

Técnicas de verificación y validación de modelos de simulaciones en la investigación operativa

Verification and validation techniques of simulation models in operations research

Adrian Ismael Quispe Fajardo

<https://orcid.org/0009-0001-7157-2458>

adrianismael.quispe@unmsm.edu.pe

Jorge Armando Ramírez García

<https://orcid.org/0009-0005-2188-7012>

jorgearmando.ramirez@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

RECIBIDO: 25/03/2024 - ACEPTADO: 10/05/2024 - PUBLICADO: 31/07/2024

RESUMEN

Los modelos de simulación son una herramienta valiosa para la investigación operativa (IO), ya que permiten estudiar el comportamiento de sistemas complejos. Sin embargo, la efectividad de estos modelos depende de su precisión y confiabilidad. Por ello, es importante realizar técnicas de verificación y validación (V&V) para garantizar que los modelos representen adecuadamente el sistema real. Este artículo presenta una revisión de las técnicas de V&V para modelos de simulación en IO.

Palabras clave: Simulación, Verificación de modelos, Validación de modelos, Técnicas de simulación, Confiabilidad de simulaciones.

ABSTRACT

Simulation models are a valuable tool for operations research (OR) as they enable the study of the behavior of complex systems. However, the effectiveness of these models depends on their accuracy and reliability. Therefore, it is important to employ verification and validation (V&V) techniques to ensure that the models adequately represent the real system. This article provides a review of V&V techniques for simulation models in operations research (OR).

Keywords: Simulation, Model verification, Model validation, Simulation techniques, Simulation reliability.

I. INTRODUCCIÓN

La investigación operativa (IO) es una disciplina científica que utiliza métodos matemáticos y estadísticos para resolver problemas complejos de toma de decisiones en una amplia gama de industrias (Trigeorgis y Tsekrekos, 2018). Como bien mencionan Faulín & Juan (2005), la IO se caracteriza por un equilibrio entre la teoría y la práctica. Si bien el estudio de modelos matemáticos es crucial para comprender las relaciones y el comportamiento de un sistema, la validación y la utilidad práctica de los resultados obtenidos son fundamentales.

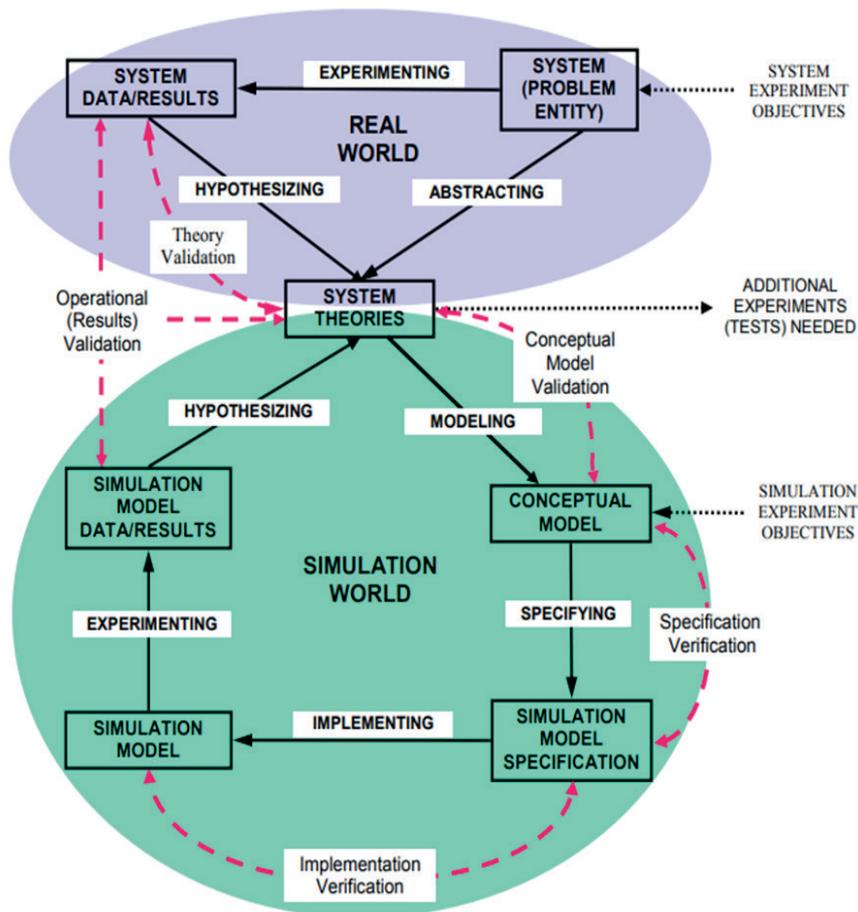
Por otra parte, los modelos de simulación son representaciones abstractas de sistemas reales (Gulyás y Kampis, 2015). Tal como lo indica Tarifa (2001), la simulación permite "experimentar" con modelos simplificados del sistema real, sin incurrir en los costos y riesgos asociados a la experimentación

directa. De esta manera, se facilita la toma de decisiones informadas, brindando a los responsables de la gestión de sistemas una mejor comprensión de las posibles consecuencias de sus acciones (Kumar, Nottestad y Murphy, 2009).

En el ámbito de la IO, la simulación se posiciona como un método fundamental para la evaluación de diferentes cursos de acción (Kleijnen y Van Beers, 2022). Sin embargo, la efectividad de los modelos de simulación depende en gran medida de la precisión y la confiabilidad de los datos que generan (Akhavian y Behzadan, 2013).

El propósito fundamental de este artículo es explorar las técnicas de V&V que se aplican en el contexto de la IO, con un enfoque especial en los modelos de simulación. Estas técnicas desempeñan un papel crítico en la garantía de la calidad de los

Fig. 1
Relaciones entre el mundo real y el mundo de simulación con verificación y validación.



Fuente: Adaptada de "Verification and Validation of Simulation Models" de Robert G. Sargent (2009).

modelos, lo que a su vez influye en la toma de decisiones informadas y estratégicas.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

En esta sección, nos adentraremos en el proceso de recopilación, análisis y adaptación de las técnicas de V&V en el contexto de la investigación operativa y los modelos de simulación.

2.1. Recopilación de Información

La primera etapa implica la búsqueda y recopilación de información relevante. Esto incluye la revisión de literatura académica, artículos científicos y otros recursos especializados. La búsqueda se realizó en bases de datos académicas confiables, tales como Scopus y Web of Science, y se centró en encontrar estudios y ejemplos que ilustren las mejores prácticas en V&V de modelos de simulación.

2.2. Análisis de la Información

Una vez reunida una cantidad significativa de información, se procede al análisis detallado, esto implica la evaluación crítica de los métodos y técnicas utilizados en los estudios seleccionados. Se busca identificar patrones, enfoques comunes y lecciones aprendidas que puedan aplicarse a este estudio.

2.3. Adaptación a Nuestro Contexto

Cada estudio y artículo seleccionado se evalúa en función de su relevancia para este enfoque específico, se seleccionan las técnicas más adecuadas para la naturaleza de los modelos de simulación en la investigación operativa. Es fundamental asegurarse de que estas técnicas se ajusten adecuadamente a nuestra problemática y objetivos de investigación.

III. RESULTADOS

En cuanto a los hallazgos relacionados con las técnicas de V&V de modelos de simulaciones en la investigación operativa, se pueden resumir de la siguiente manera:

La V&V de modelos de simulación es un proceso iterativo que se lleva a cabo durante el desarrollo del modelo con el objetivo de garantizar que este sea correcto y preciso, que es similar a lo que señalan Stevens y Atamturktur (2017)

La verificación se centra en asegurar que el modelo computacional es una representación fiel del modelo

conceptual, mientras que la validación se centra en asegurar que el modelo conceptual es una representación fiel del sistema real. (Kleijnen, 1995)

Por otro lado, Monleón (2005) expande el concepto de validación con:

- La validación operacional: Se refiere al proceso de determinar si los resultados del modelo son lo suficientemente precisos para su propósito, comparando los datos generados por el modelo simulado con los datos del sistema real.
- La validación de los datos: Implica asegurar que los datos utilizados para construir, evaluar y verificar el modelo sean adecuados y correctos. Siendo que los errores en los datos pueden generar problemas significativos

Para entender mejor las ideas de los distintos autores se presentan las técnicas de V&V de la siguiente forma: Tipo de técnica y autor que la considera.

3.1 Verificación de los Modelos de simulación

- Buenas Prácticas de Programación: Es importante seguir prácticas de programación sólidas para garantizar la integridad y la precisión del código. (Kleijnen, 1995).
- Comparación Intermedia: Se deben calcular manualmente algunos resultados intermedios de la simulación a modo de detectar errores de programación. Mediante el uso de técnicas como: Pruebas estadísticas, comparación con soluciones analíticas, uso de técnicas de reducción de varianza. (Kleijnen, 1995)
- Comparación de resultados finales de la simulación con resultados analíticos: La cantidad de procesos que contiene una simulación es demasiado elevada, de modo que, hacer un seguimiento manual es prácticamente imposible. Por lo que se realiza la ejecución de una versión simplificada del programa con soluciones analíticas conocidas. (Kleijnen, 1995)
- Animación: Es una herramienta valiosa para la verificación, ya que permite a los usuarios visualizar el sistema simulado en acción. Sin embargo, es importante no depender únicamente de la animación, ya que puede llevar a centrarse en ejecuciones cortas de la simulación y pasar por alto problemas a largo plazo. (Kleijnen, 1995)

- Animación y representaciones gráficas: La animación y la representación gráfica son dos formas de visualizar y verificar los resultados de un modelo de simulación.. La animación muestra el comportamiento del modelo a lo largo del tiempo, mientras que la representación gráfica muestra los datos de salida del modelo en forma de gráficos. (Xiang et al, 2005)
- Verificación del lenguaje de simulación y la implementación computacional: La verificación se enfoca en garantizar que se haya utilizado un lenguaje de simulación libre de errores, que se haya implementado correctamente en la computadora. (Sargent, 2009)
- Pruebas estáticas y dinámicas: Sargent (2009):
 - Pruebas estáticas: Analizan el código sin ejecutarlo, buscando errores en la estructura y lógica.
 - Pruebas dinámicas: Ejecutan el código con diferentes datos, verificando su comportamiento y resultados.
- Verificación de la estructura: La verificación de la estructura implica comparar la estructura del modelo con la del sistema real y otros modelos ya establecidos, asegurándose de que no haya contradicciones con el conocimiento existente sobre el sistema. (Alvarado & Ontiveros, 2016).

3.2 Validación de los Modelos de Simulación

- Uso de técnicas de comparación entre datos simulados y reales: Kleijnen (1995) compara los resultados de la simulación con datos históricos del sistema real. Mediante el uso de estas técnicas:
 - Prueba de Turing de Schruben: Presentar una mezcla de series temporales simuladas y reales a los clientes y desafiarlos a identificar las generadas por computadora. Se aplican pruebas estadísticas para evaluar si las identificaciones son significativas.
 - Estadísticas matemáticas: Emplear estadísticas matemáticas para obtener datos cuantitativos sobre la calidad del modelo de simulación. Se discute el uso de estadísticas, como la prueba t, para comparar medias simuladas y reales.
- Comparación entre modelos: La comparación de salidas entre modelos de simulación diferentes puede ser una herramienta útil para evaluar la precisión de un modelo. Al comparar los resultados de modelos que utilizan diferentes enfoques conceptuales, pero los mismos datos de entrada, se pueden identificar posibles áreas de mejora. (Xiang et al, 2005)
- Pruebas estadísticas: La validación del modelo se lleva a cabo utilizando técnicas estadísticas para comparar los datos de salida del modelo con los datos del sistema correspondiente o con los datos de salida de otros modelos cuando se ejecuta con los mismos datos de entrada. (Xiang et al, 2005)
- Validación de los datos: Obtener datos apropiados, precisos y suficientes puede ser difícil, lleva tiempo y es costoso, por lo que no se suele tener en cuenta. Sin embargo, los problemas con los datos a menudo son la razón por la cual los intentos de validar un modelo fallan. (Sargent, 2009)
- Verificación de Teorías y Suposiciones: Para asegurar la validez, las teorías y suposiciones del modelo deben someterse a pruebas mediante análisis matemático y métodos estadísticos aplicados a datos de la entidad del problema. (Sargent, 2009)
- Evaluación del Modelo: Cada submodelo y el modelo global deben evaluarse para determinar su razonabilidad y corrección para el propósito previsto. Esto implica verificar las relaciones utilizadas en términos de detalle y agregación, así como la aplicación adecuada de estructuras, lógica y relaciones matemáticas y causales. (Sargent, 2009)
- Validación con datos históricos: Los resultados de las simulaciones realizadas fueron analizados estadísticamente y comparados con los valores observados en la industria. Buscando que los errores estándar residual y medio absoluto se mantengan dentro del rango aceptable. (Ribas-García et al, 2014)
- Prueba de Límites adecuados: La prueba de límites adecuados examina si la relación entre las variables en el modelo es suficiente para cumplir con su propósito. Esta evaluación busca determinar si es necesario ampliar el modelo y si incluye una estructura relevante. (Alvarado & Ontiveros, 2016).
- Validación del modelo mediante la intuición de expertos: Es crucial determinar si el modelo genera resultados realistas, por lo tanto, es

esencial obtener la opinión de aquellos directamente involucrados en el proceso. En este sentido, la intuición de expertos desempeñó un papel significativo en la validación del modelo propuesto. (Correa et al, 2020)

- Técnica de intervalos de confianza: Esta técnica permite determinar el número mínimo de corridas (réplicas) necesarias para obtener resultados confiables en una simulación. Se basa en la construcción de un intervalo que, con un cierto nivel de confianza, contiene el valor real de la variable de salida. (Serrano & Garzón, 2019)
- Medidas de precisión: Son herramientas utilizadas para evaluar la calidad de los pronósticos, especialmente en modelos de predicción numérica. Estas medidas se centran en la discrepancia entre los valores simulados y los valores observados. Algunas de las medidas comunes de precisión incluyen el error medio absoluto (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación. (Ñavincopa, 2018)

3.3 Otras Consideraciones

Además de la V&V, es importante considerar otros aspectos relacionados con el desarrollo de modelos de simulación, como:

- Documentación detallada: La documentación detallada de las suposiciones y valores de entrada es esencial. Esto asegura que otros analistas puedan comprender y evaluar el modelo correctamente, incluso en ausencia del creador original del modelo (Sargent, 2009).
- Validez operacional: Implica determinar si el comportamiento de salida del modelo de simulación tiene la precisión necesaria para el propósito previsto sobre el dominio de aplicación del modelo. Esto se realiza mediante pruebas y evaluaciones, donde las deficiencias pueden originarse en cualquier paso del desarrollo del modelo, incluida la formulación de teorías del sistema o la presencia de datos inválidos (Sargent, 2009).
- Comunicación entre expertos en el dominio y analistas de simulación: Los expertos pueden proporcionar información invaluable sobre el sistema real y ayudar a definir las suposiciones del modelo. Esta colaboración mejora la calidad y la aplicabilidad de la simulación (Xiang et al, 2005).
- Validación interna: También se considera como técnica que compara resultados de repeticiones de un modelo de simulación estocástica con diferentes semillas aleatorias. Detectando inconsistencias causadas por semillas aleatorias que generan variabilidad no deseada (Xiang et al, 2005).
- Responsabilidad de la validación del modelo: El equipo encargado de la simulación tiene la responsabilidad de determinar la validez del modelo. Cuando el equipo de desarrollo es reducido, se sugiere que sean los usuarios finales del modelo quienes evalúen su validez, lo que contribuye a aumentar la credibilidad del mismo. (Monleón, 2005).
- Consistencia dimensional: Se debe realizar una prueba de consistencia dimensional, la cual requiere que cada ecuación matemática en el modelo, así como la inclusión de parámetros sea evaluada y analizada. (Alvarado & Ontiveros, 2016).

IV. DISCUSIÓN

En esta sección, se discutirán los resultados obtenidos en relación con la V&V de modelos de simulación en la investigación operativa.

4.1 Interpretación

Los resultados obtenidos muestran que la V&V de modelos de simulación es un proceso complejo y multifacético que requiere la participación de expertos en el dominio del sistema real, analistas de simulación y otros especialistas, este enfoque es similar al de Liu y Yang (2004).

La verificación se enfoca en garantizar que el modelo computacional refleje fielmente el modelo conceptual y que esté implementado correctamente, definición parecida a la dada por Ruvinsky et al. (2019). Esto implica seguir buenas prácticas de programación, realizar comparaciones intermedias y finales con soluciones analíticas conocidas, utilizar animaciones y representaciones gráficas, verificar el lenguaje de simulación y llevar a cabo pruebas estáticas y dinámicas para evaluar la estructura y la implementación del modelo.

La validación se centra en determinar si los resultados del modelo son lo suficientemente precisos para su propósito y si el modelo conceptual refleja adecuadamente el sistema real, como también lo señalan Tang, Kong y Li (2021). Esto implica comparar los datos generados por el modelo con datos

reales, utilizar técnicas estadísticas para comparar resultados, validar los datos utilizados en el modelo, verificar teorías y suposiciones, evaluar el modelo en su totalidad y validar con datos históricos. También se mencionan técnicas como la validación mediante la intuición de expertos, el uso de intervalos de confianza y medidas de precisión, entre otras.

Además de la V&V, se destacan otros aspectos importantes, como la documentación detallada del modelo, la validez operacional, la comunicación entre expertos y analistas, la validación interna, la responsabilidad del equipo de validación y la consistencia dimensional del modelo.

4.2 Limitaciones

Los resultados obtenidos tienen algunas limitaciones:

En primer lugar, se basan en una revisión de la literatura, lo que significa que no proporcionan información sobre la aplicación práctica de las técnicas de V&V.

En segundo lugar, al ser una recopilación de las distintas técnicas de V&V presentadas por otros autores, el detalle de las mismas es reducido.

4.3 Recomendaciones futuras

Para superar las limitaciones mencionadas, se recomiendan las siguientes investigaciones futuras:

- Estudios empíricos que investiguen la aplicación práctica de las técnicas de V&V.
- Estudios comparativos que evalúen la eficacia de diferentes técnicas de V&V.
- Estudios que exploren nuevos enfoques para la V&V de modelos de simulación.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran que la V&V de modelos de simulación son procesos esenciales, complejos y multifacéticos que requiere la participación de expertos en el dominio del sistema real, analistas de simulación y otros especialistas.

Además de la V&V, es importante considerar otros aspectos relacionados con el desarrollo de modelos de simulación.

Se recomienda realizar más investigaciones sobre la V&V de modelos de simulación para desarrollar nuevas técnicas que sean más eficientes y eficaces, evaluar la eficacia de las técnicas existentes en diferentes tipos de simulaciones, y elaborar directrices para la V&V de modelos de simulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Akhavian, R., & Behzadan, A. H. (2013, December). Automated knowledge discovery and data-driven simulation model generation of construction operations. In 2013 Winter Simulations Conference (WSC) (pp. 3030-3041). IEEE.
- [2] Alvarado, L. W. R., & Ontiveros, M. Á. L. (2016). Aplicación de Técnicas de Validación de un Modelo de Simulación de Dinámica de Sistemas. Caso de Estudio. Archivo de la revista Latinoamericana de Ingeniería de Software, 4(4), 187-196.
- [3] Correa, A. P., Castro, J. A., Garcés, C., & Ceballos, Y. F. (2020). Simulación y evaluación de un proceso productivo de suelas termoplásticas en Colombia. Entre Ciencia E Ingeniería, 14(28), 10-15.
- [4] Faulín, J., & Juan, Á. A. (2005). Introducción a la investigación operativa.
- [5] Gulyás, L., & Kampis, G. (2015). Models, Representations and Comparisons in Computer Simulations. Procedia Computer Science, 66, 5-12.
- [6] Kleijnen, J. P. C. (1995). Verification and validation of simulation models. European Journal of Operational Research, 82(1), 145-162. doi:10.1016/0377-2217(94)00016-6
- [7] Kleijnen, J. P., & Van Beers, W. C. (2022). Statistical tests for cross-validation of kriging models. INFORMS Journal on Computing, 34(1), 607-621.
- [8] Kumar, S., Nottestad, D. A., & Murphy, E. E. (2009). Effects of product postponement on the distribution network: a case study. Journal of the Operational Research Society, 60(4), 471-480.
- [9] Liu, F., & Yang, M. (2004, August). Verification and validation of ai simulation systems. In Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04EX826) (Vol. 5, pp. 3100-3105). IEEE.

- [10] Monleón Getino, T. (2005). Optimización de los ensayos clínicos de fármacos mediante simulación de eventos discretos, su modelización, validación, verificación y la mejora de la calidad de sus datos. Universitat de Barcelona.
- [11] Ñavincopa Muñoz, V. M. (2018). Validación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) al simular temperaturas en zonas altoandinas de Puno y Arequipa.
- [12] Ribas-García, M., Hurtado-Vargas, R., Domenech-López, F., & Garrido-Carralero, N. (2014). Verificación y validación del software Fermenta 5.0 para la simulación de la fermentación alcohólica. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 48(1), 21-29.
- [13] Ruvinsky, A., Walker, L., Abdullah, W., Seale, M., Bond, W. G., Leonard, L., ... & Siedlecki, T. (2019). An epistemological model for a data analysis process in support of verification and validation. *Information Quality in Information Fusion and Decision Making*, 359-399.
- [14] Sargent, R. G. (2009). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, Austin, TX, USA, pp. 162-176. doi:10.1109/WSC.2009.5429327
- [15] Serrano Rugel, B. H., & Garzón Montealegre, V. J. (2019). Estudio de la caída de las ventas de la farmacia Farmicentro MM a través de la simulación de eventos discretos. *Conrado*, 15(67), 38-44.
- [16] Stevens, G., & Atamturktur, S. (2017). Mitigating error and uncertainty in partitioned analysis: a review of verification, calibration and validation methods for coupled simulations. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 24, 557-571.
- [17] Tang, B., Kong, Y., & Li, Q. (2021, September). Recent Progresses in Verification, Validation and Uncertainty Analysis in Computational Fluid Dynamic. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2026, No. 1, p. 012043). IOP Publishing.
- [18] Tarifa, E. E. (2001). Teoría de modelos y simulación. Facultad de Ingeniería, Universidad de Jujuy.
- [19] Trigeorgis, L., & Tsekrekos, A. E. (2018). Real options in operations research: A review. *European Journal of Operational Research*, 270(1), 1-24.
- [20] Xiang, Xiaorong, Kennedy, Ryan, Madey, Gregory, & Cabaniss, Steve. (2005). Verification and Validation of Agent-based Scientific Simulation Models. *Agent-Directed Simulation Conference*.

Financiamiento: Propio

Conflictos de interés:

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribuciones de autoría

Los dos autores participaron en la elaboración del artículo.