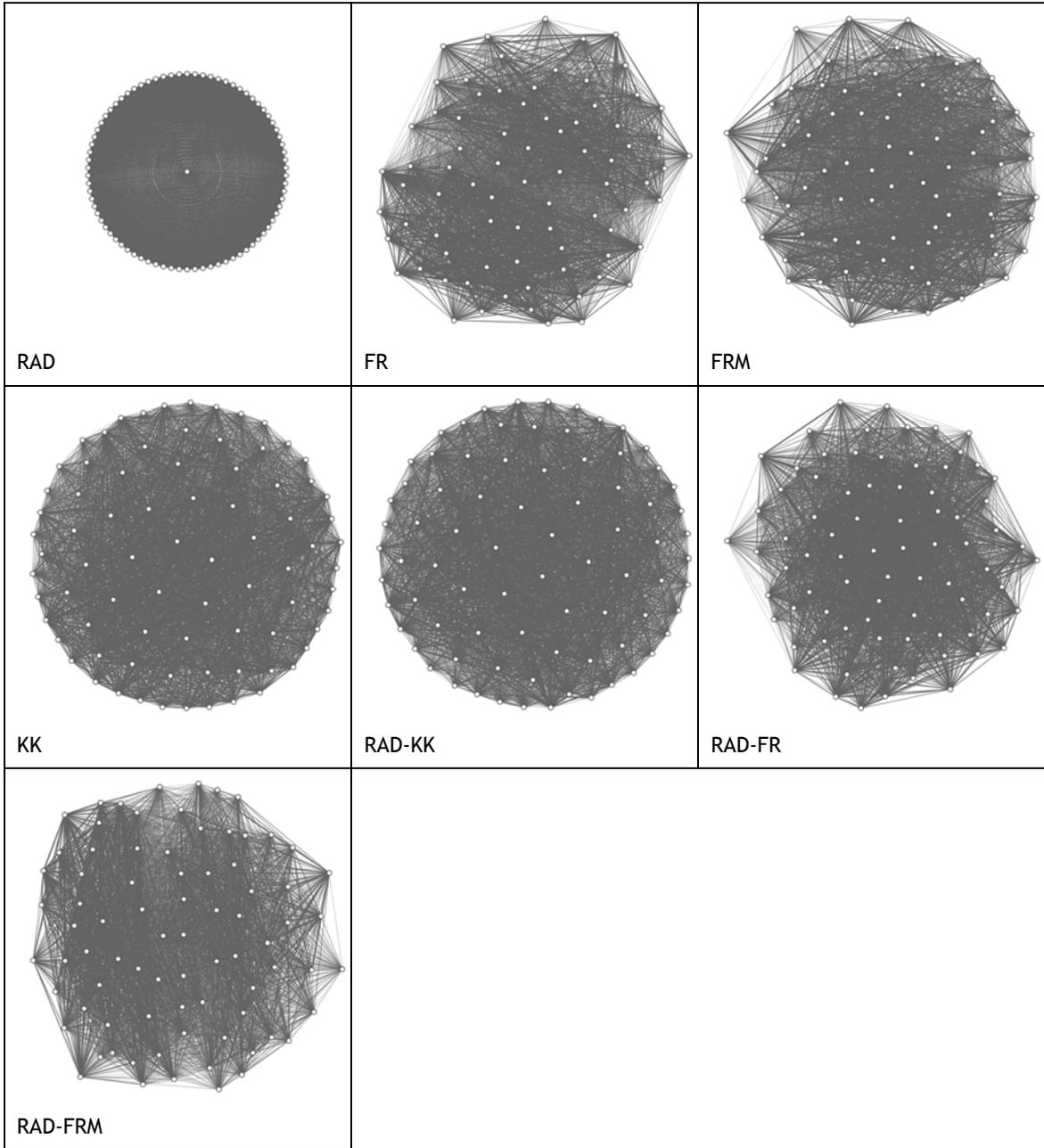


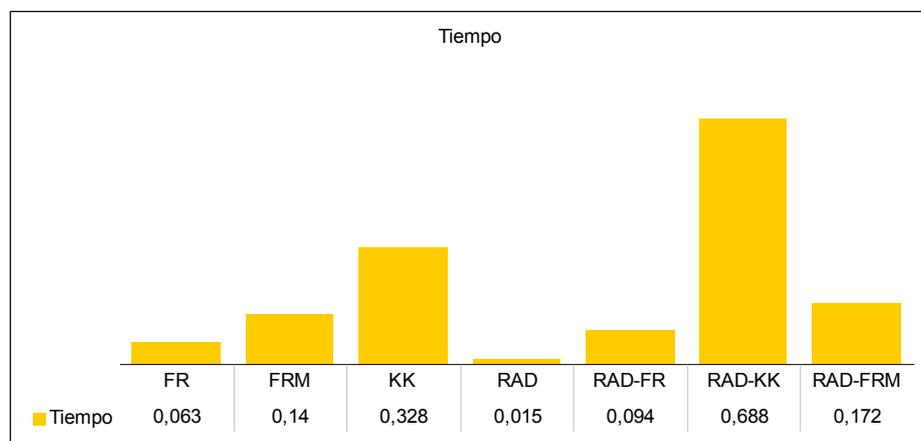
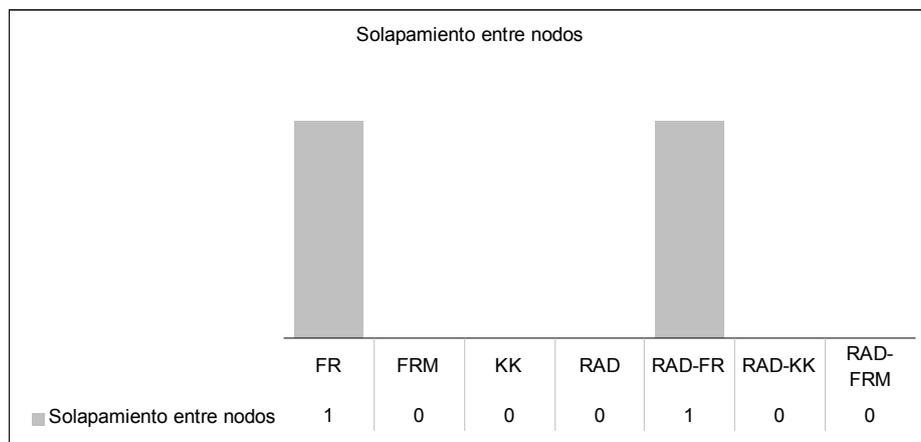
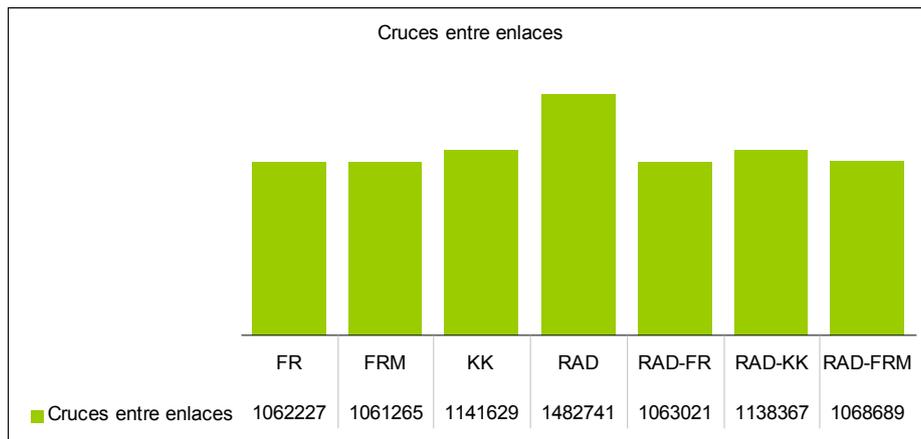
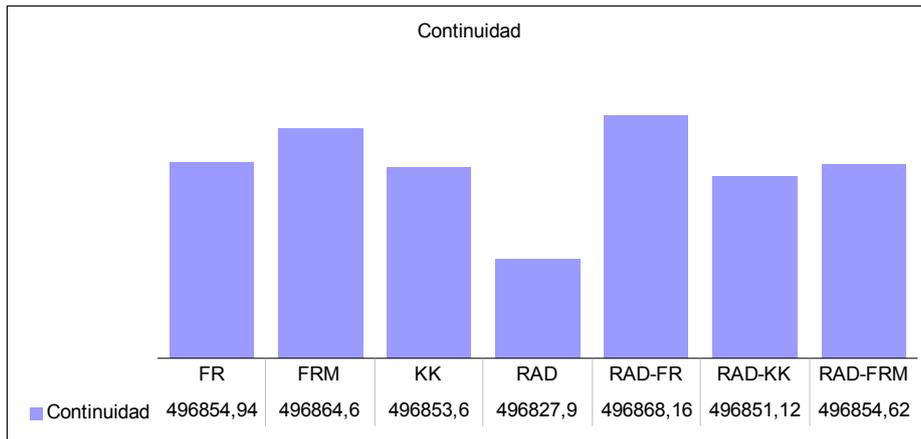
Net40





Net41





Net42

