

19. EVALUACIÓN MACROPRUDENCIAL DE LA IMPORTANCIA SISTÉMICA DE LAS INSTITUCIONES FINANCIERAS EN COLOMBIA

Carlos León
Clara Machado
Andrés Murcia*

Puede considerarse que una institución es sistémicamente importante si, al fallar, su caída o mal funcionamiento provocan una alteración generalizada sobre el sistema financiero mediante diferentes efectos directos o indirectos. De esta forma, el criterio principal para evaluar la importancia sistémica se relaciona con su potencial para causar un gran impacto negativo tanto en el sistema financiero como en la economía real (IMF *et al.*, 2009). De ahí que definir si una institución bancaria o no bancaria es sistémicamente importante (o no) resulta crucial para monitorear, supervisar y regular los sistemas financieros, así como para diseñar políticas macroprudenciales con el objetivo de preservar la estabilidad financiera.

Estar en capacidad de evaluar la importancia sistémica puede ayudar a las autoridades financieras a centrar su atención y sus recursos (la intensidad del seguimiento, la supervisión y la regulación) allí donde se estima que es mayor la gravedad sistémica que resulta cuando una institución financiera está en crisis o a punto de sufrirla. Identificar

* Los autores son, en su orden, directora del Departamento de Seguimiento a la Infraestructura Financiera; jefe de la Sección de Investigación y Desarrollo, del mismo departamento del Banco de la República e investigador externo del CentER, Universidad de Tilburg; y economista visitante del Banco de Pagos Internacionales, Oficina de Representación de las Américas, y profesional líder de la Subgerencia Monetaria y de Inversiones Internacionales, Banco de la República.

Sus opiniones y afirmaciones no necesariamente representan las del Banco de la República ni las de su Junta Directiva. Los resultados son ilustrativos y no pueden ser utilizados para inferir la calidad crediticia o realizar algún tipo de evaluación con respecto a una institución financiera en particular. Agradecemos a los funcionarios y miembros del personal ejecutivo que participaron en el diseño de la base del conocimiento experto. Los comentarios y sugerencias de Pamela Cardozo, Joaquín Bernal, Luc Renneboog y de un revisor anónimo son altamente apreciados, así como los recibidos en una investigación previa en seminarios en el Banco Central del Brasil, el Banco de Finlandia, el Centro de Estudios Monetarios Latinoamericanos (Cemla) y el Banco de la República. Los datos fueron procesados con la asistencia de Carlos Cadena, Jorge Cely y Santiago Hernández. Esta es una versión anterior a la publicada como León, C.; Machado, C.; Murcia, A. (2015). "Assessing Systemic Importance with a Fuzzy Logic Inference System". *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management* (en edición).

instituciones sistémicamente importantes puede, igualmente, facilitar a las autoridades financieras la formulación de políticas (como por ejemplo, regulación, seguimiento y supervisión prudenciales) y la toma de decisiones (por ejemplo, para el diseño de mecanismos de resolución especiales, de provisión de liquidez o de prestamista de última instancia).

La literatura converge hacia la existencia de tres criterios clave primordiales para evaluar e identificar la importancia sistémica de las instituciones financieras y las infraestructuras del mercado: tamaño, conectividad y sustituibilidad (FMI *et al.*, 2009; Manning *et al.*, 2009; BCBS, 2013)¹. Según el Comité de Supervisión Bancaria de Basilea (BCBS) (2013), el tamaño está relacionado con qué dificultad se pueden reemplazar las actividades de una institución financiera en dificultades o a punto de caer; la conectividad tiene que ver con la forma como la alteración en una institución financiera puede aumentar considerablemente en otras la probabilidad de sufrir trastornos por medio de la red de obligaciones contractuales; en tanto que la sustituibilidad se refiere al grado o medida en que una institución financiera provee servicios de infraestructura (de pagos o de custodia, por ejemplo) al sistema financiero.

A pesar del carácter intuitivo de estos conceptos, evaluar e identificar instituciones financieras sistémicamente importantes dentro de un enfoque basado en indicadores² sigue siendo una tarea difícil que implica diversos desafíos, dos de ellos particularmente exigentes.

El primero, que consiste en diseñar indicadores o medidas para la conectividad y la sustituibilidad, puede llegar a exigir, como lo reconoce la más reciente literatura, fuentes de información y técnicas especializadas como los datos de las infraestructuras financieras y el análisis de redes. En segundo lugar, elegir una metodología capaz de incorporar robustamente las medidas diseñadas para los tres conceptos mencionados dentro de un índice de importancia sistémica puede ser complejo.

El BCBS, introdujo una primera propuesta para ambos retos (BCBS, 2011), que fue posteriormente actualizada en BCBS (2013). Con respecto al primer desafío, la proposición del BCBS se basa esencialmente en la utilización de datos tradicionales de balance, en contra de un creciente consenso sobre la conveniencia de emplear otras fuentes de información y enfoques técnicos (Uribe, 2011 a y b; León *et al.*, 2012; ECB, 2010). Sobre el segundo reto, en cierto modo divergente de las inquietudes y sugerencias del FMI *et al.* (2009), la propuesta del BCBS (2013) emplea un esquema de ponderación igual y fija para agregar cinco categorías (asignando a cada una un 20% de ponderación o valor, por

1 La BCBS (2013) sugiere añadir dos criterios (actividad entre jurisdicciones y complejidad) con el fin de entender la importancia sistémica global de los bancos y la dificultad de resolver un evento sistémico. Puesto que este documento se centra en banca no global, y como los derivados y otros instrumentos complejos son escasos en el mercado colombiano, los criterios se limitan a tamaño, conectividad y sustituibilidad, como originalmente lo ha sugerido el Fondo Monetario Internacional (FMI), el Banco de Pagos Internacionales (BIS) y la Junta de Estabilidad Financiera (FSB) (FMI *et al.*, 2009). Sin embargo, los métodos de agregación que se proponen tienen la capacidad de tener en cuenta estos dos (e incluso otros) criterios.

2 Existe una alternativa para los enfoques basados en indicadores, como el aquí propuesto, a partir de un modelo que emplea patrones cuantitativos para estimar los aportes de las instituciones financieras al riesgo sistémico. No obstante, como lo subraya BCBS (2013:5): “los modelos para medir la importancia sistémica de las instituciones financieras está todavía en una etapa muy primitiva de desarrollo y sigue habiendo inquietudes con respecto a la robustez de los resultados; [porque, por ejemplo], pueden no llegar a capturar todas las formas (tanto cuantitativas como cualitativas) en que una [institución financiera] es sistémicamente importante.

ejemplo), donde la pertinencia de cada métrica constitutiva no parece obedecer a ninguna técnica (cuantitativa o cualitativa). Por lo demás, el esquema de ponderación igual y fija sugerido por BCBS puede llegar a generar resultados indeseables, como los de sesgar los resultados hacia las categorías más volátiles, y también llevar a suponer ingenuamente que todos los sistemas financieros son similares³.

Este documento presenta dos enfoques para los retos mencionados. Con respecto al primero, se diseñan tres medidas destinadas a evaluar el tamaño, la conectividad y la no sustituibilidad de las instituciones financieras colombianas como dimensiones primordiales de la importancia sistémica: i) la centralidad como prestatario neto en la red de los mercados monetarios; ii) la centralidad como originador de pagos en la red de los sistemas de pagos de alto valor, y iii) el valor de los activos de los servicios financieros.

A diferencia de la propuesta del BCBS (2013), nuestras medidas no se limitan a los datos tradicionales de balance y emplean métodos de análisis de redes —por ejemplo, centralidad de distribución, (*hub centrality*)— para evaluar la importancia global de cada institución financiera dentro del sistema financiero, ya sea como prestatario en el mercado monetario o como originador de pagos. En este sentido, el presente documento contribuye al diseño de medidas más cercanas a la perspectiva macroprudencial de la estabilidad financiera, en la que el objetivo más inmediato radica en reducir la conmoción en la totalidad del sistema y con la cual deben calibrarse las normas prudenciales con respecto a la contribución marginal de las instituciones financieras al riesgo de todo el sistema (Borio, 2003).

En lo que concierne al segundo desafío, que consiste en la forma de agregar las diferentes medidas de importancia sistémica dentro de un solo índice, se han implementado dos métodos distintos de acumulación o agregación: el de la lógica difusa (*fuzzy logic*), y el de análisis de componentes principales. La lógica difusa, en la forma de un sistema de inferencia de lógica difusa (en adelante FLIS), es un enfoque basado en la utilización del conocimiento experto, el cual emplea un método cuantitativo que imita la forma como los propios expertos perciben el proceso de decisiones con respecto a lo que corresponde a una institución financiera sistémicamente importante. En contraste, el análisis de componentes principales (*principal component analysis*: PCA), es un método estándar (puramente cuantitativo) de reducción de dimensiones, que encuentra la combinación lineal no correlacionada de variables que explican gran parte de la covarianza de los datos originales.

Los resultados confirman que: i) los establecimientos de crédito (como los bancos comerciales y otras instituciones bancarias) constituyen el tipo de institución financiera sistémicamente más importante en el mercado local; ii) pese a ser poco significativos por su tamaño, algunas instituciones financieras no bancarias son sistémicamente importantes debido a su centralidad dentro del mercado monetario y al sistema de pagos de alto valor; iii) con base en el análisis de componentes principales, se encontró que las tres medi-

3 Se comentan brevemente en León y Machado (2013) otros inconvenientes de la propuesta metodológica de BCBS (2013). Comentarios adicionales al documento de consulta se publican en la página del BIS (<http://www.bis.org/publ/bcbs201/cacomments.htm>). Por otra parte, con respecto a la existencia de sesgos hacia las categorías más volátiles, el BCBS (2013) implementó un límite para ponderar la sustituibilidad, puesto que las ponderaciones mostraron un impacto mayor que el esperado en la evaluación de la importancia sistémica. Este punto es explicado y tratado por Hurlin y Pérignon (2013).

das son no redundantes y explicativas; iv) la utilización del conocimiento especializado sugiere que, aunque los vínculos entre instituciones financieras son considerados como factor fundamental de impacto sistémico, el tamaño es visto como el principal propulsor de la importancia sistémica, y v) ambos métodos de agregación son complementarios.

El presente artículo está estructurado de la siguiente manera: en la primera sección se presenta el concepto de la importancia sistémica, centrándose en las recomendaciones e inquietudes aportadas por el IMF *et al.* (2009). En la segunda se expone el diseño de las medidas de la importancia sistémica y la intuición y elementos esenciales subyacentes en los dos métodos de agregación: FLIS y PCA. En la tercera se describen la base de datos y las medidas de importancia sistémica resultantes, así como el procedimiento de agregación implementado; además, presenta la evaluación de la importancia sistémica producida (es decir, los índices) para las instituciones financieras colombianas a junio de 2013. La última sección ofrece algunos comentarios finales.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA: EL RIESGO SISTÉMICO Y LA IMPORTANCIA SISTÉMICA

Tal como lo expone el IMF *et al.* (2009: 2), los países del Grupo de los 20 (G-20) emplean una definición general para riesgo sistémico, calificándolo como: “el riesgo de perturbación de los servicios financieros que i) es causado por un deterioro de la totalidad o partes del sistema financiero y ii) tiene el potencial de traer consigo graves consecuencias negativas para la economía real”. En relación con los sistemas de pagos, el Comité para Pagos y Sistemas de Liquidación y la Organización Internacional de Comisiones de Valores (CPSS e Iosco, 2012:18) lo define, a su vez, como “el riesgo de que la incapacidad de uno o más participantes para desempeñarse como se espera, provoque que otros no puedan cumplir con sus obligaciones al vencimiento”.

Indistintamente de que se adopte cualquiera de estas definiciones, y a pesar de no haber una sola que resulte del todo satisfactoria en cada situación (Dowd, 2005), es común ver el riesgo como una función basada en dos parámetros: frecuencia y gravedad (Condamin *et al.*, 2006), conocidos también, respectivamente, como probabilidad e impacto (Gallati, 2003). Aunque tradicionalmente el esfuerzo académico se ha centrado en inquietudes sistémicas basadas en la estimación del riesgo sistémico —es decir, el producto de frecuencia e impacto, como en Norman *et al.* (2009)—, existe hoy un nuevo interés en enfocar la atención en gravedad o importancia sistémica⁴.

Por ejemplo, Paul Tucker, el por entonces director ejecutivo para Mercados y miembro del Comité de Política Monetaria del Banco de Inglaterra, señaló lo siguiente (Tucker, 2005: 73)

[L]a cuestión más interesante no radica en si el riesgo va a materializarse o no, tal como en una u otra forma se materializan otros riesgos diariamente. Más bien, lo importante es saber, en el caso de producirse choques adversos, si nuestros mercados de capi-

4 Ciertos autores (Rebonato, 2007; Taleb, 2007) sostienen que tanto los modelos como las técnicas para estimar eventos con efectos muy negativos con bajas probabilidades han mostrado resultados deficientes, llegando incluso a cuestionar la utilidad de tales modelos y técnicas para capturar eventos extremadamente adversos no encontrados en los datos históricos.

tales son capaces de absorberlos o si éstos ya han llegado a desarrollar, como algunos sugieren, unas características que pueden haberlos dejado vulnerables.

Tan creciente interés en el impacto de los choques sistémicos es el resultado de las características intrínsecas de los sistemas financieros. Como lo señalan Haldane (2009), León *et al.* (2012) y León y Berndsen (2013), es posible describir las redes financieras y de pagos de hoy en día como resistentes a alteraciones fortuitas, pero altamente susceptibles a ataques específicamente dirigidos⁵. Este es el resultado de la importancia sistémica de las instituciones financieras (por ejemplo, en tamaño, conectividad o sustituibilidad) que es distribuida con un alto grado de asimetría (colas anchas o sesgo a la derecha) y excesiva curtosis, como bajo una distribución de ley de potencia. Bajo un tipo así de distribución sesgada, la institución promedio es de reducida importancia sistémica y (por ende), el incumplimiento o imposibilidad de pagar tiene como resultado un bajo nivel de gravedad sistémica; en consecuencia, las instituciones sistémicamente importantes y sus consiguientes altos grados de gravedad se ubican en la cola del extremo derecho de la distribución.

Esto significa que enfocarse en la forma tradicional, calculando el riesgo como la suma de multiplicar la frecuencia esperada de falla real (o cercana, inminente) de cada participante por el correspondiente impacto estimado, puede estar desviando peligrosamente a las autoridades financieras de su objetivo de preservar la estabilidad financiera: en promedio, es posible “garantizar” tal estabilidad, pero no cuando se ve confrontada por el fallo de un participante sistémicamente importante. Es decir, al concentrarse en aquellas entidades con mayor probabilidad de fallar, las autoridades financieras pueden estar preparándose para enfrentar un grave choque sistémico basado solo en el impacto de una institución promedio.

Más aún, al estimar el riesgo sistémico como la suma de la frecuencia calculada con que cada participante cae (o está a punto de caer) multiplicada por el correspondiente impacto conjeturado, se está presuponiendo que las fallas reales o anunciadas no tienen lugar juntas ni a un mismo tiempo (es decir, que son independientes). Pero, como lo demostraron los episodios simultáneos de trastorno financiero de AIG, Lehman y Bear Sterns, de ninguna manera es posible garantizar tal independencia.

Por consiguiente, así como las autoridades financieras deben prepararse para enfrentar una no ordinaria, pero sí extrema amenaza a la estabilidad financiera, sus actividades (como las de supervisión, seguimiento y regulación) tienen que ir destinadas a lidiar con instituciones financieras sistémicamente importantes que estén fallando o se encuentren al borde del fracaso, como lo sugieren CPSS e Iosco (2012). En este sentido, es preciso que las políticas y la toma de decisiones de las autoridades financieras se basen en cómo definir la importancia financiera e identificar así a las instituciones que caen bajo tal definición.

De acuerdo con el IMF *et al.* (2009), puede considerarse que una institución es sistémicamente importante si su caída o su mal funcionamiento causan un trastorno general,

5 Como lo menciona Haldane (2009), esto explica por qué existen largos períodos de aparente robustez en los que nodos periféricos (no sistémicamente importantes) están sujetos a choques o impactos aleatorios, y a cortos aunque graves episodios de crisis sistémica en la que unas instituciones sistémicamente importantes ponen en peligro la estabilidad financiera. De ahí la caracterización que hace Haldane de la red financiera internacional actual: “robusta y, sin embargo, frágil”.

ya sea directa o indirectamente, mediante un efecto de contagio. El mayor criterio para evaluar la importancia sistémica tiene relación con el potencial de las instituciones para provocar un gran impacto negativo en el sistema financiero y en la economía real. Ese criterio global puede explicarse convenientemente por medio de tres conceptos más precisos: tamaño, conectividad y sustituibilidad (como en IMF *et al.*, 2009; Manning *et al.*, 2009).

1.1 Tamaño

Según el BCBS (2013), el tamaño se relaciona con lo difícil que puede ser reemplazar las actividades de una institución que esté en dificultades o próxima a caer. Algunos autores consideran que una institución es sistémicamente importante si excede un umbral en el tamaño de los activos (Saunders *et al.*, 2009), en tanto que otros (IMF *et al.*, 2009) prefieren evaluar el monto de los servicios financieros que suministran al sistema. Este último es el enfoque tradicional del riesgo sistémico, en el que generalmente la importancia sistémica de una institución crece junto con su tamaño, y en el que las instituciones sistémicamente importantes son clasificadas como demasiado grandes para caer.

Existen ciertas medidas con respecto al tamaño de los servicios financieros suministrados por una entidad al sistema. Los datos contables tradicionales de las instituciones contienen información importante, como las exposiciones al riesgo dentro y fuera de balance (p. e.: depósitos, garantías y préstamos del mercado monetario) al igual que el volumen de los activos administrados, etcétera. Otros indicadores de tamaño pertinentes, tales como el volumen de pagos por parte de instituciones individuales, no se revelan públicamente, pero se encuentran disponibles para las autoridades financieras cuando las instituciones participan en sistemas de pagos de alto valor o provienen de las labores de seguimiento y supervisión financiera.

1.2 Conectividad

La conectividad se relaciona con la forma como los problemas en una institución financiera pueden incrementar considerablemente la probabilidad de perturbar a otras por medio de la red de obligaciones contractuales (BCBS, 2013). Por tanto, entre más extenso sea el número y el volumen de los vínculos de una institución con otros participantes en el mercado, mayor será, entonces, el contagio o peores las repercusiones que pueda llegar a generar.

En lo que concierne a los vínculos que constituyen el grado de conectividad, se identifican dos tipos distintos. Según la descripción de Allen y Babus (2008), los vínculos directos se relacionan con exposiciones mutuas al riesgo adquiridas en el mercado financiero, en tanto que los indirectos surgen de mantener portafolios similares o de compartir el mismo conjunto o masa de depositantes.

Pese a su carácter intuitivo, la conectividad constituye un enfoque bastante novedoso del riesgo sistémico donde las instituciones sistémicamente importantes se encuentran catalogadas como demasiado conectadas para caer (León *et al.*, 2012; Chan-Lau, 2010;

ECB, 2010; Clark, 2010; Zhou, 2009). A diferencia de lo que ocurre con el tamaño de las instituciones financieras, es más complicado evaluar la conectividad, al carecer tanto los reguladores como los bancos centrales de los recursos requeridos para realizar este tipo de análisis (Clark, 2010). El análisis de redes⁶ facilita algunos conceptos y medidas que pueden servir para apreciar la conectividad. El concepto más simple está en la centralidad por número de conexiones entrantes y salientes (*indegree and outdegree centrality*), que se relaciona con el número de “vecinos” o “socios” que una institución tiene dentro de la red donde los primeros (últimos) corresponden a los flujos entrantes (salientes). Otros conceptos toman en cuenta las propiedades globales de toda la red, en donde la centralidad surge de las relaciones contractuales con entidades subyacentes en la red, como en el caso de la centralidad del vector propio (v. g.: de eigenvector) y otras medidas de centralidad (por ejemplo, *pageRank*, autoridad y centralidad de distribución, centralidad de Katz).

La aplicación tradicional del análisis de redes para evaluar el riesgo sistémico se apoya en datos aportados por los estados financieros, tales como la financiación y los préstamos interbancarios, a la manera de Garrat *et al.* (2011) o Chan-Lau (2010). No obstante, tales fuentes de información pueden no ser confiables debido a las prácticas contables de las firmas informantes, como lo destaca Smith (2011)⁷. Por su parte, León y Berndsen (2013) y León *et al.* (2012) emplean transacciones provenientes de infraestructuras financieras (por ejemplo, sistemas de pagos de alto valor, y sistemas de liquidación de títulos-valores y de divisas) que conceden algunas ventajas en términos de detalle, integridad, exhaustividad y oportunidad. Kyriakopoulos *et al.* (2009) sugieren optar por recurrir a transacciones financieras en lugar de emplear los datos de estados financieros y otros informes de las instituciones.

1.3 Sustituibilidad

Si la ausencia de una institución financiera distorsiona el sistema porque resulta difícil (o imposible) encontrar otra institución capaz de suministrar el mismo volumen (o uno similar) de servicios financieros (como, por ejemplo, liquidación, pagos, préstamos interbancarios, custodia, corretaje) se considera una entidad sistémicamente importante. Como lo señalan Manning *et al.* (2009), la gravedad del impacto de la falla o caída de un sistema de pagos, y de ahí la extensión del riesgo sistémico, depende crucialmente de si existen sustitutos rápidamente disponibles que permitan que los flujos de pagos sean desviados mediante otro sistema. En consecuencia, generalmente la importancia sistémica de una institución financiera disminuye junto con su grado de sustituibilidad. Ambas, la

6 Los estudios de Soramäki *et al.* (2006) y de Bech y Garrat (2006) emplean el análisis de redes para caracterizar el sistema de pagos (fedwire) de los Estados Unidos, en tanto que Inaoka *et al.* (2004) lo aplican al caso (BoJ-Net) de Japón. Cepeda (2008), León y Pérez (2014) y León y Berndsen (2013) lo adoptan en relación con el sistema de pagos de alto valor (CUD) de Colombia y otras infraestructuras de mercados financieros para cuantificar el impacto de fallas o caídas en su estabilidad.

7 Según Smith (2011), Lehman empleaba acuerdos de venta y reventa o de recompra (repos) a fin de disminuir su deuda reconocida para fechas cercanas a los períodos de presentación de informes trimestrales. Por medio de su interpretación de normas contables, Lehman retiró más de USD 50 mil millones (mm) de su balance al final del trimestre fiscal en mayo de 2008, lo que redujo el apalancamiento neto de 13,9 a 12,1.

conectividad y la sustituibilidad, están, por tanto, relacionadas con el criterio de demasiado conectadas para caer con respecto a la importancia sistémica.

A diferencia de lo que ocurre con el tamaño de las instituciones, puede resultar más difícil evaluar la dimensión de sustituibilidad. Pese a existir circunstancias en las que es fácil determinar que un participante no es sustituible (por ejemplo, si hay únicamente una infraestructura para todo el sistema de compensación), puede ser engorroso determinar el grado de sustituibilidad en la mayoría de los casos.

El análisis de redes facilita algunos conceptos y medidas que pueden ayudar a evaluar la sustituibilidad en dichos casos. Uno de ellos es el de la centralidad de intermediación (Newman, 2010 y 2003), que corresponde a la medida de resiliencia de una red basada en la evaluación de lo que implica la salida de un participante en la conexión.

No obstante, y a pesar de que el concepto de sustituibilidad resulta evidente dentro de un marco tradicional de análisis de redes, las redes financieras tienen algunas particularidades que vale la pena tener en cuenta. En primer lugar, como lo subrayan Inaoka *et al.* (2004), pueden estar caracterizadas por su estabilidad dinámica, lo que significa que es posible reconfigurar con bastante prontitud las conexiones entre las instituciones, dada la apropiada intervención de las autoridades financieras, ya sea para salvar a la que ha fallado o apoyar a las restantes (es decir, a las que no han caído). A diferencia, por ejemplo, de una red física como Internet o una de transporte de energía eléctrica cuyo *hardware* no puede ser reconfigurado rápida o económicamente, se puede afirmar que una red financiera hasta cierto punto sí se puede reconfigurar, restableciendo las conexiones entre las instituciones financieras⁸. En este sentido, el papel del intermediario conector de una institución financiera dentro de una red de transacciones o exposiciones puede no llegar a revelar si alguna es sustituible (o no). De manera similar, Soramäki y Cook (2012) destacan que las medidas que dependen de la longitud de las trayectorias, como en la centralidad de intermediación (*betweenness centrality*), pueden no ser precisas dentro de las redes de pago, principalmente porque son ciegas con respecto al valor de las transacciones.

Al igual que en el caso de la conectividad, el análisis de redes para evaluar la sustituibilidad podría utilizar datos recogidos a partir de los balances de las instituciones (por ejemplo, financiación y préstamos interbancarios) o provenientes de infraestructuras de mercados financieros (por ejemplo, información de los sistemas de pago de alto valor y de liquidación de títulos-valores).

2. CÓMO DISEÑAR LOS ÍNDICES DE IMPORTANCIA SISTÉMICA

Teniendo en cuenta los conceptos fundamentales expuestos (v. g.: tamaño, conectividad y sustituibilidad), esta sección expone nuestra propuesta para el diseño de dos índices de importancia sistémica correspondiente a dos métodos de agregación distintos: FLIS y

8 Sin embargo, vale la pena recalcar que una red de infraestructuras de mercado financiero exhibe rigideces tanto legales como operativas que constituyen una red que puede no ser reconfigurada prontamente, como en el caso de las redes de las instituciones financieras. En este sentido, es posible que una red de infraestructuras de mercados pueda parecerse a una física, siendo aquí la sustituibilidad una cuestión importante.

PCA. La primera parte presenta las tres medidas o indicadores de importancia sistémica, su lógica y su diseño, y la segunda plantea brevemente los dos métodos de agregación⁹.

2.1 Cómo diseñar las medidas de importancia sistémica

Según la literatura dedicada a evaluar la importancia sistémica relativa a instituciones financieras y sistemas de pago (IMF *et al.*, 2009; Manning *et al.*, 2009; BCBS, 2013), los criterios más relevantes corresponden al tamaño, la conectividad y la sustituibilidad. De ahí que las tres medidas elegidas tengan que capturar (en cierta medida) estos tres importantes criterios o dimensiones.

2.1.1 La centralidad como prestatario neto en la red del mercado monetario

La primera métrica consiste en estimar la centralidad de cada institución financiera como prestatario neto en la red del mercado monetario. Dicha métrica emplea una puntuación de centralidad (centralidad de distribución) como medida de la importancia de cada institución financiera dentro de la red de préstamos garantizados por bonos emitidos por el gobierno (lo que se conoce comúnmente como *sell/buy backs* u operaciones de simultáneas)¹⁰.

En el caso colombiano, la importancia de los mercados de simultáneas está muy bien documentada en lo que concierne a caracterizar el mercado financiero local (por ejemplo, en Martínez y León, 2014; Cardozo *et al.*, 2011). Excluyendo los repos del Banco de la República, las simultáneas de títulos del Gobierno constituyen la fuente más importante de liquidez entre instituciones financieras: durante 2010, 2011 y 2012 su valor diario promedio representó el 83% del total, en tanto que las repos entre instituciones financieras significaron alrededor de un 1%, los préstamos no garantizados bordearon el 16%¹¹. Por consiguiente, en este trabajo se considera al “mercado monetario” como el mercado de simultáneas.

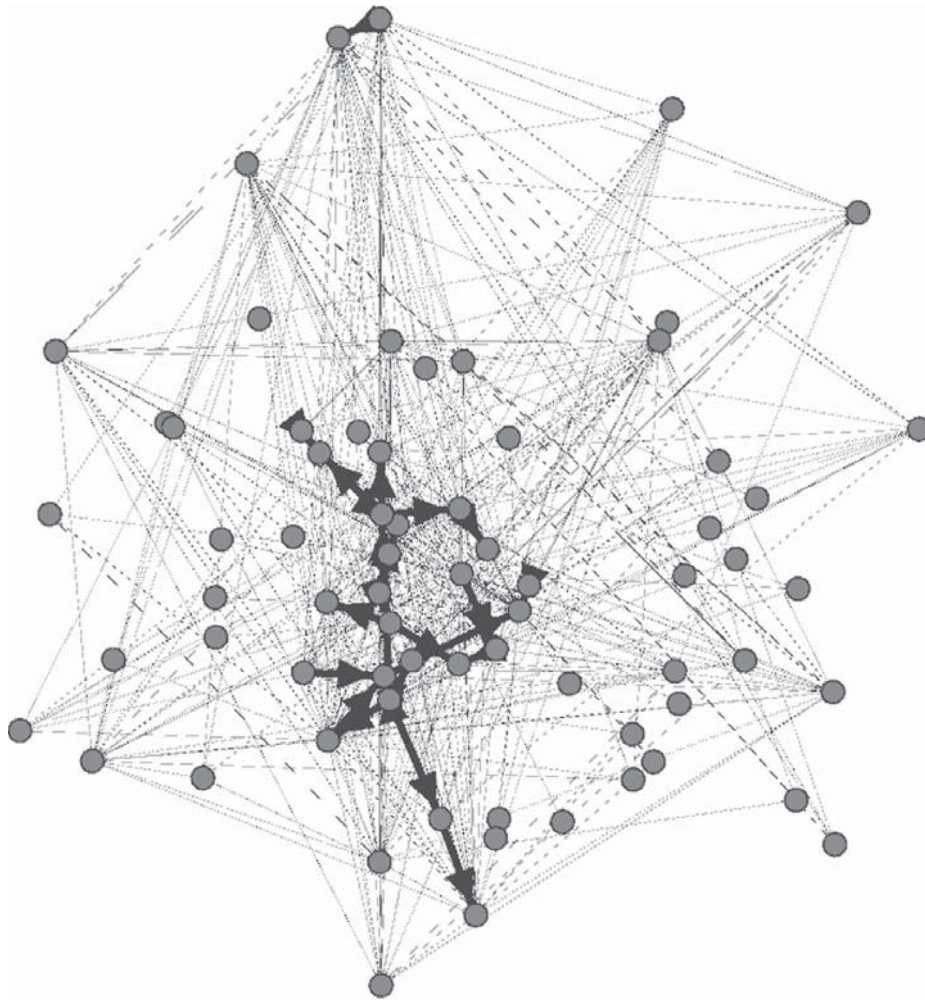
9 El lector interesado podrá encontrar mayores detalles en el sistema de inferencia de lógica difusa (FLIS) en León y Machado (2013) o Reveiz y León (2010).

10 Las *sell/buy backs* o simultáneas consisten en vender y comprar transacciones contratadas simultáneamente, con la misma suma capital y el mismo título valor y quedando ambas partes obligadas a adoptar la posición inversa al vencimiento (es decir, que el comprador pasa a ser el vendedor) cuando la propiedad de la garantía es transferida a su comprador. Bajo la regulación local, a diferencia de las repos, no se imponen recortes ni limitaciones de movilidad a la garantía, lo que puede llegar a explicar por qué las firmas financieras colombianas prefieren las simultáneas a otras fuentes, incluidas las repos con el Banco de la República durante algunos periodos (Cardozo, 2011).

11 El hecho de no haber tomado en cuenta mercados colateralizados de títulos emitidos por instituciones diferentes al gobierno se debe principalmente a limitaciones en materia de datos. Sin embargo, en el año 2012, con base en cifras aproximadas, el 79% de las transacciones colateralizadas del mercado monetario (como las simultáneas y los repos, excluyendo las del Banco de la República) utilizó títulos del gobierno como garantía (p. e.: los TES o títulos de deuda pública local emitidos por la Dirección General de Crédito Público y Tesorero Nacional), en tanto que un 17% empleó otros títulos de renta fija y el 4% recurrió a las acciones.

La red de préstamos colateralizados entre instituciones financieras empleada para esta medición está construida con datos provenientes del Depósito Centralizado de Valores (DCV). El DCV corresponde a la infraestructura del mercado financiero que sirve como sistema de liquidación de títulos del Gobierno para el mercado local. Esta plataforma es operada por el Banco de la República y contiene los compromisos de pagos netos de cada institución financiera en el mercado de simultáneas. Dicho de otra forma, esta red corresponde a las exposiciones netas entre instituciones financieras en el mercado monetario. El Gráfico 1 representa las exposiciones promedio durante junio de 2013, en donde la dirección y el ancho de la flecha corresponden a la dirección y el valor del pago pactado, respectivamente.

Gráfico 1
Red de endeudamiento neto del mercado monetario.



Nota: una flecha desde i hasta j representa el compromiso de pagar de i a j . El ancho indica el valor del compromiso de pago.

Fuente: estimaciones de los autores.

Utilizar los datos de exposiciones del sistema de liquidación de títulos del Gobierno ofrece muchas ventajas. Para empezar, el mercado local más líquido es precisamente el de los TES, donde estos sirven como principal colateral para préstamos. En segundo lugar, a diferencia de los datos reportados (por ejemplo: estados financieros o transmisiones periódicas de instituciones financieras), la información del sistema de liquidaciones es completa, individual, minuciosa y puntual, y coincide con las propiedades primordiales expuestas por Kyriakopoulos *et al.* (2009) como particularmente ventajosas desde una perspectiva de supervisión y seguimiento financiero (por ejemplo, las transacciones se encuentran disponibles en tiempo real y falsificarlas es casi imposible). En tercer lugar, a pesar de que la incapacidad de pagar en el mercado monetario no genera riesgo de crédito debido al esquema de entrega contra pago existente en dicha plataforma (conocido como *delivery versus payment* [DvP]), de todos modos un incumplimiento puede llegar a provocar varios problemas: i) presiones de liquidez a causa de que las contrapartes de la institución en dificultades no han recibido el pago; ii) entramientos o retrasos en liquidaciones de efectivo y títulos-valores debido a que las partes de las instituciones en problemas no hayan satisfecho sus compromisos con sus contrapartes; iii) ventas forzadas a menores precios por parte del titular de la garantía colateral (conocidas como *fire sales*), capaces de disminuir la capacidad de otros participantes para obtener financiamiento utilizando los mismos títulos-valores, además de su efecto negativo en el valor de mercado y la volatilidad de portafolios, carteras, cuentas de margen y solvencia de otras instituciones, e incluso de producir y fortalecer un ciclo negativo en el mercado (v. g.: espirales de liquidez)¹².

En consecuencia, esta red puede ser vista como una descripción de los vínculos directos entre instituciones financieras, en las que se espera que una institución que reúna varios compromisos futuros de pago (por ejemplo, para realizar la operación pactada al vencimiento de una operación simultánea) tenga mayor importancia para el mercado monetario. Más aún, puesto que esta red corresponde a las exposiciones netas entre instituciones financieras, también el nivel de las obligaciones está relacionado con el tamaño de la institución dentro del mercado monetario, así como con el nivel de las externalidades potenciales negativas que pueden llegar a producirse a partir de mantener portafolios similares entre entidades, al igual que por los posibles efectos de escenarios de ventas forzadas (*fire sales*). Por ende, bajo las definiciones del BCBS (2013: 7), esta métrica captura la interconectividad frente a otras instituciones financieras que se originan a partir de la red de obligaciones contractuales en la que ellas operan.

Pese a que la medición de la importancia relativa de una institución puede ser fácilmente capturada por el número de contrapartes (p. e.: grado) o por el valor de los compromisos de pago, tales medidas son de carácter local, ya que no captan la pertinencia de las contrapartes directas e indirectas como una fuente de importancia sistémica. Por tanto, distan mucho de tomar en cuenta el efecto global o de red de una determinada institu-

12 Se refiere al proceso de amplificación interna mediante el cual un activo que sufre una caída conduce a más ventas (desapalancamiento), lo que a su vez disminuye aún más los precios, los estados de pérdidas y ganancias de los intermediarios financieros y el valor neto o patrimonial de los balances (Brunnermeier *et al.* 2009). El problema concerniente a las externalidades negativas que surgen de las ventas forzadas en préstamos garantizados es tratado por Stein (2013).

ción. Como el mayor interés consiste en apreciar el aporte de las instituciones financieras al riesgo en el conjunto del sistema, la métrica utilizada debe poder reconocer que, en la red del mercado monetario, la importancia sistémica surge de los compromisos directos o indirectos a contrapartes importantes.

De ahí que con base en el algoritmo *hypertext induced topic search* (HITS) de Kleinberg (1998), en este artículo se calcula la centralidad de distribución de cada institución en la red de préstamos netos del mercado monetario¹³. El algoritmo HITS es una versión mejorada de la medida de centralidad a partir del *eigenvector* (vector propio) que comúnmente se utiliza, en la que la premisa principal consiste en identificar la importancia dentro de una red basada en un par de tesis circulares interdependientes: i) un participante es un buen distribuidor (*hub*) si señala buenas autoridades, y ii) un participante es una buena autoridad (*authority*) si está señalada por buenos *hubs*.

En el caso que nos ocupa, una institución financiera es un buen *hub* cuando: i) ha obtenido préstamos de varias contrapartes en el mercado monetario; ii) su obligación es significativa para el mercado monetario, o iii) en ambos casos; en tanto que una institución es una buena *authority* si: i) ha otorgado préstamos a muchas contrapartes en el mercado monetario; ii) si sus préstamos son significativos para el mercado monetario, o iii) ambas situaciones. En relación con su fundamentación matemática (por ejemplo, la centralidad de *eigenvector*), la importancia de una institución financiera es proporcional a la suma ponderada de la importancia de sus contrapartes en todas las adyacencias posibles, lo que permite capturar el papel global de cada una de las instituciones dentro de la red. Como anexo se ofrece una descripción formal de la autoridad de HITS y del concepto de centralidad de distribución.

2.1.2 La centralidad como originador de pagos en la red del sistema de pagos de alto valor

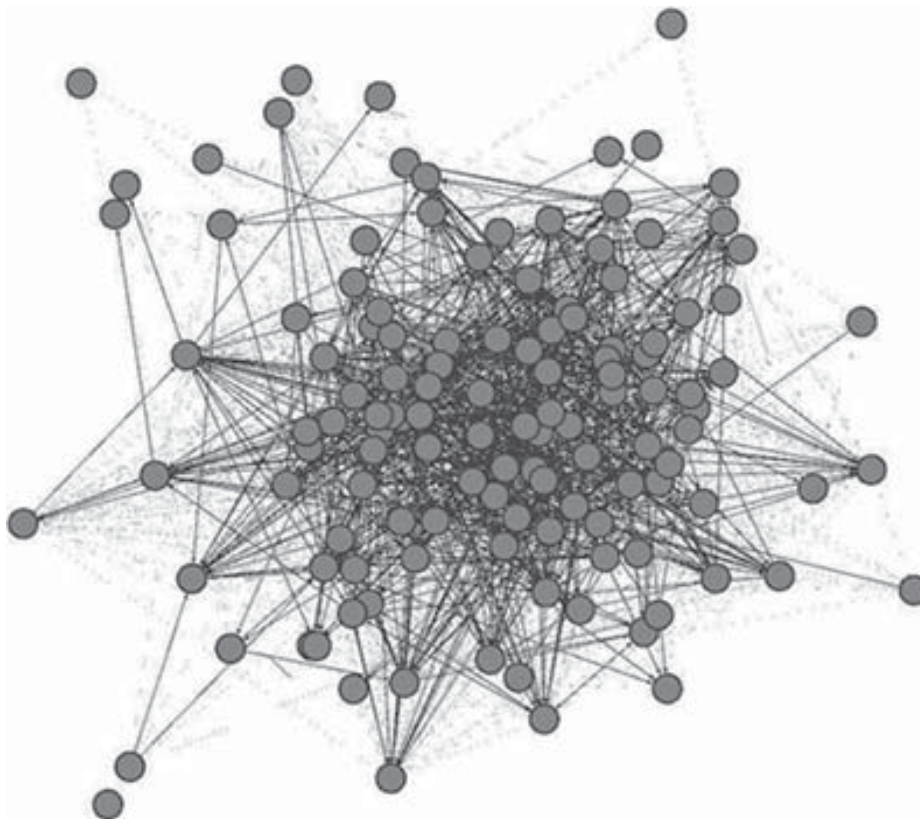
La segunda métrica consiste en estimar la centralidad de distribución de cada institución financiera dentro de la red del sistema de pagos de alto valor —large-value payments system (LVPS)—. Los datos son suministrados por el CUD, el único gran sistema de pagos de alto valor en el mercado financiero colombiano, en donde tiene lugar toda liquidación de efectivo (en moneda local). Al igual que el DCV, esta infraestructura de mercado financiero es operada por el Banco de la República.

Esta red está conformada por todos los pagos (liquidaciones en efectivo) entre instituciones financieras en el mercado local, donde todas pueden liquidar sus pagos directamente (es decir, en forma no intermediada). El Gráfico 2 muestra los pagos promedio

13 Hay otras alternativas disponibles; sin embargo, como lo presentan León y Pérez (2014), algunos de sus puntos débiles hacen que el algoritmo HITS sea particularmente atractivo. Por ejemplo, a diferencia de la centralidad de *eigenvector* estándar, HITS puede estimarse en redes dirigidas como la que se tenga a mano; a diferencia de *PageRank*, en el modelo no se introduce ninguna aleatoriedad con el fin de lograr convergencia, y a diferencia de la centralidad de Katz, no debería asignarse ninguna centralidad arbitraria para alcanzar la convergencia.

liquidados en junio de 2013, en donde la dirección y el ancho de la flecha corresponden a la dirección y el valor del pago, respectivamente.

Gráfico 2
Red de pagos de alto valor



Nota: una flecha desde i hasta j representa un pago de i a j . El ancho indica el valor del pago.

Fuente: estimaciones de los autores.

Existen varias ventajas al utilizar datos del sistema de pagos de alto valor: i) todas las transacciones entre instituciones financieras se liquidan en moneda local, en la que todas ellas son procesadas y registradas por un mismo sistema (el CUD); ii) como lo recalca Kodres (2009), la falla, quiebra o insolvencia no son las únicas fuentes de choques sistémicos. El hecho de omitir pagos o de dejar de pagar transacciones puede obstruir íntegramente el sistema financiero; iii) como lo admite Tumpel-Gugerell (2009), una institución en particular podría no ser sistémicamente importante no solo porque otras instituciones se encuentren financieramente expuestas a ella mediante posiciones de balance, sino también porque otros participantes del mercado dependen del continuo suministro de sus servicios.

De ahí que esta red tenga que considerarse como representativa de la conectividad entre instituciones financieras, en donde se espera que las entidades que más concentran pagos a otras contrapartes sean más importantes para todo el sistema de pagos, y por esta vía para todos los mercados donde se liquiden transacciones en moneda local

(por ejemplo, renta fija, mercado cambiario, acciones, mercado de derivados). Adicionalmente, la red puede ofrecer un indicio de la cantidad de servicios financieros provistos por cada institución, lo que representa una medida de su tamaño relativo dentro del sistema financiero, la cual no está basada en la información de sus estados financieros.

Además, calcular la centralidad de distribución en la red del sistema de pagos de alto valor no solo permite medir una fuente de conectividad comúnmente pasada por alto (p. e.: conectividad de pagos intradiarios) y del tamaño de las instituciones financieras, sino que también captura la sustituibilidad basada en las definiciones del BCBS (2013). En este sentido, mientras más central es una institución financiera dentro del sistema de pagos de alto valor, más puede ser considerada como una proveedora de servicios en la infraestructura, y por esta vía mayor será, entonces, la perturbación en el sistema financiero generada en caso de que esta institución tenga problemas.

Como en la métrica anterior, la importancia relativa de las instituciones que participan se mide con su *centralidad de distribución*. En consecuencia, una institución financiera es importante porque le paga a un gran número de contrapartes, porque a sus contrapartes pagan grandes volúmenes, o por ambas cosas, considerando la información de todas las órdenes de contrapartes adyacentes. De nuevo, debido a la fundamentación matemática de esta medida (p. e.: el vector propio de la matriz de pagos), la importancia de una institución es proporcional a la suma ponderada de la importancia de sus contrapartes en todas las proximidades posibles.

2.1.3 Valor de activos de los servicios financieros centrales

La tercera métrica corresponde a una versión ajustada de una de las dimensiones de la importancia sistémica de las instituciones financieras: el tamaño. Con base en el tamaño de los activos de las instituciones financieras, reportados en los estados financieros periódicos (en los balances, por ejemplo), la métrica elegida consiste en el valor de los activos que posee cada institución financiera, los cuales son susceptibles de quedar comprometidos en caso de su falla o caída, y que pueden llegar a causar algún tipo de ruptura o trastorno negativo en los mercados financieros y en el sector real. En este sentido, dicha métrica busca amoldarse al siguiente raciocinio: “mientras más grande sea [la institución financiera], más difícil resultará que sus actividades lleguen a ser reemplazadas prontamente por otras [instituciones] y, por lo tanto, mayor será la probabilidad de que sus dificultades, o su falla o su caída, causen perturbación en los mercados financieros en que opera” (BCBS-BIS, 2013: p.7).

Más precisamente, la métrica corresponde al valor total de los activos, descontando el efectivo, propiedades, planta y equipos¹⁴, donde tal compensación apunta a filtrar el tamaño de los servicios financieros centrales (por ejemplo, mercado monetario, crédito a empresas y a particulares) suministrados por cada firma al mercado financiero y al sector

14 “Bienes, planta y equipos” es un término empleado en los Estados Unidos, entre los establecidos por la Junta de Normas de Contabilidad Financiera —Financial Accounting Standards Board (FASB)— y las normas contables colombianas, y generalmente se refiere a cualquier estructura o equipo físico unido al bien raíz que no puede ser retirado ni usado en forma separada sin incurrir en costos considerables.

real, y limitarse exclusivamente al portafolio que podría emplearse en una venta forzada (*fire sales*) y, a su vez, causar efectos relacionados con espirales de liquidez. También, se espera que las instituciones que captan depósitos no posean o mantengan una considerable participación de depósitos y otras obligaciones a corto plazo en forma de efectivo o de propiedades, planta y equipos. De esta forma, esta métrica sirve para expresar el tamaño de los pasivos de las instituciones financieras que pueden estar en riesgo con respecto a sus contrapartes financieras y no financieras (hogares y compañías, por ejemplo)¹⁵.

3.1.4 Cómo hacer coincidir las medidas de la importancia con los criterios

Una sola métrica de importancia sistémica puede capturar uno, dos o tres de sus criterios o dimensiones, lo que dificulta definir con precisión los límites de cada una de dichas dimensiones. En el caso de las tres medidas escogidas, es posible (y además ilustrativo) resumir el aporte a la correspondiente evaluación que se espera de ellas, como sigue en el Cuadro 1.

Cuadro 1
En qué forma se relacionan las medidas de importancia sistémica con los criterios del FMI *et al.* (2009) y Manning *et al.* (2009)

Medidas / criterios	Criterios del FMI <i>et al.</i> (2009) y Manning <i>et al.</i> (2009)		
	Tamaño	Conectividad	Sustituibilidad
La centralidad como prestatario neto en la red del mercado monetario			
La centralidad como originador de pagos en la red del sistema de pagos de alto valor (<i>large value payments system</i>)			
Valor de los activos de los servicios financieros centrales			
Capturados directamente			
Capturados indirectamente			

Fuente: diseño de los autores.

El tamaño es capturado directamente por la métrica del valor de los activos de los servicios financieros centrales y constituye una medida directa de la perturbación potencial generada por el volumen de servicios financieros suministrados por cada institución financiera a la economía en su conjunto (por ejemplo, préstamos, retiro de depósitos), y

15 Para el período analizado (junio de 2013) el coeficiente de correlación estimado entre el valor de activos de los servicios financieros centrales y de los depósitos es cercano a uno. Esta estimación está restringida a instituciones autorizadas para captar depósitos del público (como los establecimientos de crédito, por ejemplo).

del potencial latente para afectar el funcionamiento normal de los mercados financieros por causa del volumen de activos financieros que posee (y que podría llegar a vender bajo circunstancias críticas). Sin embargo, las dos medidas relacionadas con la centralidad de distribución capturan también el tamaño relativo de cada institución financiera, en la cual la centralidad capta tanto la importancia de su endeudamiento neto dentro del mercado monetario como la de sus pagos dentro del sistema de los pagos de alto valor.

La conectividad, la cual busca medir la importancia sistémica relacionada con el número y el volumen de los vínculos que tiene una institución financiera, es capturada directamente por dos medidas: i) la centralidad como prestatario en la red del mercado monetario, y ii) la centralidad como originador de pagos en la red del LVPS. Ambas medidas se basan en la centralidad de distribución. Mientras mayor sea el número y el volumen de los vínculos con respecto a las proximidades de diferentes órdenes, mayor será la centralidad de distribución.

Adicionalmente, el valor de los activos de los servicios financieros centrales comprende el volumen de activos financieros que cada institución posee, lo que podría ser visto como una medida del efecto potencial que podría causarse indirectamente a otros agentes de la economía (por ejemplo, otras instituciones financieras, hogares, compañías) si la institución en problemas se ve obligada a vender forzosamente sus activos (*fire sales*). En otras palabras, ya que el valor de los activos de los servicios financieros comprende el volumen de los títulos-valores en posición propia en circulación, dicha medida capta de manera parcial el contagio potencial que se puede dar mediante un efecto negativo sobre los precios. En este sentido, bajo las definiciones del BCBS (2013), podría verse también como medida de interconectividad.

Dado que se espera que la sustituibilidad esté relacionada en forma positiva con el papel de las instituciones financieras como participantes en el mercado y proveedores de servicios a los clientes (BCBS, 2013), ambas medidas basadas en la centralidad capturan dicho papel dentro del mercado monetario y del sistema de pagos. El fundamento matemático de la centralidad de distribución, que se basa en que la importancia de una entidad es proporcional a la de sus contrapartes en las proximidades de todo orden posible, implica que la importancia general de cada institución financiera en el mercado monetario y en el sistema de pagos genera puntuaciones más altas a bajos niveles de sustituibilidad.

Pese a la indiscutible pertinencia de la sustituibilidad como factor de importancia sistémica, su medición desde una perspectiva de red no resulta nada sencilla. Como ya se ha comentado, Inaoka *et al.* (2004) señalan que las redes financieras pueden ser reconfiguradas rápidamente con la apropiada intervención de las autoridades financieras ya sea para rescatar a la institución que se encuentre en dificultades o apoyar a las restantes. En este sentido, la regulación puede lidiar de manera parcial con la sustituibilidad mediante la efectiva reconfiguración de las redes financieras.

En el caso colombiano la regulación puede llegar a facilitar la reconfiguración debido a la segregación de los activos del cliente (por ejemplo, la tenencia de activos de propiedad queda separada de la de sus clientes)¹⁶ y a la existencia de mecanismos de resolución

16 En French *et al.* (2010:73) se subraya la importancia de la segregación de los activos “*en caso de quiebra [...] el cliente sigue siendo el dueño de los títulos-valores en una cuenta segregada [...] Si los activos no están segregados, el cliente solamente asume un derecho contractual*”. Por otra parte, debido a la segregación de los

(como transferir a una institución sólida los activos, pasivos y contratos de la institución en dificultades), mientras que la solidez de las infraestructuras de mercado financiero y sus sistemas de pago y liquidación permite que los participantes en el mercado “continúen realizando operaciones a sabiendas de que las transacciones con seguridad serán liquidadas y compensadas sin dificultad” (Dudley, 2012: 4).

Por otra parte, dado que el tamaño relativo de cada institución financiera, medido con el valor de los activos de los servicios financieros centrales, considera igualmente su papel como participantes y proveedores de liquidez en mercados cruciales (p. e.: vivienda y préstamos comerciales). En consecuencia, esta métrica del tamaño captura en cierto grado la sustituibilidad de la entidad.

Tal como se presentan en el Cuadro 2, las tres medidas de la importancia sistémica son también coherentes con la Ley Dodd-Frank para la reforma de Wall Street y la Ley de Protección al Consumidor¹⁷.

Cuadro 2
En qué forma se relacionan las medidas de importancia sistémica elegidas con los criterios provenientes de la Ley Dodd-Frank

Medidas / criterios	Criterios de la Ley Dodd-Frank			
	Valor monetario agregado de las transacciones	Exposición agregada frente a las contrapartes	Interdependencias e interacciones con otros participantes	Efecto en mercados críticos e instituciones, y en el sistema
La centralidad como prestatario neto en la red del mercado monetario				
La centralidad como originador de pagos en la red de los pagos de alto valor				
Valor de los activos de los servicios financieros centrales				
Capturados directamente				
Capturados indirectamente				

Fuente: diseño de los autores.

activos dentro del marco de la regulación colombiana, los de terceros (clientes, por ejemplo) no se toman en cuenta en esta propuesta.

¹⁷ La Ley Dodd-Frank para la reforma de Wall Street y la Ley de Protección al Consumidor de 2010 (The 2010 Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act; en adelante: Ley Dodd-Frank), es la respuesta legislativa de los Estados Unidos al más reciente episodio de crisis financiera internacional. Su mayor objetivo consiste en promover la estabilidad financiera estadounidense. La sección 804 de la ley aborda las consideraciones principales al designar la importancia sistémica.

Es importante resaltar que la elección de los indicadores o medidas utilizadas obedece a varias consideraciones. Lo primero, y posiblemente más relevante, consiste en que las medidas empleadas permiten evaluar de manera simultánea la importancia sistémica de las instituciones bancarias y no bancarias¹⁸. A diferencia de la mayoría de los modelos existentes sobre evaluación de importancia sistémica, que se centran en instituciones bancarias (como en BCBS, 2013), se considera que es indispensable poder evaluar la importancia sistémica de instituciones bancarias y no bancarias, simultáneamente. Tal como lo han demostrado los sucesos recientes concentrados en entidades no bancarias (LTCM, Lehman, AIG, Bear Sterns, Freddie Mac y Fannie Mae, por ejemplo), y como lo plantean Ötoker-Robe *et al.* (2011), resulta esencial mejorar la comprensión del sistema bancario paralelo (o en la sombra) para evitar que instituciones no bancarias vayan ganando importancia inadvertidamente. En segundo lugar, las medidas utilizadas tienen en cuenta un modelo parsimonioso y flexible, lo que permitiría un continuo monitoreo (por ejemplo mensual) de la importancia sistémica de las instituciones financieras. Y en tercer lugar, las medidas empleadas resultan convenientes cuando se quiere comparar resultados en diferentes sistemas financieros.

2.2 Agregando las medidas de importancia sistémica

Con base en los métodos del sistema de inferencia de lógica difusa (FLIS) y de análisis de componentes principales (PCA) propuestos respectivamente por León y Machado (2013) y León y Murcia (2013), en esta sección se describen los procedimientos de agregación que muestran los dos índices de importancia sistémica aquí sugeridos.

2.2.1 Sistema FLIS

El concepto fundamental de “pertenencia” en teoría básica de conjuntos establece que un elemento pertenece o no a un conjunto determinado. Este tipo de conjunto, descrito mediante una definición inequívoca y unos límites, se conoce como conjunto ordinario o nítido, y se caracteriza por una pertenencia discreta bivariada (sí o no, 1 o 0, verdadero o falso) y lógica clásica booleana o aristotélica.

Al contrario de los conjuntos ordinarios, Zadeh (1965) reconoció el hecho de que, en realidad, existen elementos caracterizados por funciones de pertenencia que no son discretos sino continuos, en los que hay grados diferentes de pertenencia entre sí o no, 1 o 0, verdadero o falso¹⁹; en este tipo los límites no son claros, de modo que Zadeh los llamó conjuntos difusos.

18 Sin embargo, es posible desglosar cada indicador clave en otras medidas (más específicas), como lo sugiere el documento del BCBS (2013). No obstante, tal descomposición puede resultar en una preferencia implícita por evaluar la importancia sistémica de ciertos tipos de institución financiera (bancos comerciales, por ejemplo), pasando por alto otras entidades que pueden ser relevantes (sociedades comisionistas de bolsa, fondos de pensiones). Por ende, se sugiere emplear medidas generales (de amplio espectro) al implementar el modelo propuesto inicialmente y, de ser necesario, ir aumentando su especificidad.

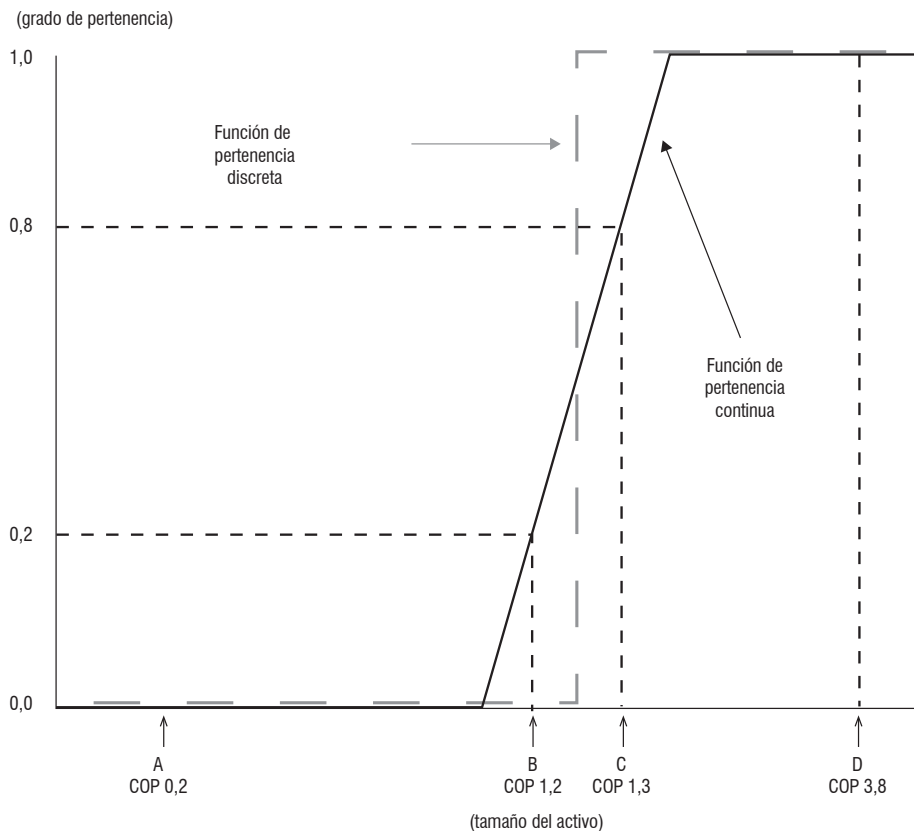
19 Una función de pertenencia es la línea que define la transición entre conjuntos, de este modo mapeando el grado de pertenencia de sus elementos, una función de pertenencia típica de los conjuntos difusos reconoce que los elementos pueden pertenecer a diferentes categorías en cierto grado, de forma moderada y continua.

Como lo expresan Sivanandam *et al.* (2007), el mejor aporte del concepto de conjunto difuso es la capacidad de modelar información incierta y ambigua, tal como casi siempre se encuentra en la vida real.

En este estudio sería difícil catalogar a una institución financiera como demasiado grande para caer con base en un umbral único definido por el tamaño de sus activos, como lo sugieren Saunders *et al.* (2009). El Gráfico 3 compara una función de pertenencia discreta típica de los conjuntos ordinarios con una de pertenencia continua de conjuntos difusos, donde el criterio utilizado corresponde al tamaño de los activos de las instituciones financieras.

La función de pertenencia discreta (línea de puntos) puede mostrar resultados no intuitivos e imprácticos que podrían desorientar gravemente el análisis y la toma de decisiones de las autoridades financieras: i) pese a ser claramente diferentes, las instituciones A y B son vistas como no sistémicamente importantes; ii) el tamaño de la institución C, pese a no ser muy diferente del de la B, se considera como suficiente para catalogar a una institución como demasiado grande para caer, y iii) no obstante que la D es mucho más grande que la C, ambas entidades son catalogadas como igualmente importantes, en razón de su tamaño.

Gráfico 3
Tamaño de los activos como variable ordinaria y difusa



Fuente: diseño de los autores.

Por otro lado, una simple función de pertenencia continua que le aplica al riesgo sistémico el mismo criterio de demasiado grande para caer, muestra resultados más intuitivos y prácticos. La institución A es vista como no sistémicamente importante, con un grado nulo de pertenencia en el criterio de tamaño. La institución B, así como la C, en cierta medida, son sistémicamente importantes, y donde el grado de pertenencia de la B para el criterio “demasiado grande para caer” (20%) es inferior al de la C (80%). Por su lado, el tamaño de la D corresponde inequívocamente (100%) a una institución sistémicamente importante al utilizar el criterio de tamaño.

Es posible notar que la pertenencia al conjunto establecido por el tamaño no está claramente limitada, es una cuestión de grado, y queda mejor descrita mediante un conjunto difuso. Resulta sencillo aplicar la misma lógica a otros criterios como los de conectividad y sustituibilidad. Este hallazgo es bastante importante puesto que, como lo hacen notar el IMF *et al.* (2009), evaluar la importancia sistémica de una institución financiera no es una cuestión binaria.

Adicionalmente, con el fin de obtener una mayor generalidad de los resultados, así como un más alto poder explicativo, es posible emplear una mezcla de funciones de pertenencia continua para caracterizar aún más el grado de clasificación de las instituciones²⁰. De esta forma, se obtiene una metodología más aplicable al mundo real que permite explotar mejor la tolerancia de la imprecisión en el sentido de Klir y Yuan (1995). Esta combinación se presenta en el Gráfico 4.

Se emplean tres funciones de pertenencia trapezoidal con tres categorías para tamaño (bajo, mediano, alto) en lugar de usar una sola (v. g.: grande), donde el valor nominal del tamaño (mil millones de dólares, por ejemplo) se reemplaza con un índice²¹ de tamaños que va desde 0 hasta 10. Todas estas tres funciones de pertenencia trapezoidal tienen la misma forma matemática dividiendo el rango numérico del eje x en tres rangos no simétricos. Esta división produce la posibilidad de observar características superpuestas, lo cual se requiere para que exista una función global continua²².

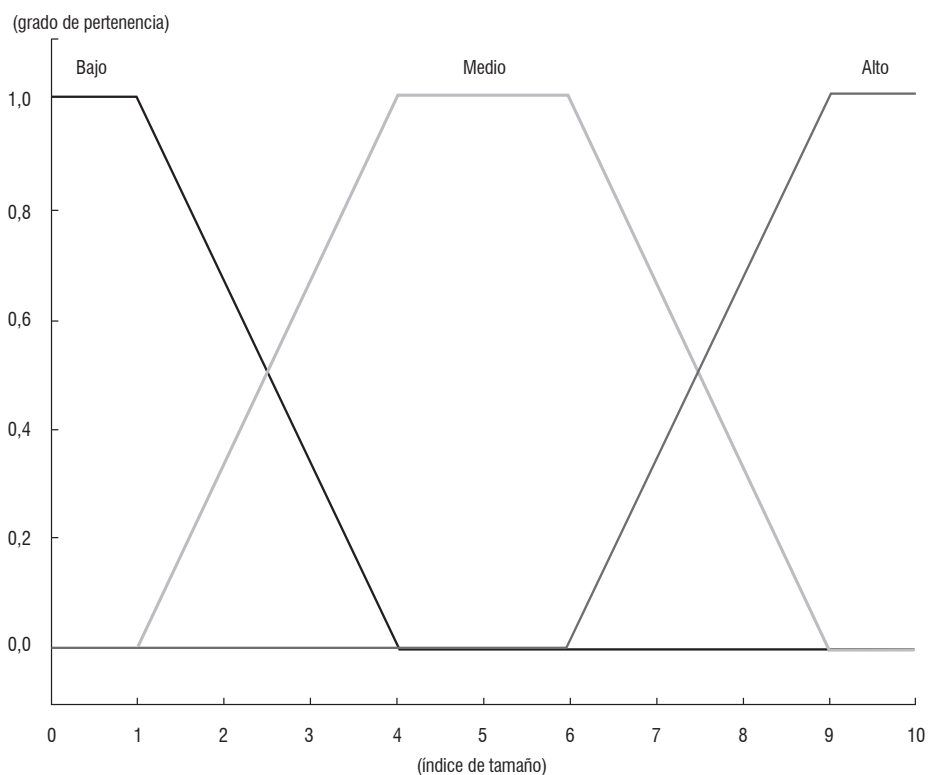
Este procedimiento, que consiste en la conversión de una cantidad determinada de categorías en una serie de conjuntos difusos apropiados mediante el uso de funciones de pertenencia, se conoce como *fuzzification* (Sivanandam *et al.*, 2007; Klir y Yuan, 1995; McNeill y Thro, 1994). Una peculiaridad interesante de este procedimiento es que los modelos lógicos difusos (*fuzzy logic models*) son raramente sensibles a la escogencia de la función de pertenencia (Cox, 1994), lo que los hace bastante robustos.

20 La escogencia de la función de pertenencia es de algún modo arbitraria, pero debe ser hecha pensando en la simplicidad, la conveniencia, la velocidad y la eficiencia (Mathworks, 2009).

21 El índice del tamaño consiste en una estandarización típica de los valores nominales del tamaño de los activos para cada institución considerada; a la mayor de ellas se le asigna un valor máximo de índice (10 en este caso) y al resto se les fija el suyo por medio de interpolación lineal. Como se explicará, esta estandarización es sencilla y facilita las comparaciones y los cálculos.

22 Cox (1994) subraya que debe prestarse especial atención a la superposición o solapamiento entre funciones de pertenencia: este es un resultado natural de la confusión o *fuzziness* y de la ambigüedad asociadas con la segmentación y clasificación de un espacio continuo.

Gráfico 4
El tamaño de los activos como variable difusa



Fuente: diseño de los autores.

En lo que concierne a la lógica empleada para evaluar proposiciones, los conjuntos ordinarios dependen de la *lógica ordinaria*, también conocida como clásica, aristotélica o booleana, la cual concibe el universo en términos de categorías estructuradas en los que un elemento es o no un miembro de un conjunto. En este caso se utilizan los operadores lógicos AND, OR y NOT, que respectivamente corresponden a conjunción, disyunción y complemento. Bajo este enfoque las proposiciones se evalúan de la forma como se ilustra en el Cuadro 3.

Cuadro 3
Operadores lógicos ordinarios

Conjunción			Disyunción			Complemento	
A	B	A y B	A	B	A o B	A	No A
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	0

Fuente: Reveiz y León (2010), basados en Mathworks (2009).

Los conjuntos ordinarios pueden considerarse como un caso particular de conjuntos difusos en los que los grados de pertenencia se ven restringidos a dos alternativas extremas (0 o 1). Como resultado, la escogencia de los operadores lógicos difusos debe poder preservar los operadores lógicos ordinarios para pertenencia bivariada, como en el Gráfico 5 y ser capaces de evaluar grados multivariados de pertenencia. Esto se logra típicamente utilizando el operador mín(.) en lugar de AND como conjunción, máx(.) en lugar de OR como disyunción y 1-(.) en lugar de NOT para complemento.

La existencia de estos operadores de lógica difusa permite desarrollar y evaluar reglas de inferencia difusa, que son aquellas que derivan verdades a partir de verdades expuestas o comprobadas (McNeill y Thro, 1994). El conjunto de reglas de inferencia difusa o de base de conocimiento que contiene el entendimiento general correspondiente al dominio del problema conecta antecedentes con acciones (Klir y Yuan, 1995). Si A y B son conjuntos difusos (*fuzzy sets*), la siguiente es la forma más simple de una regla de inferencia difusa:

si A, entonces B

Con respecto al caso que nos ocupa, con los tres criterios previamente considerados las reglas pueden verse como sigue:

Si el tamaño es [bajo / medio / alto] y...

La sustituibilidad es [baja / media / alta] y...

La conectividad es [baja / media / alta],

Entonces la importancia sistémica es...

[muy baja / baja / media baja / media alta /, alta / muy alta]

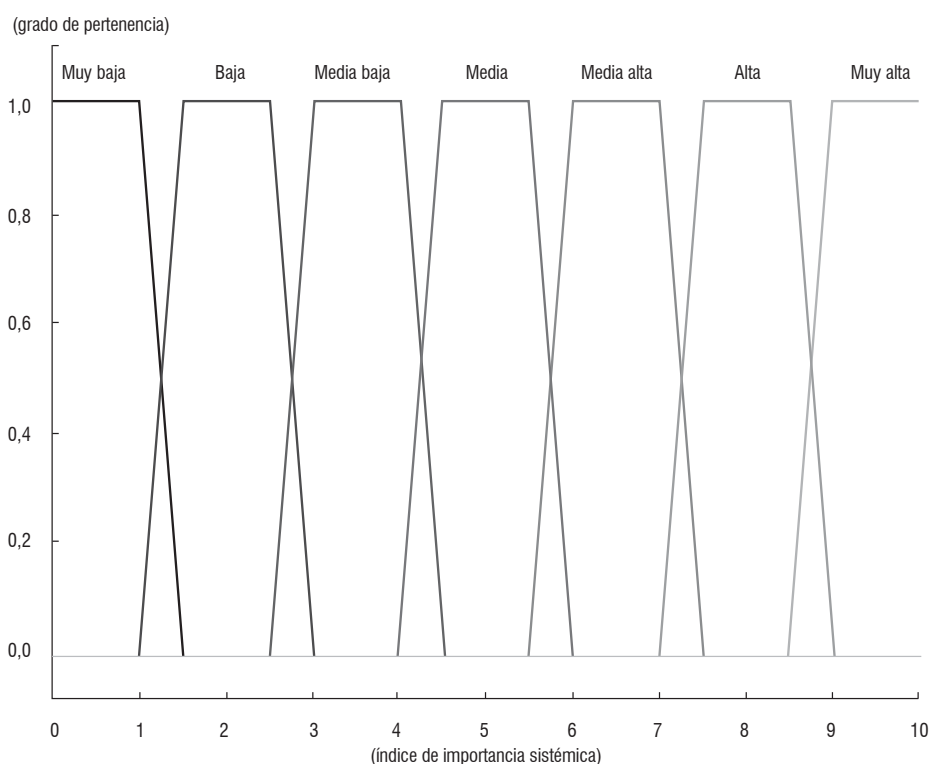
Las reglas de inferencia son el resultado de un conocimiento experto y tratan de imitar las capacidades del razonamiento humano. Cox (1994) afirma que el proceso de construir una base de conocimiento mediante el diseño de reglas de inferencia difusa obliga a los expertos a “recomponer” su conocimiento experto, lo que desemboca en un considerable beneficio proveniente de la modelación de sistemas difusos. En otras palabras, se busca codificar directamente el conocimiento en una forma muy cercana a la manera como los propios expertos piensan con respecto al proceso de decisión²³; esto se conoce comúnmente como “razonamiento aproximado” (Serrano y Seraji, 2007).

Como lo subrayan Sivanandam *et al.* (2007), la principal debilidad de un sistema de lógica difusa son sus reglas. Unas reglas “inteligentes” dan lugar a sistemas “inteligentes”. En el caso de no definir las reglas adecuadamente, se obtienen sistemas no tan inteligentes. Bojadziev y Bojadziev (2007) resaltan el papel que tienen tanto la experiencia como las nociones de los expertos cuando desarrollan la base de conocimientos, puesto que ellos son designados para establecer el objetivo del sistema.

23 Cox (1994) recalca que los sistemas expertos y de decisión convencionales fallan porque obligan a los expertos a dicotomizar nítidamente las reglas, lo que desemboca en su innecesaria multiplicación, así como en la incapacidad de articular soluciones a problemas complejos.

La evaluación de las reglas de inferencia se realiza por un motor de procesamiento de inferencia difusa, basado en los operadores lógicos difusos previamente definidos. Este motor tiene a su cargo la evaluación del grado de entrada (*input*) de la pertenencia a los conjuntos difusos de salida (*output*) de acuerdo con todas las reglas de inferencia (Gráfico 5), en las que dicha evaluación se realiza simultáneamente²⁴. Como lo muestra el Gráfico 5, en este caso el conjunto de salida consiste en una combinación de las seis funciones de pertenencia trapezoidal de importancia sistémica: [*muy baja* / *baja* / *media baja* / *media alta* / *alta* / *muy alta*]²⁵.

Gráfico 5
Importancia sistémica de una variable difusa (*fuzzy variable*)



Fuente: diseño de los autores.

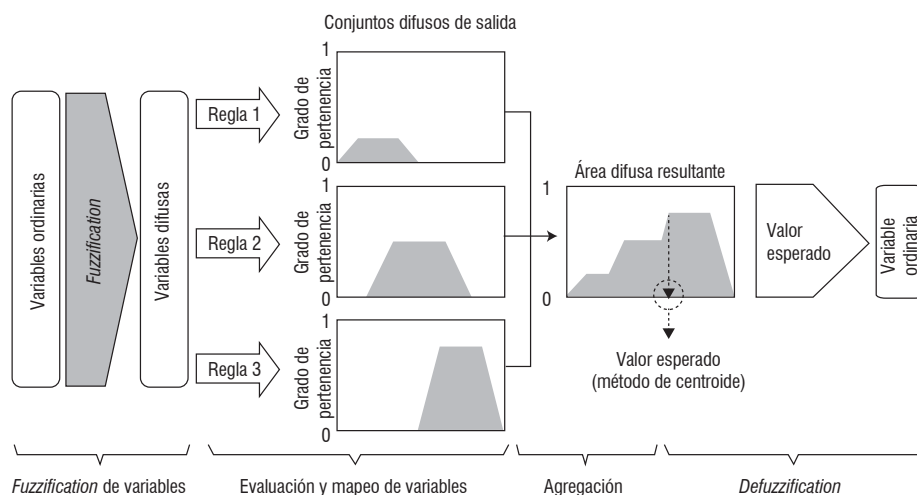
24 Según Cox (1994), la mayor diferencia entre sistemas expertos convencionales y un sistema experto difuso está en que este último permite evaluar las diferentes reglas de inferencia simultáneamente que, comparadas con la evaluación serial de los convencionales, tiene la ventaja de poder examinar todas las reglas y su impacto en el espacio de salida.

25 La escogencia del número de funciones de pertenencia (entrante y saliente) obedece a dos criterios. El primero consiste en que el número de funciones de pertenencia debe permitir una caracterización y una diferenciación detalladas de lo que es una institución sistémicamente importante. El segundo se refiere a que el número de funciones de pertenencia debe ser limitado con el fin de evitar una complejidad innecesaria para el modelo y más bien facilitar la deconstrucción del conocimiento experto. Como en el Gráfico 4, el rango del eje *x* está dividido para preservar la forma matemática de todas las funciones de pertenencia trapezoidal y obtener la característica de sobreposición o solapamiento requerido para que exista una función global continua.

Cada vez que el motor de procesamiento de la inferencia difusa evalúa un grado de pertenencia del insumo o aporte a las reglas de inferencia, mapea cada variable de solución dentro de su correspondiente conjunto de salida difuso, donde el número resultante de todos ellos coincide con el de las reglas de inferencia empleadas para evaluar las entradas.

Por ejemplo, como se ilustra en la parte izquierda del Diagrama 1, evaluar y mapear una entrada con tres reglas de inferencia resultaría en tres conjuntos de salida difusos, cuya agregación produce el área difusa resultante, la cual contiene la información del grado de pertenencia (o verdad) de las entradas (o proposiciones) luego de la evaluación simultánea de las reglas de inferencia.

Diagrama 1
Sistema de inferencia de lógica difusa



Fuente: Reveiz y León (2010).

Posteriormente, puesto que se requiere un indicador sencillo (p. e.: un índice), debe calcularse el mejor valor representativo (v. g.: el valor esperado) de la región de salida difusa. Este proceso se conoce como *defuzzification* y corresponde al cálculo del valor esperado del resultado (Cox, 1994).

Según Sivanandam *et al.* (2007), Klir y Yuan (1995) y Cox (1994), el método de *defuzzification* más utilizado es el *centroide*, conocido también como el método de centro de la gravedad o método de centro de área²⁶. Se calcula como el promedio ponderado

26 Cox (1994) destaca la consistencia del enfoque del centroide, dada su sensibilidad con respecto al alto y al ancho de la región difusa total y los moderados cambios en el valor esperado del resultado en las observaciones, comportándose de manera similar a las estimaciones bayesianas; es decir, que selecciona un valor que está apoyado por el conocimiento acumulado a partir de cada proposición ejecutada. Cox hace hincapié igualmente en que, a menos que existan razones para creer que el modelo exige un método más avanzado o especializado de *defuzzification*, debe entonces limitarse ya sea al método centroide o al del principio de max-pertenencia (*max*

de la región difusa de salida, y corresponde al punto en el eje x que la divide en dos subáreas iguales (Diagrama 1).

En este estudio el resultado de la *defuzzification* constituye un nivel de índice de importancia sistémica, como se muestra en el eje x del Diagrama 1. Este nivel de índice corresponde a una evaluación cuantitativa de la importancia sistémica de cada institución relativa, con base en sus entradas (medidas) y conocimiento experto incorporado al conjunto de reglas difusas.

Finalmente, de acuerdo con McNeill y Thro (1994), la combinación de reglas de inferencia difusa, el motor de procesamiento de la inferencia difusa (basado en operadores lógicos difusos) resulta en un sistema experto difuso. Conjuntamente, como en el Diagrama 1, el empleo de un sistema experto difuso y de la teoría de conjuntos difusos produce un sistema de inferencia de lógica difusa (FLIS).

La lógica difusa ha sido empleada exhaustivamente en el mundo real, en especial en el contexto de la ingeniería con el propósito de controlar sistemas en los que, por lo menos hasta cierto punto, la sincronización y el nivel de las entradas sean inciertos (Cruz, 2002). Entre sus aplicaciones más importantes se encuentra el diseño de *software* de la NASA para el aterrizaje autónomo, seguro y confiable de naves espaciales y la navegación de vehículos *rover* (Serrano y Seraji, 2007; Howard y Seraji, 2002 y 2000; Tunstel *et al.*, 2001; Seraji, 2000), junto con las cotidianas para la medicina, la industria automotriz, el tratamiento de aguas, el control de tráfico aéreo y terrestre, y el diseño de electrodomésticos (Sivanandam *et al.*, 2007; von Altrok, 2002 y 1996; Klir y Yuan, 1995; McNeill y Thro, 1994). Su aplicación a las finanzas y la economía se relaciona con seguros, detección de fraudes en tarjetas de crédito, análisis de riesgos crediticios, calificación de bonos y riesgo operacional (Revez y León, 2010; Bojadziev y Bojadziev, 2007; Bundesbank, 1999; McNeill y Thro, 1994).

Hasta donde sabemos, en León y Machado (2013) se encuentra el primer intento de utilización de un FLIS destinado a agregar medidas o factores de importancia sistémica dentro de un solo índice de importancia sistémica para instituciones financieras.

2.2.2 Análisis de componentes principales (PCA)

El objetivo del análisis de componentes principales (PCA) consiste en disminuir la dimensionalidad de datos altamente correlacionados, buscando un número reducido de combinaciones lineales que representen la mayor parte de la variabilidad de los datos (McNeil *et al.*, 2005). Por otro lado, como lo describen Campbell *et al.* (1997), el PCA es una técnica que permite disminuir el número de variables que estén siendo analizadas, sin perder demasiada información en la matriz de covarianza.

El caso en cuestión resulta particularmente apropiado para el uso de PCA, puesto que hay tres medidas relacionadas con la importancia sistémica para un conjunto de instituciones financieras, y se desconoce el esquema de ponderación. Por tanto, el objetivo

membership principle). Sivanandam *et al.* (2007), Klir y Yuan (1995) y Cox (1994) hacen referencia a otros métodos menos comunes.

principal consiste en construir una medida consolidada de importancia sistémica tomando en cuenta el conjunto de medidas escogido.

Si R_i representa el conjunto original de variables con dimensión $(i \times n)$ y Ω su matriz de covarianza de la muestra con dimensión $(n \times n)$, el modelo PCA emplea la descomposición espectral de la Ω positivamente semidefinida y simétrica como en (1), donde Λ corresponde a una matriz diagonal de valores propios de Ω , y Γ es una matriz ortogonal que satisface a $\Gamma\Gamma' = \Gamma\Gamma = I_n$, cuyas columnas son valores propios de Ω .

$$\Omega = \Gamma\Lambda\Gamma' \quad (1)$$

Si la matriz diagonal de valores propios (Λ) se ordena de manera que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \lambda_n$, la primera columna en Γ corresponde al vector propio de Ω . El vector propio principal (Γ_1) puede ser visto como el más esencial del sistema o como primer componente principal, el cual tiene la capacidad de explicar la mayoría del sistema subyacente, donde es posible considerar las puntuaciones ordenadas n a cada elemento como sus ponderaciones dentro de un índice. Al igual que en McNeil *et al.* (2005), el primer vector de las cargas es ponderado positivamente y puede ser considerado como si describiera alguna clase de índice.

En cuanto a la facultad explicativa del vector propio principal, es usual calcular la relación en (2) que muestra el aporte de este a la suma de los valores propios.

$$\varpi_{\lambda_1} = \frac{\lambda_1}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (2)$$

Si la combinación lineal expresada en el primer vector propio (Γ_1) puede explicar una fracción representativa de la información de la matriz de covarianza (p. e.: si $\varpi_{\lambda_1} \gg n^{-1}$), entonces resulta apropiado emplear el primer componente principal con el fin de asignar un peso apropiado a las diferentes variables. Como resultado podemos resumir en forma efectiva la información implícita de distintas características e individuos de manera lineal, donde el uso de PCA describe los componentes principales como factores dentro de un sistema (como en McNeil *et al.*, 2005).

La metodología del PCA se ha aplicado ampliamente en numerosos campos. Por lo común, el principal objetivo consiste en construir una medida agregada combinando características diferentes que pueden correlacionarse. Se enuncian con propósitos ilustrativos algunas aplicaciones relacionadas con base en PCA: la construcción de un índice para calidad de universidades internacionales (Steiner, 2006); índices de riqueza de los hogares para la India (Filmer y Pritchett, 1998); índices bursátiles (Feeney y Hester, 1964; McNeil *et al.*, 2005); un índice de historia de la calificación crediticia de préstamos otorgados por instituciones financieras a particulares en Colombia (Murcia, 2007); un índice compuesto para medir la actividad económica (FRB of Dallas, 2003); un índice de confianza del sector empresarial real para Turquía (Oral *et al.*, 2005); un índice para medir la tensión de los mercados financieros (Amol, 2010); un índice de estabilidad financiera para Colombia (Morales y Estrada, 2010) y, entre muchos otros, índices de condiciones financieras para diferentes países (Hatzius *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2011).

El enfoque del PCA ya ha sido empleado también en la literatura de riesgo sistémico. Por ejemplo, para capturar la importancia sistémica de las instituciones financieras

en los Estados Unidos, Billio *et al.* (2010) usaron esta técnica con el fin de captar la interconectividad entre los rendimientos mensuales de fondos de cobertura, bancos, corredores y seguros. Rodríguez-Moreno y Peña (2011) estudian y comparan distintas medidas de riesgos sistémicos para los bancos más grandes de Europa y los Estados Unidos. Ellos encuentran que las medidas más sencillas basadas en el análisis de componentes principales de *credit default swaps* (CDS) de los bancos y tasas interbancarias obtienen mejores resultados que otras mediciones más complejas basadas en modelos estructurales de riesgos crediticios (à la Merton, 1974), índices de obligaciones de deuda garantizadas (CDO) y sus tramos, densidades multivariadas (MD) y medidas de CoVaR. Adicionalmente, De Cadenas *et al.* (2010) utilizaron el PCA con el fin de identificar y evaluar diferentes fuentes de riesgo cuando se identifica el carácter sistémico de una entidad. Su análisis muestra que todas las instituciones consideradas contribuyen al riesgo sistémico, aunque en distinto grado, dependiendo de varios factores riesgosos como tamaño, interconexión, sustituibilidad, balance general y calidad. En Kritzman *et al.* (2011) se introduce un concepto útil denominado “relación de absorción” como una medida de fragilidad financiera. Esta relación se define como la proporción de la varianza que se explica mediante un número finito de vectores propios. En palabras de los autores (Kritzman *et al.*, 2011: 115), “un alto valor para la relación de absorción corresponde a un alto nivel de riesgo sistémico [,] puesto que implica que sus fuentes de riesgo se encuentran más unificadas [mientras que] una baja relación de absorción indica menor riesgo sistémico porque implica que las fuentes del mismo son más dispares”. Kritzman *et al.* (2011) subrayan el hecho de que los escenarios con un riesgo sistémico más alto no necesariamente conducen a depreciación en el precio de los activos o escenarios de turbulencia financiera; esto simplemente podría tratarse de un indicio de la fragilidad de mercados, puesto que hay mayor probabilidad de que un choque negativo se propague rápida y generalizadamente cuando las fuentes de riesgo se encuentran interrelacionadas.

No obstante, hasta donde sabemos, esta metodología ha sido empleada únicamente por León y Murcia (2013) para evaluar la importancia sistémica de las instituciones financieras. La idea básica consiste en combinar de manera apropiada las medidas que están asociadas con las características identificadas por la literatura como aquellas que determinan la importancia sistémica (es decir, tamaño, conectividad y sustituibilidad), para luego para construir un índice basado en el PCA, utilizando los factores de [puntuación] del componente principal. El valor del índice permitiría clasificar instituciones financieras diferentes según su importancia sistémica.

2.2.3 Cómo equilibrar los métodos de agregación

Cabe destacar tres ventajas que resultan de usar el conocimiento experto dentro del sistema de inferencia de la lógica difusa propuesto (FLIS). Para empezar, dismantelar o deconstruir tal conocimiento permite reconocer las características principales del sistema financiero analizado. Es más probable descubrir que los sistemas financieros de dos países distintos producen dos conjuntos diferentes de reglas de inferencia, incluso cuando el panel de expertos es el mismo en ambos casos. Igualmente, es normal encontrar que el mismo sistema financiero da lugar a distintos conjuntos de reglas de inferencia a lo largo

del tiempo, en los cuales la evolución del marco institucional, los participantes, los productos, los servicios y la regulación explicarían esa dinámica. Es por ello que el conocimiento experto proveniente del Banco de la República es pertinente solo para el actual caso colombiano.

En segundo lugar, a diferencia de un método de ponderación²⁷, en el que el índice agregado es el resultado de la suma ponderada lineal de todas las medidas, deconstruir el conocimiento experto permite capturar no linealidades que surgen de acumular medidas. Ésta es una característica conveniente, puesto que intuye que se espera que el impacto sistémico resultante de la fusión de dos instituciones financieras sea más alto que la suma ponderada de su importancia sistémica, lo cual difiere de lo utilizado en la teoría de portafolio, donde la suma de activos puede dar como resultado una volatilidad igual o inferior. De esta forma, agregar instituciones financieras (v. g.: sus medidas) puede llegar a desembocar en una mayor importancia sistémica.

En tercer lugar, a diferencia de un enfoque de ponderación fija donde las ponderaciones permanecen constantes para distintas combinaciones de medidas, deconstruir el conocimiento experto permite capturar efectos no lineales resultantes de combinarlas. Por ejemplo, resulta intuitivo considerar que mientras más grande o más conectada sea una institución, más importante será su grado de sustituibilidad. Dicha dimensión puede no ser un factor significativo cuando el aporte de la institución al sistema de pagos sea bajo, pero puede llegar a ser decisiva cuando tal contribución es alta. De esta forma, un enfoque de ponderación simple puede ignorar este tipo de no linealidades, las cuales se pueden capturar deconstruyendo el juicio de los expertos.

En general, estas tres ventajas permiten que el FLIS propuesto facilite un marco cuantitativo (por medio de *fuzzification* y *defuzzification*), con el fin de agregar intuitiva y no linealmente las medidas de cada institución financiera (es decir, el aporte cuantitativo) con base en los criterios de los expertos (el aporte cualitativo). Por tanto, a diferencia de emplear el conocimiento experto o métodos cuantitativos estándar con el fin de determinar “el conjunto apropiado de ponderaciones” para agregar cada métrica, esta propuesta está más cerca de capturar la complejidad estática (Casti, 1979) que emerge de la relación existente entre las medidas que interactúan y la importancia sistémica (es decir, que el *output* o resultado de salida es una función compleja del *input* o insumo).

Sin embargo, pese a las ventajas del FLIS, la importancia de cada variable de entrada o métrica no es comprobada (se sustenta en el conocimiento experto), y la ponderación asignada a cada una no es observable. El método de agregación del PCA supera algunas de estas limitaciones, como se explica a continuación:

Primero, por medio de construcción, el mayor componente principal (Γ_1) provee un conjunto de valores para cada métrica de importancia sistémica, lo que permite observar las ponderaciones que el método le asigna a cada una dentro de un marco de agregación

27 El documento de BCBS (2013) sugiere un enfoque de ponderación arbitraria, igual y fija (es decir, cinco medidas asignándole a cada una ponderación de 20%). Además de no poder capturar no linealidades surgidas de combinar medidas, esta propuesta puede llegar a ser muy simplista, pues no queda claro si todos los criterios son igualmente importantes para todos los mercados o en todo momento. Como se sugiere en IMF *et al.* (2009), en cualquier evaluación de importancia sistémica se requiere un alto grado de valoración fundamentada en un conocimiento detallado del funcionamiento del sistema financiero.

lineal. Esto puede ser importante, puesto que una ponderación particularmente baja en el mayor componente principal es capaz de revelar la redundancia o la falta de importancia de la métrica correspondiente, información que no se obtiene por el método del FLIS.

En segundo lugar, el aporte del primer componente principal o primer valor propio (ϖ_{λ_1}) facilita una medida de su facultad explicativa, lo cual permite evaluar cuantitativamente la idoneidad de este método de agregación. Vale la pena recordar que el método de agregación del FLIS no revela esta clase de información.

En tercer lugar, según Kritzman *et al.* (2011), el aporte del primer valor propio (ϖ_{λ_1}) puede facilitar información adicional con respecto a la manera como las medidas de importancia sistémica van juntas dentro de las instituciones financieras consideradas; es decir, que el PCA puede llegar a señalar si en unas pocas entidades se concentran altos niveles de medidas individuales de importancia sistémica. Esta puede ser una estadística a la que vale la pena hacerle un seguimiento en el tiempo con fines de estabilidad financiera, y constituye una clara ventaja del PCA sobre el FLIS.

Ambos métodos de agregación comparten una ventaja común al compararlos con la propuesta de BCBS (2013), pues evitan apoyarse y depender de un esquema arbitrario, homogéneo y de ponderaciones fijas. Finalmente, debido a su distinto marco metodológico y (des)ventajas relacionadas, se espera que ambos métodos faciliten una visión complementaria del problema de la agregación de las medidas de importancia sistémica.

3. EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA SISTÉMICA

Esta sección presenta los resultados de implementar las medidas y los métodos de agregación propuestos. Primero, se describen brevemente los datos y los procedimientos y después se muestran los resultados para cada método de agregación.

3.1 Datos y procedimientos

Se utilizan los datos a junio de 2013 provenientes del sistema de liquidación de títulos del Gobierno (Depósito Central de Valores: DCV) y del sistema de pagos de alto valor (Cuenta de Depósitos: CUD), junto con la información de los estados financieros reportados a la Superintendencia Financiera de Colombia²⁸. Un mes es una muestra conveniente, puesto que promedia particularidades indeseables típicas de los datos diarios, en tanto que permite evaluaciones periódicas que coinciden con la divulgación característica de los estados financieros. Durante el período elegido 125 instituciones financieras se analizaron y quedaron clasificadas, como se ve en el Cuadro 4.

28 Desde junio de 2013 se ha ido actualizando este ejercicio cada semestre con similares resultados cuantitativos y analíticos.

Cuadro 4
Principales instituciones financieras colombianas (a junio de 2013)^{a/}

Clase	Tipo de institución	Objeto principal ^{b/}
Instituciones no bancarias	Establecimientos de crédito (C) ^{c/}	Comprende bancos comerciales (i. e.: provisión de depósito y préstamos, incluyendo hipotecas), corporaciones financieras (v. g.: enfocados en financiación industrial a mediano plazo, al modo de un banco de inversiones) y compañías de financiación (provisión de depósitos y préstamos centrados en la comercialización de bienes y servicios) [50].
	Fondos de inversión (F)	Provisión de vehículos de inversión con el objeto de invertir en títulos valores y otros activos, de acuerdo con el perfil de riesgos del inversionista [27].
	Sociedades comisionistas de bolsa (K)	Provisión de servicios de corretaje o intermediación con el objeto de comprar y vender títulos valores (como acciones, bonos y divisas, por ejemplo); con permiso para comerciar por su propia cuenta (en posición propia) [25].
	Administradores de fondos de pensiones (P)	Provisión de vehículos de inversión con el objeto de invertir para la jubilación [5].
	Otras ^{d/} (O)	Compañías de seguros, cooperativas financieras y otras [18].

a/ En este cuadro se excluyen el Banco de la República, el Ministerio de Hacienda y Crédito Público y las instituciones financieras oficiales.

b/ Únicamente aparece la principal característica diferenciadora; el número de instituciones a junio de 2013 figura entre corchetes.

c/ Las cooperativas financieras son instituciones crediticias (C), pero, debido a su pobre contribución a las medidas consideradas, se incluyeron en la clase "Otros". Las C son las únicas instituciones capaces de recibir liquidez de préstamos de último recurso.

d/ La clase "Otros" reúne instituciones financieras caracterizadas por su particularmente baja (o nula) relevancia para los indicadores clave de importancia sistémica.

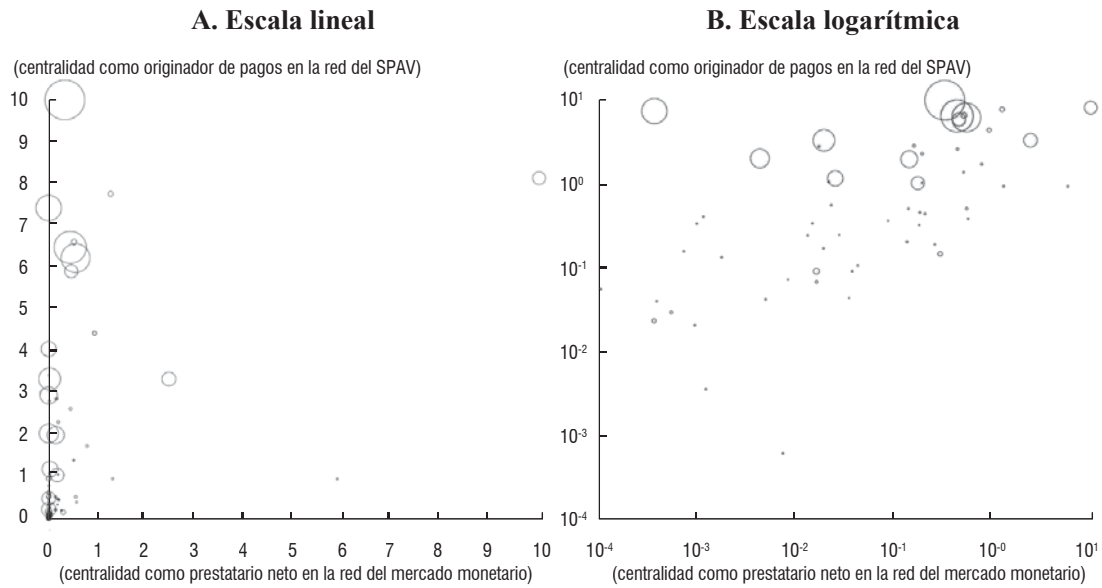
Fuente: diseño de los autores.

Se calcularon las tres medidas de importancia sistémica para cada una de las instituciones financieras consideradas. En lugar de emplear las unidades originales (p. e.: ponderaciones o porcentajes) se designaron índices de 0 a 10. Por ejemplo, el índice de tamaño consiste en una estandarización típica de los valores nominales de los activos ajustados para cada institución considerada, donde a la más grande se le asigna el máximo valor (10 en este caso) y al resto se les fija uno mediante interpolación lineal. Dicha estandarización facilita las comparaciones y los cálculos. Cabe destacar que las evaluaciones realizadas con los valores obtenidos para las diferentes características junto con el índice agregado de importancia sistémica no son medidas absolutas sino relativas para determinar la importancia sistémica de las instituciones financieras.

El Gráfico 6 presenta un diagrama de dispersión que contiene las tres medidas individuales para todas las instituciones financieras consideradas. Para una mejor visualización se despliegan dos escalas: una lineal y otra logarítmica. El eje horizontal corresponde a la

primera métrica (v. g.: la centralidad como prestatario neto en la red del mercado monetario), cuyo valor es estandarizado, tal como se estableció previamente; el eje vertical corresponde a la segunda métrica (la centralidad como originador de pagos en la red LVPS); en tanto que el diámetro de cada círculo representa el valor de activos de los servicios financieros centrales.

Gráfico 6
Medidas de importancia sistémica



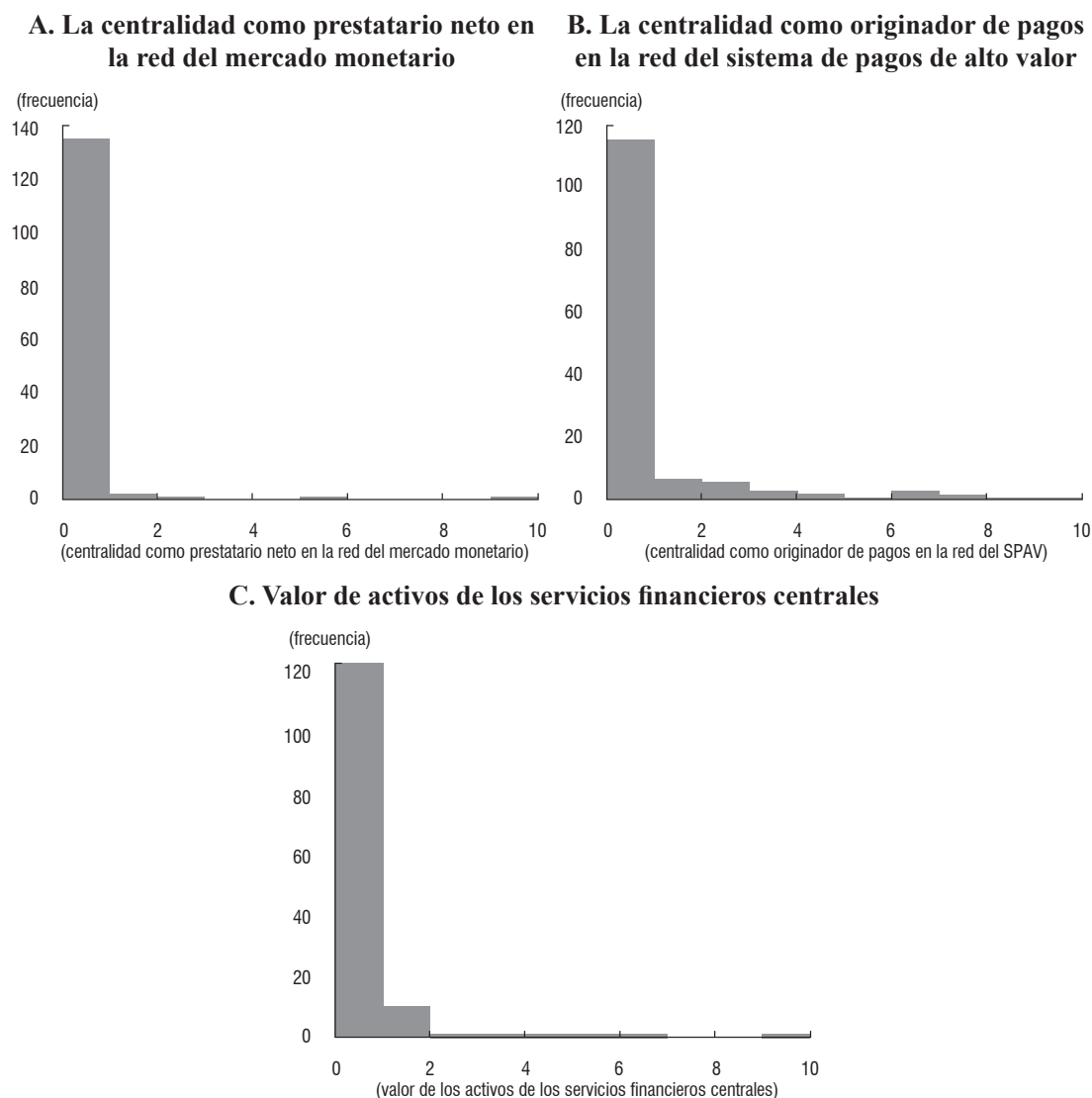
Fuente: cálculos de los autores.

Es interesante notar que, afín con la literatura sobre redes financieras, las dos primeras medidas despliegan distribuciones sesgadas en las que es evidente que solo en unas pocas instituciones financieras se concentra casi toda la importancia sistémica, mientras que dicho valor es bajo en un número considerable de entidades (Gráfico 7). Igualmente, la métrica correspondiente al tamaño de las instituciones financieras exhibe también una distribución sesgada.

Además, no solamente la distribución de las medidas de importancia sistémica es sesgada, sino que se aproxima un tipo de distribución particular: la ley potencial. La distribución de la ley de potencia (o de Pareto) sugiere que la probabilidad de ver una institución financiera con tamaño k obedece a la forma funcional en (3), donde z corresponde a una constante arbitraria y γ se conoce como el exponente de la ley de potencia.

$$P_k \propto z k^{-\gamma} \tag{3}$$

Gráfico 7
Distribución de las medidas de importancia sistémica



Fuente: cálculos de los autores.

De acuerdo con la literatura relacionada (Taleb, 2007; Mandelbrot y Hudson, 2004; Peak y Frame, 1994) los valores que oscilan entre $1 \leq \gamma \leq 3$ son típicos de las distribuciones sin escala, donde una primera regla general es $\gamma \sim 3/2$, tomando como referencia los hallazgos de Pareto concernientes a la distribución de la riqueza²⁹. Con base en el algoritmo

29 Otros exponentes típicos son los de Zipf para el empleo de palabras en la literatura ($\gamma \sim 1$) y Mandelbrot para precios del algodón ($\gamma \sim 1,7$). Por otra parte, con respecto a la distribución de las conexiones en las redes del mundo real, Newman (2010) sugiere que los exponentes en la escala $2 \leq \gamma \leq 3$ son típicos, aunque los valores ligeramente por fuera de ella son posibles y se observan ocasionalmente.

diseñado por Clauset *et al.* (2009), los exponentes resultantes de ajustar la ley potencial a las tres medidas presentadas en el Gráfico 7 son 1,90, 1,92 y 2,46 respectivamente³⁰. Tales exponentes corresponden a distribuciones en las que la mayoría de las observaciones presentan valores bajos (por ejemplo: poca importancia, baja intensidad, bajo impacto, pequeño tamaño), mientras que unas pocas exhiben cifras altas. En el presente caso, por ejemplo, esta distribución señala que pocas instituciones financieras son grandes y la gran mayoría son pequeñas.

En este sentido, y según Bak (1996), puesto que no existe un tamaño típico de institución financiera que pueda describir la distribución total a cualquier escala (como si fuera de tipo gaussiano), ella también es mencionada como libre de escala o sin escala, lo que significa que coexisten instituciones financieras sumamente diferentes. Más aún, el carácter de libre de escala invalida análisis basados en la existencia de una institución financiera promedio o típica, o que suponen dotaciones homogéneas. Coincidente con un creciente volumen de literatura de distintas ciencias (como física, biología, economía e ingeniería, por ejemplo), encontrar una distribución libre de escala constituye una muestra distintiva evidente de sistemas que se autoorganizan (León y Berndsen, 2013; Andriani y McKelvey, 2009; Dorogovtsev *et al.*, 2003; Strogatz, 2003; Barabási, 2003; Barabási y Albert, 1999; Bak, 1996; Krugman, 1996). Además, la índole de libre de escala de las tres medidas no solamente sugiere que el sistema financiero exhibe rasgos autoorganizativos, sino que se ha configurado a sí mismo con una estructura que, aunque sólida, puede ser a la vez frágil. Este tipo de autoorganización se menciona como criticidad autoorganizativa (Bak, 1996), y coincide con la caracterización (Haldane, 2009) de la actual red financiera internacional: *robust yet fragile* (sólida, aunque frágil)³¹.

Las tres medidas estandarizadas resultantes o índices individuales han servido como insumo para cada uno de los dos métodos de agregación. En el caso del FLIS, como se estableció previamente, cada índice estandarizado (es decir, de 0 a 10) se usa para definir el grado de pertenencia o afiliación de cada institución financiera a las categorías disponibles (ej. *bajo, medio, alto*) y, fundamentado en las reglas de inferencia (la base del conocimiento experto) y los operadores lógicos difusos, el método de agregación mostró un índice agregado de importancia sistémica que se ha estandarizado dentro de una escala de 0 a 10. Aquí, este (iFLIS) corresponde a una apreciación cuantitativa del índice de importancia sistémica esperada basado en la evaluación simultánea de la combinación particular de medidas individuales de cada institución y su total incidencia sistémica resultante, de acuerdo con la información suministrada por los expertos.

El Gráfico 8 presenta tres módulos de intensidad, correspondientes a la combinación de las tres medidas. Cada una de ellas puede considerarse como una representación del conocimiento experto relativo a cómo dos medidas (en el eje) dan como resultado distintos

30 El método más simple para estimar el exponente de la ley de potencia (α) consiste en una regresión de mínimos cuadrados ordinarios (*ordinary least squares*: OLS). Sin embargo, como lo subrayan Clauset *et al.* (2009), el ajuste mediante OLS puede llegar a ser inexacto, debido a grandes fluctuaciones en la parte más relevante de la distribución (v. g.: la cola), donde puede ser más apropiado el uso de métodos de máxima verosimilitud (*maximum likelihood*: MLE).

31 León y Berndsen (2013) presentan un análisis exhaustivo del carácter libre de escala y autoorganizativo de las redes financieras colombianas.

grados de importancia sistémica (v. g.: la intensidad), manteniéndose constante la tercera (no visualizada) en un valor de 5 (columna izquierda del Gráfico 8) y en un valor de 8 (columna derecha).

Gráfico 8
El conocimiento experto como gráficas o representaciones de intensidad

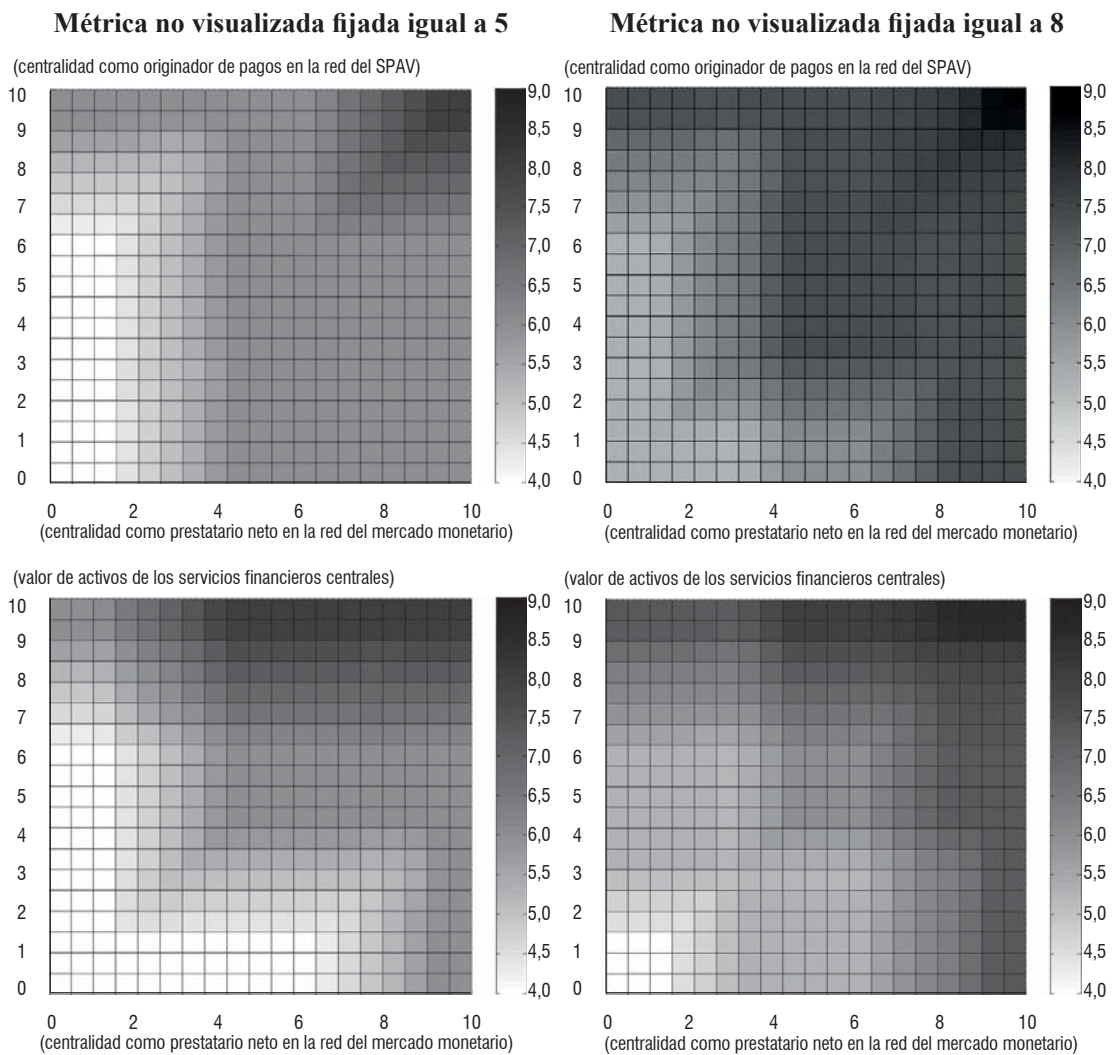
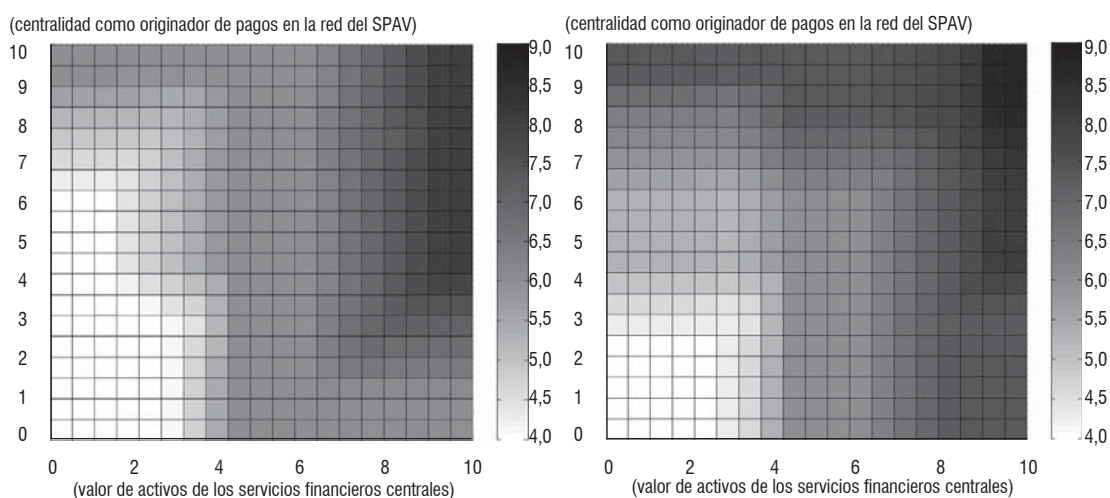


Gráfico 8 (continuación)**El conocimiento experto como gráficas o representaciones de intensidad**

Fuente: cálculos de los autores.

Las representaciones de intensidad en el Gráfico 8 revelan que los expertos encuentran que pocas combinaciones de la centralidad de distribución del sistema de pagos de alto valor y la centralidad de distribución de la exposición neta del mercado monetario (primera fila del Gráfico 8) muestran niveles de importancia sistémica que puedan considerarse como críticos (como $iFLIS \geq 8$); es decir, que si el valor de activos de los servicios financieros centrales fuera fijado en los dos niveles (5 y 8, por ejemplo), surgiría una alta importancia sistémica únicamente con niveles muy altos de centralidad de distribución en el mercado monetario y en los sistemas de pagos.

Por otra parte, los expertos encuestados opinan que el valor de activos de los servicios financieros centrales es innegablemente crucial para determinar la importancia sistémica; los dos gráficos que implican activos ajustados (segunda y tercera filas del Gráfico 8) exhiben áreas más grandes (es decir, más combinaciones) en las que la importancia sistémica puede considerarse como crítica (v. g.: $iFLIS \geq 8$) para un determinado nivel de las otras medidas (no visualizadas).

No obstante, los módulos del Gráfico 8 proveen una visión limitada de la opinión de los expertos. Es claro que se están dejando por fuera numerosas combinaciones posibles porque se han empleado, con fines ilustrativos, únicamente dos niveles de la métrica no desplegada. La existencia de muchos otros niveles de la misma obstaculiza la forma como los expertos juzgan todas las combinaciones posibles de las medidas consideradas.

En el caso del PCA se utilizaron tres índices estandarizados para estimar la matriz de covarianza (Ω) y realizar los cálculos en (1). Los puntajes resultantes se escalaron (es decir, se elevaron al cuadrado) para obtener valores que entre sí sumen 1 y que de esta forma puedan considerarse como ponderaciones con un índice de agregación lineal. Si \mathcal{A} , \mathcal{B} y \mathcal{C} representan la centralidad como prestatario neto en el mercado monetario, la centralidad como originador de pagos en la red del sistema de pagos de alto valor y el valor

de activos de las medidas de los servicios financieros centrales para una institución financiera, respectivamente, el indicador de importancia sistémica del PCA (iPCA) será calculado como el valor estandarizado (p. e.: en una escala de 0 a 10) de la siguiente expresión lineal:

$$iPCA_x = 0,1525 \times \mathcal{A}_x + 0,4770 \times \mathcal{B}_x + 0,3704 \times \mathcal{C}_x \quad (4)$$

donde

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0,3906 & 0,8657 & -0,3131 \\ 0,6907 & -0,0507 & 0,7214 \\ 0,6086 & -0,4980 & -0,6177 \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1,8588 & 0 & 0 \\ 0 & -0,9281 & 0 \\ 0 & 0 & -0,2131 \end{bmatrix}$$

y

$$\varpi_{\lambda_1} = 0,6196$$

Puesto que ϖ_{λ_1} es suficientemente alto ($\varpi_{\lambda_1} > 0,5$), resulta adecuado emplear el modelo PCA como en (4), ya que el sistema lineal diseñado captura el 62% de la información en la matriz de covarianza. Asimismo, el nivel alcanzado por ϖ_{λ_1} sugiere que unas pocas instituciones financieras concentran altos niveles de medidas individuales de importancia sistémica. Como se estableció previamente, esta puede llegar a ser una estadística que merece un seguimiento con fines de estabilidad financiera.

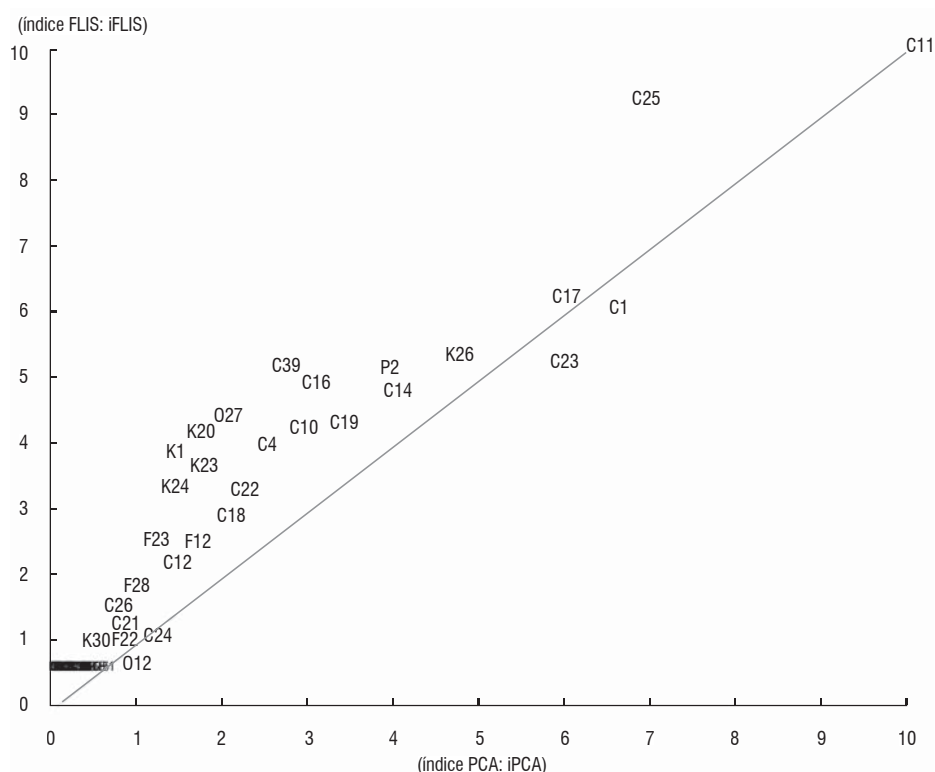
En lo concerniente a Γ_1 , como es evidente en la expresión lineal del iPCA, la métrica principal es la centralidad como originador de pagos en la red del sistema de pagos de alto valor, que tiene un puntaje (peso) de 0,6907 (0,4770), seguida por el valor de activos de los servicios financieros centrales y la centralidad como prestatario neto en la red del mercado monetario.

Lo más interesante, según las bases de la partición espectral (Kolaczyk 2009; Straffin, 1980), tanto los signos como las diferencias absolutas entre los elementos del segundo *eigenvector* (Γ_2) sugieren que allí existe un cierto grado de cercanía lineal de segundo orden entre el valor de activos de los servicios financieros de las instituciones financieras y la centralidad como originador de pagos en la red del sistema de pagos de alto valor; es decir, que hay algún grado de correspondencia entre ser grande y ser central en dicho sistema, en tanto que ser central como prestatario neto en el mercado monetario parece no estar relacionado con las otras dos categorías. No obstante, como los puntajes y las ponderaciones son significativos (v. g.: $>> 0$), ambas medidas son no redundantes y continúan siendo informativas para el sistema lineal en [4].

3.2 Principales resultados

El Gráfico 9 presenta una comparación de los resultados utilizando los dos métodos de agregación. Cada institución financiera se identifica con una letra que corresponde a su tipo (como en el Cuadro 4), junto con un número de etiqueta, y se representa en un plano cartesiano en el que el eje horizontal corresponde al índice PCA (iPCA), y el vertical corresponde al índice FLIS (iFLIS). Las instituciones financieras localizadas sobre la diagonal reciben el mismo índice de importancia sistémica a partir de ambos métodos de agregación, en tanto que los situados por encima (por debajo) de ella corresponden a casos en los que el índice iFLIS (iPCA) es más alto. Vale la pena subrayar que ambos índices facilitan realizar una evaluación relativa de la importancia sistémica de cada institución. De esta forma, un valor del índice igual a cero para una entidad en particular no debe interpretarse como una carencia absoluta de importancia sistémica para esa institución, sino de una importancia relativa insignificante con respecto a la institución más sistémica.

Gráfico 9
Índice de importancia sistémica (a junio de 2013)

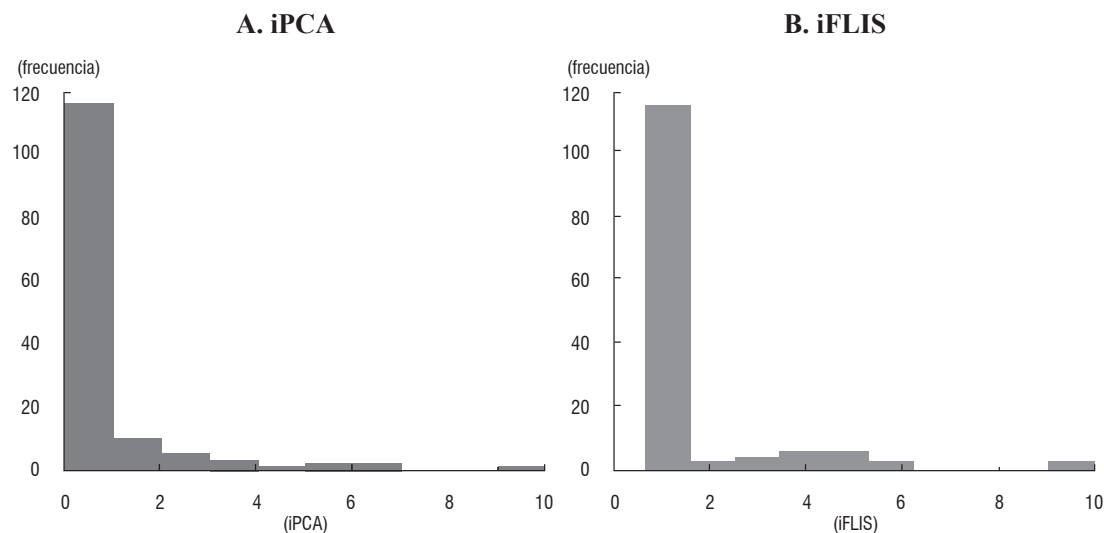


Ambos índices coinciden en que C11 y C25 son las dos instituciones financieras más importantes sistémicamente en el mercado financiero local. También concuerdan en el predominio de las instituciones crediticias (C) como el tipo de entidad financiera con mayor probabilidad de desplegar altos niveles de importancia sistémica de acuerdo con la escala de 0 a 10. Por otra parte, ambos índices coinciden en cuanto a las seis principales instituciones financieras (i. e.: C11, C25, C1, C17, C23, K26), a pesar de que el ordenamiento entre las mismas es distinto. Existen diferencias relevantes entre los índices para las entidades clasificadas más allá del sexto lugar.

Las dos primeras entidades no bancarias que aparecen en ambos índices son la K26 y la P2, que corresponden a una sociedad comisionista de bolsa y a una administradora de un fondo de pensiones, respectivamente. Por debajo de la marca 5, ambos índices exhiben una mezcla heterogénea de instituciones financieras, siendo las crediticias (C) y las firmas comisionistas de bolsa (K) las que despliegan más altas cifras de importancia sistémica, y donde los fondos de inversión (F) muestran puntajes por debajo de 3.

Una característica importante de ambos índices es su alto nivel de asimetría o *skewness* (Gráfico 10). Únicamente un grupo de instituciones financieras tiene índices por encima de 5; 4 para el iFLIS, y 5 para el iPCA. Alrededor del 95% de ellas presenta índices por debajo de 5, mientras que cerca del 83% están por debajo de 2. El iPCA y el iFLIS promedio es 0,66 y 1,33, respectivamente.

Gráfico 10
Distribución del índice de importancia sistémica
(a junio de 2013)



Fuente: cálculos de los autores.

La distribución sesgada de la importancia sistémica, en la cual la de la institución promedio es baja, confirma que analizar la importancia sistémica tomando como base una institución promedio desviaría a las autoridades financieras de su objetivo de preservar la estabilidad financiera. Por otra parte, este hallazgo subraya aún más la relevancia de iden-

tificar técnicamente las instituciones financieras sistémicamente importantes, así como los peligros relacionados al suponer la presencia de entidades homogéneas para modelar el riesgo de contagio (como en Allen y Gale, 2000; Freixas *et al.*, 2000).

4. OBSERVACIONES FINALES

Este documento presenta dos propuestas en torno a cómo lidiar con ciertos desafíos comunes en la evaluación de la importancia sistémica de las instituciones financieras. Estos desafíos consisten en diseñar adecuadamente medidas capaces de capturar el tamaño, la conectividad y la sustituibilidad de las entidades y, por otra parte, elegir un método de agregación apropiado para esas medidas. En particular, primero se plantea emplear tres medidas de importancia sistémica: i) la centralidad como prestatario neto en la red del mercado monetario; ii) la centralidad como originador de pagos en la red del sistema de pagos de alto valor y iii) el valor de activos de los servicios financieros. Segundo, se propone sumar las tres medidas con dos enfoques diferentes: uno que utiliza lógica difusa y el segundo que consiste en aplicar un análisis de componentes principales. De manera conjunta estas dos propuestas contribuyen a evaluar la importancia sistémica desde una perspectiva macroprudencial.

A pesar de sus distintos aspectos y bases metodológicas, ambos métodos de agregación (FLIS y PCA) muestran índices que coinciden en varios rasgos: i) la clasificación y la lejanía relativa de las dos principales instituciones financieras más importantes sistémicamente; ii) el predominio de los establecimientos de crédito como el tipo de entidad financiera con mayores probabilidades de exhibir altos niveles de importancia sistémica; iii) de las seis instituciones financieras más importantes sistémicamente, hay cinco establecimientos de crédito y una sociedad comisionista de bolsa, y iv) el carácter sesgado de los índices de importancia sistémica que corresponde a la naturaleza igualmente sesgada de las tres medidas y de su distribución aproximada libre de escala (v. g.: ley de potencia). Las mayores divergencias entre ambos índices surgen al evaluar la importancia sistémica de instituciones financieras no clasificadas en los primeros lugares.

Los dos índices proporcionan a las autoridades financieras la capacidad de adquirir una apreciación relativa muy completa de la importancia sistémica de cada institución. Estos índices pueden ayudar a las autoridades a concentrar su atención y a enfocar sus recursos (v. g.: intensidad del seguimiento, la supervisión y la regulación) donde se estime que la gravedad sistémica resultante de una institución que está fallando o a punto de fallar es mayor. Más aún, los dos índices pueden llegar a servir como insumo en la adopción de políticas y en la toma de decisiones (tales como resolver, reestructurar o proveer liquidez de emergencia, por ejemplo).

No obstante, es importante resaltar que las metodologías e indicadores acá planteados no corresponden de ninguna forma a un sustituto de las herramientas de seguimiento y al buen discernimiento de las autoridades financieras, ni tampoco pueden usarse aisladamente para evaluar la importancia sistémica de una institución financiera. Se considera que los dos índices proporcionan medidas relativas valiosas y novedosas para que la importancia sistémica de las diferentes entidades sea evaluada por dichas autoridades, lo que complementa de manera adecuada los métodos ya existentes (BCBS, 2013).

Vale la pena resaltar algunos aspectos no contemplados en este documento. Primero, tal como lo plantean León y Machado (2013), considerar los vínculos que son generados por la propiedad de las entidades puede enriquecer la evaluación de las instituciones financieras sistémicas, al reconocer la existencia de conglomerados dentro del sistema financiero. En segundo lugar, a las autoridades financieras puede resultarles interesante definir un umbral de los indicadores para considerar que una entidad sea en efecto sistémicamente importante; no obstante, esta tarea puede resultar muy compleja. Adicionalmente, se deben tener en cuenta diferentes aspectos, como por ejemplo, el propósito para definir un umbral (v. g.: si se busca determinar una exigencia de capital o decidir a qué instituciones se debe realizar un seguimiento más especializado), así como la asimetría en la distribución de los índices encontrados. Finalmente, al considerar el aporte del primer valor propio como medida del grado en que las diferentes medidas de importancia sistémica se acoplan unas con otras, se podría considerar analizar el comportamiento de este indicador con el fin de proporcionar algunas ideas con respecto a la evolución del riesgo sistémico en el tiempo.

REFERENCIAS

- Allen, F.; Babus, A. (2008), “Networks in Finance”, Working Paper, núm. 08-07, Wharton Financial Institutions Center.
- Allen, F.; Gale, D. (2000). “Financial Contagion”, *Journal of Political Economy*, vol. 108, núm. 1, pp. 1-33.
- Amol, A. (2010). “St. Louis Fed’s Financial Stress Index”, Federal Reserve Bank of St. Louis, Appendix, enero.
- Andriani, P.; McKelvey, B. (2009). “From Gaussian to Paretian thinking: causes and Implications of power laws in organizations”, *Organization Science*, núm. 6, vol. 20, pp. 1053-1071.
- Bak, P. (1996). *How Nature Works*, New York: Copernicus.
- Barabási, A.-L. (2003). *Linked*, New York: Plume.
- Barabási, A.-L.; Albert, R. (1999). “Emergence of Scaling in Random Networks”, *Science*, vol. 286, October, pp. 509-512.
- Basel Committee on Banking Supervision (2011). *Global Systemically Important Banks: Assessment Methodology and the Additional Loss Absorbency Requirement (Consultative Report)*, Bank for International Settlements, julio.
- Basel Committee on Banking Supervision (2013). *Global Systemically Important Banks: Updated Assessment Methodology and the Higher Loss Absorbency Requirement*, Bank for International Settlements, julio.
- Bech, M.; Garrat, R. (2006). “Illiquidity in the Interbank Payment System Following Wide-Scale Disruptions”, Staff Report, núm.239, Federal Reserve Bank of New York, marzo.
- Billio, M.; Getmansky, M.; Lo, A.; Pelizzon, L. (2010). “Econometric Measures of Systemic Risk in the Finance and Insurance Sectors”, working paper, núm. 16223, National Bureau of Economic Research.

- Bjelland, J.; Canright, G.; Engo-Mønsen, K. (2008). "Web Link Analysis: Estimating Document's Importance from its Context", *Teletronikk*, núm.1, pp. 95-113.
- Bojadziev, G.; Bojadziev, M. (2007). *Fuzzy Logic for Business, Finance and Management, Advances in Fuzzy Systems: Applications and Theory* Singapur: World Scientific (segunda edición).
- Borio, C. (2003). "Towards a Macroprudential Framework for Financial Supervision and Regulation", working papers, núm. 128, Bank for International Settlements (BIS), febrero.
- Brunnermeier, M.; Crocket, A.; Goodhart, C.; Persaud, A.D.; Shin, H. (2009). *The Fundamental Principles of Financial Regulation, International Center for Monetary and Banking Studies, Centre for Economic Policy Research (CEPR)*, enero.
- Bundesbank (1999). "The Bundesbank's Method of Assessing the Creditworthiness of Business Enterprises", *Deutsche Bundesbank Monthly Report*, enero.
- Campbell, J.; Lo, A.; Mackinlay, A. C. (1997). *The Econometrics of Financial Markets*, Princeton: Princeton University Press.
- Cardozo, P.; Huertas, C.; Parra, J.; Patiño, L. (2011), "Mercado interbancario colombiano y manejo de liquidez del Banco de la República", Borradores de Economía, núm. 673, Banco de la República.
- Casti, J. L. (1979). *Connectivity, Complexity and Catastrophe in Large-Scale Systems*, Chichester: John Wiley & Sons.
- Cepeda, F. (2008). "La topología de redes como herramienta de seguimiento en el sistema de pagos de alto valor en Colombia", Borradores de Economía, núm. 513, Banco de la República.
- Chan-Lau, J. (2010). "Balance Sheet Network Analysis of Too-connected-to-fail Risk in Global and Domestic Banking Systems", working paper, núm. WP/10/107, International Monetary Fund, abril.
- Clark, J. (2010). "Too-Networked-to-Fail", en *Risk: Risk Management, Derivatives, Structured Products*, Southwick: Incisive Financial Publishing.
- Clauset, A.; Shalizi, C. R.; Newman, M. E. J. (2009). "Power-Law Distributions in Empirical Data", *SIAM Review*, núm. 4, vol. 51, pp. 661-703.
- Committee on Payment and Settlement Systems and International Organization of Securities Commissions (2011). *Principles for Financial Market Infrastructures (Consultative Report)*, Bank for International Settlements, marzo.
- Committee on Payment and Settlement Systems and International Organization of Securities Commissions (2012). *Principles for financial market infrastructures*, Bank for International Settlements, April.
- Condamin, L.; Louisot, J-P.; Naim, P. (2006). *Risk Quantification: Management, Diagnosis and Hedging*, Chichester: John Wiley & Sons.
- Cox, E. (1994). *The Fuzzy Systems Handbook*, San Diego: AP Professional.
- Cruz, M. (2002). *Modeling, Measuring and Hedging Operational Risk*, Chichester: John Wiley & Sons.
- De Cadenas, G.; de Mesa, L.; Sanchis, A. (2010). "Systemic Risk, an Empirical Approach, *Colección de Estudios*, núm.17", Banco Santander: Fundación de Estudios de Economía Aplicada.

- Dorogovtsev, S.N.; Goltsev, A.V.; Mendes, J.F.F. (2002). “Pseudofractal scale-free web”, *Physical Review*, núm.65.
- Dowd, K. (2005). *Measuring Market Risk*, John Wiley & Sons.
- Dudley, W.C. (2012). “Reforming the OTC Market”, en Remarks at the Harvard Law School’s Symposium on Building the Financial System of the 21st Century, Armonk, New York, marzo.
- European Central Bank (2010). *Financial Stability Review*, junio.
- Federal Reserve Bank of Dallas (2003). “Composite Index: A New Measure of El Paso’s Economy”, Federal Reserve Bank of Dallas-El Paso Branch, Issue 1.
- Feeney, G.; Hester, D. (1964). “Stock Market Indices: A Principal Components Analysis”, Cowles Foundation’s Discussion Papers, núm. 175, Cowles Foundation, Yale University.
- Filmer, D.; Pritchett, L. (1998). “Estimating Wealth Effects without Income or Expenditure Data—or Tears: Educational Enrollment in India”, Policy Research Working Paper, núm.1994, Development Economics Research Group (DECRG), The World Bank.
- Freixas, X.; Parigi, B. M.; Rochet J-C. (2000). “Systemic Risk, Interbank Relations, and Liquidity Provision by the Central Bank”, *Journal of Money, Credit and Banking*, vol. 32, núm. 3, pp. 611-638.
- French, K.; Baily, M.; Campbell, J. Y.; Cochrane, J. H.; Diamond, D. W.; Duffie, D.; Kashyap, A.K.; Mishkin, F.S.; Rajan, R.G.; Scharfstein, D.S.; Shiller, R.J.; Shin, H.S.; Slaughter, M.J.; Stein, J.C.; Stulz, R.M. (2010). *The Squam Lake Report: Fixing the Financial System*, Princeton: Princeton University Press.
- Gallati, R. (2003). *Risk Management and Capital Adequacy*, New York: McGraw-Hill.
- Garrat, R.; Mahadeva, L.; Svirydenka, K. (2011). “Mapping Systemic Risk in the International Banking Network”, Working Paper, núm. 413, Bank of England, March.
- Gómez, E.; Murcia, A.; Zamudio, N. (2011). “Financial Conditions Index: A Leading and Early Warning Indicator for Colombia?”, *Ensayos sobre Política Económica*, núm.66, Banco de la República, diciembre.
- Haining, R. (2004). *Spatial Data Analysis*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Haldane, A. G. (2009). “Rethinking the Financial Network”, Speech delivered at the Financial Student Association (Amsterdam, Netherlands), abril.
- Hatzius, J.; Hooper, P.; Mishkin, F. S.; Schoenholtz, K. L.; Watson, M. W. (2010). “Financial Conditions Indexes: A Fresh Look after the Financial Crisis”, Working Papers, núm.16150, National Bureau of Economic Research.
- Howard, A.; Seraji, H. (2000). “A Real-Time Autonomous Rover Navigation System”, Proceedings from World Automation Congress.
- Howard, A.; Seraji, H. (2002). “A Rule-Based Fuzzy Safety Index for Landing Site Risk Assessment”, Proceedings from the 9th International Symposium on Robotics and Applications held within the 5th Biannual World Automation Congress.
- Howard, A.; Seraji, H.; Tunstel, E. (2001). “A Rule-Based Fuzzy Traversability Index for Mobile Robot Navigation”, Proceedings from the International Conference on Robotics and Automation.
- Hurlin, C.; Pérignon, C. (2013). “Systemic Risk Score: a Suggestion”, Research Paper, núm. FIN-2013-1005, HEC Paris.

- Inaoka, H.; Ninomiya, T.; Taniguchi, K.; Shimizu, T.; Takayasu, H. (2004). “Fractal Network Derived from Banking Transaction: An Analysis of Network Structures Formed by Financial Institutions”, Working Paper Series, núm. 04-E-04, Bank of Japan, abril.
- International Monetary Fund; Bank for International Settlements; Financial Stability Board (2009). “Guidance to Assess the Systemic Importance of Financial Institutions, Markets and Instruments: Initial Considerations”, octubre.
- Kleinberg, J. M. (1998). “Authoritative Sources in a Hyperlinked Environment”, Proceedings of the ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms.
- Klir, G.; Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*, Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Kodres, L. (2009). “The Road to Re-Regulation: Repainting the Center Line and Erecting more Guardrails”, The World Bank and Banco de España International Conference: “Reforming Financial Regulation and Supervision: Going Back to Basics”, Madrid, 15 de junio.
- Kolaczyk, E. D. (2009), *Statistical Analysis of Network Data*, New York: Springer.
- Kritzman, M.; Li, Y.; Page, S.; Rigobon, R. (2011). “Principal Components as a Measure of Systemic Risk”, *The Journal of Portfolio Management*, vol. 37, núm. 4, pp. 112-126.
- Krugman, P. (1996). *Self-Organizing Economy*, Oxford: Blackwell.
- Kyriakopoulos, F.; Thurner, S.; Pühr, C.; Schmitz, S. W. (2009). “Network and Eigenvalue Analysis of Financial Transaction Networks”, *The European Physical Journal B*, núm. 71, pp. 523-531.
- León, C.; Berndsen, R. J. (2014). “Rethinking Financial Stability: Challenges Arising from Financial Networks’ Modular Scale-free Architecture”, *Journal of Financial Stability*, vol. 15, pp. 241-256.
- León, C.; Machado, C. (2013). “Designing an Expert-Knowledge-Based Systemic Importance Index for Financial Institutions”, *Journal of Financial Market Infrastructures*, núm. 1, vol. 2, pp. 77-127.
- León, C.; Machado, F.; Cepeda, F.; Sarmiento, N. M. (2012). “Too-Connected-to-Fail Institutions and Payments System’s Stability: Assessing Challenges for Financial Authorities”, en Hellqvist, M.; Laine, T. (eds.), *Diagnostics for the Financial Markets-Computational Studies of Payment System: Simulator Seminar Proceedings 2009-2011*, E:45, Bank of Finland, pp. 267-313.
- León, C.; Murcia, A. (2013). “Systemic Importance Index for financial institutions: A Principal Component Analysis approach”, *ODEON*, núm.7, pp.125-165.
- León, C.; Pérez, J. (2014). “Assessing financial market infrastructures’ systemic importance with authority and hub centrality”, *Journal of Financial Market Infrastructures*, vol.2, núm.3, pp.67-87.
- Mandelbrot, B.; Hudson, R. L. (2004). *The (Mis)Behavior of Markets*, New York: Basic Books.
- Manning, M.; Nier, E.; Schanz, J. (2009). *The Economics of Large-Value Payments and Settlement: Theory and Policy Issues for Central Banks*, New York: Oxford University Press.

- Martínez, C.; León, C. (2014). "The Cost of Collateralized Borrowing in the Colombian Money Market: Does Connectedness Matter?", Borradores de Economía, núm.803, Banco de la República.
- Mathworks (2009). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*, Mathworks.
- McNeil, A.J.; Frey, R.; Embrechts, P. (2005). *Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools*, Princeton: Princeton University Press.
- McNeill, M.; Thro, E. (1994). *Fuzzy Logic: A Practical Approach*, London: AP Professional.
- Merton, R. (1974). "On the Pricing of Corporate Debt: the Risk Structure of Interest Rates", *Journal of Finance*, núm. 29, pp. 449-470.
- Morales, M.; Estrada, D. (2010). "A Financial Stability Index for Colombia", *Annals of Finance*, núm. 6, pp. 555-581.
- Murcia, A. (2007). "Determinantes del acceso al crédito de los hogares colombianos", *Ensayos sobre Política Económica*, núm. 55, Banco de la República.
- Newman, M. E. J. (2003). "The Structure and Function of Complex Networks", *SIAM Review*, vol. 45, núm. 2, pp. 167-256.
- Newman, M. E. J. (2010). *Networks*, New York: Oxford University Press.
- Norman, B.; Brierley, P.; Gibbard, P.; Mason, A.; Meldrum, A. (2009). "A Risk-based Methodology for Payment Systems Oversight", *Journal of Payments Strategy & Systems*, vol. 3, núm. 3, agosto.
- Oral, E.; Dilara, E.; Hamsici, T. (2005). "Building Up a Real Sector Business Confidence Index for Turkey", *Central Bank Review*, vol. 5, núm. 1, Research and Monetary Policy Department, Central Bank of the Republic of Turkey.
- Ötoker-Robe, I.; Narain, A.; Ilyina, A.; Surti, J. (2011). "The Too-Important-to-Fail Conundrum: Impossible to Ignore and Difficult to Resolve", Staff Discussion Note, núm. 11/12, International Monetary Fund, mayo.
- Peak, D.; Frame, M. (1998). *Chaos under Control: the Art and Science of Complexity*, New York: W. H. Freeman & Co.
- Rebonato, R. (2007). *Plight of the Fortune Tellers*, Princeton: Princeton University Press.
- Revez, A.; León, C. (2010). "Operational Risk Management using a Fuzzy Logic Inference System", *Journal of Financial Transformation*, vol. 30, pp. 141-153.
- Rodríguez-Moreno, M.; Peña, J. I. (2011). "Systemic Risk Measures: the Simpler the Better?", BIS Papers, núm. 60, Bank of International Settlements.
- Saunders, A.; Smith, R. C.; Walter, I. (2009). "Enhanced Regulation of Large, Complex Financial Institutions", en Acharya, V. V.; Richardson, M. (eds.), *Restoring Financial Stability*, Hoboken: Wiley Finance.
- Seraji, H. (2000). "Traversability Index: a New Concept for Planetary Rovers", *Journal of Robotics Systems*, vol. 17, pp. 2006-2013.
- Serrano, N.; Seraji, H. (2007). "Landing Site Selection using Fuzzy Rule-Based Reasoning", Proceedings from the International Conference on Robotics and Automation.
- Sivanandam, S. N.; Sumathi, S.; Deepa, S. N. (2007). *Introduction to Fuzzy Logic using Matlab*, Heidelberg: Springer.
- Smith, D. (2011). "Hidden Debt: From Enron's Commodity Prepays to Lehman's Repo 105s", *Financial Analysts Journal*, vol. 67, núm. 5, pp. 15-22.

- Soramäki, K.; Bech, M.; Arnold, J.; Glass, R.; Beyeler, W. (2006). “The topology of interbank payments flow”, *Federal Reserve Bank of New York Staff Report*, No 243, March.
- Soramäki, K.; Cook, S. (2013). “SinkRank: an Algorithm for Identifying Systemically Important Banks in Payment Systems”, *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 7, núm. 2013-28.
- Stein, J. C. (2013). “The Fire-Sales Problem and Securities Financing Transactions”, Remarks at the Federal Reserve Bank of New York Workshop on Fire Sales as a Driver of Systemic Risk in Triparty Repo and other Secured Funding Markets, 4 de octubre.
- Steiner, J. (2006). “World University Rankings: A Principal Component Analysis”, documento interno, Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo.
- Straffin, P. D. (1980). “Linear Algebra in Geography: eigenvectors of networks”, *Mathematics Magazine*, vol. 53, núm. 5, pp. 269-276.
- Strogatz, S. (2003). *SYNC: How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature and Daily Life*, New York: Hyperion Books.
- Taleb, N. N. (2007). *The Black Swan*, New York: Random House.
- Tucker, P. (2005). “Where are the Risks?”, *Financial Stability Review*, pp.73-77, Bank of England, diciembre.
- Tumpel-Gugerell, G. (2009). “Introductory Remarks”, Recent Advances in Modeling Systemic risk Using Network Analysis (workshop), European Central Bank, Frankfurt am Main, 5 de octubre.
- Tunstel, E.; Seraji, H.; Howard, A. (2001). “Soft Computing Approach to Safe Navigation of Autonomous Planetary Rovers”, en Zilouchian, A.; Jamshidi, M (eds.), *Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies*, New York: CRC Press.
- Uribe, J. D. (2011a). “Descifrando los sistemas bancarios paralelos: nuevas fuentes de información y metodologías para la estabilidad financiera”, *Revista del Banco de la República*, pp. 1-9, abril.
- Uribe, J. D. (2011b). “Lecciones de la Crisis Financiera de 2008: Cómo la Infraestructura Financiera puede Mitigar la Fragilidad Sistémica”, *Revista del Banco de la República*, pp.1-9, junio.
- Von Altrock, C. (1996). “Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy in Appliances”, Embedded Systems Conference, Santa Clara.
- Von Altrock, C. (2002). *Applying Fuzzy Logic to Business and Finance*, vol. 2, pp. 38-39, Optimus.
- Zadeh, L. A. (1965). “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, núm. 8, pp. 338-353.
- Zhou, C. (2009). *Are Banks too Big to Fail? Measuring Systemic Importance of Financial Institutions*, De Nederlandsche Bank.

ANEXO 1

CENTRALIDAD DE AUTORIDAD Y DISTRIBUCIÓN

Kleinberg (1998) introduce el algoritmo (HITS) de búsqueda (*hyper text induced topic search*) para estimar la centralidad de autoridad y distribución. Este algoritmo reconoce que la centralidad de cada nodo se define como proporcional a la suma de la centralidad de distribución de los nodos que apuntan hacia ella, y que la centralidad de distribución de cada nodo es proporcional a la suma de la centralidad de autoridad de los nodos que señala. Para hacer tal reconocimiento, el algoritmo emplea la centralidad del vector propio en dos versiones modificadas de la matriz adyacente original donde esas dos corresponden a una matriz de autoridad (\mathcal{A}) y a una matriz de distribución (\mathcal{H}). Al ser Ω la matriz resultante de una red, entonces las de autoridad y distribución (\mathcal{A} y \mathcal{H}) se estiman como sigue:

Matriz de autoridad

$$\mathcal{A} = \Omega^T \Omega$$

Matriz de distribución

$$\mathcal{H} = \Omega \Omega^T$$

Multiplicar una matriz de adyacencia simétrica por ella misma permite identificar todos los nodos que pueden contactarse entre sí en adyacencias de segundo orden en dos pasos (Haining, 2004). Sin embargo, en el caso de matrices de adyacencia no simétrica (es decir, dirigidas), multiplicar la matriz por una versión transpuesta de la misma permite identificar adyacencias dirigidas (dentro o fuera) de segundo orden. Con respecto a \mathcal{A} , multiplicar Ω^T por Ω envía las ponderaciones hacia atrás (en contra de las flechas, hacia el nodo que apunta), en tanto que multiplicar Ω por Ω^T (como en H) manda los puntajes hacia adelante (donde la dirección de las flechas apunta hacia el nodo señalado) (Bjelland *et al.*, 2008).

Dado que \mathcal{A} y \mathcal{H} son matrices simétricas no negativas (incluso si Ω es dirigida y acíclica), puede estimarse una centralidad única del vector propio de \mathcal{A} y \mathcal{H} y la centralidad resultante, además de los puntajes positivos distintos de cero para cada nodo. Esto contrasta con la centralidad del vector propio estándar en una matriz dirigida y de adyacencia acíclica, donde la centralidad de valor propio mostrará puntuaciones iguales (cero) para cada nodo.