

Concepts for modeling road asset management systems using agent-based simulation

Conceptos para la modelación de sistemas de gestión de activos viales usando simulación basada en agentes

T. Echaveguren ^{1*}, A. Chamorro **, H. De Solminihac **

* Universidad de Concepción, Concepción. CHILE

** Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. CHILE

Fecha de Recepción: 02/08/2016

Fecha de Aceptación: 12/12/2016

PAG 47-56

Abstract

Complex emergent and adaptive systems raise modeling challenges that cannot always be faced through mathematical modeling. The agent-based simulation is a simulation technique of socio-technical systems that allows modeling the interactions among agents, thereby offering an emergent alternative to the development of road infrastructure management systems. Road infrastructure management is a socio-technical system similar to open and adaptive systems, because there is interaction among the agents (state, private and public); it needs to consider the variability through the risk inclusion and it induces externalities that modify the system's initial conditions. This paper discusses the agent-based simulation and how it can be used for designing road asset management systems. Therefore, a generic model is proposed, based on the existing literature, in order to characterize the types of agents involved. A plan is also discussed to include the risks in the infrastructure asset management under the agent-based simulation system. It was concluded that this modeling approach allows incorporating the effect of the agents' decisions on maintenance planning, and the same time it has enough flexibility to include other effects, such as uncertainty and risk, considering that an asset management system is an open socio-technical system and not necessarily a closed mechanistic system

Keywords: Simulation, agent, agent-based simulation, road asset management, risk

Resumen

Los sistemas adaptativos complejos y emergentes plantean desafíos de modelación que no siempre pueden enfrentarse mediante modelación matemática. La simulación basada en agentes es una técnica de simulación de sistemas socio-técnicos que permite modelar las interacciones entre agentes, ofreciendo una alternativa emergente al desarrollo de sistemas de gestión de infraestructura vial. La gestión de infraestructura vial es un sistema socio-técnico con rasgos de sistema abierto y adaptativo, puesto que existe interacción entre agentes (estado, privados y público), necesita incluir la variabilidad a través de la inclusión de los riesgos, y genera externalidades que modifican las condiciones iniciales sobre las cuales opera el sistema. Este trabajo se discute la técnica de simulación basada en agentes y cómo esta se incorpora en el diseño de sistemas de gestión de activos viales. Se plantea un modelo genérico para la gestión de infraestructura vial, en base a la escasa literatura que existe sobre el tema, para posteriormente caracterizar los tipos de agentes involucrados. Se discute también un esquema para incluir los riesgos en la gestión de activos viales bajo el enfoque de simulación basada en agentes. Se concluyó que este enfoque de modelación permite incorporar el efecto de las decisiones de los agentes sobre la planificación del mantenimiento y a la vez que posee la suficiente flexibilidad para incorporar otros efectos tales como la incertidumbre y el riesgo, tomando como base que un sistema de gestión de activos es un sistema abierto de carácter socio-técnico más que un sistema cerrado mecanicista

Palabras clave: Simulación, agentes, simulación basada en agentes, gestión de activos viales, riesgo

1. Introducción

Los activos viales son todos aquellos elementos físicos, procesos tecnológicos y sistemas de información que permiten que la infraestructura vial preste un servicio adecuado a los usuarios con un cierto nivel de calidad. La infraestructura, como obra física, es un subconjunto de los activos viales. Por su parte la gestión de activos viales tiene por fin su preservación, de manera que el Nivel de Servicio ofrecido tienda a ser consistente con el esperado por los usuarios directos, indirectos y por los no usuarios, sujeto al presupuesto disponible para ello.

Tradicionalmente, la gestión de activos viales se ha focalizado en la gestión de pavimentos y de puentes, asumiendo que estos activos son los de mayor valor, los más

relevantes para otorgar continuidad a la infraestructura vial, y que el nivel de servicio provisto es adecuado para los usuarios. Asimismo, presupone que las condiciones de contexto no cambian, lo que permite estimar la progresión de la demanda y la progresión del comportamiento de la infraestructura bajo leyes de comportamiento más o menos estables. De este modo, el proceso de gestión actúa como un sistema cerrado que define planes y programas de mantenimiento sobre la base de criterios técnicos que determinan únicamente la oferta de nivel de servicio.

El enfoque tradicional presenta dificultades en la optimización de planes cuando se analizan los beneficios de reducir la brecha entre los niveles de servicio provisto y esperado. Contribuye a esto el hecho de tratar el proceso de gestión como un sistema cerrado y mecanicista, es decir que no posee la capacidad de interactuar con las condiciones ambientales de contexto ni la capacidad de incluir la

¹ Autor de correspondencia:

Departamento de Ingeniería Civil y CIGIDEM
Universidad de Concepción, Concepción. CHILE
E-mail: techaveg@udec.cl



incertidumbre (los riesgos) y como estos cambian las decisiones de los usuarios, analistas, tomadores de decisiones.

Por ejemplo, al no considerar la incertidumbre los sistemas de gestión no son capaces de analizar cómo cambia la planificación de inversión en mantenimiento ante cambios estructurales en la economía, lo cual resiente la solicitud de tráfico de manera temporal y espacial. Asimismo, no permite prever cómo cambia un plan de mantenimiento ante eventos disruptivos como eventos naturales y antrópicos, cambio climático. Asimismo, tampoco permite incorporar las decisiones de viaje (o no viaje) de los distintos tipos de usuarios ni el nivel de utilidad que implica para ellos el reducir la brecha entre los niveles de servicio provisto y esperado. La simulación basada en agentes es una rama emergente de la simulación que proviene de las ciencias sociales, pero que permite resolver los problemas de las técnicas tradicionales destinadas a la gestión de activos, puesto que incorpora el concepto de sistemas socio-técnicos, en los cuales los diversos agentes (actores) también se incluyen en el proceso de toma de decisiones.

De este modo, este trabajo tiene por objetivo discutir un nuevo concepto de modelación aplicado al diseño de sistemas de gestión de activos viales, en el cual se incorpora a la modelación tradicional la noción de sistema abierto, adaptativo y emergente, y los actores o agentes como integrantes de un proceso decisional. Este enfoque posee la ventaja de que permite capturar de manera más eficiente, además de los beneficios las externalidades producidas

durante un proceso de gestión de activos y, a la vez, incorporar la incertidumbre asociada al comportamiento de los agentes. El artículo describe en primer lugar el concepto de simulación y específicamente el de simulación basada en agentes, así como el concepto de agente mismo. Posteriormente se discute la aplicación del concepto al diseño de sistemas de gestión de activos viales. Se comienza con una revisión de la literatura, para posteriormente desarrollar conceptualmente un sistema de gestión de activos, con lo cual es posible identificar los agentes y sus características. Luego se analiza el efecto de incorporar los riesgos (naturales y antrópicos) en la gestión de activos bajo el esquema de simulación basada en agentes. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas.

2. La simulación basada en agentes

La simulación es una forma de modelar la realidad en base a la recreación de reglas que representan el mundo real. Su principal ventaja como instrumento de modelación, es que permite representar relaciones complejas entre entidades que los modelos analíticos (mecanicistas), no son adecuados y/o suficientes para reflejar todas las interacciones. Asimismo, permite representar sistemas y sus interacciones, probar múltiples hipótesis simultáneamente y realizar predicciones bajo una multiplicidad de condiciones. La Figura 1 muestra la arquitectura de un modelo de simulación genérico e independiente de la técnica de simulación.

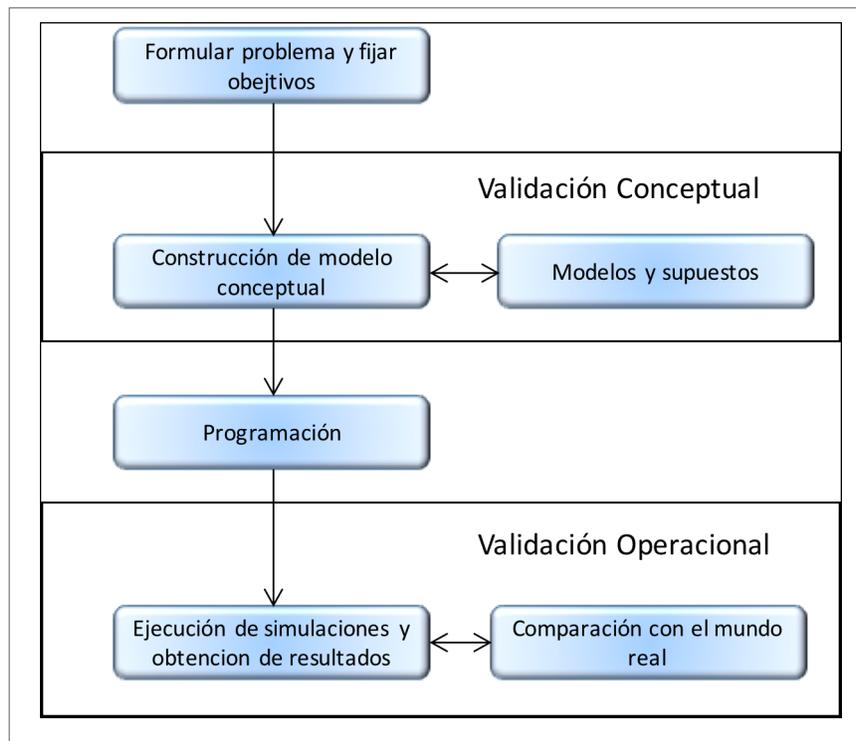


Figura 1. Esquema de un modelo de simulación genérico (Heath et al., 2009)

Los principales métodos de simulación utilizados en la actualidad son: la simulación basada en eventos discretos, la simulación basada en sistemas dinámicos y la simulación basada en agentes. Esta última técnica de simulación es la que otorga contexto al presente artículo. La Figura 2 muestra gráficamente el campo de acción de estas tres técnicas de simulación antes mencionadas. Se puede visualizar que la simulación basada en agentes puede utilizarse con cualquier nivel de detalle, por lo cual aparece como más versátil que las otras técnicas de simulación.

El elemento central de la simulación basada en agentes es el "agente". Aun cuando no existe una definición universal del término, puede referirse a un componente de un sistema o una entidad independiente, por ejemplo personas en diferentes roles (consumidores, ciudadanos, pacientes, médicos, clientes) equipamiento (vehículos, automóviles, grúas, ferrocarriles, aeronaves, máquinas) cosas no materiales (proyectos, productos, ideas, innovaciones) y organizaciones (compañías, agrupaciones políticas, países, servicios públicos) (Grigoryev, 2015). En cualquier caso, los agentes se programan para que tomen decisiones y reaccionen ante cambios en el sistema del cual participan y para que interactúen entre ellos. La programación se realiza en base a reglas pre-definidas que

pueden variar desde reacciones pre-programadas hasta decisiones complejas basadas en inteligencia artificial. Más adelante se realiza un análisis más profundo del concepto de agente.

La simulación basada en agentes modela procesos dinámicos y las interacciones entre agentes que se simulan repetidamente. Históricamente se ha utilizado para modelar sistemas adaptativos complejos y sistemas socio-técnicos, para predecir su comportamiento, entendiendo a este tipo de sistemas como aquellos que poseen muchos agentes y tomadores de decisiones con control disperso, muchos niveles organizacionales, la capacidad de los agentes de adaptarse y usar modelos que permiten predecir el futuro. Corresponde a un esquema de simulación que comienza con la definición de actores individuales (los agentes) para luego definir sus interacciones, las que en su totalidad generan interacciones a nivel de sistema. La Figura 3 muestra una abstracción de un sistema complejo con propiedades emergentes, en la cual el comportamiento de los agentes y las interacciones entre ellos y el ambiente dan por resultado un sistema complejo y emergente.

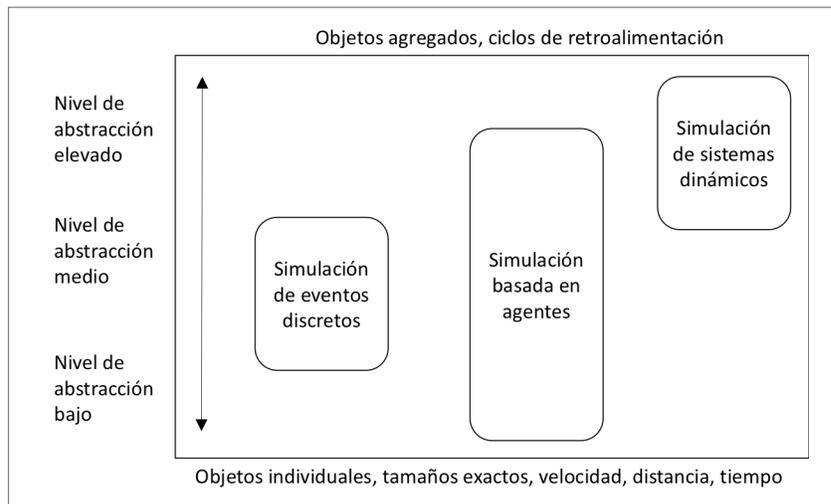


Figura 2. Nivel de detalle de las diversas técnicas de simulación (Grigoryev, 2015)

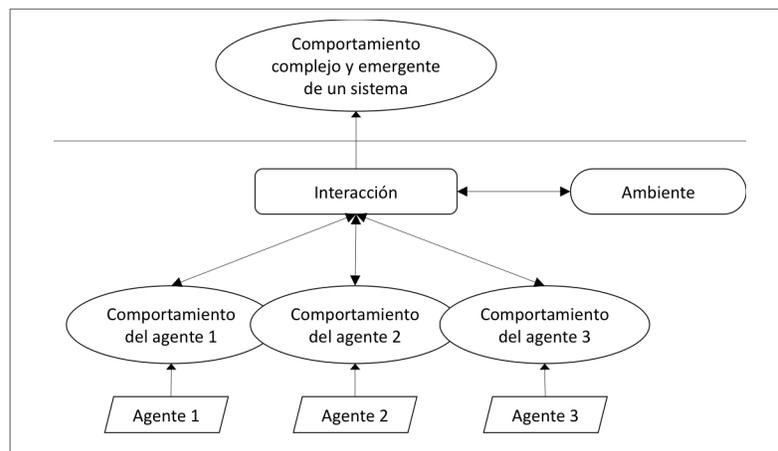


Figura 3. Esquema de un sistema complejo bajo un enfoque de (Sanford, 2007)

La simulación basada en agentes es una herramienta que se utiliza preferentemente para modelar sistemas adaptativos, emergentes, cerrados o abiertos en donde existe una interacción entre las decisiones técnicas y los agentes que toman decisiones en respuesta a esas decisiones técnicas. De acuerdo a (Zhang y Li, 2010), un modelo basado en agentes requiere de un ambiente en el cual se desenvuelven los agentes, de suerte que la proyección de las decisiones e interacciones entre agentes se proyecta en dicho ambiente. En términos de simulación, dicho ambiente puede consistir en una red, una representación geográfica, una grilla o una proyección no espacial. Las decisiones e interacciones entre agentes se dan en un contexto que define la semántica de las interacciones. En términos simples, la Figura 4 muestra cómo la simulación basada en agentes expresa el mundo real en un ambiente de simulación a través de una proyección que puede ser uni o multidimensional.

Algunas de las situaciones en que es ventajoso usar la modelación basada en agentes frente a la modelación basada en ecuaciones para analizar sistemas complejos y adaptativos son (Axtell, 2000; Singh y Gupta, 2009):

- Cuando se puede formular un modelo matemático pero solo resolver parcialmente.
- Cuando los modelos matemáticos son suficientemente complejos para ser insolubles.
- Cuando no se pueden elaborar realizaciones numéricas explícitas.

Un procedimiento estándar para formular modelos de simulación basados en agentes para sistemas socio-técnicos es (Nikolik y Ghorbani, 2011):

- Analizar el sistema, definiendo el problema y la identificación de los afectados por los problemas; identificando el sistema en cuanto a su estructura interna y su interacción potencial con un sistema externo (mundo exterior o ambiente en que habitan); conceptualizando el sistema y posteriormente

realizando la formalización de la ontología del sistema.

- Diseño del modelo, definiendo su estructura en términos de la identificación de las entidades que lo componen sus fronteras, comportamiento de los agentes (activo, proactivo, reactivo), habilidad para interactuar y los vínculos entre ellos; e identificando los comportamiento de las entidades del modelo.
- Diseño detallado del modelo, en términos de la formalización lógica del modelo, y del diseño experimental. El diseño experimental considera sobre la base de una hipótesis de modelación el número y tipo de corridas del modelo, el escenario de simulación, y la sensibilidad de parámetros.
- Implementación en software, que básicamente consiste en cargar códigos en software ad-hoc o comerciales.
- Evaluación del modelo, que consiste en la verificación de los tipos y datos de entrada clasificados en datos de acciones, datos de conocimiento y su relación con los dominios físico y social. Nikolik y Ghorbani (2011) recomiendan además realizar una verificación escalonada, en donde se analizan los agentes individualmente, luego las interacciones limitadas al modelo base y luego la verificación multi-agente. Finalmente, se realiza la validación del modelo para posteriormente pasar a la experimentación y análisis.

Las aplicaciones más recurrentes se encuentran en el campo de las ciencias sociales, de la biología, negociación y evaluación de políticas públicas. En la ingeniería se utiliza principalmente para modelar cadenas de abastecimiento pero también existe evidencia de aplicaciones a la ingeniería de tráfico, planificación de transporte, procesos constructivos y gestión de la construcción en general. Por el contrario, en el caso de la gestión de infraestructura es escasa la evidencia y en el caso de la evaluación de riesgos, básicamente la aplicación de esta técnica se concentra en la modelación de sistemas de evacuación.

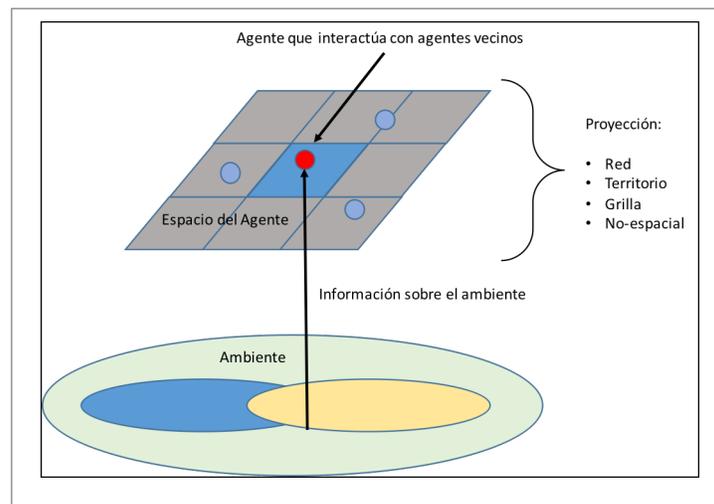


Figura 4. Del ambiente real al ambiente de simulación (Macal y North, 2010)

3. El concepto de agente

En términos generales, un agente es una entidad o componente de un sistema que es capaz de percibir y actuar por sí mismo y decidir qué debe hacer para alcanzar sus objetivos (Clymer, 2009). Posee la capacidad de modelar desde un elemento simple hasta elementos más complejos, como puede ser el comportamiento de tomadores de decisiones. Una definición completa del término agente lo considera como una entidad que posee los siguientes atributos (Macal y North, 2009):

- Una entidad identificable, auto-contenida y discreta, que posee un conjunto de características y reglas que gobiernan su conducta y capacidad de tomar decisiones. El carácter discreto implica que el agente posee una frontera definida que permite discriminarlo claramente de otro agente.
- Una entidad viva y localizada que interactúa con y en su ambiente con otros agentes, mediante protocolos de interacción y comunicación y que posee además la capacidad de responder ante cambios en el ambiente en que habita.
- Una entidad autónoma y auto-dirigida, que puede funcionar de forma independiente.
- Una entidad flexible, que posee la capacidad de aprender y adaptar su comportamiento basado en la experiencia, lo cual implica que requiere de memoria. Puede poseer entonces reglas que modifican sus propias reglas de comportamiento.

Estos atributos se pueden complementar con la caracterización de agentes previa definiéndolos como una entidad autónoma que toma decisiones (Bonabeau, 2002). Cada agente evalúa individualmente diversas situaciones y toma decisiones en base a reglas, exhibiendo distintos comportamientos de acuerdo al ambiente en que se sitúa. Los comportamientos se originan en acciones de carácter repetitivo, programadas e interactivas con las acciones de otros agentes, generando así patrones de comportamiento emergente.

El comportamiento de los agentes es individual y no lineal. Se caracteriza mediante umbrales reglas si-entonces o acoplamiento no lineal de acciones entre agentes. Los agentes exhiben memoria, dependencia con otros agentes, capacidad

de aprendizaje y capacidad de adaptación. También son reactivos (puesto que percibe y reacciona ante cambio en el ambiente), proactivos (puesto que ejecuta una serie de tareas para lograr metas) y social (puesto que interactúa con otros agentes para resolver conflictos o cooperar).

4. La simulación basada en agentes para la gestión de activos viales

Existe evidencia reciente en la literatura acerca del uso de este tipo de modelación para modelar la gestión de activos viales. Entre ellos resaltan los trabajos descritos en (Sanford y McNeil, 2008; Moore et al., 2008; Osman, 2012 y Batouli y Mostafavi, 2014; Bush et al., 2014a y Bush et al., 2014b). Estas referencias discuten a nivel conceptual aplicaciones de la modelación basada en agentes a problemas de gestión de activos de transporte, que son útiles para caracterizar los agentes involucrados. Batouli y Mostafavi (2014) conceptualizan un modelo de gestión de activos multi-agente como lo muestra la Figura 5, en la cual están presentes la agencia de gestión, los usuarios y los activos viales. Sanford y McNeil (2008), Moore et al. (2008) y Osman (2012) precisan la agencia de gestión en términos de la agencia vial y los tomadores de decisiones, para incorporar en el modelo los objetivos de política de infraestructura a nivel nacional.

Es relevante hacer esas distinciones debido a que una caracterización adecuada de agentes necesariamente requiere de una definición previa de los objetivos del modelo y de sus fronteras, para luego caracterizar los agentes. En caso contrario, existe la posibilidad cierta de dejar fuera agentes relevantes. Por otro lado, es importante caracterizar el ciclo de gestión con el fin de incorporar además temporalmente la distinción entre agentes y la activación de sus participaciones en el proceso de gestión. En términos de tamaño de un sistema de gestión de activos, estos se pueden especificar, desde un mayor tamaño a uno menor en:

- Gestión de activos incluyendo decisiones de política (Sanford y McNeil, 2008; Batouli y Mostafavi, 2014)
- Gestión de activos viales (Osman, 2012)
- Gestión de pavimentos (Moore et al., 2008)
- Gestión de puentes (Bush et al., 2014a; Bush et al., 2014b)

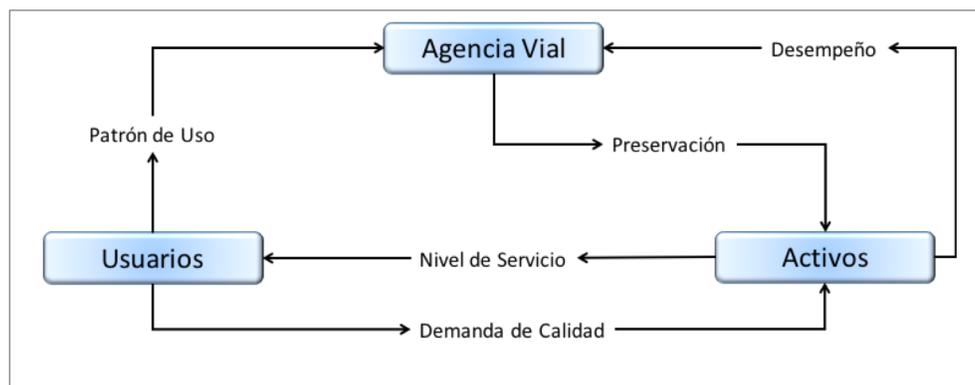


Figura 5. Concepto de gestión de activos en condiciones de operación normal (Moore et al., 2008; Batouli y Mostafavi, 2014)

En la Figura 5 la agencia vial es la encargada de medir el desempeño de los activos, diseñar y aplicar las medidas de preservación en función del patrón de uso de las infraestructuras. Por otro lado los usuarios son los que establecen una demanda de calidad mínima que los activos deben proporcionar a la manera de Nivel de Servicio, dado el patrón de uso de la infraestructura y las actividades de preservación impulsadas por la agencia vial. Este esquema es asimilable a un proceso de asignación de recursos con restricción presupuestaria. Se puede extender si se expande el proceso de toma de decisiones de la agencia vial, caso en cual es necesario caracterizar el enfoque de optimización y si se incluye la participación ciudadana en el esquema de asignación de recursos bajo un esquema 4P (*Public, Private, People Partnership*).

Batouli y Mostafavi (2014), plantean que la modelación del proceso de toma de decisiones de la agencia vial y el comportamiento de los usuarios se puede realizar utilizando la simulación basada en agentes, pero que la modelación de desempeño de los activos es necesario realizarla con los modelos tradicionales de comportamiento. En general, los activos son el agente más simple de representar si se cuenta con modelos de desempeño de los activos (Sanford y McNeil, 2008; Osman, 2012). Bajo el esquema de la Figura 6, es posible establecer una clasificación genérica de agentes y cuáles son las características que estos deben considerar. Los agentes genéricos son: los usuarios, la agencia vial y la infraestructura. A estos agentes se pueden agregar las compañías que ejecutan las labores de mantenimiento, que varían desde las propias de la agencia vial (en el caso de la administración directa), hasta aquellas que consideran la concesión del mantenimiento. En este caso, a la Figura 5 se le agrega un componente más, como se muestra en la Figura 6.

Atendiendo a estas consideraciones, es posible proponer la clasificación de agentes de la Tabla 1.

En la Tabla 1 se muestra que son tres los agentes que toman decisiones durante la aplicación de las tareas de gestión: la agencia vial, los usuarios y la agencia de mantenimiento. La modelación basada en agentes permite por ejemplo describir los procesos de toma de decisiones de los agentes dentro de la organización y como estos impactan sobre el nivel de servicio que desea proporcionar la agencia vial. Por otro lado, los usuarios, como receptores del nivel de servicio, también reaccionan y toman decisiones que son de diversa naturaleza, en función del nivel de servicio que ellos esperan de la red. De este modo, es posible especificar una función de utilidad para la sociedad, en términos del nivel de servicio, como lo expresa la Ecuación 1. En ella, nivel de servicio está explicado por los agentes.

$$\text{Utilidad} = \text{Nivel de Servicio Ofrecido} - \text{Nivel de Servicio Demandado} \quad (1)$$

A su vez, la mínima utilidad corresponde a la tolerada por los agentes (Osman, 2012):

$$\text{Utilidad} > \text{Utilidad mínima tolerada} \quad (2)$$

La agencia de mantenimiento es la que ejecuta las tareas de mantenimiento, por lo cual el resultado de su labor necesariamente repercute en los resultados ofrecidos por la agencia vial al público. Asimismo, el resultado de las tareas de mantenimiento depende del esquema organizativo de la agencia de su interacción con el mercado que le proporciona los insumos, maquinaria y mano de obra, así como de la interacción contractual con la agencia vial.

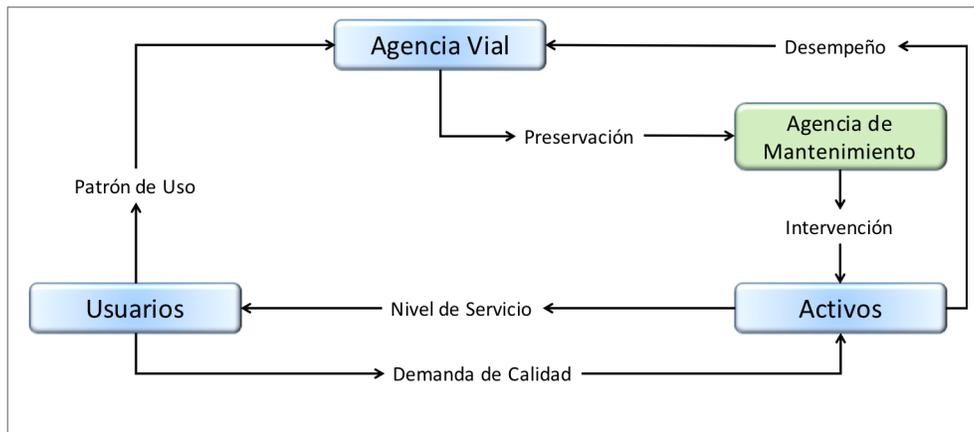


Figura 6. Concepto genérico de gestión de activos incluyendo la contratación del mantenimiento bajo condiciones normales

Tabla 1. Clasificación de agentes (Sanford y McNeil, 2008; Osman, 2012)

Agente	Acción que ejecuta el agente	Atributo genérico		
		Estático	Dependiente del tiempo	Dependiente del tiempo y de la acción
Agencia Vial	<ul style="list-style-type: none"> Ejecuta las intervenciones Evalúa respuesta del usuario Evalúa condición de los activos viales 	<ul style="list-style-type: none"> Plan de intervención Nivel de Servicio Nivel de Riesgo 	<ul style="list-style-type: none"> No tiene 	<ul style="list-style-type: none"> Asignación Presupuestaria
Usuarios	<ul style="list-style-type: none"> Usa servicios de infraestructura Usa otras facilidades Evalúa calidad Usa un tipo de vehículo Decide viajes 	<ul style="list-style-type: none"> Tipo de usuario Nivel de ingreso Expectativa de Nivel de Servicio Aceptabilidad de riesgo 	<ul style="list-style-type: none"> No tiene 	<ul style="list-style-type: none"> Nivel de satisfacción Costos de los usuarios
Activos Viales	<ul style="list-style-type: none"> No ejecuta acciones 	<ul style="list-style-type: none"> Características físicas Localización Tasa de deterioro Edad 	<ul style="list-style-type: none"> Atributos ambientales 	<ul style="list-style-type: none"> Condición Nivel de Servicio actual Estándar de servicio Riesgo
Agencia de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> Aplica operaciones de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> No tiene 	<ul style="list-style-type: none"> Experiencia 	<ul style="list-style-type: none"> Reglas de mantenimiento Presupuesto

En la Tabla 1 también se describen los atributos, clasificándolos en estáticos, dependientes del tiempo y dependientes del tiempo y de las acciones que los agentes emprenden. Los atributos estáticos no cambian en el tiempo y no dependen de las decisiones que tomen los agentes. En el caso de la red vial por ejemplo, los atributos son principalmente estáticos en el corto y mediano plazo. Los atributos que dependen del tiempo y de las decisiones van variando en la medida que se suceden las interacciones entre agentes y son los que le dan la condición de emergencia y complejidad al sistema modelado.

5. La incorporación del riesgo

Un aspecto relevante que en general no se considera en los sistemas de gestión de activos viales son los riesgos. El riesgo se define en términos simples como la probabilidad de que una amenaza o peligro natural o antrópica, afecte negativamente a un sistema de manera tal que comprometa total o parcialmente su funcionamiento. Por ejemplo, la probabilidad de que un sismo limite la operación de un sistema portuario. La modelación basada en agentes puede incorporarlos explícitamente, generando múltiples escenarios de cambio que pueden modificar la elección de los planes de mantenimiento óptimos. La ventaja de este enfoque de modelación es que permite evaluar y comparar múltiples condiciones inciertas, lo cual le otorga una flexibilidad única al análisis.

En general, la literatura revisada no puntualiza acerca de los efectos cascada asociados a la interrupción total o parcial de la red debido a amenazas naturales o antrópicas que pueden alterar los supuestos sobre los cuales descansan los

planes y programas de mantenimiento. Únicamente en (Hasan y Foliente, 2015) se explica en general que estos efectos implican la incorporación de agentes adicionales a los descritos en la sección anterior y que la modelación basada en agentes es útil para incorporar este efecto en la conceptualización de un modelo como el que aquí se propone. Con el fin de simplificar el modelo, se asume preliminarmente que:

- No considera los efectos cascada, es decir los impactos de segunda o tercera vuelta, que pueden inducirse sobre otros sistemas de infraestructura u otros sistemas sociales. Esto con el fin de reducir el número de agentes y el tamaño del sistema.
- El enfoque general es de un sistema de gestión de riesgos centrado en la infraestructura, de manera de controlar el tamaño del sistema y el sujeto de estudio.
- Se asumen tres escalas de gestión: prevención, emergencias y desastres, puesto que cada uno de ellos determina acciones distintas de los agentes. En el caso preventivo, las acciones se centran en la planificación del mantenimiento para aumentar la resiliencia de la infraestructura. En el caso de las emergencias, las acciones se centran en respuestas inmediatas y la generación de intervenciones de restauración o de incremento de la resiliencia de la infraestructura vial.
- En el caso de desastres, se incluye la respuesta inmediata, la habilitación de infraestructura para la evacuación y la generación de intervenciones de restauración o de incremento de la resiliencia de mediano a largo plazo que implican eventualmente la intervención sobre otro tipo de infraestructuras u otros tipos de sistemas.



- El análisis se realiza usando un enfoque de gestión basado en necesidades, con el fin de evitar el uso de modelos predictivos de largo plazo. Con esto se logra considerar una ventana de tiempo suficientemente extensas para analizar efectos antes/después y a la vez suficientemente cortas

Considerando los aspectos antes descritos un modelo genérico de gestión de riesgo considera 5 grupos de agentes: las amenazas, los activos viales, los usuarios, la agencia vial, las compañías de mantenimiento. Así, los usuarios determinarán los niveles tolerables de riesgo. La agencia vial, considerando las amenazas, los activos viales determinarán las condiciones de inversión para armonizar una valoración objetiva del riesgo con el nivel deseado de riesgo, mediante la aplicación de contratos de mantenimiento implementados por las compañías de mantenimiento, quienes a su vez buscan maximizar sus beneficios. Este concepto se esquematiza en la Figura 7, que ilustra los agentes y los objetivos que cada uno persigue.

En la Figura 7 el agente central son los activos viales, sobre los cuales se determina el nivel de riesgo. El nivel de riesgo sobre el cual se determinan las inversiones considera 2 condiciones: por un lado, los usuarios determinan cual es el nivel de riesgo admisible o tolerable, dependiendo de sus objetivos, objetivos que son diferentes dependiendo de si los usuarios son personas, carga o pasajeros. Por otro lado, la

agencia vial estima mediante algún tipo de modelo, el nivel de riesgo "ofrecido" como estándar de servicio.

Dicha estimación, eventualmente, incluye la retroalimentación de los usuarios de manera indirecta a través de la interacción entre nivel de servicio ofrecido y el grado de calidad esperada por los usuarios. Analizando la parte superior de la Figura 7, los usuarios utilizan los activos viales y a la vez evalúan, sobre la base de sus expectativas, la operación de los activos viales, tanto en condiciones de operación normales como bajo emergencias.

A su vez, sobre la base de la estimación del nivel de riesgo y de la tolerancia establecida por la población, la agencia vial determina la necesidad, monto y duración de la inversión de manera de conciliar la expectativa de nivel de servicio respecto de la que puede ofrecer la propia agencia vial. Asumiendo que existe un nivel de recursos predefinido, la agencia vial mandata, mediante la contratación de obras según alguna modalidad, la ejecución de obras de mantenimiento que pueden restituir la condición inicial o hacer más resilientes los activos viales para alcanzar un determinado nivel de servicio, en respuesta al nivel de riesgo tolerable por los usuarios. Este análisis se puede realizar a nivel nacional, regional o local, adaptando algunos aspectos clave como son el tamaño de la infraestructura y los recursos disponibles.

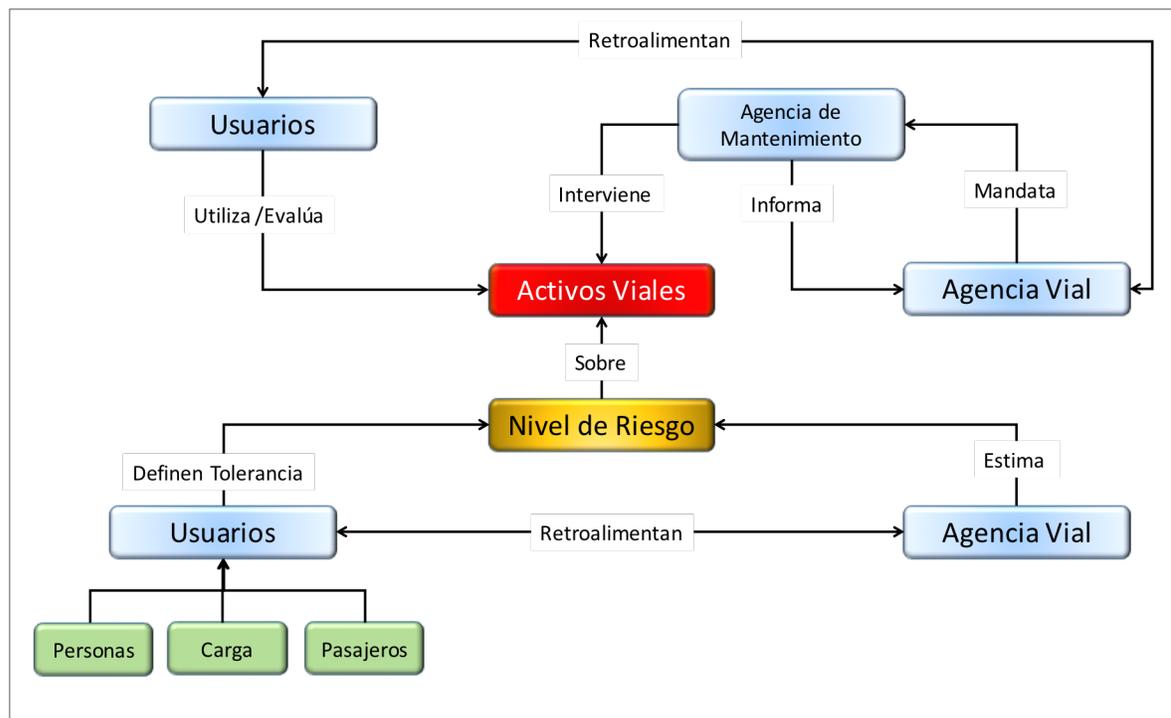


Figura 7. Interacción entre agentes en el contexto de gestión de riesgos en un sistema de gestión de infraestructura vial

6. Conclusiones

Este trabajo tuvo el propósito de discutir a nivel conceptual el enfoque de simulación basada en agentes y de cómo se puede utilizar para modelar un sistema de gestión de activos viales en presencia de riesgos e incertidumbre. A partir de la discusión realizada, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los sistemas tradicionales de gestión de activos viales se modelan como sistemas cerrados que no permiten incorporar las decisiones de los usuarios, la incertidumbre y los riesgos, por lo cual no poseen los medios para determinar la consistencia entre el nivel de servicio provisto y el demandado por los usuarios.
- La simulación basada en agentes es una técnica que permite analizar sistemas complejos, abiertos y emergentes, incluyendo como elemento central el agente, quien es capaz de tomar decisiones, interactuar con el medio y con otros agentes, tomar decisiones y aprender otorgando un grado de flexibilidad que permite analizar múltiples escenarios posibles.
- La literatura existente sobre la temática es reciente y se abocan esencialmente a tratar aspectos conceptuales acerca de cómo utilizar la simulación basadas en agentes para modelar sistemas de gestión de pavimentos, de puentes y la incorporación de los tomadores de decisiones. Un aspecto importante de resaltar es que este enfoque de análisis necesariamente se debe integrar a las técnicas tradicionales para modelar el comportamiento de la infraestructura vial en el tiempo.

- En un sistema de gestión de activos estándar los principales agentes corresponden a la agencia vial, los usuarios, la infraestructura y la agencia ejecutora del mantenimiento. Al aplicar la simulación basada en agentes lo que se busca es maximizar la utilidad de los agentes, expresada como la mínima diferencia entre el nivel de servicio ofrecido respecto del esperado, sujeto a que esta utilidad sea superior a una utilidad mínima.
- Para incorporar el riesgo en la gestión de activos viales basada en agentes, se debe considerar los efectos cascada producto de la interacción de las obras viales con otras infraestructuras, además del ámbito de la modelación: prevención, emergencias y desastres. Esto determina las acciones que adoptan los agentes.
- La simulación basada en agentes es una herramienta promisorio para desarrollar sistemas de gestión de activos viales que involucren las decisiones de las personas en diversos ámbitos y niveles, desde las decisiones de política (tomadores de decisiones) hasta decisiones de viaje de los usuarios, con lo cual surge de manera natural el carácter socio-técnico de este tipo de sistemas. Como herramienta, permite evaluar dimensiones de la utilidad de las personas complementarias a la valoración económica, lo cual permite mejorar la calidad de los planes de mantenimiento.

7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICYT) del Ministerio de Educación de Chile por el financiamiento otorgado al Proyecto FONDAPE 15110017 y al Proyecto FONDEF ID14110309, dentro de los cuales se enmarca éste trabajo.

8. Referencias

- Axtell R. (2000)**, Why agents? On the varied motivations for agent computing in social sciences. Working Paper 17. Centre of Social and Economic Dynamics. Brookings Institution, Washington D.C. Estados Unidos. 2000.
- Batouli, M. y Mostafavi, A. A. (2014)**, hybrid simulation framework for integrated management of infrastructure networks. En A. Tolk, S. Y. Diallo, I. O. Ryzhov, L. Yilmaz, S. Buckley, y J. A. Miller (Eds.) Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, pp 3319 – 3330.
- Bonabeau E. (2002)**, Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. PNAS, 99(3), 7280–7287.
- Bush S., Henning T., Ingham J. y Raith A. (2014a)**, Agent-Based modelling, a quiet revolution in asset management. IPWEA Conference, Auckland, Nueva Zelanda.
- Bush S., Henning T., Ingham J. y Raith A. (2014b)**, An agent based framework for improved strategic bridge asset management. 9th Austroads bridge conference, Sidney, Australia.
- Clymer J.R. (2009)**, Simulation-based engineering of complex systems. 1st ed. Wiley. 2009.
- Grigoryev I. (2009)**, AnyLogic 7 in Three Days, 2ª Edición. AnyLogic developers. 2015.
- Hasan S. y Foliente G. (2015)**, Modeling infrastructure system interdependencies and socioeconomic impacts of failure in extreme events: emerging R&D challenges. Natural Hazards, 78, 2143 – 2168.
- Heath B., Hill R. y Ciarallo F. (2009)**, A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008), Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 12(4), 9.
- Macal C. y North M. (2009)**, Tutorial on agent-based modeling and simulation Part 2: How to model with agents. 2006 Winter Simulation Conference, Monterrey, CA. 2009.
- Macal C. y North M. (2010)**, Tutorial on agent-based modeling and simulation, Journal of Simulation, 4(3), 151–162.
- Moore C., Tjioe M., Manzella A., Bernhardt K.L y McNeil S. (2008)**, Asset Management Insights Using Agent Models. 7th International Conference on Managing Pavement Assets, 2008.
- Nikolik C. y Ghorbani A. A. (2011)**, method for developing agent-based models of socio-technical systems. Proceedings of the 2011 international conference on networking, sensing and control. Delf, 11-13 abril. pp 44 – 49.
- Osman H. (2012)**, Agent-based Simulation of Urban Infrastructure Asset Management Activities. Automation in Construction, 28, 45-57. 2012.
- Sanford K.L. (2007)**, Agent-Based modeling in transportation. Artificial Intelligence in Transportation Information for Application. Transportation Research Circular E-C113. 2007. Transportation Research Board, Estados Unidos.
- Sanford K.L. y McNeil S. (2008)**, Agent-Based modeling: approach for improving infrastructure management. Journal of Infrastructure Systems, 14(3), 253–261.



- Singh V.K. y Gupta A.K. (2009)**, Agent based models of social systems and collective intelligence. International conference of intelligent agent & multiagent systems, Cheennai.
- Zhang G. y Li Y. (2010)**, Agent-based modeling and simulation for open complex systems. Proceedings of the 2nd international Asia conference on informatics in control, automation and robotic. Pp 504 – 507. 2010.

