

APROXIMACIONES A LA VALIDACIÓN EN DINÁMICA DE SISTEMAS

A. Valencia¹, L. Obando², Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia.
Recibido Junio 3, 2012 – Aceptado septiembre 1 de 2012

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v6n2.a06>

Resumen—El proceso de validación de modelos en dinámica de sistemas permite asegurar una mayor confiabilidad en las estrategias y políticas planteadas a partir de ellos. El presente artículo identifica algunos aspectos y herramientas básicas de validación en modelos de dinámica de sistemas a través de un análisis de información secundaria tomada de memorias de eventos y publicaciones académicas alrededor de la temática. Como resultado, se observa que la validación en dinámica de sistemas se apoya en una serie de pruebas estructurales, técnicas y de comportamiento que se conciben como un proceso de creación gradual de confianza con respecto a la aplicación de un respectivo modelo. Se concluye que la validez del modelo está ligada a la naturaleza, propósito, contexto del problema y a sus usuarios, constituyéndose como un proceso transversal al desarrollo del modelo con el fin de facilitar la detección temprana de errores.

Palabras clave— Dinámica de sistemas, validación, confiabilidad, modelado

Abstract— The models validation process in system dynamics ensures better reliability in the strategies and policies set from them. This article identifies some basic aspects and validation tools in system dynamics models. The methodology has been a secondary information analysis from proceedings and academic publications on the theme. As a result, is observed that the validation of system dynamics is based on a series of structural, techniques and behaviors tests that are structured as a gradual process of confidence building with respect to the application of a respective model. In conclusion, the validity of the model is related to the nature, purpose, problem context and users, constituting as a transversal process to development model to facilitate early errors detection.

Keywords— System dynamics, validity, reliability, modeling

I. INTRODUCCIÓN

La validación de un modelo no puede ser del todo objetiva, cuantitativa y formal, puesto que la validez refleja la utilidad con respecto a un objetivo [1]. Además, la validez en dinámica de sistemas se considera más compleja que la de un modelo de “recuadro negro” ya que juzgar la validez de la estructura interna de un modelo resulta problemático [2], tanto filosóficamente como técnicamente, por lo que no existe una definición o procedimiento único establecido para la validación en la literatura de dinámica de sistemas [3].

Para el presente artículo se adoptará la definición dada por Babuska quien concibe la validación como “la evaluación de la exactitud de un resultado de un modelo, respecto a la solución que se espera que el modelo deba arrojar. La relación que tiene el modelo con el sistema real que lo inspiró no es un insumo para esta evaluación” [4].

Inicialmente se presentan algunos principios que se deben tener en consideración en todo el proceso de validación, así como la importancia de la replicabilidad para dar validez a los resultados. Luego se exponen algunas opciones de análisis para la validación de variables blandas, las cuales son de vital importancia al modelar sistemas sociales. Posteriormente se exponen técnicas específicas utilizadas para la validación en dinámica de sistemas, las cuales representan mecanismos para dar fiabilidad al modelo y finalmente, se expone la importancia de aplicar las políticas de mejoramiento del sistema después de haber aplicado diversas pruebas que permitan generar confianza en el modelo.

II. PRINCIPIOS PARA LA VALIDACIÓN DE UN MODELO

Inicialmente, es importante exponer algunas directrices expuestas por Balci (1995) quien a partir de varios principios para la validación de un modelo, brinda lineamientos importantes para llevar a cabo un proceso de validación [5]:

¹ A. Valencia es Ingeniero Administrador y aspirante a Magister en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Email: javalencia@unal.edu.co

² L. Obando es Ingeniera de Sistemas de la CUN y estudiante de Maestría en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Email: lobandom@unal.edu.co

- El proceso de validación y verificación no debe ser entendido como una fase del ciclo de desarrollo de un modelo, sino que debe llevarse a cabo a través de todo el desarrollo de éste, con el fin de facilitar la detección temprana de errores.
- Los resultados de un proceso de validación y verificación nunca deben entenderse como absolutos: un modelo no es ni absolutamente correcto, ni absolutamente incorrecto, sino que se ubica en una escala de credibilidad.
- Un modelo se construye para unos fines específicos, y su credibilidad debe ser juzgada respecto a dichos objetivos. Es más correcto decir “el modelo es suficientemente válido para”, en lugar de “el modelo es válido”.
- El proceso de validación y verificación debe ser guiado por personal diferente a los modeladores, para evitar sesgos.
- El proceso de validación y verificación es difícil y requiere visión y creatividad. Para llevar a cabo un proceso satisfactorio de validación y verificación, se requiere conocer plenamente el sistema real, tener experiencia en las metodologías de modelado y experiencia en procesos de validación y verificación; sin embargo, es muy difícil en muchos casos comprender el modelo completo.
- La credibilidad de un modelo sólo puede ser afirmada bajo aquellas condiciones para las cuales se desarrollaron las pruebas.
- Los errores en el modelo deben detectarse lo más pronto posible dentro del ciclo de vida del desarrollo del mismo. Lo anterior, para mejorar el proceso de validación y verificación y reducir su costo.
- El hecho de que los sub modelos sean lo suficientemente creíbles, no implica que el modelo completo sea lo suficientemente creíble.
- La validación de un modelo de simulación no garantiza la credibilidad y aceptabilidad de los resultados de la simulación.
- Sus resultados deben ser completamente replicables.
- Asegúrese de que terceros independientes puedan replicar todos los resultados utilizando sólo la documentación escrita.
- Describir los supuestos del modelo: su estructura, límites, valores de los parámetros, fuentes de datos y la lógica en general.
- La documentación no es simplemente una copia impresa de las ecuaciones del modelo.
- Organizar la documentación por el subsistema de modelo.
- Documentar el modelo para que otros puedan comprender, ejecutar y modificar sin tener que hacer un montón de preguntas. Reclutar y entrenar a otros que entienden y pueden usar el modelo.

Es importante aclarar que como lo exponen Oberkampf & Trucano (2002) el proceso de validación se lleva a cabo entre el mundo real y las soluciones arrojadas por el modelo, comparando los resultados entre uno y otro y haciendo uso de datos experimentales; a diferencia del proceso de verificación que se lleva a cabo entre el modelo conceptual y las soluciones arrojadas por el modelo, confirmando que la solución sí refleje lo que dicta el modelo conceptual [5]

III. METODOLOGÍA

Para este artículo se ha realizado un análisis de información secundaria a partir de seminal papers y publicaciones académicas alrededor del proceso de validación en dinámica de sistemas. Entre los seminal papers se encuentran: “Tests for building confidence in system dynamics models” desarrollado por Forrester y Senge (1978) en el System Dynamics Group en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y posteriormente los publicados por Barla y Carpenter (1990) “Philosophical roots of model validation: Two paradigms” y Barlas (1996) “Formal aspects of model validity and validation in system dynamics” en la revista System Dynamics Review. Más recientemente Sterman en su libro “Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world” dedica un capítulo entero a la temática.

A partir de la revisión de los seminal paper mencionados se consultó información de otros centros investigativos que han trabajado en las pruebas y mecanismos de validación en dinámica de sistemas, entre estos se encuentran el School of Information Science and Policy de la Universidad de

Otro de los aspectos importantes y comúnmente ignorados por la literatura se relaciona con el papel de la replicabilidad como mecanismo de validación, ya que esto permite que otros investigadores mediante la comprobación, puedan revelar errores, mejorar la transparencia y la utilidad del trabajo de modelado, siendo así una forma de dar credibilidad y validez a determinados planteamientos a largo plazo. Algunas de las directrices que deben tenerse en cuenta para la documentación de un modelo con el fin de que se pueda asegurar su replicabilidad y mejora por parte de otros investigadores son las siguientes [6]:

Albania, Technology and Development Studies del National Institute of Science en New Delhi, School of Administrative Studies en la Universidad de York y el reconocido System Dynamics Group en el departamento de ciencias de la información de la Universidad de Bergen en Noruega.

De la información recopilada en esta búsqueda y la incorporación de otros artículos de interés para la temática, se identifican algunas de las principales pruebas y recomendaciones en el proceso de validación en dinámica de sistemas.

IV. VALIDACIÓN DE VARIABLES BLANDAS

Frecuentemente al formular un modelo de dinámica de sistemas se deben incorporar variables blandas y cualitativas, lo cual representa una dificultad ya que los modelos exigen un manejo cuasi-cuantitativo de dichos conceptos, obstaculizando así la fiabilidad y validez de su medición [7]. La inclusión de este tipo de variables representa una de las ventajas de la utilización de dinámica de sistemas ya que permite incorporar dichas variables y analizar sus fluctuaciones permitiendo estudiar las influencias mutuas con otras variables en el tiempo; sin embargo, la incorporación de estas variables se enfrenta a problemas de medición sistemáticos y aleatorios. Además, la vinculación causal entre las variables blandas no es fácil de determinar [3], por ejemplo, modelar la “motivación” incorpora un sinfín de posibilidades, por lo que se debe hacer claridad sobre los conceptos tomados y la teoría social que se emplea para el análisis.

Desde las metodologías de modelado para variables blandas se deben tener presentes las limitaciones causadas por la medición de variables en una escala no métrica, y tratar de evitar el uso de operaciones numéricas no admisibles en variables cualitativas. La forma en que se incorporan las variables blandas en estos modelos es mediante una variable multiplicadora con valores que van de 0 a un límite superior que podría ser 1; sin embargo, la comparación y naturaleza de dicho comportamiento debe justificarse claramente para evitar mayores incertidumbres sobre el modelo, ya que los problemas se agudizan con la utilización de varios multiplicadores debido a que el hecho de asumir que su comportamiento es equivalente como “multiplicador” en el mundo real, es difícil de mostrar [8].

Para realizar esta validación de variables blandas se propone utilizar el Modelo de Ecuaciones

Estructurales (SEM), el cual permite realizar un análisis de las relaciones causales y no causales entre variables, incorporando técnicas de regresión, el análisis factorial y el análisis Path. El SEM trata de comprobar si el modelo teórico es válido, verificando el ajuste de los datos al modelo propuesto [9], [10]. Los modelos de medida comprueban si las escalas de medida propuestas son adecuadas teniendo en cuenta la fiabilidad y validez de las escalas. La fiabilidad se define como el grado de consistencia entre las múltiples medidas de una variable.

La consistencia interna se refiere a que los ítems individuales o indicadores de la escala deberían estar midiendo las mismas cosas y por lo tanto deben estar altamente correlacionadas. La alternativa para estudiar la fiabilidad de la escala es usar Análisis Factorial Confirmatorio (AFC). El AFC es una técnica estadística de reducción de datos usada para explicar las correlaciones entre las variables observadas en términos de un número menor de variables no observadas llamadas factores. Las variables observadas se modelan como combinaciones lineales de factores más las expresiones de error. Existen dos enfoques para estudiar análisis factorial: el enfoque exploratorio y el enfoque confirmatorio. El enfoque exploratorio no tiene restricciones en cuanto a normalidad, homocedasticidad o linealidad entre las variables, de hecho, algunas veces, la multicolinealidad favorece los resultados ya que se agrupan las variables en función de su correlación. Para la estimación usa el análisis de componentes principales. La perspectiva confirmatoria sin embargo permite aplicar máxima verosimilitud y se propone como una manera óptima de validar el análisis factorial confirmatorio [9].

La validez es la medida en que una escala o conjunto de medidas representa con precisión el concepto de interés. Es necesario evaluar tres aspectos [9]:

- Validez de Contenido: proviene del análisis de la teoría.
- Validez Convergente: grado en el que dos medidas del mismo concepto están correlacionadas (serán las cargas factoriales del AFC).
- Validez Discriminante: cuando dos elementos conceptualmente parecidos difieren.

En cuanto a la medición de los instrumentos de recolección comúnmente usados para la cuantificación de variables blandas o cualitativas vale la pena destacar que en la mayoría de ocasiones

de utiliza una escala de Likert [11] (o método de evaluaciones sumarias), la cual es una escala psicométrica comúnmente utilizada en cuestionarios para investigaciones sociales. Entre los pasos para su construcción se encuentran la definición nominal de la variable a medir, la recopilación de preguntas en forma de proposiciones frente a las cuales se estipula el nivel de acuerdo o desacuerdo, la determinación de las puntuaciones dadas a dichas preguntas donde las respuestas a cada elemento se suman para obtener la puntuación total de un grupo de elementos. Además, se considera una escala de tipo ordinal, ya que no se puede asumir que los sujetos perciban las respuestas como equidistantes.

Luego de tener la escala de medida y recolección de los datos se prosigue a realizar la validación de los resultados en los cuestionarios utilizados. Esto se puede realizar mediante el Alfa de Cronbach siguiendo la metodología propuesta por Gliem & Gliem (2003) para medir la fiabilidad de una escala de medida de una variable que no se considera directamente observable (por ejemplo, la motivación) en una población de sujetos, para lo cual se miden n variables que sí son observables del público de interés, partiendo del hecho que las variables están relacionadas con la magnitud inobservable de interés, existiendo un elevado nivel de correlación entre ellas [12].

Las medidas de confiabilidad expuestas permiten una menor incertidumbre sobre la capacidad de lograr resultados similares de los trabajos de diversos investigadores en la medición de variables blandas mediante el uso repetido de los instrumentos utilizados para la recolección de datos [3].

V. ALGUNAS TÉCNICAS DE VALIDACIÓN EN DINÁMICA DE SISTEMAS

Con el fin de que la validación sea un proceso que genere confianza en un modelo, ésta no debe ser un evento de una sola vez sino un proceso apoyado por una serie de pruebas con características estructurales y de comportamiento, debido a que debe ser visto como un proceso de creación gradual de confianza con respecto al propósito de un modelo en particular [13]. En este sentido, se sostiene que el requisito de falsabilidad debe sustituir a la verificabilidad ya que las teorías científicas deben ser obligadas a ser falsables implicando así un proceso gradual de corroboración que va fortaleciendo los modelos [1].

A. Evaluación de la estructura

Se inicia con la comparación de la estructura del modelo frente a la estructura del sistema real. Según

Barlas (1994) este contraste podría llevarse a cabo como una prueba de la estructura teórica, mediante la comparación de la estructura del modelo elaborado con los conocimientos existentes en la literatura [3]. Basado en esto, lo primero que se recomienda revisar son las relaciones causales en la hipótesis dinámica ya que sin una fundamentación teórica que la respalde los puntos de vista así como el modelo generado serían poco confiables [14].

En cuanto a las pruebas que respaldan la validez estructural del modelo construido a partir de las teorías y relaciones identificadas, se presentan cinco pruebas, que se observan en la Tabla 1 [15]. Estas pruebas se ampliarán con detalle más adelante.

TABLA I.
RESUMEN DE TEST PARA LA VALIDACIÓN ESTRUCTURAL EN MODELOS DE DINÁMICAS DE SISTEMAS

Nombre de la prueba	Propósito de la prueba
Adecuación de límites	Si los conceptos y estructuras importantes para abordar las cuestiones políticas son endógenos al modelo.
Verificación de la estructura	Si la estructura del modelo es consistente con el conocimiento descriptivo relevante del sistema de modelado inicial.
Consistencia dimensional	Si cada ecuación en el modelo dimensional corresponde al sistema real.
Verificación de parámetros	Si los parámetros en el modelo son consistentes con el conocimiento relevante del sistema.
Condiciones extremas	Si el modelo exhibe un comportamiento lógico cuando a los parámetros seleccionados se les asignan valores extremos.

Fuente: Adaptación a partir de [16]

Por otro lado, en las pruebas de evaluación de la estructura se cuestiona si el modelo es consistente en su nivel de agregación, en la conformidad del modelo a las realidades físicas básicas (leyes de conservación, valores reales negativos) y sobre el realismo de las reglas de decisión para los agentes, además de examinar las externalidades y los efectos secundarios que deben ser capturados de forma endógena. Mediante la inspección directa de las ecuaciones se pueden analizar las claves de información utilizadas en cada decisión con ayuda de las relaciones causales establecidas. Otra técnica para probar la idoneidad de los supuestos de agregación es mediante el desarrollo de un submodelo más detallado que permita comparar su comportamiento con la formulación más agregada, con el objetivo de analizar si el detalle adicional es importante y afecta significativamente los

resultados del modelo y las implicaciones de las políticas implementadas en éste [6].

B. Análisis de sensibilidad

En el análisis de sensibilidad se pregunta si las conclusiones cambian de manera importante cuando se varían los supuestos en el rango posible de incertidumbre. En este aspecto se busca probar la solidez de las conclusiones teniendo en cuenta la incertidumbre en sus supuestos [6].

Al evaluar la sensibilidad de los supuestos paramétricos se debe identificar en primer lugar el rango plausible de incertidumbre en los valores de cada parámetro, a continuación, se debe comprobar la sensibilidad a estos parámetros en un rango mucho más amplio. Sobre este análisis, la mayoría de software en dinámica de sistemas incluyen herramientas automatizadas de análisis de sensibilidad, especificando inicialmente los parámetros para variar y proporcionando un rango de valores para cada uno de ellos. Dado el escaso tiempo y recursos en cualquier proyecto, el análisis de sensibilidad debe centrarse en las relaciones y los parámetros de los cuales se tenga sospecha de incertidumbre y pueden ser influyentes; sin embargo, si un parámetro tiene poco efecto sobre la dinámica, no tiene que ser probado, incluso si su valor es muy incierto debido a que los errores de estimación son de poca importancia. Un método común para examinar la sensibilidad es el de definir los mejores y peores escenarios previamente [6].

Las pruebas de políticas de sensibilidad pueden, además de revelar el grado de solidez de un modelo de comportamiento, indicar el grado en que las recomendaciones de política podrían estar influenciadas por la incertidumbre en los valores de los parámetros. Dichas pruebas podrían ayudar a mostrar el riesgo involucrado en la adopción de un modelo para sugerir políticas basándose en sus resultados [15].

C. Pruebas de evaluación de parámetros

Se parte de la pregunta ¿los parámetros del modelo incorporan el conocimiento descriptivo y numérico del sistema? [17]. Esta prueba evalúa la pertinencia de los parámetros constantes en contra del conocimiento del sistema real tanto conceptual como numéricamente [3].

Inicialmente, antes de decidir cómo estimar un parámetro, se debe tener la seguridad de que cada constante (y variable) tiene un significado en la vida real, a partir de lo cual se realiza una estimación de

los valores de los parámetros con los datos numéricos que se tengan, siendo éste el enfoque más común. Por otro lado, dentro de los métodos numéricos, el más utilizado es la regresión múltiple por mínimos cuadrados, la cual no se considera adecuada en los modelos dinámicos debido a su imprecisión ante la presencia de colinealidad, autocorrelación y heterocedasticidad [6].

D. Prueba de adecuación de los límites en las políticas sugeridas

Esta prueba se usa para estudiar las implicaciones de la adopción de una respectiva política en el modelo, examinando como al modificar los límites de éste, se pueden alterar las políticas recomendadas y las sugerencias a las que se llega mediante el uso del modelo. En este sentido las pruebas de adecuación de límites requieren la conceptualización de la estructura adicional de comportamiento surgida a partir de la política [15].

E. Reproducción del comportamiento

Bajo esta prueba se busca comparar los resultados del modelo de dinámica de sistemas formulado con datos reales de forma cuantitativa y cualitativa, incluyendo modelos de comportamiento, la forma de las variables, asimetrías, eventos inusuales, entre otros. Dado lo anterior, la capacidad de un modelo para generar los patrones adecuados de conducta puede ser evaluada mediante juicio cualitativo o estadístico.

En general, cuanto mayor es el grado de estructuración de variables exógenas en el modelo entonces mayor es la correspondencia punto por punto de sus datos; sin embargo las medidas de error no son significativas, teniendo mayor relevancia la coherencia con las frecuencias y amplitudes, las relaciones de fase (adelantos y retrasos), la variabilidad de características tales como la amplitud y la frecuencia, las cuales también deben corresponder a los datos [6]. Además, las pruebas estadísticas usualmente aceptadas en modelos económicos y sociales se plantean por medio de una comparación directa de modelos individuales de ecuaciones y los datos estadísticos [15].

Por otro lado, existen diversos problemas involucrados en el uso de pruebas de significancia estadística en la validación de la dinámica del sistema debido a que al considerar algunos supuestos fundamentales que deben ser

titulares de pruebas estadísticas se observa que la mayoría de las pruebas estadísticas asumen al menos que los datos son (i) independientes (no autocorrelacionados), (ii) no se correlacionan de forma transversal, (iii) se distribuyen de forma normal. Se observa que los dos primeros supuestos casi nunca se cumplen en un modelo de dinámica de sistemas ya que los datos generados por dichos modelos se autocorrelacionan y correlacionan entre sí por su propia naturaleza. Además, en los modelos de dinámica de sistemas no existe una única "variable de salida" donde deba concentrarse la validación del modelo, sino que normalmente hay muchas variables de importancia para el propósito del estudio [2].

F. Simplificación del modelo

La simplificación del modelo es un enfoque semiformal para extraer las estructuras esenciales de un modelo a gran escala, a fin de identificar sus dinámicas fundamentales y aumentar su comprensión. Inicialmente se identifican ciclos de retroalimentación débil con el fin de suprimirlos, se busca así identificar subestructuras que permitan generar el comportamiento dinámico previsto [18].

En la medida en que se lleva a cabo la simplificación del modelo se deben analizar las cuestiones relativas al límite del modelo, su nivel de agregación, pertinencia de la estructura simplificada, entre otras pruebas. La simplificación del modelo y sus límites depende de las variables endógenas que se desean incorporar, los factores que afectan este comportamiento en el tiempo y el problema articulado que se busca abordar. El valor agregado en este punto es que ayuda a no dispersar a los analistas en variables que no son de interés y no caer en detalles innecesarios que hacen poco útil y complejo el modelo [18].

Otro de los objetivos de la simplificación puede ser crear modelos generales (enfoque teórico) a partir de casos más específicos, favoreciendo el enfoque pedagógico y simplificado de los modelos, que puede además agregar confianza en la simulación y la estructura del modelo así como en sus parámetros, debido a la aplicación en diversos campos [18].

G. Otras técnicas de validación

Finalmente se recopilan otras técnicas de validación en dinámica de sistemas propuesta por Sterman [6], [19] y Forrester [15] que deben ser utilizadas para verificar la validez de un modelo en dinámica de sistemas pero que

no se enunciaron en el artículo debido a que son las más reportadas y conocidas en la literatura académica, mientras que el propósito del artículo era dar a conocer otro tipo de pruebas y opciones metodológicas para evaluar la confiabilidad de un modelo. Estas técnicas se presentan en la Tabla 2.

TABLA II.
OTRAS TÉCNICAS DE VALIDACIÓN [6]

Técnicas de validación	Descripción
Consistencia dimensional	Se debe especificar las unidades de medida para cada variable a lo largo de la construcción del modelo. Problemas estructurales de dimensiones revelan vacíos en la comprensión del problema y de su estructura.
Pruebas de integración de error	Se deben seleccionar diferentes métodos de integración numérica y cambios en el paso del tiempo, lo cual dará una aproximación de la dinámica subyacente continua y precisa.

TABLA II.
OTRAS TÉCNICAS DE VALIDACIÓN [6]
(Continuación)

Técnicas de validación	Descripción
Condiciones Extremas	El modelo debe comportarse de una manera realista, sin importar lo extremo de las entradas o las políticas que puedan ser evaluadas. La salida de un respectivo modelo debe ser factible y razonable, aun cuando cada entrada a la ecuación toma su valor máximo y mínimo.
Pruebas de adecuación de límites	Evalúan la idoneidad de los límites del modelo a partir de la problemática que aborda el problema planteado (evaluación de gráficos y diagramas del modelo e inspección directa de ecuaciones del modelo) examinando la lista de variables exógenas y la pertinencia de incluirlas como variables endógenas en caso de tener interés por su comportamiento en un horizonte de tiempo determinado.
Pruebas de comportamiento anormal	Permiten observar la importancia de las estructuras o variables examinando los comportamientos extraños que puedan darse cuando una relación se elimina o modifica dando una idea de su importancia. Estas pruebas funcionan en conjunto con las pruebas de condiciones extremas cuando se da un cambio en los parámetros, pero en estas se profundiza la importancia de las relaciones causales de un determinado constructo.
Pruebas de comportamiento sorpresivo	Se refiere al momento en que se genera en el modelo un determinado comportamiento, previamente desconocido, pero que puede llegar a ocurrir en el sistema real. Para detectar sorpresas en las pruebas de comportamiento se debe analizar con atención cada una de las implicaciones de cambios en el modelo, analizando el comportamiento de todo el modelo, no sólo de sus indicadores más importantes, con el fin de registrar dichas anomalías.
Pruebas de miembro de la familia	Se cuestiona si el modelo puede generar los mismos comportamientos en otros casos similares al sistema para el cual se construyó inicialmente. Enfatiza que se debe desconfiar de los modelos que puedan exhibir un único modo de comportamiento debido a que para cada caso los comportamientos deben diferir aunque puedan tener puntos comunes que permiten capturar los patrones del modelo.

H. Pruebas y políticas de mejoramiento del sistema

Estas pruebas de mejora en el sistema permiten analizar si el proceso de modelado ayudó a cambiar el sistema buscando así identificar las políticas que conduzcan a su mejora; sin embargo, este proceso registra numerosas dificultades, ya que en la práctica la evaluación del impacto de un modelo es extremadamente difícil porque se necesita mucho tiempo para que sus efectos se manifiesten y es difícil cambiar las creencias y modelos mentales de las personas. Además, muchas otras variables y sus condiciones cambian al mismo tiempo cuando las nuevas políticas se aplican y esto no implica que las políticas basadas en el modelo hayan sido las responsables de las mejoras o empeoramiento en el sistema ya que puede deberse a factores no relacionados con el proceso de modelado. En este sentido, se plantea que la clave para una evaluación exitosa de una intervención del modelado es: (1) evaluación prospectiva, (2) el uso de múltiples fuentes de datos, y (3), en la medida de lo posible, la adhesión a los protocolos experimentales adecuados [6]. Estas pruebas de sistemas evalúan el beneficio de los cambios y políticas encontradas en el modelo, la forma en que se implementan y las mejoras en el comportamiento del modelo real [15].

Está claro que los modelos tienen la intención de diseñar políticas para resolver un problema específico, mejorar el rendimiento de un sistema o analizar las contingencias de un respectivo sistema para las cuales la experiencia no proporciona ninguna guía. Además, se debe tener en cuenta la creación de mecanismos, tales como protocolos de entrevistas y encuestas para documentar los modelos mentales de las personas, sus comportamientos y los cambios en las políticas [6].

VI. CONCLUSIONES

Los estudios coinciden en que los resultados del proceso de validación nunca deben entenderse como absolutos ya que la credibilidad de un modelo puede ser afirmada sólo bajo aquellas condiciones para las cuales se desarrollaron las pruebas, siendo éste un proceso más confiable cuando la validación se lleva a cabo en todo el ciclo de desarrollo del modelo con el fin de facilitar la detección temprana de errores.

Una de las formas que han sido parcialmente ignoradas en la validación de modelos ha sido el proceso de replicabilidad, lo cual se convierte en una forma de dar credibilidad y validez a determinados planteamientos a largo plazo, garantizando la transparencia de los modelos a partir de una

documentación que permita detallar la estructura, límites, los valores de los parámetros, las fuentes de datos y la lógica en general.

Al recopilar lo planteado por los estudios analizados se observa que el proceso se puede resumir en tres aspectos. En primera instancia, la validación de los modelos mentales verificando que la hipótesis causal refleje lo planteado a partir del estudio del problema abordado y la literatura disponible. Por otro lado, se debe verificar que el modelo de simulación cumple con los criterios técnicos en cuanto al comportamiento y coherencia del modelado y finalmente, la validación con el modelo de simulación que examina las variaciones del comportamiento del modelo en comparación con el mundo real.

Una importante temática para futuras investigaciones se compone del estudio de validación de variables blandas debido a la dificultad que representa el manejo cuantitativo del modelo de dinámica y los problemas de medición que pueden obstaculizar la fiabilidad de los parámetros estimados, constituyéndose en una temática fundamental que permita fortalecer los procesos de modelamiento, comprensión y validación de sistemas sociales.

REFERENCIAS

- [1] Y. Barlas y S. Carpenter, «Philosophical roots of model validation: Two paradigms», *System Dynamics Review*, vol. 6, n.º. 2, pp. 148–166, 1990.
- [2] Y. Barlas, «Formal aspects of model validity and validation in system dynamics», *System dynamics review*, vol. 12, n.º. 3, pp. 183–210, 1996.
- [3] S. Roy y P. K. J. Mohapatra, «Causality and validation of system dynamics models incorporating soft variables: Establishing an interface with structural equation modelling», in *Proceedings of the 2000 international system dynamics conference*, 2000.
- [4] I. Babuska, «Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, pp. 4057–4066, 2004.
- [5] L. Cadavid y others, «Propuesta para la medición del ajuste entre las metáforas organizacionales y las herramientas de modelado», Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [6] J. D. Sterman, «Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. 2000», *Boston et al: Irwin McGraw-Hill*, vol. 110, 2000.
- [7] L. F. Luna-Reyes y D. L. Andersen, «Collecting and analyzing qualitative data for system dynamics: methods and models», *System Dynamics Review*, vol. 19, n.º. 4, pp. 271–296, 2003.
- [8] G. Coyle y D. Exelby, «The validation of commercial system dynamics models», *System dynamics review*, vol. 16, n.º. 1, pp. 27–41, 2000.
- [9] M. A. Ramón, «Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales. Metodología LISREL con EQS». 2007.
- [10] M. A. Ruiz, A. Pardo, y R. San Martín, «Modelos de ecuaciones estructurales», *Papeles del psicólogo: revista*

- del Colegio Oficial de Psicólogos, vol. 31, n.º. 1, pp. 34–45, 2010.
- [11] R. Likert, «A technique for the measurement of attitudes.», *Archives of psychology*, 1932.
- [12] J. A. Gliem y R. R. Gliem, «Calculating, interpreting, and reporting Cronbach’s alpha reliability coefficient for Likert-type scales», in *Midwest research to practice conference in adult, continuing, and community education*, 2003, vol. 88.
- [13] Ö. Pala, J. A. M. Vennix, y J. P. C. Kleijnen, «Validation in soft OR, hard OR and system dynamics: A critical comparison and contribution to the debate», in *Proceedings of the 17th International Conference of The System Dynamic Society and the 5th Australian&New Zealand Systems Conference, New York, United States of America, The System Dynamics Society*, 1999.
- [14] H. Qudrat-Ullah, «On the validation of system dynamics type simulation models», in *Information Science and Applications (ICISA), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1–7.
- [15] J. W. Forrester y P. M. Senge, *Tests for building confidence in system dynamics models*. System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [16] H. Qudrat-Ullah y B. S. Seong, «How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model», *Energy Policy*, vol. 38, n.º. 5, pp. 2216–2224, 2010.
- [17] H. Qudrat-Ullah, «Structural validation of system dynamics and agent-based simulation models», in *19th European Conference on Modelling and Simulation, Riga, Latvia*, 2005, vol. 94.
- [18] A. K. Saysel y Y. Barlas, «Model simplification and validation: Illustration with indirect structure validity tests», 2004.
- [19] J. D. Sterman y others, «A skeptic’s guide to computer models», *Managing a nation: The microcomputer software catalog*, vol. 2, pp. 209–229, 1991.

BIOGRAFÍA



Alejandro Valencia Arias, Ingeniero Administrador, aspirante a Magister en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Integrante del grupo de investigación en “Innovación y Gestión tecnológica” Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.



Lucero Obando Montoya, Ingeniera de Sistemas. Aspirante a Magíster en Ingeniería de Sistemas Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.