



Revista de Ingeniería

ISSN: 0121-4993

reingeri@uniandes.edu.co

Universidad de Los Andes

Colombia

Gómez Castro, Camilo Hernando; Castiblanco Rey, Diego Julián; Sánchez-Silva, Mauricio
Aproximación integral a la evaluación y manejo de riesgos sobre la infraestructura urbana

Revista de Ingeniería, núm. 31, enero-junio, 2010, pp. 84-96

Universidad de Los Andes

Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015012002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Aproximación integral a la evaluación y manejo de riesgos sobre la infraestructura urbana

Integral Approach to Risk Management and Assessment of Urban Infrastructure

Camilo Hernando Gómez Castro^a, Diego Julián Castiblanco Rey^b, Mauricio Sánchez-Silva^c.

PALABRAS CLAVES

Análisis sistemático, clustering, incentivos, redes de infraestructura, riesgo, toma de decisiones.

RESUMEN

La infraestructura urbana es esencial para el funcionamiento de las sociedades modernas, y su evaluación y manejo de riesgo obedece a decisiones en el interés público. Al estar constituida por redes, su evaluación no debe concentrarse en elementos individuales, sino seguir una aproximación sistemática que describa jerárquicamente el sistema en diferentes niveles de resolución. En consecuencia, la evaluación de probabilidad y consecuencias de falla no requiere la descripción completa y detallada del sistema, permitiendo un manejo eficiente del riesgo. El artículo describe dicha aproximación y presenta alternativas para estructurar el manejo del riesgo mediante el uso de incentivos.

KEY WORDS

Systemic analysis, clustering, infrastructure networks, decision making, incentives, risk-assessment.

ABSTRACT

Urban infrastructure is essential for the development of modern societies: its assessment and risk-management must be undertaken within the framework of decisions of public-interest. The fact that infrastructure is made up of networks imposes the need for a systemic approach rather than one that emphasizes individual elements. This paper proposes a hierarchical description of infrastructure systems at different levels of resolution, allowing for effective risk-assessment through the use of simplified representations of the network for the assessment of failure probability and consequences. Finally, the approach to risk-management is undertaken by means of theory of incentives.

a Ingeniero Electrónico, M.Sc. en Ingeniería, Área Industrial. Estudiante Doctoral. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

✉ch.gomez171@uniandes.edu.co

b M.Sc. Ingeniero Electrónico, M.Sc. en Ingeniería, Área Industrial. Estudiante Doctoral. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

✉dj.castiblanco23@uniandes.edu.co

c Ph.D. Ingeniero Civil, M.Sc. en Ingeniería Civil, Doctorado en Ingeniería Civil. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

✉msanchez@uniandes.edu.co

INTRODUCCIÓN

Según la Corporación Andina de Fomento (CAF), “La infraestructura es la intervención primaria del ser humano sobre el territorio, para acceder a él y desatar su potencial de desarrollo. Aunque usualmente describe la provisión de los servicios (públicos) básicos (...) la infraestructura incluye también vías de acceso que permitan ampliar el área de influencia de la actividad humana y tecnología para generar energía y permitir la comunicación a larga distancia” [1]. Dentro del contexto de los desastres y el manejo del riesgo para la sostenibilidad, la infraestructura juega un papel fundamental. Ante la posibilidad de un evento catastrófico, la respuesta de la infraestructura define los tiempos y la eficiencia de la recuperación después del evento. Una infraestructura robusta cumple un papel esencial en la recuperación de una ciudad ante un evento de gran magnitud.

Las evaluaciones del estado de la infraestructura en varios países del mundo muestran que ésta se deteriora aceleradamente [2]. Además, usualmente no existe información detallada y confiable sobre su estado. Por ejemplo, la mayoría de infraestructura básica urbana (redes de telecomunicaciones y servicios públicos) está enterrada y sólo existe información vaga sobre aspectos como los materiales, las modificaciones y el trazado.

Varios estudios de organismos internacionales demuestran que la mayoría de países no cuentan con los recursos suficientes para mantener la infraestructura actual. En consecuencia, el crecimiento de la población, la consecuente demanda por nueva infraestructura, el deterioro creciente y la posibilidad de que se presenten eventos de origen natural (e.g., sismos) y antrópico (e.g., terrorismo), que puedan afectarla severamente, imponen retos muy importantes sobre la seguridad, la calidad de vida y la sostenibilidad urbana. Actualmente, este problema es grave en grandes ciudades y, particularmente, en las denominadas *megaciudades* (poblaciones mayores a 10 millones). Sin embargo, la toma de decisiones sobre el manejo del riesgo de la infraestructura en ciudades intermedias

es esencial para evitar un crecimiento desorganizado, ineficiente e inseguro que no sea sostenible en el tiempo.

Con base en la discusión anterior, es evidente que el manejo del riesgo dirigido hacia la infraestructura básica es una tarea urgente e imprescindible. La responsabilidad de esta tarea se divide entre los dueños/operadores de las redes y las entidades reguladoras. La importancia socioeconómica de estos sistemas demanda que cualquier decisión se tome dentro de un marco de referencia del interés público; por lo tanto, las decisiones sobre el manejo del riesgo corresponden en gran medida a las entidades gubernamentales. Dentro de este contexto, el manejo del riesgo involucra, además del problema técnico (e.g., evaluación del sistema y estimación de probabilidades de falla), la necesidad de garantizar equidad social, promover un desarrollo organizado y de largo plazo, y fomentar acciones que garanticen la sostenibilidad.

Los objetivos de este artículo son los siguientes:

- Revisar críticamente la naturaleza y las alternativas que existen para la modelación de redes de infraestructura urbana.
- Proponer una estrategia para el manejo del riesgo de redes de infraestructura urbana con base en una aproximación sistemática.
- Plantear un marco general para el manejo del riesgo de sistemas críticos orientado al interés público, proponiendo la teoría de incentivos como una herramienta importante para tal fin.

La estructura del artículo es la siguiente: la sección “Modelación de redes de infraestructura” presenta fundamentos para la modelación de redes como medio para representar sistemas de infraestructura; mientras que en la sección “Modelación del riesgo en redes” se describen los métodos tradicionales para la modelación del riesgo en tales sistemas. La sección “Visión sistemática de la infraestructura” ofrece una descripción sobre la teoría de sistemas y su utilización para modelar sistemas complejos como las re-

des de infraestructura; consecuentemente, la sección “Aproximación sistémica a la evaluación del riesgo en redes” propone una estrategia para la evaluación del riesgo mediante una perspectiva sistémica. La sección “Manejo del riesgo en sistemas de infraestructura” describe cómo las decisiones para el manejo del riesgo deben circunscribirse dentro del marco de las decisiones del interés público y la utilización de incentivos para el manejo del riesgo de la infraestructura urbana. Por último, en la sección “Conclusiones” se presenta un resumen y las principales conclusiones del artículo.

MODELACIÓN DE REDES DE INFRAESTRUCTURA

Un sistema de infraestructura constituido por componentes interconectados puede modelarse como una red. La mayoría de sistemas físicos, biológicos y sociales pueden describirse como redes. Las redes de infraestructura se enmarcan dentro de los sistemas complejos debido a la gran cantidad de elementos y a la naturaleza de sus propiedades emergentes. En esta sección se describen los conceptos básicos relacionados con la modelación y caracterización de redes de infraestructura. Aunque el término “infraestructura” incluye un espectro muy amplio de sistemas, en este documento se discuten aspectos relacionados principalmente a la infraestructura física básica de servicios públicos y transporte. Sin embargo, la mayoría de temas que se tratarán pueden extenderse a otros tipos de infraestructura.

TEORÍA DE GRAFOS

La teoría de grafos es la aproximación matemática más utilizada para modelar redes. Un grafo, $G(V,E)$, está definido como un conjunto de n nodos (vértices) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, conectados mediante un conjunto de m arcos, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. La estructura de un grafo se puede representar mediante una matriz de incidencia $A_{n \times m}$ que indica la relación entre nodos y vértices, o una matriz de adyacencia que des-

cribe la forma en que están conectados los nodos de la red; en especial, la matriz de adyacencia se define como $A_{n \times n}$ tal que $a_{ij} = 1$ si los nodos v_i y v_j están conectados, y $a_{ij} = 0$ de lo contrario. Un grafo puede ser dirigido o no dirigido dependiendo de si la relación entre nodos ij difiere de aquélla entre nodos ji . En la práctica, los nodos pueden representar ciudades en una red de transporte intermunicipal, o subestaciones para un sistema de distribución de energía. Por otro lado, las conexiones entre nodos están definidas por atributos como costo, capacidad o tiempo de viaje [8].

INDICADORES DESCRIPTIVOS Y DE DESEMPEÑO

Existen diversos índices sobre grafos que permiten caracterizar sistemas de redes; se clasifican en locales y globales. Los índices locales toman en cuenta información sobre nodos, arcos o rutas específicas. El indicador más utilizado se conoce como el *degree* (grado) de un nodo que mide el número de arcos entrando y/o saliendo de él. Otro indicador de uso frecuente es la definición de la ruta más corta entre dos nodos. Los índices globales ofrecen información general sobre el grafo completo, permitiendo hacer comparaciones entre diferentes redes. Algunos ejemplos de ellos son la distribución del grado de los nodos de la red (probabilidad de que un nodo tenga grado k) y la distancia-más-corta-promedio entre dos nodos cualesquiera. La principal desventaja de los métodos globales, con respecto a los locales, es su elevado costo computacional en redes grandes, como es el caso de los sistemas de infraestructura urbana, puesto que por su carácter combinatorio, el número de operaciones generalmente crece exponencialmente con el número de elementos. La centralidad, excentricidad, media, mediana, *betweenness*, centroides y conectividad son otros ejemplos de indicadores para redes, cuya descripción se puede encontrar en [3].

El desempeño de una red se puede evaluar en términos de forma y/o flujo. Las medidas de desempeño basadas en la forma de la red se concentran en los cambios en su estructura topológica (e.g., su geometría), considerando problemas como la conectividad.

Las medidas de flujo [4] consideran problemas como el costo o la eficiencia de aquello que viaja por la red (e.g., tráfico). En la práctica, forma y flujo son conceptos relacionados, sin embargo, es difícil evaluar y hacer generalizaciones alrededor de tal dependencia.

MODELACIÓN DEL RIESGO EN REDES

Las decisiones sobre inversión y manejo en redes de infraestructura se basan en un análisis de riesgo, cuyo objetivo es hacer predicciones sobre la posible ocurrencia, y las consecuencias asociadas, de eventos futuros. Si las consecuencias esperadas son benéficas, la decisión evalúa una oportunidad; si, por el contrario, son negativas se utiliza el término riesgo. Dentro del contexto de la evaluación, prevención y mitigación de riesgos, manejo de emergencias y planeación para el desarrollo, las decisiones están dirigidas a minimizar los efectos negativos de un evento sobre la sociedad. Entonces, la información de un estudio de riesgos contribuye al proceso de toma de decisiones sobre aspectos tales como mantenimiento de redes, reemplazo de componentes obsoletos o medidas de gestión como reubicación de asentamientos en riesgo, entre otros. En esta sección se presenta una discusión sobre los métodos que existen para evaluar y manejar el riesgo sobre la infraestructura.

EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA

Aunque existen diferentes alternativas para hacer estimaciones sobre la ocurrencia y las consecuencias de un evento futuro, el análisis probabilístico es la mejor aproximación técnica al problema. De manera general, la confiabilidad, R , se define como la probabilidad de que un sistema cumpla con un estándar de desempeño (funcionamiento) mínimo esperado. La confiabilidad se define como el complemento de la probabilidad de falla (P_f):

$$R = 1 - P_f \quad (1)$$

Matemáticamente, el cálculo de la probabilidad de falla (o de confiabilidad) se obtiene resolviendo la siguiente integral:

$$P_f = \int_{\Phi_F} f(x) dx \quad (2)$$

donde Φ_F es la región de falla [5] y x el vector de estado del sistema. La solución de la ecuación 2, en el caso de sistemas complejos (e.g., redes) es usualmente un problema matemático difícil de resolver analíticamente; o muy costoso computacionalmente si la solución es numérica.

En el contexto de redes, considerando únicamente *falla* u *operación* de sus componentes, se tiene un caso combinatorio que da lugar a un espacio discreto de estados del sistema. En este sentido, considere $x_i \in \{0, 1\}$ un indicador de operación del componente i ($i = 1 \dots n$); $X_j \in \{0, 1\}^n$ el j -ésimo estado de la red ($j = 1 \dots l$); y $\Phi_F : \{X_j \in \Omega : M(X_j) < \Psi\}$ el conjunto de estados que causan falla del sistema, en donde Ω representa el conjunto de los estados X_j posibles, $M(\cdot)$ es una medida de desempeño del sistema, y Ψ un nivel mínimo aceptable. Considere además que para cada estado X_j , el vector H_j contiene los índices de los elementos x_i que fallan para dicha realización. La confiabilidad se calcula entonces como:

$$R = 1 - \sum_{j \in \Phi_F} \left(\prod_{i \in H_j} (1 - P_i) \prod_{i \notin H_j} P_i \right) \quad (3)$$

en donde P_i es la probabilidad de falla del elemento i . Es importante resaltar que la cantidad de estados por considerar en la ecuación crece exponencialmente con el número de elementos de la red.

MÉTODOS PARA EVALUAR LA PROBABILIDAD DE FALLA EN REDES

En el caso de redes de infraestructura, la confiabilidad se evalúa comúnmente con respecto a la conectividad entre nodos. Los métodos para evaluar la confiabilidad pueden ser analíticos o basados en simulación. Los métodos analíticos se pueden dividir, a su vez, en

métodos exactos y aproximados. Algunos ejemplos de métodos exactos son la *formula de inclusión-exclusión* [6], cotas basadas en programación lineal [7] y métodos que plantean la solución como un problema de optimización [4]. Por su parte, los aproximados utilizan reducciones y simplificaciones del problema; ejemplos de ellos son el uso de cortes mínimos [8] y reducciones serie-paralelo o delta-estrella [9].

Por otro lado, los métodos de simulación buscan extraer información estadística a partir de una muestra de los eventos posibles. Con estos métodos se realiza una gran cantidad de evaluaciones de la función objetivo con el fin de obtener estimativos estadísticos sobre su comportamiento. Es importante resaltar que, en los métodos de simulación, el número de simulaciones requeridas aumenta en la medida que se necesite evaluar probabilidades de falla muy pequeñas, como es el caso de la mayoría de los sistemas reales, incluidas las redes de infraestructura [10]. El anterior inconveniente puede ser revertido mediante el uso de técnicas avanzadas como la reducción de varianza [11], subset simulation [12] o aprendizaje estadístico [13].

Las dificultades en la estimación de la probabilidad de falla de una red ante la ocurrencia de un evento externo (o interno) sugieren que es necesario buscar alternativas de modelación. Una nueva aproximación a esta solución consiste en enfocarse en el problema de toma de decisiones y no en la representación exacta del comportamiento del sistema. En otras palabras, la evaluación sobre una representación simplificada de la red puede suministrar información muy valiosa a un bajo costo. Esta aproximación requiere una interpretación y una descripción coherente de la red. Para este propósito, en este artículo, se sugiere la utilización de una aproximación sistemática para la descripción de redes de infraestructura.

VISIÓN SISTÉMICA DE LA INFRAESTRUCTURA

La aproximación sistemática permite modelar, de manera eficiente y estructurada, el comportamiento de

sistemas complejos. En términos generales, un sistema se caracteriza por un conjunto de elementos u objetos interconectados dentro de un contexto (físico o conceptual) que define los límites del sistema. En esta sección se presenta una discusión conceptual sobre aspectos relevantes de la teoría de sistemas que pueden aplicarse al manejo de redes de infraestructura. La discusión sobre las propiedades de los sistemas está fuera del alcance de este documento pero puede encontrarse en [14] y [15].

ESTRUCTURACIÓN JERÁRQUICA DE LA INFORMACIÓN

Un elemento esencial de la aproximación sistemática es la estructuración de la información. La complejidad de un sistema se maneja a través de su descripción de manera jerárquica. Una estructura jerárquica es una representación lógica de un sistema en términos de subsistemas que permite describirlo en diferentes niveles de precisión. Entonces, en los niveles superiores, el sistema se define de una manera general, mientras que, a medida que se desciende en la jerarquía, el nivel de precisión con el cual se describe el sistema aumenta. Uno de los aspectos más importantes de la estructuración jerárquica es que los subsistemas se evalúan a través de sus propiedades emergentes. Una propiedad emergente es aquella que resulta de la interacción de diversos tipos entre las partes, pero no es una propiedad de ninguno de los elementos constitutivos.

La característica más importante de una estructura jerárquica es que permite analizar y tomar decisiones sobre un sistema en diferentes niveles de precisión [5]. En otras palabras, no siempre es necesaria una descripción o un modelo completo del comportamiento del sistema para tomar una decisión. La información sobre estados intermedios es muy valiosa y puede ser determinante en diferentes momentos. En resumen, los beneficios de esta aproximación son:

- Un mejor entendimiento del comportamiento del sistema y sus propiedades emergentes en múltiples niveles de abstracción (i.e., resolución).
- La posibilidad de ejecutar evaluaciones (e.g., confiabilidad) sobre representaciones más simples del

sistema que se desprenden de utilizar subsistemas de menor especificidad como componentes de la representación.

- Versatilidad respecto a diferentes tipos de decisores que se aproximen al problema [16].

CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS JERÁRQUICAS

La representación jerárquica de una red se obtiene mediante los denominados métodos de *clustering*. Estos métodos, propios del área *reconocimiento de patrones*, permiten detectar comunidades o sub-estructuras en redes de manera robusta [17]. El objetivo de los métodos de *clustering* es encontrar la estructura interna de una red (descrita como un grafo) a partir de información implícita en ella. En general, se utiliza una medida de similaridad (e.g., distancia) para evaluar relaciones entre nodos, de tal manera que se obtiene una partición de la red en sub-grafos, con elementos que comparten alguna característica. La representación jerárquica de una red se obtiene mediante la aplicación recursiva de estos métodos.

Los métodos de *clustering* se pueden clasificar como:

1. *Jerárquicos y de Particionamiento*: dependiendo de si revelan la estructura de comunidades en la red hasta que la red misma constituye una comunidad [18] o simplemente detectan una partición de la red original [19, 20].
2. *Supervisados y No Supervisados*: dependiendo de si requieren información a priori del problema [21, 22] o no [23] (e.g., el número de *clusters* por generar).
3. *Espectrales y Basados en kernels*: dependiendo de si el proceso se basa en el análisis de valores propios [2, 24], o si el análisis se realiza en un espacio de mayor dimensión a través de funciones especiales denominadas *kernels* [25, 26, 27].

MEDIDAS DE EVALUACIÓN EN SISTEMAS JERÁRQUICOS

La interpretación de la infraestructura como un sistema cambia la forma en que se modela su comportamiento. Entonces, el análisis no está dirigido hacia

el comportamiento de los componentes individuales, sino a la evaluación de medidas de desempeño globales en el nivel de precisión requerido para la toma de la decisión. El nivel de desempeño de un sistema está íntimamente ligado a su capacidad para cumplir un propósito específico. A diferencia de la mayoría de componentes, el funcionamiento de un sistema de infraestructura no puede evaluarse mediante una variable binaria (falla o no falla). Por el contrario, el nivel de cumplimiento de su función está definido dentro de un rango continuo, cuyos extremos son: *cumplimiento total de la función e incumplimiento de la función*. Algunos ejemplos de medidas de desempeño incluyen: el número de viajes promedio en una red de transporte y la continuidad en la prestación de un servicio público (agua potable, electricidad), entre otros.

APROXIMACIÓN SISTÉMICA A LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN REDES

APROXIMACIÓN MULTINIVEL A LA PROBABILIDAD DE FALLA

Una estructura jerárquica proporciona descripciones del sistema real en diferentes niveles de precisión. Por lo tanto, es posible construir modelos simplificados de la red en cada nivel mediante la definición de *redes ficticias* (Figura 1). En una red ficticia, cada nodo es un *cluster* y las conexiones entre nodos ficticios se construyen como arreglos en paralelo de los arcos reales entre nodos de dos *clusters*. De la misma forma que en las redes reales, las redes ficticias pueden describirse como grafos mediante las correspondientes matrices de adyacencia. En consecuencia, la complejidad de las redes ficticias se reduce en la medida que el análisis se mueve hacia las partes superiores de la estructura jerárquica. Así, se reduce considerablemente el número de escenarios necesarios para evaluar la probabilidad de falla. Esta aproximación al manejo de la complejidad de redes de infraestructura no es sólo conceptualmente valiosa, sino que permite reducir sustancialmente el costo computacional del análisis. Los detalles sobre este procedimiento se encuentran en [16].

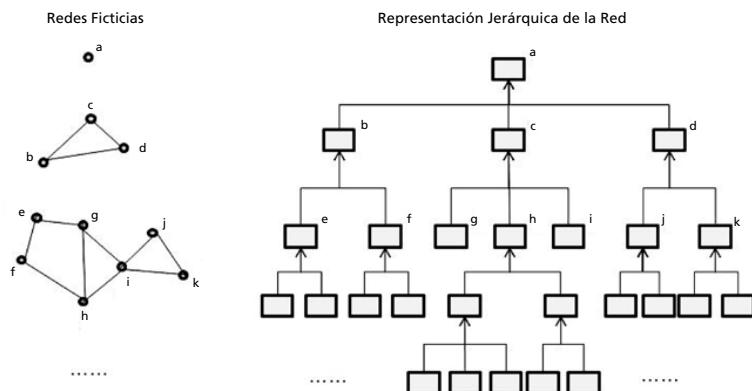


Figura 1. Redes ficticias y estructura jerárquica

Esta simplificación del problema es congruente con la necesidad de tomar decisiones a diferentes niveles de precisión. Por ejemplo, en un nivel superior es posible identificar el monto y las áreas hacia las cuales se debe dirigir la inversión para la mitigación del riesgo, para lo cual no es necesario conocer el detalle de la inversión. Por el contrario, una decisión en un nivel inferior permite definir exactamente en qué se invierten los recursos. En resumen, la utilización de redes de infraestructura ficticias es una alternativa muy valiosa para la evaluación del riesgo y toma de decisiones en sistemas de infraestructura de alta complejidad.

PROPAGACIÓN DE DAÑO BASADA EN CORRELACIÓN

La estimación de riesgo tiene implícito, además de la probabilidad de falla, la evaluación de las pérdidas para cada escenario posible. Dentro del contexto de redes de infraestructura, un escenario está caracterizado por un conjunto de elementos (nodos/arcos) que fallan (se eliminan). Como resultado de esta situación, la red pierde capacidad para cumplir su función; esto se ve reflejado en un cambio en las medidas de desempeño. Por ejemplo, después de un evento que elimina un conjunto de nodos de la red, la conectividad entre dos nodos puede cambiar incrementando el tiempo de recorrido.

La existencia de interconectividad directa e indirecta de los elementos de la red conlleva a que el impacto de un evento tenga repercusiones a nivel global.

La estructura jerárquica de la red que se utiliza para hacer estimativos de la probabilidad de falla (sección “Aproximación multinivel a la probabilidad de falla”) también puede utilizarse para entender mejor la forma en que se propaga el daño a través de la red. Una alternativa para encontrar y cuantificar la propagación del daño es el uso de funciones de correlación. La correlación es una matriz que describe la relación entre nodos como función de: (1) el nivel dentro de la estructura jerárquica; y (2) las medidas de similaridad utilizadas dentro de los procesos de *clustering*. No obstante, los estudios físicos y estadísticos necesarios para determinar funciones apropiadas de correlación son todavía incipientes. Una propuesta a este respecto es llevada a cabo en [28], en donde se evalúa una función de correlación que incluye características topológicas y funcionales de la red. En la actualidad otros procedimientos se encuentran en evaluación [16].

MANEJO DEL RIESGO EN SISTEMAS DE INFRAESTRUCTURA

DECISIONES EN EL INTERÉS PÚBLICO

Desde una perspectiva política, las decisiones relacionadas con el manejo de la infraestructura son decisiones en el interés público. Esto significa que son decisiones que no están dirigidas a beneficiar (afectar) a un individuo en particular, sino que buscan maximizar el bien común. Esta forma de ver la infraes-

tructura tiene implicaciones muy importantes sobre el manejo del riesgo, lo cual se potencializa a través de la aproximación sistémica, la cual permite una evaluación tanto general como distribuida de la red.

La primera implicación de esta visión es que el manejo de la infraestructura debe entenderse dentro del contexto de la sostenibilidad. El desarrollo sostenible se refiere al continuo crecimiento socioeconómico mediante el uso racional de los recursos naturales y el manejo apropiado del medio ambiente [29]. La comisión Brundtland define el desarrollo sostenible como la capacidad de una sociedad para “lograr las metas de desarrollo actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de alcanzar las suyas”. Por otra parte, y de manera complementaria, la Agenda 21 para la construcción sostenible en países en desarrollo establece que es necesario “restaurar y mantener el equilibrio del desarrollo físico y el entorno medioambiental con el fin de crear desarrollos que garanticen la dignidad humana y fomenten el desarrollo y la equidad económica”. El tema es muy importante, al punto que en algunos foros las preocupaciones sobre sostenibilidad se han convertido en estándares éticos relacionados con la igualdad intergeneracional con implicaciones muy importantes sobre el desarrollo de infraestructura. Estas implicaciones incluyen control de la polución, uso racional de los recursos naturales y la viabilidad financiera de proyectos de ingeniería [29].

El segundo aspecto importante es que la evaluación y los planes de prevención y mitigación del riesgo deben realizarse sobre indicadores globales, en concordancia con la filosofía de la aproximación jerárquica. Esto implica que los métodos para evaluar el riesgo tienen un papel relevante en la evaluación. Bajo un criterio de igualdad social, el manejo del riesgo debe garantizar que no existen beneficios diferenciales entre sectores de la población (i.e., subsistemas en la jerarquía). Por el contrario, es muy importante que el manejo del riesgo garantice igualdad en las decisiones. Es importante resaltar que este aspecto es particularmente difícil de manejar en países con grandes desigualdades sociales y con altos niveles de informalidad.

ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO DEL RIESGO

El manejo efectivo del riesgo en sistemas complejos exige una visión amplia y multidisciplinaria que tenga en cuenta los procesos de toma de decisiones, y, dentro de ellos, aspectos técnicos, económicos y cognitivos. El núcleo de la teoría económica clásica reside en la racionalidad de los individuos; en otras palabras, en la suposición de que éstos actuarán de modo que maximicen su utilidad. Entonces, una persona u organización tomará decisiones para maximizar su bienestar y no necesariamente el bienestar común. Dado que las decisiones sobre el manejo de riesgo en los sistemas de infraestructura urbana tienen un claro impacto en el desarrollo socioeconómico de las ciudades, es necesario buscar mecanismos para garantizar que se tomen decisiones en el interés público (sección “Decisiones en el interés público”); por ejemplo, el balancear los montos de intervención entre los *clusters* que componen un nivel de interés en la jerarquía. Esto implica establecer criterios, socialmente aceptables, de obligatorio cumplimiento por parte de los agentes (i.e., personas u organizaciones). Esto se logra comúnmente por vía legislativa. Cabe anotar que en su cotidianidad, la sociedad opera bajo reglas de diferente tipo, por ejemplo, reglas de carácter legal o moral.

Manejar el riesgo desde una perspectiva fundamentalmente regulatoria tiene varios problemas. En primer lugar, al tratarse de un conjunto de reglas, es imposible que comprendan todas las actividades posibles consideradas como inadecuadas o conducentes a escenarios de menor bienestar general. Puesto que la legislación no es perfecta, siempre existirán vacíos legales que pueden ser aprovechados por los agentes en busca de su beneficio particular. En segundo lugar, puesto que la legislación es de carácter general y las normas no corresponden a intereses particulares, es necesario contar con un mecanismo policivo que garantice su cumplimiento. El diseño del castigo representa entonces otro problema: éste puede ser muy bajo, de modo que el beneficio de incumplir la norma supera el detimento ocasionado por el castigo; o es lo suficientemente alto como para prevenir que se in-

cumpla la norma, pero promoviendo la ilegalidad. A pesar de las deficiencias en las que se incurre al manejar el riesgo mediante medidas regulatorias, una legislación efectiva en favor de la seguridad es esencial.

Puesto que el manejo del riesgo no puede restringirse únicamente al cumplimiento de normas sobre seguridad, es necesario diseñar una estrategia que, además de establecer criterios de aceptabilidad del riesgo desde una perspectiva del interés público, genere una cultura de la seguridad. La construcción de esa cultura de la seguridad puede hacerse mediante campañas educativas o a través de incentivos. En la sección “Manejo del riesgo a través de incentivos” se presenta una breve discusión sobre esta última alternativa.

MANEJO DEL RIESGO A TRAVÉS DE INCENTIVOS

El estudio exhaustivo de la teoría de incentivos está fuera del alcance de este artículo. Sin embargo, en las siguientes secciones se expondrá la importancia de la utilización de los incentivos económicos para el manejo del riesgo. En particular, se propone que el uso de incentivos es una acción complementaria, la cual permite el manejo efectivo del riesgo en sistemas de infraestructura urbana, tomando provecho de la perspectiva ofrecida por una descripción jerárquica del sistema.

- *Definición de incentivos*

Un incentivo es un factor que motiva a una persona/institución a comportarse de cierta manera o a tomar un curso de acción determinado [30]. En el estudio de la Economía de la Información se diferencian dos tipos de incentivos: (1) materiales; y (2) no materiales; a su vez, estos últimos se pueden subdividir en morales y sociales. La principal ventaja del uso de los incentivos reside en la alineación de los intereses particulares con los intereses generales, es decir, aún asumiendo agentes racionales que maximicen su bienestar (i.e., utilidad), su decisión maximizará a su vez el bienestar común.

En la sección “Ejemplo sobre el manejo de incentivos” se ilustra la importancia del uso de incentivos para el manejo de infraestructura urbana.

- *Ejemplo sobre el manejo de incentivos*

Considere que la operación y el mantenimiento de la red de acueducto de una ciudad están divididos entre cinco operadores privados. Dados los riesgos a los que está expuesta la red, el Gobierno ha decidido invertir una cantidad determinada de recursos en un sector para reducir el riesgo de daño en caso de un sismo y aumentar la disponibilidad del sistema (tiempo promedio que la red está en operación).

Desde la perspectiva del gobierno local, la forma de maximizar el bienestar común es minimizando el dinero que se va a invertir en la intervención, bajo la condición de que ésta se realiza correctamente, ya que todo dinero extra para dejar de destinarse a otros bienes y servicios. Entonces, el problema se convierte en estimar correctamente cuál es el valor de la inversión para la reducción del riesgo, ya que se escogerá al operador cuyo costo sea menor para hacer la inversión. El principal problema es que no se conoce el valor real de la inversión que efectuaría cada uno de los operadores. Para maximizar el bienestar general es importante conocer el verdadero costo de la inversión para cada uno de los operadores; esto es conocido como *truthful revelation*.

La primera alternativa para conocer el valor verdadero es que el gobierno le pregunte a cada una de las organizaciones tal valor. Sin embargo, en este procedimiento existe un incentivo negativo que ocasionará que se inflen los costos reportados, ya que un valor alto no obliga a las compañías a hacer la inversión. La segunda alternativa es la vía regulatoria, en la cual, aun si existiera una ley que obligase a las organizaciones a revelar el verdadero valor, no hay forma de comprobar tal información o su comprobación resultaría en altos costos por parte del gobierno. La tercera posibilidad es el uso de incentivos. Por ejemplo, en este caso se puede diseñar un incentivo que motive el reporte del costo real, pero compensando mediante un pago equivalente a la diferencia con segundo menor costo reportado; este mecanismo es una variante de la subasta de Vickrey [30].

Para ilustrar el funcionamiento del incentivo, considere los costos reales de la cinco compañías: A (\$1500), B (\$1200), C (\$3000), D (\$800) y E (\$2000) (valores unitarios). La organización con el menor costo real es la D, con un valor real de \$800. La firma con el siguiente menor costo es la B con un valor de \$1.200. Asumiendo que todos reportan el costo real, la firma que debería hacer la inversión es la D y eso le representaría una ganancia de \$400 (\$1200-\$800=\$400). Nótese que cualquier otro valor, diferente al real, reportado por la organización D no le representa ningún beneficio. Si reporta cualquier valor entre 0 y \$1.200, su ganancia neta seguirá siendo de \$400 pues el costo real no ha cambiado y aún así se vería obligada a hacer la inversión; por el contrario, si reporta un valor superior a \$1200 la inversión no es rentable y tampoco recibirá la compensación del gobierno incurriendo en una pérdida de \$400. Por lo tanto, la mejor estrategia para los intereses de la firma D es reportar el valor real de la inversión. De este modo, sus intereses se ven alineados con el interés general. Se puede verificar fácilmente que el anterior análisis es válido para cualquier otra organización.

Este ejemplo demuestra que, con el uso de un incentivo sencillo, es posible alinear los intereses privados con los generales.

- *Discusión sobre el uso de incentivos*

El anterior ejemplo ilustra cómo la aplicación de los incentivos adecuados puede garantizar un comportamiento dado en una persona u organización, demostrando además la manera en que los incentivos funcionan bastante mejor en comparación con la vía regulatoria. Sin embargo, esto no significa que la vía regulatoria debe ser abolida; a continuación se presenta un ejemplo de cómo pueden combinarse ambas alternativas.

Una de las principales preocupaciones actualmente es el cambio climático, esto ha llevado a los gobiernos a tomar medidas para reducir la emisión de material contaminante. Una de estas medidas es

el comercio de emisiones. El papel de la vía regulatoria está dado por una restricción en la cantidad de material contaminante que se puede emitir, la norma establece únicamente un tope máximo. El papel de los incentivos se explica a continuación.

Existe, en primer lugar, un incentivo negativo, es decir, un castigo o amonestación para aquella compañía que supere el límite establecido. Este incentivo juega un papel importante en la reducción de emisiones. Existe, sin embargo, un incentivo positivo cuyo papel no es tan evidente pero sí importante. Las compañías que reduzcan sus emisiones por debajo del tope establecido pueden vender esa reducción a aquéllas que sobrepasan el tope. Esto permite a la compañía que sobrepasa el tope comprar el equivalente a su exceso de emisiones y, de este modo, evitar la sanción por no cumplir el límite. Por otro lado, las compañías cuyo nivel está por debajo del tope tienen también un incentivo para reducir las emisiones, pues esto les representa un beneficio económico. Nótese que de aplicarse únicamente la prohibición, las compañías cuyo nivel de emisión era menor al tope no tendrían motivaciones suficientes para reducir sus emisiones.

CONCLUSIONES

La infraestructura es esencial para el funcionamiento de las sociedades modernas. Por lo tanto, su exposición a eventos adversos de origen natural o generados por el hombre puede tener implicaciones muy importantes sobre el desarrollo. Por su naturaleza, las decisiones sobre la evaluación o manejo del riesgo sobre infraestructura deben enmarcarse dentro de lo que se conoce como decisiones en el interés público. Esto tiene implicaciones sobre las decisiones para el manejo del riesgo, como el hecho de que deben garantizar la sostenibilidad y que la estrategia no debe tener preferencias sobre ningún sector de la sociedad en particular.

La infraestructura urbana básica está constituida por redes y, por lo tanto, su evaluación no debe concen-

trarse en elementos individuales. Por el contrario, es esencial adoptar una visión más integral del problema. En este artículo se sugiere que la visión sistémica es fundamental para un manejo efectivo del riesgo de infraestructura. Esta aproximación utiliza una representación jerárquica mediante la cual se describe el sistema a diferentes niveles de definición. En consecuencia, la evaluación de la probabilidad de falla del sistema y de las consecuencias asociadas no requiere la descripción completa del sistema ni la evaluación detallada del mismo. Entonces, mediante la evaluación en los niveles superiores es posible manejar de manera más eficiente el riesgo.

El manejo de riesgos en la infraestructura no puede manejarse únicamente a través de medidas regulatorias. Es importante buscar alternativas que permitan construir una sociedad más segura. Estas alternativas deben establecerse a partir de una combinación de leyes que garanticen los niveles mínimos de seguridad, que estén de acuerdo con la situación social y económica del país, con la educación y la construcción de una cultura de la seguridad y la utilización de incentivos para fomentar la eficiencia en la inversión.

En síntesis, la evaluación y toma de decisiones en sistemas de infraestructura debe llevarse a cabo en el interés público, empleando complementariamente la vía regulatoria y los incentivos. Lo anterior, enmarcado en una perspectiva de entendimiento de la estructura y propiedades del sistema a través de su representación jerárquica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Corporación Andina de Fomento (CAF).

“Iniciativa para la Integración de la Infraestructura Regional Suramericana (IIRSA)”. 2010. Fecha de consulta: 30 de abril de 2009. Disponible en: <http://www.caf.com/>

[2] American Society of Civil Engineers.

Report Card for America's Infrastructure. 2005. Fecha de

consulta: 30 de abril de 2009. Disponible en: <http://www.asce.org/reportcard/2005/page.cfm?id=203>

[3] U. Brandes and T. Erlebach.

“Network Analysis: methodological foundations”. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 3418, 2005.

[4] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti and J. B. Orlin.

Network flows: theory, algorithms, and applications. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1993.

[5] B. Scholkopf, A.J. Smola and K.R. Muller.

“Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problema”. *Neural Comput.* Vol.10, No. 5, 1998, pp. 1299-1319.

[6] M.G.H. Bell and Y. Iida.

Transportation network analysis. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1997.

[7] S. van Dongen.

Graph Clustering by Flow Simulation. PhD thesis. University of Utrecht, May 2000.

[8] J. McQueen.

“Some methods for classification and analysis of multivariate observations”. *Computer and Chemistry*, Vol. 4, 1968, pp. 257-272.

[9] C. Gómez, M. Sánchez-Silva, L. Dueñas-Osorio and D.V. Rosowsky.

“Hierarchical infrastructure network representation methods for risk-based decision-making”. (En revisión – 2010).

[10] M. Sánchez-Silva, D.V.

Rosowsky (2008), “Structural reliability and risk in the developing world and its relationship withy sustainability”. *ICE- Structures*. Special issue on Structural sustainability. Vol. 161, No. 4, August 2008, pp. 189-198.

[11] S.K. Au.

“Probabilistic failure analysis by importance sampling Markov chain simulation”. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 3, March 2004, pp. 303-311.

- [12] S.K. Au and J.L. Beck.
“Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset Simulation”. *Probabilistic Engineering Mechanics*. Vol. 16, No. 4, 2001, pp. 263- 277.
- [13] “Obras, Redes de Distribución de Gas”. IGK. Fecha de consulta: 30 de abril de 2009, Disponible en: http://igkinfrastructure.com/es/obras/redes_distribucion.html
- [14] P.B. Checkland.
Systems thinking, systems practice. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1981.
- [15] D.I. Blockley and P. Godfrey.
Do it differently: systems for rethinking construction. London: Thomas Telford, 2000.
- [16] T. Graepel and K. Obermayer.
“Fuzzy topographic kernel clustering”. In W. Brauer (Ed.), *Proceedings of the Fifth GI Workshop Fuzzy Neuro-Systems '98*, 1998, pp. 90-97.
- [17] J.P. Gadani.
“System Effectiveness Evaluation using Star and Delta Transformations”. *IEEE Trans. Rel.* Vol. 30, No. 1, 1981, pp. 43-47.
- [18] S.M. Ross.
Simulation. San Diego: Academic Press, 1997
- [19] M.E.J. Newman and E.A. Leicht.
“Mixture models and exploratory analysis in networks”. *PNAS*, Vol.104, No. 23, 2007, pp. 9564-9569.
- [20] A. Ng, M. Jordan and Y. Weiss.
“On spectral clustering, analysis and an algorithm”. In *Advances in Neural Information processing systems*, Vol. 14, 2001, pp. 849-856.
- [21] J. Peng and Y. Xia.
“A New Theoretical Framework for K-Means-Type Clustering”, *StudFuzz*, Vol. 180, Springer-Verlag, 2005, pp.79-96.
- [22] M. Meila and J. Shi.
“Learning segmentation by random walks”. In *NIPS*, 2000, pp. 873-879.
- [23] D. Verma and M. Meila.
“A comparison of spectral clustering algorithms”. *Technical Report, Department of CSE University of Washington Seattle*, WA, 200598195ñ2350.
- [24] M.E.J. Newman.
“Detecting community structure in networks”. *Eur. Phys. J. B* 38, 2004, pp. 321-330.
- [25] J.E. Hurtado.
Structural reliability: statistical learning perspectives. Ed. F. Pfeiffer, and P. Wrighers. “Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics”. Vol. 17, 2004.
- [26] Y. Lin.
“Evaluate the performance of a stochastic-flow network with cost attribute in terms of minimal cuts”. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 91, No. 5, 2006, pp. 539-545.
- [27] J. Song and A. Der Kiureghian.
“Bounds on systems reliability by linear programming”. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 6, 2003, pp. 627-636.
- [28] B. Barzel and O. Biham.
“Quantifying the connectivity of a network: the network correlation function method”. *Physical Review E* 80, 046104, 2009.
- [29] M. Sánchez Silva.
Introducción a la Confidabilidad y evaluación de riesgos. Bogotá: Ediciones Uniandes, 2005.
- [30] D.E. Campbell.
Incentives: Motivation and the Economics of Information. Cambridge University Press, 2006.

Brundtland Commission.

Our Common Future. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1987.

P. Bourgine and J. Pierre-Nadal.

Cognitive Economics. An Interdisciplinary Approach. Springer, 2004.

M. Filippone, F. Camastra, F. Masulli and S. Rovetta.

“A survey of kernel and spectral methods for clustering”.
Pattern recognition, Vol. 41, 2008.

R. Inokuchi and S. Miyamoto.

“LVQ clustering and SOM using a kernel function”.
Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 3, 2004, pp. 1497-1500.



Climate change mounting heat wave on wonderful view.
Andrea Lampis