



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Research

Models for Assessing the Complexity of Infrastructure Construction Projects

Modelos para evaluar la complejidad de los proyectos de construcción de infraestructura

Flavio Durón-González¹  , Luis Arturo Rivas-Tovar¹ , and Magali Cárdenas-Tapia² 

¹ESCA-UST, Instituto Politécnico Nacional (México)

²ESCA-Tep., Instituto Politécnico Nacional (México)

Abstract

Context: Infrastructure allows satisfying the population's needs and contributes significantly to countries and regions' economic development. However, Flyvbjerg points out that the success rate of construction projects is estimated at only 25%, and, particularly in megaprojects, it is eight successful projects for every 1.000. On the other hand, several studies point out that complexity has negative effects on project performance, so it is of interest to evaluate such complexity and to sensitize project managers to anticipate its negative effects.

Method: Through a literature review, four relevant complexity models were identified. Using a heuristic analysis technique, they were analyzed with regard to three aspects: 1) factors contributing to project complexity, 2) types of projects and their specific complexity factors, and 3) techniques and tools used in the models to study project complexity.

Results: The most comprehensive model is Lessard, Sakhrani, and Miller's HoPC. By considering the project's life cycle within the Bosch-Rekveltdt's TOE framework, seven complementary complexity aspects were identified: project architecture, financial complexity, governance, the validation process of project stages, project management maturity, cultural aspects, and the regulatory framework.

Conclusions: Recent studies highlight that environment and externalities are increasingly relevant in assessing the complexity of infrastructure construction projects. Projects exhibit aspects of complexity depending on their internal components and on the specific context in which they are undertaken, so the development of subject-specific models is recommended. Project complexity has been addressed mainly from Project Management and Systems Dynamics approaches. However, for the study of the diversity, interdependence, and dynamics among the complexity factors, future research based on the Complex Systems approach is needed.

Acknowledgements: We would like to thank Instituto Politécnico Nacional (National Polytechnic Institute) and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (National Science and Technology Council) of Mexico.

Keywords: construction industry, megaprojects, project performance, complexity measurement, project management, complex systems.

Article history

Received:
29th / Jan / 2022

Modified:
19th / July / 2022

Accepted:
5th / Aug / 2022

Ing., vol. 28, no. 1,
2023. e19021

©The authors;
reproduction right
holder Universidad
Distrital Francisco
José de Caldas.

Open access



*  **Correspondence:** flavioturong@netscape.net

Resumen

Contexto: La infraestructura permite la satisfacción de necesidades de la población y contribuye de manera importante al desarrollo económico de países y regiones. Sin embargo, Flyvbjerg señala que la tasa de éxito de los proyectos de construcción se estima en solo el 25% y, particularmente en los megaproyectos, es de 8 proyectos exitosos por cada 1.000. Por otra parte, diversas investigaciones señalan que la complejidad tiene efectos negativos en el desempeño, por lo que es de interés evaluar dicha complejidad y sensibilizar a los administradores de proyectos en la anticipación de los efectos negativos.

Método: Mediante la revisión de la literatura se identificaron cuatro modelos de complejidad relevantes. Por medio de un análisis heurístico fueron analizados en tres aspectos: factores que aportan complejidad a los proyectos, tipos de proyectos y su complejidad particular y técnicas y herramientas que utilizan los modelos para estudiar la complejidad.

Resultados: El modelo más integral es el HoPC de Lessard, Sakhrani y Miller. Al considerar el ciclo de vida de los proyectos, sobre el marco TOE, se identificaron siete aspectos complementarios: arquitectura del proyecto, complejidad financiera, gobernanza, proceso de validación de las etapas del proyecto, madurez de la gestión de los proyectos, aspectos culturales y marco regulatorio.

Conclusiones: Investigaciones recientes destacan que la complejidad del entorno/externalidades es cada vez más relevante en la evaluación de la complejidad. Los proyectos exhiben aspectos de complejidad según los componentes internos que los integran y el contexto particular en el que se emprenden, por lo que se recomienda la construcción de modelos para sujetos específicos. La complejidad de los proyectos ha sido abordada principalmente desde los enfoques de administración de proyectos y dinámica de sistemas. Sin embargo, para el estudio de diversidad, interdependencia y dinámica entre los elementos de complejidad, son necesarias futuras investigaciones desde el enfoque de sistemas complejos.

Agradecimientos: Al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México).

Palabras clave: industria de la construcción, megaproyectos, desempeño de los proyectos, medición de la complejidad, administración de proyectos, sistemas complejos.

Tabla de contenidos

		3. Resultados y discusión	16
		3.1. Factores de complejidad y categorías	17
		3.2. Factores de complejidad y tipos de proyectos	21
		3.3. Técnicas y herramientas para la medición de la complejidad	23
		4. Conclusiones	24
		5. Contribución de autores	26
		Referencias	26
1. Introducción	3		
1.1. Los proyectos de construcción de infraestructura	5		
1.2. La complejidad de los proyectos	8		
2. Materiales y método	13		
2.1. Obtención de documentos	13		
2.2. Método de investigación	14		

1. Introducción

Los proyectos de construcción de infraestructura transforman el medio físico mediante el aprovechamiento de los recursos naturales, humanos, financieros y tecnológicos en obras que permiten la satisfacción de necesidades de la población. La construcción de la infraestructura requiere la planeación y la organización de dichos recursos. Aunque existen estándares de administración de proyectos, en la práctica profesional, los proyectos continúan fallando en términos del tiempo y el costo de su ejecución (1).

Los proyectos de construcción de infraestructura se encuentran inmersos en un entorno social, jurídico, económico, político y ecológico cuya gestión escapa a los aspectos puramente técnicos (2), (3), es decir, son emprendimientos sociotécnicos. Estos aspectos internos y externos de los proyectos y su desempeño se han analizado desde diversos enfoques epistémicos, uno de ellos es el de la complejidad.

En el contexto de la administración de proyectos, y en general en la práctica profesional, se utiliza el término *complejidad* como sinónimo de complicado, ya que intervienen muchas variables que hacen que los proyectos incrementen su tiempo y costo a la terminación. Sin embargo, una gran cantidad de proyectos de construcción de infraestructura son complicados, pero no complejos, ya que la complejidad exige cuando menos tres características: emergencia, no linealidad y formación de patrones (4).

En otro sentido, los proyectos de construcción de infraestructura son complejos en su naturaleza, por lo que es importante evaluar y entender esas complejidades (5), donde la gestión de la complejidad de los proyectos es un tópico emergente que se ha convertido en una parte importante de la administración de proyectos, siendo relevante para su éxito (6).

Diversos investigadores han reconocido la importancia de medir la complejidad de los proyectos (5). El punto de partida para la gestión de la complejidad involucra el entendimiento de dicha complejidad y sus efectos en la ejecución y en los resultados del proyecto (7). Para estos autores, la evaluación de la complejidad se consigue identificando los mecanismos que influyen en el éxito de los proyectos, lo que permite entender y predecir sus impactos negativos. Así, la aplicación de los marcos y modelos para la evaluación de la complejidad es un referente para los tomadores de decisiones y los gerentes involucrados en un proyecto (5).

El desempeño de los proyectos es potencialmente afectado por su complejidad, y es un tópico de investigación relevante (8), ya que es asombrosamente frecuente que los proyectos técnicos sean entregados tarde o con grandes sobrecostos, con un decepcionante rendimiento del proyecto (2). Existe una gran cantidad de factores que intervienen en la complejidad de los proyectos (6). En general, las investigaciones relativas a la influencia de la complejidad en el éxito de los proyectos son escasas (7). Desde un punto de vista teórico y práctico, se sugieren investigaciones con énfasis en el carácter subjetivo de la complejidad, o sus similitudes encontradas en grandes proyectos de diferentes sectores industriales, lo cual favorecerá la comprensión del pobre desempeño de proyectos reales (8).

También son escasos los estudios empíricos relacionados con la medición de la complejidad en grandes proyectos, aunque existen varios estudios que proporcionan un marco conceptual de la complejidad, rara vez aportan un modelo práctico para evaluarla de manera cuantitativa (5).

En cuanto a las aproximaciones para la evaluación de la complejidad de los proyectos, la complejidad se mide como una función de muchos factores interrelacionados, por lo que su estudio debe adoptar un enfoque sistémico (5). En la literatura se percibe un exceso de estudios, que basado en la supuesta “ciencia de sistemas”, proliferan casi excesivamente enfoques de análisis cualitativo y pocas investigaciones adoptan un análisis cuantitativo, y que además omiten estudiar la interacción entre los diversos elementos, haciendo difícil que reflejen la complejidad de los proyectos (6).

Las investigaciones de la *complejidad de los proyectos de construcción* se han enfocado principalmente en cuatro áreas (9): los factores que contribuyen a la complejidad de los proyectos, el impacto de la complejidad de los proyectos, los métodos de medición de la complejidad y la gestión de la complejidad de los proyectos.

La complejidad de los proyectos tiene un efecto negativo en su desempeño (10), por lo que los académicos han centrado sus esfuerzos de investigación en la gestión de riesgos, en el estilo de gestión y en la capacidad de adaptación (9). Con base en las investigaciones existentes y sus implicaciones, estos autores sugieren que futuras investigaciones examinen las siguientes áreas: los factores que influyen en la complejidad del proyecto desde la perspectiva de las diferentes partes interesadas (*stakeholders*) y desde las diferentes *fases del ciclo de vida* de un proyecto, la relación entre la *complejidad* del proyecto y el *éxito* del proyecto, la *medición de la complejidad* del proyecto teniendo en cuenta los elementos estructurales, dinámicos e interacciones, la gestión de la *complejidad* del proyecto para los diferentes tipos de proyectos y el *incremento de la complejidad* del proyecto durante su *ciclo de vida*.

En cuanto a la gestión de los *megaproyectos de construcción*, existen brechas en el conocimiento de la gestión de la complejidad externa, incluyendo la complejidad temporal y la social y cultural (10), debido a que la mayoría de las investigaciones existentes se han realizado sobre cuestiones de complejidad interna.

La presente investigación tiene como objetivo comparar los modelos para evaluar la complejidad de los proyectos de construcción de infraestructura. Para este propósito se realiza el análisis comparativo de cuatro marcos y modelos relevantes por medio de un análisis heurístico en tres aspectos: los factores que aportan complejidad a los proyectos, los tipos de proyectos y su complejidad particular, y las técnicas y herramientas que utilizan los modelos para estudiar la complejidad.

Las siguientes dos secciones describen el abordaje al estudio de la complejidad desde tres enfoques, señalando las propiedades y características que aportan un marco para su estudio. La sección de materiales y métodos presenta los criterios utilizados para el análisis comparativo con apoyo del software ATLAS.ti, tablas de co-ocurrencia y diagramas de Sankey, así como el diagrama de bucles causales por medio del software Vensim PLE, que permiten identificar relaciones entre los conceptos.

En la sección de resultados y discusión se presentan los factores de complejidad más relevantes que se han identificado en los modelos analizados, los factores de complejidad más relevantes según el tipo de proyectos, y se identifican las técnicas y herramientas utilizadas en dichas investigaciones.

Paralelamente a los resultados del análisis comparativo, se reflexiona acerca de la necesidad de abordar la gestión de proyectos de construcción de infraestructura desde el enfoque de sistemas complejos, dadas las propiedades y características de los primeros y las descripciones que aportan los segundos, y que no han sido abordadas suficientemente en el enfoque de administración de proyectos ni en el enfoque de sistemas.

1.1. Los proyectos de construcción de infraestructura

Los proyectos de construcción de infraestructura varían ampliamente en términos de tipo, tamaño, duración y costo, lo que conduce a múltiples alternativas para el modelado del ciclo de vida, los métodos de entrega de los proyectos y las formas de contratación para la ejecución (11). El estándar *Construction Extension* al PMBoK (2016) señala que el entorno y el contexto son extremadamente importantes, sus efectos son usualmente causas de complejidad en los proyectos y deben ser tenidos en cuenta como fuentes de riesgo (11).

En el estudio de la complejidad es importante distinguir los tipos de proyectos de construcción de infraestructura, ya que cada uno tiene diferentes características y, por tanto, diferentes complejidades. Por ejemplo, los proyectos de transmisión y distribución de energía eléctrica, las redes de agua potable y saneamiento, las carreteras, los ferrocarriles, los ductos para el transporte de hidrocarburos son construcciones lineales. Esto implica que los sitios de construcción pueden abarcar kilómetros de longitud, con sus correspondientes complejidades debidas a la diversidad de sitios y en relación con la propiedad de la tierra o los derechos de vía, incrementando la complejidad en la gestión de múltiples partes interesadas. Por otra parte, los proyectos de generación de energía eléctrica y de transformación de hidrocarburos implican importantes componentes tecnológicos y conflictos sociales con las comunidades afectadas.

Según el tipo de proyectos, también se diferencian los elementos de complejidad de acuerdo con el entorno o externalidades, por ejemplo, los megaproyectos tienen importantes impactos económicos y sociales. Económicos, por la gran cantidad de recursos que requieren para su ejecución y sociales, por el impacto en la creación de empleos, el posible desplazamiento de comunidades originarias, e incluso por los importantes impactos en la ecología del lugar en donde se construyen.

Por otra parte, el estándar *Construction Extension* al PMBoK señala que la mayoría de los ciclos de vida de los proyectos de construcción son predictivos (11), es decir, que se espera sean ejecutados conforme a la planeación, con los mínimos cambios posibles en el diseño durante la construcción. Este criterio demanda que la planeación sea lo más detallada y completa posible para evitar dichos cambios. De ahí la preocupación por la adecuada asignación de recursos en la fase de diseño del proyecto, es decir, antes de la fase de ejecución, reconociendo que el adecuado desarrollo inicial del proyecto (*FED, Front End Development*) es la mejor garantía para que su ejecución se logre con el costo y en el tiempo

planeados (12), (13), pues de la calidad de la planeación dependerá el comportamiento de las siguientes fases (14). La importancia de las fases iniciales radica en que es cuando se define si el proyecto es asequible, resiliente y sostenible (3) y es cuando se pueden gestionar los riesgos al menor costo (15).

La incertidumbre al inicio del proyecto es máxima y se reduce de manera importante hacia la terminación (16), (17), pues al inicio del proyecto se cuenta con poca información y el riesgo es alto, en la medida que se cuenta con más información disminuye el riesgo (15). Así, el desarrollo de las etapas iniciales del proyecto (FED) tiene impactos importantes en su éxito para la terminación (2). Diversos especialistas sugieren que un proyecto no se debe licitar si no está en la etapa FEL-III (FEL, *Front End Loading*) (18) o que el avance de la ingeniería de detalle debe ser 95 % cuando el avance de la construcción sea máximo del 20 % (19), con el propósito de que los proyectos de construcción de infraestructura alcancen un buen desempeño en términos del tiempo y el costo.

La complejidad de los proyectos de construcción de infraestructura tiene un carácter dinámico, ya que varía según las fases del ciclo de vida y, por tanto, los modelos para caracterizar la complejidad de los proyectos deben reconocer ese carácter dinámico (2). Las diversas alternativas de contratación y el número de puntos de decisión (o revisión) a lo largo del ciclo de vida también influyen en la complejidad (13).

De acuerdo con lo anterior, una planeación realista, la gestión del riesgo y de la complejidad son principios para el éxito guiando el proceso de ejecución de los proyectos (3). En este sentido, el mismo autor señala que los objetivos del proyecto inicialmente solo consideraban la construcción de activos y actualmente se requiere considerar a la infraestructura como un servicio cumpliendo con criterios de sostenibilidad ambiental, resiliencia y cambio climático, que se encuentra inmersa en cambios tecnológicos y todo esto es necesario financiarlo. Para acceder a fondos de financiamiento, los proyectos requieren cumplir con criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG), adicionalmente, la parte social es muy sensible, en esta se pueden aprobar o desaprobado los proyectos y se debe poner atención a la capacidad para afrontar los riesgos y los equilibrios regionales que los gobiernos deben controlar para desarrollar la infraestructura. Todos estos elementos en conjunto constituyen el *ecosistema de proyectos* de infraestructura (3).

El éxito de un proyecto depende del cumplimiento de ciertas *hipótesis* (alcance, calidad, costo y tiempo), que se desarrollan en un ambiente de incertidumbre (*ecosistema de proyectos*), ya que falta información acerca de los eventos que se pudieran presentar (15). La incertidumbre del entorno natural y social resulta en riesgos que son impredecibles y que obstaculizan alcanzar los objetivos del proyecto (7). Para estos aspectos fuera de control directo, la gestión de proyectos debe estar en sintonía con las fuentes de incertidumbre, surgiendo como alternativa la gestión de riesgos (13), ya que esta es la gestión de la incertidumbre (20).

La complejidad aparece cuando los sistemas tienen muchos elementos desconocidos que influyen en el comportamiento del conjunto, lo que equivale a tener incertidumbre en la operación (ejecución) y, por lo mismo, un riesgo alto de que los resultados no sean los esperados (21). Un proyecto complejo es

La complejidad se refiere a las interacciones con el *ecosistema* en el que se desarrollan los proyectos de infraestructura, ya que se presentan múltiples actividades interrelacionadas, con presupuestos y tiempos muy apretados, incertidumbre en su ejecución, múltiples grupos de interés interactuando con objetivos que suelen estar en conflicto y cuyo desenlace no es lineal, por lo que el cumplimiento de los objetivos de los proyectos está fuertemente condicionado (3). Albarrán agrega que un proyecto puede pasar de simple a complicado, complejo o caótico en función de dos variables: qué tan bien se estudió o analizó el proyecto en su fase inicial (planeación) y la gestión de los aspectos del *ecosistema de proyectos* (técnicos, financieros, ambientales, sociales, tecnológicos y los grupos de interés) (3).

1.2. La complejidad de los proyectos

El término complejidad es un atributo que da la noción de una cosa conformada por elementos diversos que se encuentran enmarañados, entrelazados o entretejidos. En tanto que la evaluación de la complejidad se refiere al uso de métodos que permitan apreciar o medir la complejidad.

Aunque existe una gran cantidad de investigaciones acerca de la complejidad de los proyectos, no hay consenso entre los investigadores en su definición (23). Particularmente en la industria de la construcción, no hay una definición universalmente aceptada e incluso es difícil de cuantificar (9). No parece haber una única definición de la complejidad de los proyectos que pueda capturar todo el concepto (22).

La complejidad de los proyectos consiste en muchas partes variadas e interrelacionadas que pueden ser operacionalizadas en términos de diferenciación e interdependencia (24). La diferenciación se refiere al número de elementos (tareas, especialistas), y la interdependencia o conectividad al grado de las interrelaciones entre dichos elementos (24).

La complejidad de los proyectos también puede definirse como un arreglo intrincado de diversas partes interrelacionadas en el que los elementos pueden cambiar y evolucionar constantemente con un efecto sobre los objetivos del proyecto (23). Estos autores, mediante una revisión sistemática de la literatura, extraen las palabras clave más citadas para definir la complejidad de los proyectos: la interdependencia entre los elementos como tareas, equipos y entradas; la causalidad está entrelazada y no aplican las relaciones simples de causa y efecto entre las partes; existe un contexto de emergencia dinámica; la previsibilidad y el control son reducidos; el alcance y los límites del proyecto no están claros; la gobernanza del proyecto está descentralizada y existen equipos autónomos; el número de posibles relaciones es vasto; el proyecto es autoorganizado y adaptable; la transparencia es escasa, incluidos los objetivos, procesos, métodos, *etc.*; la diversidad de recursos es heterogénea.

Desde el enfoque de sistemas, los proyectos están formados por elementos que interactúan a diferentes niveles, incluyendo los aspectos internos y externos a los proyectos. Así, la Real Academia de Ingeniería del Reino Unido define un sistema complejo como un “arreglo de partes (o elementos) que en conjunto tienen un desempeño o significado distinto e impredecible que se deriva a partir del comportamiento de las partes” (25, p. 1).

Desde las ciencias de la complejidad, un sistema complejo es aquel que “tiene agentes que se relacionan entre sí y forman patrones que requieren enfoques epistémicos y/o métodos de análisis para visualizar comportamientos emergentes a partir de las interacciones, que ningún elemento individual puede explicar por sí mismo” (4, p. 9).

El constructo *complejidad de los proyectos* plantea así tres perspectivas o enfoques: la perspectiva del Project Management Institute (PMI), la perspectiva de sistema de sistemas (System of Systems, SoS) y las teorías de la complejidad (Complexity Theories) (23).

La administración de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades de un proyecto con el fin de alcanzar sus objetivos (1).

El estándar *Construction Extension* al PMBoK señala que la complejidad de los proyectos de construcción no es evidente cuando inician, ya que existe la posibilidad de que surjan situaciones conforme avanza, generando incertidumbre en los alcances y procedimientos constructivos inadecuados, teniendo efectos negativos en la terminación en tiempo y dentro de las expectativas de costo (11).

Los proyectos cada vez son más complejos debido al incremento de factores que son considerados *fuentes de complejidad*, afectando los resultados del proyecto: un gran aumento de recursos requeridos, entornos turbulentos, innovaciones tecnológicas y un gran número y diversidad de actores trabajando y comunicándose entre ellos (1). Estos autores señalan que una parte del problema consiste en que cuando los problemas son fundamentalmente dinámicos y son tratados de manera estática, los retrasos y el incremento de costos son frecuentes.

Desde el enfoque de administración de proyectos en la industria de la construcción diversos factores contribuyen a la complejidad (11): avances tecnológicos y su impacto en la administración de proyectos; desarrollo de nuevos materiales y equipos de construcción; variedad de involucrados; interrelaciones entre las diferentes partes del proyecto, gran nivel de detalle, complejidad de los elementos; limitaciones de espacio y cantidad de personal laborando; coordinación eficiente, seguimiento y control; presiones sociales (por ejemplo, de transparencia y rendición de cuentas), y aspectos ecológicos, que no solo buscan el término del proyecto sino también la forma y métodos acerca de cómo se llegó a él.

La incertidumbre es una parte intrínseca de la complejidad, ya que grandes incertidumbres contribuyen a la complejidad y al incremento del tiempo y costo de los proyectos de construcción. Ejemplos de estas incertidumbres son el uso de tecnologías novedosas que no han sido probadas, la dificultad de realizar estimaciones del tiempo y del costo realistas al inicio del proyecto, la incertidumbre en la ejecución de las actividades del proyecto, entre otros (2).

La complejidad de los proyectos puede ser de dos tipos: complejidad estructural y complejidad dinámica (26). La complejidad estructural se refiere a sistemas y proyectos que consisten en un gran número de componentes que interactúan, y la complejidad dinámica se refiere al entorno del proyecto

y las interacciones que están sujetas a cambios resultando en imprevisibilidad, incertidumbre y comportamiento emergente (26).

Por otra parte, desde el enfoque de sistema de sistemas, el pensamiento sistémico ayuda a definir e identificar las nociones detrás del concepto de complejidad de los proyectos, a identificar y evaluar los factores que hacen que un proyecto sea complejo, o a interpretar y medir la complejidad de los proyectos (22).

Los proyectos son cada vez más complejos debido a comportamientos y características emergentes inesperados, la complejidad se ha convertido en un aspecto inseparable de los sistemas, también en uno de los factores importantes del fracaso de los proyectos y su estudio ayuda a identificar las características que se deben incorporar en el proceso de administración de proyectos para afrontar dicha complejidad (23).

Las relaciones lineales causa-efecto no se adaptan bien para el estudio de sistemas complejos (27). El enfoque tradicional para la administración de proyectos es reduccionista en tanto que emplea métodos para el desglose de las actividades en partes manejables (empleando técnicas como la estructura de desglose de trabajo), y que los procesos típicamente tratan las interacciones entre las partes de manera lineal, sin embargo, no considera la naturaleza iterativa de los proyectos particularmente en el diseño —dicho en el lenguaje de la dinámica de sistemas, no tiene en cuenta los ciclos de retroalimentación— (13). Las condiciones y el rendimiento del proyecto evolucionan con el tiempo como resultado de las respuestas de retroalimentación, muchas de las cuales implican relaciones no lineales (28).

Los sistemas de sistemas son sistemas integrados a gran escala, heterogéneos y operables de forma independiente por sí mismos, pero que están conectados en red con un objetivo común (23). En el mismo sentido, estos autores afirman que el estudio de la complejidad se apoya en el enfoque de sistemas de sistemas en varios conceptos, como la autonomía y la independencia de los sistemas y la cuestión de la falta de control en la gestión.

Adoptando la perspectiva de dinámica de sistemas (System Dynamics), un proyecto puede considerarse como un sistema que funciona dentro de una serie de “sistemas concéntricos” en los que cada uno repercute en los demás que operan en él, por ejemplo, entre los aspectos de la complejidad de los proyectos fuera del control se encuentran gradualmente: las partes interesadas externas; la industria de la construcción; la economía y el gobierno nacionales; y la economía global (13). Los aspectos dentro del control del proyecto son la organización del cliente y el proyecto mismo, compuesto de elementos como organización, liderazgo, personas, procesos y sistemas (13).

Los proyectos de construcción pueden caracterizarse como un sistema complejo y dinámico en el que los factores internos y externos están directa o indirectamente relacionados entre ellos (9). Los factores internos incluyen, entre otros, las incertidumbres relacionadas con los proyectos, los fondos de financiamiento, los recursos humanos y los conflictos de intereses entre los involucrados clave

(*stakeholders*), tales como promotores, contratistas y diseñadores; mientras que los factores externos consisten en factores inciertos relacionados con el gobierno, la economía, las condiciones sociales, las leyes, el entorno natural, etc. (29)

Los sistemas de construcción pueden ser conceptualizados como un conjunto de componentes complejos y dinámicamente interdependientes, incluyendo múltiples procesos de retroalimentación y relaciones no lineales, y en este sentido, la modelación de sistemas dinámicos permite asegurar la eficiencia y el desempeño de los sistemas de construcción (30). Citando también a Rodrigues y Bowers, esta alternativa de modelado de sistemas permite estudiar factores de comportamiento y sus interacciones con los procesos de construcción, en especial en los megaproyectos y, qué según Love, Holt, Shen, Li e Irani, son aspectos que no se pueden abordar mediante métodos de modelado tradicionales como estructuras de descomposición del trabajo (Work Breakdown Structures, WBS), diagramas de Gantt, redes PERT/CPM, análisis de fallos (*crashing analysis*) o análisis de equilibrio (*trade-of analysis*) (30).

En los años recientes, la dinámica de sistemas ha sido utilizada ampliamente para resolver problemas complejos y dinámicos en la administración de la construcción (29), ya que considera la relación dinámica entre la estructura, la función y el comportamiento de los sistemas complejos desde una perspectiva global que permite a los administradores de proyectos simular los cambios que ocurren frecuentemente y los impactos de dichos cambios (29). La dinámica de sistemas permite incorporar los factores técnicos, organizacionales y del entorno en los procesos, simulando el comportamiento de los resultados a través del tiempo (28).

La dinámica de sistemas estudia variables observables de sistemas complejos e intenta identificar las relaciones de causalidad (normalmente circulares) que existen entre ellas, una vez que estas relaciones están identificadas, resulta más sencillo explicar el origen de los comportamientos globales del sistema a partir de su estructura causal (31). Sin embargo, las estructuras de retroalimentación, por ejemplo, en los campos de estudio de las ciencias sociales, pueden ser objeto de controversia, ya que las perspectivas sobre un problema y las percepciones de este pueden ser muy diferentes (27), la construcción de estos modelos es un proceso en el que debe existir consenso entre los expertos acerca de la estructura de retroalimentación, la cual debe representar suficientemente el problema sistémico (27).

En cuanto al enfoque de sistemas complejos, diversos autores han propuesto la siguiente definición de ciencias de la complejidad o ciencias de los sistemas complejos:

“Las ciencias de la complejidad, también llamadas ciencias de los sistemas complejos, estudian cómo una gran colección de componentes —que interactúan localmente entre sí a pequeña escala— puede autoorganizarse espontáneamente para mostrar estructuras y comportamientos globales no triviales a mayor escala, a menudo sin intervención externa, autoridades centrales o líderes. Las propiedades de la colección pueden no entenderse o predecirse a partir del conocimiento completo de sus componentes por sí solos. Tal colección se denomina sistema complejo y requiere nuevos marcos matemáticos y metodologías científicas para su investigación.” (32, p. 1)

Las *ciencias de la complejidad* frecuentemente son contrastadas con las ciencias reductivas, estas últimas se basan en descomponer el todo en las partes, y las primeras implican describir un sistema mediante la descripción de las interacciones y las relaciones entre las partes (33). Asimismo, las partes de los sistemas complejos interactúan por medio de varios mecanismos estudiados por disciplinas científicas individuales (33).

En este sentido, ambas formas de hacer ciencia son complementarias. Las ciencias de la complejidad no serían posibles sin el resto de las ciencias, ya que implica combinar teorías y herramientas sintetizadoras provenientes de diferentes disciplinas, involucrando el descubrimiento de implicaciones completamente nuevas de las leyes de comportamiento que gobiernan a los sistemas (33). Las ciencias de la complejidad se han desarrollado en los últimos 120 años enriqueciéndose con conceptos de muchas ciencias que han hecho convergencia en este cuerpo de conocimiento (4).

Los sistemas complejos pueden describirse por medio de diez propiedades, unas son fuentes de complejidad y otras son aspectos que resultan de la complejidad (33). Son *fuentes de complejidad*: 1) la diversidad de interacciones y de componentes; 2) las interacciones no están coordinadas ni controladas de forma centralizada; 3) las interacciones son iterativas, de tal forma que hay retroalimentación de las interacciones previas a cierta escala de tiempo; 4) son sistemas abiertos al entorno y frecuentemente están influenciados por él (no equilibrio). Por otra parte, son aspectos que *resultan de la complejidad*: 5) los sistemas complejos exhiben un orden que surge de las interacciones entre las partes (autoorganización); 6) exhiben dependencias no lineales de parámetros o factores externos; 7) la estructura y función del sistema complejo es estable bajo perturbaciones relevantes (robustez); 8) pueden existir múltiples escalas de estructura, de patrones y de especialización de la función; 9) tienen historia y memoria; 10) pueden modificar su comportamiento dependiendo del entorno y de las predicciones que hacen de él.

En el mismo sentido, como ya se ha mencionado, un fenómeno complejo debe cubrir tres requisitos: el fenómeno resultante debe generar *propiedades emergentes*, el fenómeno debe ser *no lineal*, y el sistema debe exhibir una *formación de patrones* (4). La *emergencia* se asocia a la incertidumbre, la cual rompe con la búsqueda del orden y el control, se define como “la propiedad de un sistema que surge como resultado de un intempestivo y que busca la adaptación a un nuevo orden que constituye una evolución” (4, p. 11). La *no linealidad* se refiere a la desproporción entre las causas y los efectos, se asocia a comportamientos impredecibles o caóticos y al fenómeno de autointeracción o recursividad (efecto sobre el propio sistema, resultado de un estado anterior del sistema) (4, p. 13). La *formación de patrones*, que proviene de la búsqueda de concordancia, pretende identificar patrones subyacentes para predecir un comportamiento futuro con alto grado de certidumbre, se define como “un conjunto de sucesos o eventos reiterativos resultado de múltiples fuerzas que generan una tendencia y permiten predecir un comportamiento colectivo” (4, p. 12).

En términos de la modelación científica, los modelos son una forma práctica de comprender el mundo, son una reducción aceptable de la realidad que, en la medida en que son capaces de captar su esencia y explicarla con acierto, el modelo resulta más útil, más simple es mejor (4). Este autor propone, bajo el pensamiento complejo de sistemas sociales, utilizar las categorías de análisis de robustez,

recursividad, no linealidad, emergencia, autopoiesis, principio hologramático, límites y rutas del caos e identificación de patrones.

En relación con los proyectos de construcción de infraestructura, particularmente los megaproyectos, son considerados sistemas adaptativos complejos (2). La adaptación puede definirse como el cambio en un agente o en un sistema en respuesta a un estado de su entorno que ayudará al agente o sistema a cumplir sus objetivos (32).

Si los problemas son estacionarios, es decir, no cambian, es más fácil tratar de predecir su comportamiento para controlarlo, sin embargo, si los problemas no son estacionarios la predicción es limitada, pues nueva información generada por las interacciones en el sistema complejo conduce a la no-estacionalidad, para lo cual, la adaptación es un complemento deseable para tratar los aspectos impredecibles de un problema (32).

Un *sistema complejo es robusto* si continúa funcionando ante perturbaciones y, en general, cualquier tipo de cambio (32). La robustez y la adaptación son complementarias, pues el sistema (por ejemplo, un proyecto de construcción) debe ser suficientemente robusto mientras se adapta, y la adaptación puede favorecer la robustez (32). Una propuesta es medir la complejidad, la emergencia, la autoorganización, la homeostasis y la autopoiesis del sistema complejo desde la teoría de la información (34).

2. Materiales y método

Esta investigación tiene como objetivo comparar los modelos para evaluar la complejidad de los proyectos de construcción de infraestructura a partir de tres aspectos: 1) los factores que aportan complejidad a los proyectos, 2) los tipos de proyectos y su complejidad particular, y 3) las técnicas y herramientas que utilizan los modelos para estudiar la complejidad.

Se realizó un estudio exploratorio a partir de diversas investigaciones obteniendo 18 modelos de complejidad. Se identificaron cuatro modelos relevantes y se analizaron comparativamente por medio de un análisis heurístico. La Fig. 2 muestra el diseño de la investigación en el marco de tres enfoques para el estudio de la complejidad.

2.1. Obtención de documentos

Se obtuvieron diversas investigaciones por medio del repositorio del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (CONRICyT) de México, utilizando como palabras clave de búsqueda (“project complexity”) AND (“infrastructure”) AND (“megaprojects”) AND (“complex systems”). La búsqueda se realizó con palabras en idioma inglés, ya que esto hace posible la obtención de una mayor cantidad de documentos acerca del tema. La última fecha de la búsqueda corresponde al 22 de abril del 2021.

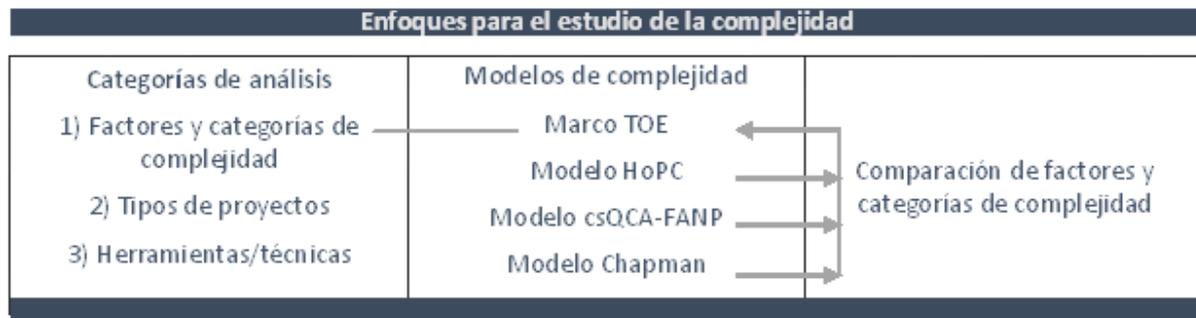


Figura 2. Diseño de la investigación

La obtención de documentos se realizó en el motor de búsqueda del repositorio y en las editoriales que publican las revistas y disertaciones doctorales más relevantes en el campo de *Project Management*. Las editoriales consultadas fueron Clarivate Analytics (Web of Science), Elsevier B. V. (Science Direct Freedom Collection Journals), Emerald Publishing, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE/IET Electronic Library), ProQuest Dissertations & Theses, Springer Protocols, Taylor & Francis Journals y Google Scholar.

En total se obtuvieron 30 documentos publicados entre los años 2008 y 2021, incluyendo revistas científicas, artículos de conferencias y disertaciones doctorales, excluyendo revistas de divulgación. Los artículos fueron seleccionados a través de la lectura de los resúmenes o abstracts en los que se hace referencia a los marcos (*frameworks*) y modelos (*models / modeling / modelling*) para medición (*measurement*) o evaluación (*assessment*) de la complejidad de los proyectos (*project complexity*). Una vez caracterizada la unidad de análisis, se identificaron los modelos de complejidad. Varios documentos comparten los mismos autores y hacen referencia a un mismo modelo, por lo que los 30 documentos fueron clasificados en 18 modelos.

2.2. Método de investigación

Se estudiaron a profundidad cuatro modelos de complejidad con el propósito de enriquecer los factores propuestos inicialmente en el marco TOE, considerando el ciclo de vida de los proyectos en la evaluación de la complejidad.

Se utilizó el método heurístico de análisis de contenido (35), a partir de las siguientes categorías de análisis cualitativo: (M) *modelo* para la evaluación de la complejidad; (F) *factor de complejidad*; (C) categorías que agrupan a los factores de complejidad; (Tp) *tipos de proyectos* en los que se han estudiado los modelos; y, (H) *técnicas/herramientas* utilizadas en los modelos para estudiar la complejidad.

El análisis de los datos se realizó mediante el software ATLAS.ti versión 9.0.23.0, herramienta de análisis cualitativo que permite observar la frecuencia de datos y relaciones entre conceptos por medio de tablas de co-ocurrencia, diagramas Sankey y redes de conceptos. Se definieron las categorías de análisis cualitativo como códigos y una vez realizada la codificación de los datos a partir de las *citas* de los documentos, se observaron las frecuencias y relaciones entre códigos. En esta fase de análisis se

emplearon tácticas para la generación de significado (36), a partir de las relaciones entre las categorías de análisis cualitativo que se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Categorías de análisis cualitativo y sus definiciones operacionales

Categoría	Definición
(M) modelo	Los modelos son representaciones esquemáticas que establecen relaciones cualitativas o cuantitativas entre los elementos conceptuales. Un marco se refiere a los límites en que se encuadra un problema o cuestión. El marco precede a la construcción de un modelo y establece los elementos conceptuales que permiten la construcción del modelo.
(F) factor	Elemento o causa que actúa junto con otros, que contribuyen a la complejidad de los proyectos.
(C) categoría	Clases o divisiones establecidas para clasificar los factores de complejidad.
(Tp) tipo de proyecto	Los proyectos de construcción se pueden clasificar desde diferentes enfoques, por ejemplo, por el tipo de construcción pueden ser: de edificación, de infraestructura, proyectos industriales; o por especialidad: petróleo y gas, bienes raíces, <i>etc.</i> (11).
(H) técnica/herramienta	Conjunto de procedimientos y recursos de los que se sirven los autores de cada modelo para estudiar la complejidad de los proyectos.

Las *categorías* que agrupan a los factores de complejidad fueron codificadas respetando la clase o división propuesta en cada modelo (relación M-C). Los *factores* de complejidad de cada modelo fueron codificados por similitud con los factores de complejidad del marco TOE (2), (8).

Posteriormente, se revisó si las categorías que agrupan a los factores de complejidad propuestas en cada modelo podrían ser agrupadas en el marco TOE por medio de las posibles relaciones entre (M) y (F).

La investigación sigue un proceso deductivo-inductivo. Deductivo en cuanto a que la codificación toma como punto de partida marcos y modelos, categorías, factores, tipos de proyectos y técnicas/herramientas de los documentos analizados. Inductivo en cuanto a que se codifican los factores de cada modelo con respecto a las categorías del marco TOE, buscando determinar si los factores de complejidad identificados en los modelos M02, M03 y M04 se pueden expresar dentro de las categorías del modelo M01 (marco TOE).

Adicionalmente, se revisaron las relaciones entre los conceptos de incertidumbre, riesgos y complejidad en los proyectos de construcción de infraestructura, y se analizaron las posibles relaciones de causalidad entre los elementos de complejidad del marco TOE mediante la construcción de un diagrama de bucles causales, siguiendo el procedimiento propuesto en (37) por medio de un método mixto de análisis de datos cualitativos (QDA) y diagramas de bucles causales (CLD). Se utilizó para ello el software Vensim PLE versión 9.0.0

3. Resultados y discusión

El marco M01 (marco TOE) (8), (2), (38) es uno de los primeros en estudiar la relación entre la complejidad de los proyectos y su desempeño. Se desarrolla en el marco de la teoría de la contingencia y, mediante entrevistas y encuestas aplicadas a expertos en proyectos de ingeniería de procesos (sector de energía), identifica elementos o factores que aportan complejidad a los proyectos. Los factores son investigados por medio de percepciones acerca de la complejidad desde las perspectivas de los contratistas, consultores y dueños de los proyectos. Considera que el concepto de complejidad y su evaluación tienen un carácter subjetivo, debido a que los diferentes actores involucrados pueden tener distintas visiones de la complejidad dependiendo de la fase del proyecto en la que participan y de su experiencia. El marco TOE recibe su nombre de las categorías en las que agrupa los factores de complejidad: técnicos, organizacionales y externalidades. El marco TOE identifica los factores de complejidad en las etapas iniciales de los proyectos con mayor impacto en el desempeño.

El modelo M02 (HoPC) (39) retoma el marco TOE y hace un nuevo planteamiento de categorías de complejidad. Conserva los elementos técnicos (T) y renombra los elementos organizacionales como institucionales (I) resaltando la importancia de aspectos como la gobernanza de los proyectos. Señala que los elementos de complejidad no son puramente técnicos u organizacionales por lo que T e I son descritos con el término genérico *características inherentes* de los proyectos. El modelo, aunque no pretende enlistar de manera exhaustiva todos los elementos de complejidad, es amplio en cuanto a que considera el contexto de los proyectos desde su origen como parte de una necesidad (por ejemplo, satisfactores para la sociedad), pasando por los elementos que forman parte del proyecto: T e I y la arquitectura (A) del proyecto como aspecto mediador entre las categorías técnicas e institucionales que finalmente conducen a determinadas propiedades emergentes (E) que constituyen los resultados esperados del proyecto. Conceptualiza la arquitectura del proyecto como el diseño que transforma las características inherentes (técnicas e institucionales) en propiedades emergentes que constituyen la realización del proyecto.

El modelo M03 (CsQCA-FANP) (7), (5), (6) es un modelo cuantitativo que, mediante la revisión de la literatura y el análisis del contenido, identifica diversos factores que son agrupados en categorías adicionales tomando como referencia al marco TOE. El valor que el modelo M03 aporta al estudio de la complejidad de los proyectos es la descripción de las relaciones entre las categorías de complejidad (tecnológica, organizacional, de los objetivos, del entorno y cultural) con respecto al éxito de los proyectos. Esto fue obtenido mediante el uso de técnicas cuantitativas como el proceso de red analítica (Analytical Network Process, ANP, con antecedentes en el método Analytical Hierarchical Process AHP) y el análisis comparativo cualitativo (Qualitative Comparative Analysis, QCA).

El modelo M04 (13) es de carácter cualitativo. Propone la idea de que la complejidad no es una noción estática, que cambia a lo largo del ciclo de vida de los proyectos. Señala que la importancia de la complejidad y las iniciativas para estudiarla y gestionarla ha sido motivo de preocupación en diversas instituciones públicas y en organizaciones de profesionistas; sin embargo, la descripción que se hace de la complejidad de los proyectos no es suficiente para afrontar el pobre desempeño. El autor señala que

la complejidad proviene de la incertidumbre. Las herramientas para entender la complejidad utilizadas en la práctica profesional son lineales, ya que no consideran la naturaleza iterativa de los proyectos y, particularmente, la naturaleza iterativa de la etapa de diseño. Con base en la revisión de seis marcos y modelos de complejidad (incluido el marco TOE), propone seis *dimensiones* de complejidad dentro de las cuales se pueden agrupar diversas *características* de la complejidad de los proyectos (financiera, del entorno, de gestión, características del sitio, de las actividades del proyecto, de la producción, la gobernanza, de inicio del proyecto, de los procesos de control y la madurez de la gestión de los proyectos).

La Tabla II presenta la valoración de la complejidad de los cuatro modelos a partir de emergencia, no linealidad y formación de patrones que caracterizan a los sistemas complejos según (4). Sin embargo, los modelos no consideran explícitamente la evaluación de la complejidad en esas tres características y, en general, solo son aspectos utilizados de manera conceptual para la descripción de la complejidad por medio de sus modelos.

3.1. Factores de complejidad y categorías

En total se codificaron 279 citas en 187 factores de complejidad y 23 categorías de complejidad. A partir de la tabla de co-ocurrencias entre los factores (F) y las categorías (C) que agrupan a dichos factores, se obtuvo un diagrama de red que representa gráficamente las relaciones entre las citas de los documentos analizados y los factores de complejidad propuestos en el marco TOE (M01).

Con el fin de comparar qué tan bien los factores TOE describen las complejidades identificadas por los autores de los otros modelos, se retiraron de la red los nodos que representan las categorías de complejidad (C) de los modelos M02, M03 y M04. Como resultado, algunas citas (aspectos de complejidad) quedan desconectadas de la red del marco TOE, esto representa los aspectos de complejidad no contenidos en TOE y que lo complementan.

Las citas desconectadas son las siguientes:

- Constructos y configuraciones de la arquitectura del proyecto (M02). Esta categoría de complejidad es mediadora para transformar las características técnicas e institucionales en los resultados esperados del proyecto (39).
- Características de la complejidad financiera (M04). Esta categoría de complejidad se deriva de limitaciones en los gastos anuales y controles como, por ejemplo, solicitudes de financiación adicional, terminación de los contratos y obtención de financiamiento del sector privado (13). Estas características también se relacionan con los esquemas de participación pública y participación público-privada en los proyectos de infraestructura señalados en el modelo (M02) (39).
- Gobernanza del proyecto (M04). Esta categoría de complejidad se refiere a la forma en que los participantes en la gobernanza definen, difunden y transmiten sus objetivos, estrategias y planes a los niveles más bajos en la jerarquía que tienen la responsabilidad de ejecutar el proyecto (13).

Tabla II. Análisis comparativo de los modelos con respecto a las características de los sistemas complejos propuestas por (4)

	Propiedades emergentes	No linealidad	Formación de patrones
Marco TOE (M01)	No considerado explícitamente. Se refiere a la emergencia como un estilo de gestión de proyectos complejos (por ejemplo, al uso de metodologías ágiles) complementario al estilo preplanificado o predictivo.	No considerado explícitamente.	Considera de manera estadística la formación de patrones que resultan de la relación entre las actividades iniciales de los proyectos (FED) y el desempeño (resultados del proyecto), relación mediada por la complejidad (factor contingente).
Modelo HoPC (M02)	Considera la <i>emergencia</i> de riesgos. Las propiedades emergentes son resultado de la interdependencia e interacciones entre aspectos técnicos e institucionales del proyecto, mediadas por su arquitectura.	Considera que la no linealidad es una propiedad emergente. Es la propiedad de un sistema cuyos efectos e impactos son desproporcionados con respecto a las causas, tanto por amplificación como por atenuación.	No considerado explícitamente.
Modelo csQCA-FANP (M03)	No considerado explícitamente.	No considerado explícitamente. Identifica relaciones entre las categorías de complejidad y sus efectos en el desempeño.	No considerado explícitamente.
Modelo Chapman (M04)	No considerado explícitamente.	Los proyectos son sistemas adaptativos complejos (<i>Complex Adaptive Systems, CAS</i>) en los que pequeños cambios en las condiciones iniciales o el ambiente externo pueden tener grandes e impredecibles consecuencias en los resultados del sistema.	Considera que hay patrones en las causas de fracaso de los proyectos.

- Procesos de validación a lo largo del ciclo de vida del proyecto (M04). Las validaciones para el rechazo o la continuación del proyecto pueden requerir la revisión de las estrategias, los procedimientos y los procesos o la reelaboración de las definiciones del alcance, las estimaciones, las evaluaciones de riesgo, las disposiciones de contingencia, los cambios del alcance o los cronogramas previamente completados (13). Esto es aplicable, por ejemplo, con el esquema de validación por compuertas a lo largo del ciclo de vida del proyecto *Front End Loading* (FEL).

en los métodos”, con repercusiones en otros aspectos técnicos y organizacionales del proyecto. Los aspectos que pueden balancear la “incertidumbre en el alcance” son “claridad en los objetivos del proyecto” y “alineación de los objetivos del proyecto”.

En la Fig. 4 están representados mediante un diagrama Sankey las co-ocurrencias más relevantes (por el número de citas) entre los factores del marco TOE y las categorías de los cuatro modelos estudiados. A mayor espesor de las líneas más fuerte es la relación; los colores indican los tipos de complejidad técnica (naranja), organizacional (verde) y del entorno/externalidades (rosa); y el cambio de color en los enlaces indica que un aspecto de complejidad tiene connotaciones de más de un tipo, de acuerdo con lo sugerido por (39).

Hay aspectos de complejidad que no son solamente técnicos y pueden tener connotaciones organizacionales (39). Se observa que los factores de complejidad “falta de experiencia en el país” y “dependencia de partes interesadas externas” tienen características organizacionales y del entorno/externalidades (O - E). El factor de complejidad “incertidumbre en el alcance” tiene características técnicas y del entorno/externalidades (T - E). Por último, el factor de complejidad

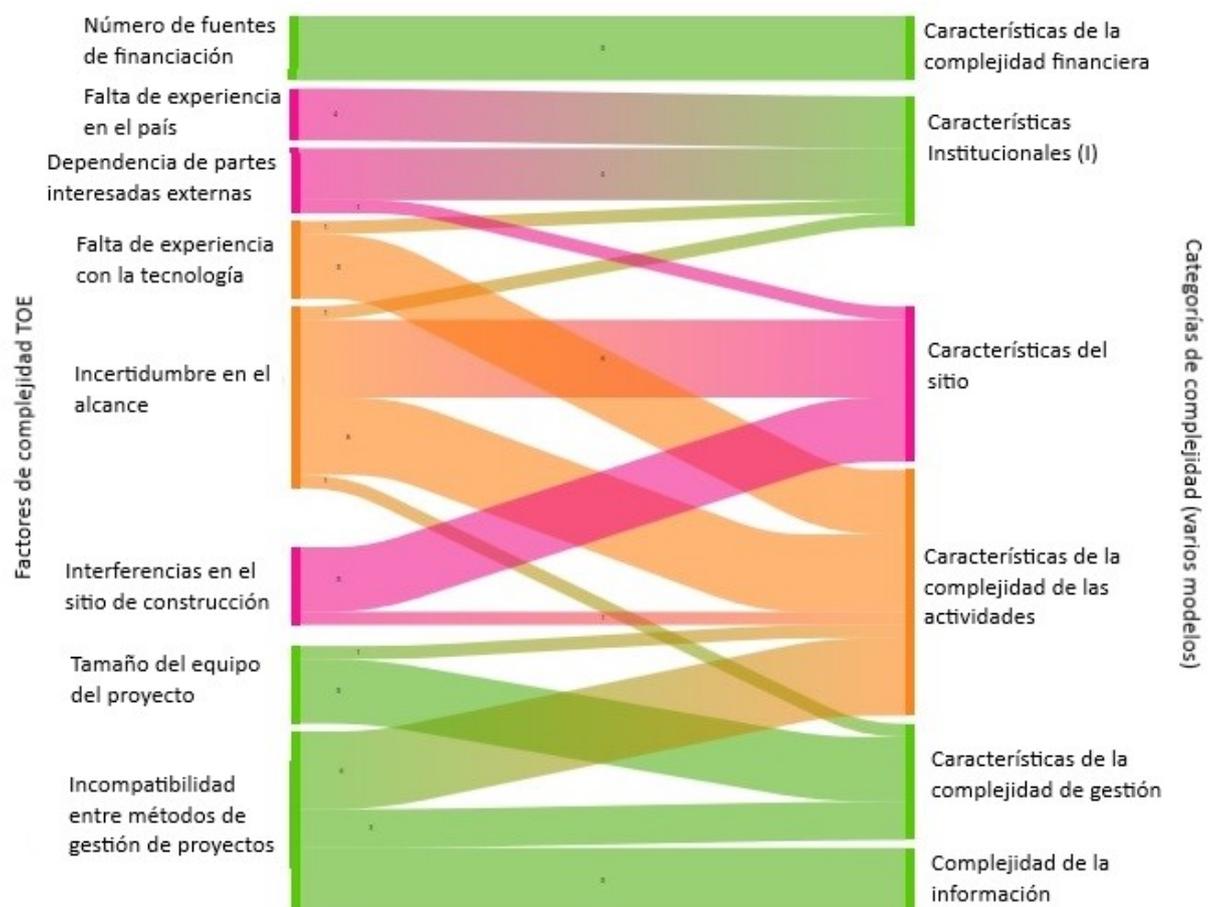


Figura 4. Diagrama Sankey de factores y categorías de complejidad más relevantes

“incompatibilidad entre métodos/herramientas de administración de proyectos” tiene características técnicas y organizacionales (T - O).

Los factores de complejidad más relevantes entre los cuatro modelos estudiados, por el número de citas asociadas a ellos, son “incertidumbre en el alcance” e “incompatibilidad entre diferentes métodos/herramientas de administración de proyectos”.

Incetidumbre en el alcance. Las citas se refieren a la diversidad de condiciones geotécnicas o geofísicas, el detalle de los estudios medioambientales, el descubrimiento de suelo contaminado, la cantidad de conexiones con las infraestructuras existentes, la exactitud de los registros de la empresa de servicios públicos (instalaciones existentes en el sitio de construcción), la investigación deficiente de las características del sitio de construcción, los intercambios de información derivados del proceso iterativo de diseño, la necesidad de incorporar cambios en el diseño, las deficiencias en la definición del alcance del proyecto, la información incompleta de la licitación y la capacidad de la infraestructura requerida.

Incompatibilidad entre diferentes métodos/herramientas de administración de proyectos. Las citas se refieren a la pobre gestión de la información, la falta de entendimiento entre los actores del proyecto, el creciente volumen de información que se puede generar en los proyectos, el volumen de información que debe pasar por compuertas de revisión, la información de diseño incompleta o poco coordinada, la necesidad de tecnologías digitales para almacenamiento, recuperación y búsqueda automatizada de los datos del proyecto, la integridad de los datos y el intercambio de información a través de los límites de la organización, la incertidumbre, el nivel de tratamiento, la capacidad de transmisión, el grado de obtención y la integración de más de un sistema o una plataforma de información.

3.2. Factores de complejidad y tipos de proyectos

Con base en la tabla de co-ocurrencias entre los factores del marco TOE y los tipos de proyectos de los cuatro modelos estudiados, se presenta en la Fig. 5 el diagrama Sankey con las relaciones más relevantes.

Los cuatro modelos de complejidad estudiados hacen referencia a los cinco tipos de proyectos siguientes: [Tp01] industria de procesos (marco M01; modelos M02 y M03); [Tp02] industria de la construcción e infraestructura (marco M01; modelos M02 y M03); [Tp03] proyectos internacionales de desarrollo (marco M01); [Tp04] edificación (modelo M03); [Tp05] proyectos ferroviarios (modelos M03 y M04).

Los proyectos de la industria de procesos (sector de energía) son los que exhiben mayor número de factores de complejidad en comparación con los otros tipos de proyectos.

Se pueden distinguir seis factores de complejidad del entorno/externalidades (E), cinco factores de complejidad organizacional (O) y cinco factores de complejidad técnica (T). Cabe destacar el factor técnico “incertidumbre en el alcance”, ya que está presente en todos los tipos de proyectos.

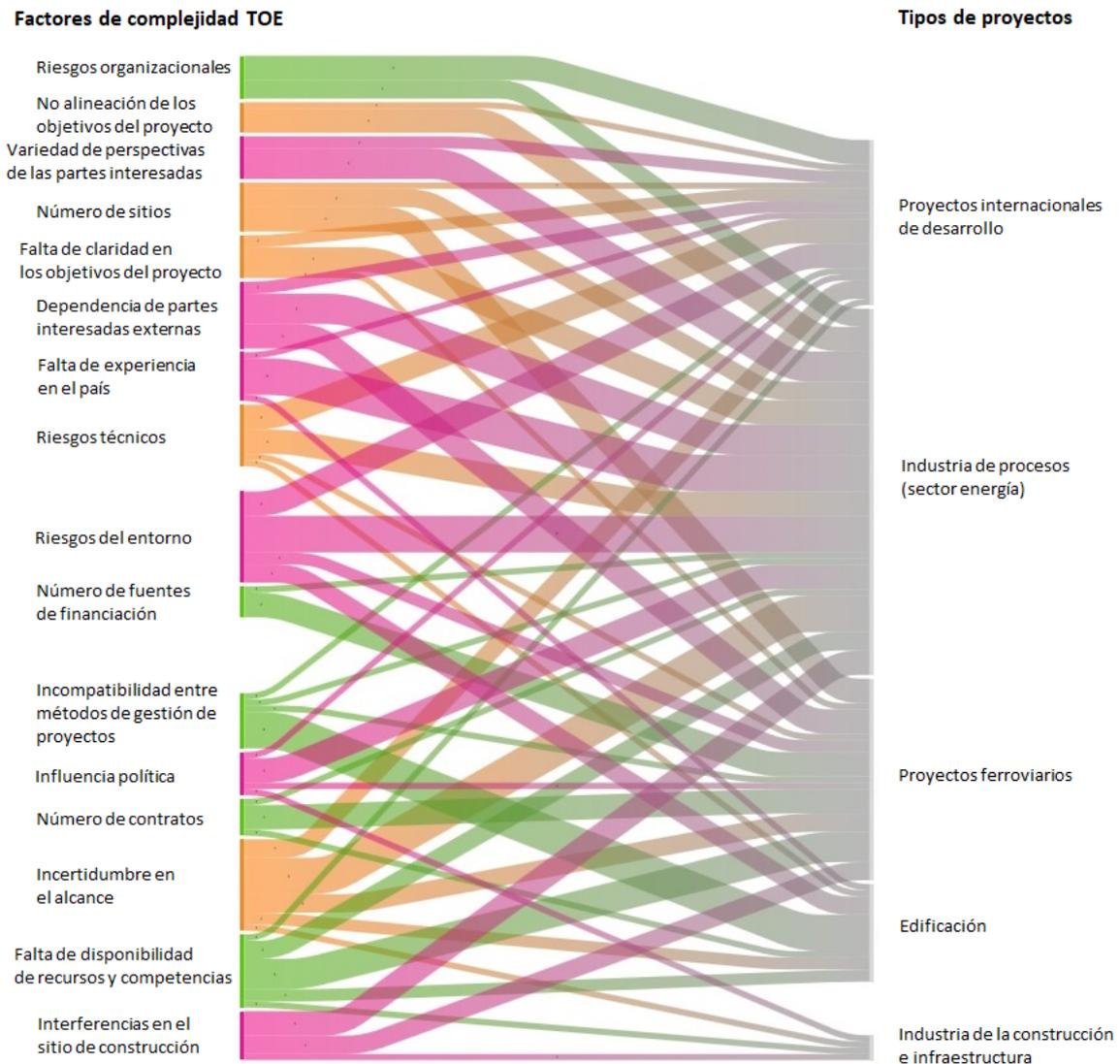


Figura 5. Diagrama Sankey de factores de complejidad más relevantes según el tipo de proyectos

Los factores de complejidad con mayor número de citas en los cinco tipos de proyectos estudiados en los modelos son las complejidades del entorno/externalidades (E) con “riesgos del entorno” y “dependencia de partes interesadas externas”. Le siguen las complejidades técnicas (T) con “incertidumbre en el alcance”.

Los proyectos de la industria de la construcción e infraestructura son los que se encontraron con menor número de factores de complejidad. Dos factores relativos a la categoría de complejidad del entorno/externalidades, uno en la complejidad organizacional y uno en la complejidad técnica.

Estos resultados indican que los factores del entorno/externalidades se reconocen cada vez más como aquellos que generan potencialmente mayor complejidad en los proyectos. El factor que

cuantitativamente califica mejor desde el punto de vista de la complejidad es “influencia política”, ya que en países como México suele ponerse por arriba de los factores técnicos (3). Adicionalmente, en los modelos analizados no se expresan de manera explícita “conflictos sociales”, que frecuentemente impactan negativamente el desarrollo de los proyectos de construcción de infraestructura.

En la Fig. 6 se presenta el modelo DURICA como una aportación metodológica en la gestión de los proyectos de construcción de infraestructura. Es un modelo con tres bucles causales: patrones de riesgo emergente, complejidad y dirección estratégica, con una relación causa-efecto no lineal sobre el resultado: el desempeño de los proyectos. El modelo incorpora los tres conceptos centrales para el estudio y comprensión de la complejidad: emergencia, formación de patrones y no linealidad (4).



Figura 6. Modelo DURICA para la gestión de los proyectos de construcción de infraestructura

3.3. Técnicas y herramientas para la medición de la complejidad

La Tabla III de co-ocurrencias muestra las técnicas y herramientas utilizadas por los autores de los modelos para la evaluación de la complejidad.

La evaluación de la complejidad se refiere a la acción de medir la complejidad, en este caso, de los proyectos de construcción de infraestructura. Los cuatro modelos estudiados abordan la complejidad de los proyectos de construcción de infraestructura a partir de la *complejidad percibida* por los contratistas, consultores y dueños de proyectos con el propósito de identificar los factores que hacen complejos a los proyectos y establecer estrategias de gestión que permitan responder a dicha complejidad. En los modelos estudiados, posiblemente debido a la amplitud de los elementos de complejidad (internos y externos a las organizaciones), los autores han considerado más conveniente la obtención de datos por medio de encuestas o entrevistas en el estudio de casos.

Cabe resaltar que el modelo CsQCA-FANP (M03) identifica cuantitativamente las relaciones entre las categorías de complejidad y sus efectos en diversas dimensiones del desempeño, utilizando las redes analíticas difusas (FANP) y ofrece una alternativa para comparar la complejidad de los proyectos. El marco TOE (M01) y las primeras investigaciones del modelo CsQCA-FANP (M03) jerarquizan cuantitativamente los factores de complejidad. El modelo HoPC (M02) jerarquiza cualitativamente los

Tabla III. Técnicas y herramientas para la medición de la complejidad utilizadas en los modelos estudiados

Tabla de co-ocurrencias		M01	M02	M03	M04
		◇ P01M01 Ma... 57	◇ P01M02 Mo... 46	◇ P01M03 Mo... 49	◇ P01M04 Mo... 127
◇ P05H01 Estudio de caso	3	1 (0.02)		1 (0.02)	1 (0.01)
◇ P05H02 Encuesta	1	1 (0.02)			
◇ P05H03 Método Delphi	2			1 (0.02)	
◇ P05H04 Teoría Fundamentada	1		1 (0.02)		
◇ P05H05 Codificación y puntaje	1		1 (0.02)		
◇ P05H06 Análisis Comparativo Cualitativo (QCA)	1			1 (0.02)	
◇ P05H07 Entrevistas semi-estructuradas	1			1 (0.02)	
◇ P05H08 Revisión de la literatura / Análisis de contenido	2			1 (0.02)	1 (0.01)
◇ P05H09 Proceso de red analítica difusa (FANP)	2			1 (0.02)	

factores. Finalmente, la propuesta de Chapman (M04) consiste en un modelo cualitativo de dimensiones y características de complejidad.

Resulta relevante destacar que de los cuatro métodos estudiados, ninguna de las técnicas corresponde a técnicas de sistemas complejos tales como: evaluación de sistemas dinámicos, modelación basada en agentes, algoritmos genéticos, autómatas celulares, análisis de redes complejas o modelación con computación cuántica o algún tipo de análisis de pensamiento complejo en las categorías propuestas por Edgar Morin y por Rivas-Tovar en su modelo epistemológico comprensivo (4). Las técnicas usadas corresponden a métodos cuantitativos de ciencias sociales o a técnicas cualitativas, algunas muy antiguas, tales como el método Delphi, el análisis cualitativo comparado y la revisión de la literatura. Solo el modelo M03 propone el uso de redes analíticas difusas (FANP), una técnica propuesta en (40), que se usa para establecer jerarquías difusas y seleccionar proveedores, siendo propiamente una técnica de sistema complejos. Dicho de una forma terminante, de los cuatro modelos estudiados para analizar la complejidad de proyectos de construcción, ninguna usa técnicas de sistemas complejos.

4. Conclusiones

La complejidad tiene efectos negativos en el desempeño de los proyectos por lo que se hace necesario identificar los factores que contribuyen a dicha complejidad, la evaluación de la complejidad y la forma de gestionarla. En la literatura se encuentran diversos modelos para evaluar la complejidad de los proyectos con aportaciones desde diversos enfoques epistémicos y técnicas/herramientas como la gestión de riesgos.

Se analizaron comparativamente cuatro modelos a partir de tres aspectos: 1) los factores que aportan complejidad a los proyectos, 2) los tipos de proyectos y su complejidad particular, y 3) las técnicas y herramientas que utilizan los modelos para estudiar la complejidad.

El modelo más integral para el abordaje de la complejidad de los proyectos es el denominado HoPC, propuesto por Lessard, Sakhrani y Miller (2014), por el planteamiento de las propiedades emergentes que resultan de las interacciones entre múltiples elementos técnicos, organizacionales y del entorno/externalidades.

En cuanto a los factores que aportan complejidad a los proyectos, el entorno o las externalidades son aspectos de gran importancia que se empezaron a tener en cuenta a partir de Bosch-Rekveltdt en el marco TOE. Hay dificultades en clasificar los factores de complejidad, pues no son únicamente técnicos, organizacionales o del entorno, ya que se interrelacionan siendo difícil su separación.

El marco TOE propuesto por Bosch-Rekveltdt identifica 49 factores de complejidad (fuentes de riesgos) con mayor impacto en el desempeño a partir del estudio de las etapas iniciales de los proyectos. Con base en el análisis comparativo con otros modelos realizado en esta investigación, se proponen siete aspectos de complejidad para enriquecer el marco TOE considerando el ciclo de vida de los proyectos: la arquitectura del proyecto, la complejidad financiera, la gobernanza, el proceso de validación de las etapas del proyecto, la madurez de la gestión de los proyectos, los aspectos culturales y el marco regulatorio.

En relación con los tipos de proyectos y su complejidad particular, los modelos de complejidad analizados proponen un marco general de las complejidades; sin embargo, se recomienda la construcción de modelos para sujetos específicos, ya que los proyectos exhiben diferentes aspectos de complejidad según los componentes que los integran de manera particular y de sus interacciones. Adicionalmente, el entorno/externalidades de los proyectos es dinámico y cambia la percepción de la complejidad en el tiempo (13); es decir, la complejidad evoluciona a lo largo del ciclo de vida de los proyectos según los procesos internos y en respuesta al entorno.

En lo referente a los métodos y las técnicas/herramientas que utilizan los modelos para estudiar la complejidad, ninguno de los cuatro modelos emplea los tres aspectos centrales para la calificación de un sistema complejo: emergencia, no linealidad y formación de patrones. La complejidad ha sido abordada principalmente desde los enfoques de la administración de proyectos y dinámica de sistemas; sin embargo, para el estudio de la diversidad, la interdependencia y la dinámica entre los elementos de complejidad son necesarias futuras investigaciones desde el enfoque de sistemas complejos. Los dos primeros enfoques epistémicos señalan las propiedades de adaptación, autoorganización y emergencia, pero no indican la forma de evaluarlas; en tanto el enfoque de sistemas complejos emplea diversas herramientas y técnicas que han sido aplicadas en diversos campos científicos y hacen aportaciones importantes en la descripción, la evaluación y el entendimiento de dichas propiedades. Por lo anterior, cabe afirmar como conclusión principal, que de los cuatro modelos estudiados para analizar la complejidad de proyectos de construcción, ninguno usa técnicas de sistemas complejos.

Resulta sumamente necesario que se proponga un modelo de complejidad para comprender y evaluar los proyectos de construcción. Nuestro principal hallazgo es la detección de una gran laguna teórica de conocimiento en los modelos que miden la complejidad con técnicas que no son de sistemas complejos sino de análisis cualitativos que resulta sorprendente ante la enorme cantidad de recursos financieros, sociales y ambientales que se destinan a los proyectos de construcción, lo cual nos proponemos abordar en nuestra futura investigación.

En cuanto a las limitaciones, esta investigación analizó comparativamente cuatro modelos de un total de dieciocho identificados en la literatura. Los resultados tienen limitaciones en cuanto a jerarquizar los factores de complejidad y sus categorías en orden de importancia, así como para identificar relaciones causa-efecto entre los elementos de complejidad.

5. Contribución de autores

Flavio Durón-González, obtención de documentos y análisis cualitativo con el software Atlas.ti, primer borrador. **Luis Arturo Rivas-Tovar**, diseño de la investigación y refinación del modelo ex-ante DURICA. **Magali Cárdenas-Tapia**, revisión. Todos los autores contribuyeron en la redacción final del manuscrito.

Referencias

- [1] J. R. San Cristóbal, E. Diaz, L. Carral, J. A. Fraguela, and G. Iglesias, “Complexity and project management: Challenges, opportunities, and future research”, *Complexity*, vol. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6979721> ↑3,9
- [2] M. G. C. Bosch-Rekvelde, *Managing Project Complexity. A Study into Adapting Early Project Phases to improve Project Performance in Large Engineering Projects* (disertación doctoral), Technische Universiteit Delft, 2011. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a783e581-bc7a-4efa-adcb-7e9201840367/> ↑3,6,7,9,13,15,16
- [3] Comisión de Especialidad de Ingeniería de Sistemas, *Ecosistema megaproyectos de infraestructura: retos y enfoques basados en la Ingeniería de Sistemas*, Academia de Ingeniería México, 2022 [En línea]. https://www.youtube.com/watch?v=DvDcQ2xo_xE&t=40s ↑3,6,8,23
- [4] L. A. Rivas-Tovar, *Sistemas Complejos evolución, conceptos, modelos*, Ciudad de México: (en proceso de publicación), 2022. ↑3,9,12,17,18,23,24
- [5] Q. He, L. Luo, Y. Hu, and A. P. Chan, “Measuring the complexity of mega construction projects in China—A fuzzy analytic network process analysis”, *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 549-563, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.07.009> ↑3,4,16
- [6] Q. He, L. Luo, J. Wang, Y. Li, and L. Zhao, “Using Analytic Network Process to analyze influencing factors of project complexity”, *2012 International Conference on Management Science & Engineering 19th Annual Conference Proceedings*, pp. 1781-1786, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2012.6414413> ↑3,4,16

- [7] L. Ma, and H. Fu, "Exploring the influence of project complexity on the mega construction project success: A Qualitative Comparative Analysis (QCA) method", *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 27, no. 9, pp. 2429-2449, 2020. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2019-0679> ↑3, 6, 16
- [8] M. Bosch-Rekvelde, H. Bakker, and M. Hertogh, "Comparing project complexity across different industry sectors", *Complexity*, vol. 2018, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3246508> ↑3, 15, 16
- [9] L. Luo, Q. He, E. J. Jaselskis, and J. Xie, "Construction project complexity: Research trends and implications", *J. Constr. Eng Manag.*, vol. 143, no. 7, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001306](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001306) ↑4, 7, 8, 10
- [10] T. Wang, A. Chan, Q. He, and J. Xu, "Identifying the gaps in construction megaproject management research: A bibliographic analysis", *Int. J. Constr. Manag.*, vol. 22, no. 9, 2020. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1735610> ↑4
- [11] PMI: Project Management Institute, *Construction Extension to the PMBOK Guide*, Project Management Institute, 2016. ↑5, 9, 15
- [12] J. F. Albarrán y J. A. Cortina, "Mantenimiento: consecuencia del diseño del proyecto", *IC Ingeniería Civil*, vol. LXXI, no. 618, pp. 21-23, 2021. ↑6
- [13] R. J. Chapman, "A framework for examining the dimensions and characteristics of complexity inherent within rail megaprojects", *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 34, no. 6, pp. 937-956, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.05.001> ↑6, 7, 10, 16, 17, 18, 19, 25
- [14] L. M. Arroyo Yllanes, *Gestión de riesgos en proyectos de construcción: un modelo integral y pragmático*, Academia de Ingeniería México, 2022 [en línea]. https://www.youtube.com/watch?v=omHg_pGD_ks ↑6
- [15] S. A. del Río Herrera, *¿Cómo se manejan los riesgos de un proyecto?*, Colegio de Ingenieros Civiles de México, 2022 [en línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=CzDaBTimfsA> ↑6, 7
- [16] PMI: Project Management Institute, *Guía de los fundamentos para la administración de proyectos*, 6a. ed., Project Management Institute, 2017. ↑6
- [17] L. M. Arroyo Yllanes, *El control de costos en proyectos de construcción*, Colegio de Ingenieros Civiles de México, 2022 [en línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=vugh3xHxZIo> ↑6
- [18] R. Juárez del Ángel, *Megaproyectos de Infraestructura: una clase especial de proyectos* (documento presentado en conferencia ante el Colegio de Ingenieros Civiles de México), México. ↑6
- [19] J. F. Albarrán, *Proyectos Libro Abierto Convertible (LAC)* (documento presentado en conferencia ante el Colegio de Ingenieros Civiles de México), México. ↑6
- [20] L. M. Arroyo Yllanes, *Técnicas y herramientas digitales para la gestión de riesgos*, Colegio de Ingenieros Civiles de México, 2020 [en línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=eznemIkZWAM> ↑6
- [21] L. E. Maumejean Navarrete, *Una aportación a la planeación con visión sistémica*, Academia de Ingeniería México, 2022 [en línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=1mi51wFD15w> ↑6
- [22] J. R. San Cristóbal, "Complexity in project management", *Procedia Computer Science*, vol. 121, no. 2017, pp. 762-766, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.098> ↑7, 8, 10

- [23] J. Bakhshi, V. Ireland, and A. Gorod, "Clarifying the project complexity construct: Past, present and future", *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 34, no. 7, pp. 1199-1213, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.002> ↑8, 9, 10
- [24] D. Baccarini, "The concept of project complexity—A review", *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 14, no. 4, pp. 201-204, 1996. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(95\)00093-3](https://doi.org/10.1016/0263-7863(95)00093-3) ↑8
- [25] S. Alcocer, *Los sistemas complejos en la ingeniería civil*, Documento presentado en el Foro de Tecnología del Colegio de Ingenieros Civiles de México, Ciudad de México, México. ↑8
- [26] P. De Koning, and M. Vanhoucke, "Stability of earned value management: Do project characteristics influence the stability moment of the cost and schedule performance index?", *J. Mod. Proj. Manag.*, vol. 4, no. 1, pp. 9-25, 2016. ↑9, 10
- [27] H. J. Scholl, "Agent-based and system dynamics modeling: A call for cross study and joint research", *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2001. <http://doi.org/10.1109/HICSS.2001.926296> ↑10, 11
- [28] J. M. Lyneis, and D. N. Ford, "System dynamics applied to project management: A survey, assesment, and directions for future research", *Syst Dyn Rev*, vol. 23, no. 2/3, pp. 157-189, 2007. <https://doi.org/10.1002/sdr.377> ↑10, 11
- [29] Z. Wu, K. Yang, X. Lai, and M. F. Antwi-Afari, "A scientometric review of system dynamics applications in contruction management research", *Sustainability*, vol. 12, no. 18, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12187474> ↑11
- [30] M. Liu, Y. Le, Y. Hu, B. Xia, M. Skitmore, and X. Gao, "System dynamics modeling for construction management research: Critical review and future trends", *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 25, no. 8, pp. 730-741, 2019. <https://doi.org/10.3846/jcem.2019.10518> ↑11
- [31] L. R. Izquierdo, J. M. Galán, J. I. Santos, and R. Del Olmo, "Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas", *Empiria*, no. 18, pp. 85-112, 2008. <https://doi.org/10.5944/empiria.16.2008.1391> ↑11
- [32] C. Gershenson, "Guiding the self-organization of cyber-physical systems", *Front. Robot. AI*, vol. 7, no. 41, 2020. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00041> ↑11, 13
- [33] J. Ladyman, and K. Wiesner, *What is a Complex System?*, New Haven, London: Yale University Press, 2020. ↑12
- [34] N. Fernández, C. Maldonado, and C. Gershenson, "Information measures of complexity, emergence, self-organisation, homeostasis, and autopoiesis", *Guided Self-Organisation: Inception*, pp. 19-51, Berlin, Springer, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-53734-9_2 ↑13
- [35] M. Bengtsson, "How to plan and perform a qualitative study using content analysis", *NursingPlus Open*, vol. 2, pp. 8-14, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.npls.2016.01.001> ↑14
- [36] M. B. Miles, M. A. Huberman, and J. Saldaña, "Part three - Making good sense, Chapter 11 - Drawing and verifying conclusions, Tactics for generating meaning", in *Qualitative Data Analysis. A Methods Sourcebook*, 3rd ed., pp. 243-257, Thousand Oaks, Sage Publications, 2014. ↑15
- [37] M. Yearworth, and L. White, "The uses of qualitative data in multimethodology: Developing causal loop diagrams during the coding process", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 231, no. 1, pp. 151-161, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.05.002> ↑15, 19

- [38] S. Gajić, and I. Palčič, “A new framework for complexity analysis in international development projects - Results from a Delphi study”, *Adv. Prod. Eng. Manag.*, vol. 14, no. 2, pp. 225-238, 2019. <https://doi.org/10.14743/apem2019.2.324> ↑16
- [39] D. Lessard, V. Sakhrani, and R. Miller, “House of project complexity—understanding complexity in large infrastructure projects”, *Eng. Proj. Org. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 170-192, 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/21573727.2014.907151> ↑16, 17, 19, 20
- [40] D. Falsini, F. Fondi, and M. Schiraldi, “A logistics provider evaluation and selection methodology based on AHP, DEA and linear programming integration”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 17, pp. 4822-4829, 2012. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.657969> ↑24

Flavio Roberto Durón-González

Ingeniero Civil (ESIA Zac-IPN). Candidato a Doctor en Ciencias Administrativas por el Instituto Politécnico Nacional (ESCA UST-IPN).

Email: flavioturong@netscape.net

Luis Arturo Rivas-Tovar

Doctor en Ciencias Administrativas, Instituto Politécnico Nacional IPN (México); Candidato a Doctor en Estudios Europeos, Instituto Ortega y Gasset (España); Postdoctorado en Estudios Organizacionales, Universidad Politécnica de Madrid (España). Profesor-investigador en la Escuela Superior de Comercio y Administración Unidad Santo Tomás ESCA UST del Instituto Politécnico Nacional IPN. Investigador Nacional Nivel III (CONACyT-México) y editor de la revista *Investigación Administrativa*.

Email: larivas33@hotmail.com

Magali Cárdenas-Tapia

Doctora en Ciencias de la Administración de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. Profesora-investigadora en la Escuela Superior de Comercio y Administración Unidad Tepepan ESCA Tep. del Instituto Politécnico Nacional IPN. Investigadora Nacional Nivel I (CONACyT-México). Coordinadora de la Red de Expertos en Sistemas Complejos del IPN (RESC-IPN).

Email: mcardenasipn@gmail.com

