

MODELO DE INCERTIDUMBRE ESTRUCTURADA PARA VALIDACIÓN OBJETIVA DE PAQUETES TECNOLÓGICOS BASADOS EN NIVELES DE MADUREZ TECNOLÓGICA

Structured uncertainty model for the objective validation of technological packages based on technology readiness levels

Modelo de incerteza estruturada para a validação objetiva de pacotes tecnológicos baseados em níveis de maturidade tecnológica

Dr. C. George Argota Pérez *, <https://orcid.org/0000-0003-2560-6749>

Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y Medio Ambiente "AMTAWI", Perú

*Autor para correspondencia. email george.argota@gmail.com

Para citar este artículo: Argota Pérez, G. (2026). Modelo de incertidumbre estructurada para validación objetiva de paquetes tecnológicos basados en niveles de madurez tecnológica. *Maestro y Sociedad*, 23(3), 2656-2664. <https://maestroysociedad.uo.edu.cu>

RESUMEN

Introducción: La validación de paquetes tecnológicos constituye un proceso fundamental para demostrar la madurez, funcionalidad y capacidad de transferencia de tecnologías basadas en niveles de madurez tecnológica (TRL). Sin embargo, los procesos convencionales de evaluación presentan altos niveles de subjetividad debido a diferencias de criterio entre evaluadores, ausencia de métricas cuantitativas y debilidad en los mecanismos de trazabilidad documental. El objetivo fue proponer un modelo matemático de incertidumbre estructurada que permita validar objetivamente paquetes tecnológicos mediante criterios cuantificables de evidencia e incertidumbre. **Materiales y métodos:** El estudio correspondió a una investigación con enfoque cuantitativo y de nivel aplicado. La propuesta metodológica se estructuró mediante cinco dimensiones: evidencia verificable, trazabilidad documental, reproducibilidad, integridad documental y coherencia técnica. Cada dimensión fue evaluada utilizando escalas de ponderación para el peso de importancia (W_i) y nivel de cumplimiento (C_i), incorporándose posteriormente un factor de incertidumbre ($1 - u$) dentro de la ecuación matemática del índice de validación tecnológica con incertidumbre (IVTITRLn). **Resultados:** Se estableció rangos cuantitativos de interpretación técnica para clasificar objetivamente estados de cumplimiento tecnológico. El caso aplicado demostró que, el modelo fue sensible a inconsistencias metodológicas y vacíos documentales, reduciendo proporcionalmente el valor final del IVTITRLn. **Discusión:** Se evidenció que la incorporación formal de incertidumbre fortalece la trazabilidad y reproducibilidad del proceso de evaluación tecnológica frente a esquemas tradicionales basados únicamente en juicio experto. **Conclusiones:** El modelo constituye una herramienta metodológica objetiva, cuantificable y reproducible con potencial aplicación en procesos institucionales de validación tecnológica y certificación de madurez tecnológica.

Palabras clave: evaluación multicriterio, evidencia verificable, madurez tecnológica, validación tecnológica.

ABSTRACT

Introduction: The validation of technological packages constitutes a fundamental process for demonstrating the maturity, functionality, and transferability of technologies based on Technology Readiness Levels (TRLs). However, conventional evaluation processes present high levels of subjectivity due to differences in evaluators' criteria, the absence of quantitative metrics, and weaknesses in documentary traceability mechanisms. The objective of this study was to propose a mathematical model of structured uncertainty that enables the objective validation of technological packages through quantifiable criteria of evidence and uncertainty. **Materials and Methods:** The study corresponded to applied research with a quantitative approach. The methodological proposal was structured around five dimensions: verifiable evidence, documentary traceability, reproducibility, documentary integrity, and technical coherence. Each dimension was evaluated using weighting scales for the importance weight (W_i) and the compliance level (C_i), subsequently incorporating an uncertainty factor ($1 - u$) into the mathematical equation of the Technological Validation Index with Uncertainty (IVTITRLn). **Results:** Quantitative interpretation

ranges were established to objectively classify technological compliance states. The applied case demonstrated that the model was sensitive to methodological inconsistencies and documentary gaps, proportionally reducing the final value of the IVTITRLn. Discussion: The findings showed that the formal incorporation of uncertainty strengthens the traceability and reproducibility of the technological evaluation process compared with traditional schemes based solely on expert judgment. Conclusions: The model constitutes an objective, quantifiable, and reproducible methodological tool with potential application in institutional processes for technology validation and technology readiness certification.

Keywords: multicriteria evaluation, technological maturity, technological validation, verifiable evidence.

RESUMO

Introdução: A validação de pacotes tecnológicos constitui um processo fundamental para demonstrar a maturidade, a funcionalidade e a capacidade de transferência de tecnologias baseadas nos Níveis de Maturidade Tecnológica (Technology Readiness Levels – TRLs). No entanto, os processos convencionais de avaliação apresentam elevados níveis de subjetividade devido às diferenças de critérios entre os avaliadores, à ausência de métricas quantitativas e às fragilidades dos mecanismos de rastreabilidade documental. O objetivo deste estudo foi propor um modelo matemático de incerteza estruturada que permita validar objetivamente pacotes tecnológicos por meio de critérios quantificáveis de evidência e incerteza. **Materiais e Métodos:** O estudo correspondeu a uma pesquisa aplicada, com abordagem quantitativa. A proposta metodológica foi estruturada em cinco dimensões: evidência verificável, rastreabilidade documental, reprodutibilidade, integridade documental e coerência técnica. Cada dimensão foi avaliada utilizando escalas de ponderação para o peso de importância (W_i) e o nível de conformidade (C_i), incorporando-se posteriormente um fator de incerteza ($1 - u$) à equação matemática do Índice de Validação Tecnológica com Incerteza (IVTITRLn). **Resultados:** Foram estabelecidas faixas quantitativas de interpretação técnica para classificar objetivamente os estados de conformidade tecnológica. O caso aplicado demonstrou que o modelo foi sensível às inconsistências metodológicas e às lacunas documentais, reduzindo proporcionalmente o valor final do IVTITRLn. **Discussão:** Evidenciou-se que a incorporação formal da incerteza fortalece a rastreabilidade e a reprodutibilidade do processo de avaliação tecnológica em comparação com os modelos tradicionais baseados exclusivamente no julgamento de especialistas. **Conclusões:** O modelo constitui uma ferramenta metodológica objetiva, quantificável e reprodutível, com potencial de aplicação em processos institucionais de validação tecnológica e certificação da maturidade tecnológica.

Palavras-chave: avaliação multicritério, evidência verificável, maturidade tecnológica, validação tecnológica.

Recibido: 5/4/2026 Aprobado: 16/6/2026

INTRODUCCIÓN

La validación de paquetes tecnológicos constituye un mecanismo fundamental para demostrar objetivamente la madurez tecnológica, funcionalidad operativa y potencial de transferencia del conocimiento. Este proceso permite verificar la consistencia técnica, la evidencia disponible y el cumplimiento de requisitos asociados a los niveles de madurez tecnológica, fortaleciendo su adopción y aplicación (Bhattacharya et al., 2021; Townes, 2026). Sin embargo, numerosos procesos de evaluación tecnológica presentan elevados niveles de subjetividad debido a la variabilidad de criterios entre evaluadores, la ausencia de indicadores cuantificables y la limitada trazabilidad de la evidencia. Estas condiciones dificultan la consistencia, reproducibilidad y objetividad de los resultados obtenidos durante la validación tecnológica (Faidi, 2020; Neves et al., 2024).

Los sistemas basados en Niveles de Madurez Tecnológica (por su denominación y siglas en inglés: Technology Readiness Levels = TRL), constituyen un marco de referencia ampliamente utilizado para clasificar el grado de madurez de tecnologías emergentes. Su aplicación permite evaluar el avance tecnológico de manera sistemática en contextos científicos, industriales y gubernamentales, facilitando procesos de desarrollo, validación, transferencia y toma de decisiones (Balmuş, 2024; Nilchiani et al., 2025). No obstante, la mayoría de los esquemas TRL continúan dependiendo de juicios expertos cualitativos para determinar la madurez tecnológica, lo que introduce variabilidad interpretativa y limita la objetividad, reproducibilidad y consistencia de los procesos de evaluación (Chen et al., 2013; Anokhov, 2022; Austin et al., 2024). Esta dependencia de valoraciones cualitativas genera variabilidad en los resultados de evaluación, debido a diferencias interpretativas entre evaluadores, afectando la consistencia, comparabilidad y confiabilidad de las decisiones tecnológicas adoptadas (Salazar & Russi, 2021).

El problema se agrava por diversos factores entre los que se encuentran: 1) no existen criterios cuantificados de evidencia mínima, 2) la documentación es interpretada de manera distinta y, 3) no se incorpora formalmente la incertidumbre de evaluación. Ante esta problemática, se plantea como hipótesis que la subjetividad inherente a los procesos de evaluación tecnológica puede reducirse significativamente mediante la implementación de

una función cuantitativa sustentada en evidencia verificable, criterios normalizados y mecanismos explícitos de ponderación, permitiendo una valoración más objetiva, consistente y reproducible de la madurez tecnológica.

El objetivo fue proponer un modelo matemático de incertidumbre estructurada que permite de manera objetiva determinar, si un paquete tecnológico puede considerarse validado independientemente del evaluador.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio correspondió a una investigación metodológica y aplicada, orientada al desarrollo de un modelo matemático para la validación objetiva de paquetes tecnológicos mediante indicadores cuantificables de evidencia e incertidumbre. El nivel de investigación fue descriptivo, debido a que se describieron los componentes fundamentales que intervienen en la validación tecnológica, además, se describe la evidencia, trazabilidad, reproducibilidad e incertidumbre, y se propuso una función matemática orientada a reducir la subjetividad en la evaluación de tecnologías basadas en niveles de madurez tecnológica. El enfoque de investigación fue cuantitativo, ya que se emplearon variables normalizadas, ponderaciones numéricas, escalas de cumplimiento y ecuaciones matemáticas para construir un índice objetivo de validación tecnológica.

Se consideró como variable principal, la validación objetiva del paquete tecnológico, entendida como el grado en que una tecnología demuestra cumplimiento verificable de los requisitos mínimos de evidencia asociados a un nivel de madurez tecnológica (TRL). Esta variable se operacionaliza mediante cinco dimensiones fundamentales: evidencia verificable, trazabilidad documental, reproducibilidad, integridad documental y coherencia técnica.

La dimensión evidencia verificable evalúa la existencia de pruebas experimentales, datos medibles y resultados documentados que sustenten las afirmaciones técnicas del paquete tecnológico. La trazabilidad documental analiza la correspondencia entre declaraciones técnicas, evidencia presentada y resultados obtenidos, garantizando que cada afirmación pueda ser rastreada y comprobada. La reproducibilidad determina la capacidad de repetir procedimientos y obtener resultados consistentes bajo condiciones similares. La integridad documental examina la presencia completa de los componentes obligatorios del paquete tecnológico, incluyendo caracterización técnica, manuales, reportes experimentales y matrices de evidencia. Finalmente, la coherencia técnica verifica la relación lógica y consistente entre la descripción tecnológica, los métodos aplicados y los resultados obtenidos.

Cada dimensión se mide mediante un criterio, sustento y sus indicadores lo cual, otorgan un peso de importancia (W_i) y nivel de cumplimiento (C_i). El Peso de importancia, es el valor que representa la relevancia relativa de un criterio dentro del proceso de evaluación del nivel de madurez tecnológica (TRL), indicando su contribución en la validación global del paquete tecnológico mientras que, el nivel de cumplimiento, es el valor que expresa el grado en que un criterio ha sido satisfecho, según la evidencia técnica disponible, reflejando el nivel real de cumplimiento observado en el paquete tecnológico. Con todas las conceptualizaciones se obtiene la matriz de operacionalización ponderada de la validación objetiva del paquete tecnológico (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de operacionalización ponderada de la validación objetiva del paquete tecnológico.

Variable	Dimensión	Criterio	Sustento	Indicadores	W_i	C_i
----------	-----------	----------	----------	-------------	-------	-------

Validación objetiva del paquete tecnológico	Evidencia verificable	Evalúa	Afirmaciones técnicas del paquete tecnológico	Pruebas verificables		
				Datos medibles		
				Resultados documentados		
	Trazabilidad documental	Analiza	Cada afirmación se garantiza mediante su rastreo y comprobación	Declaraciones técnicas		
				Demostración presentada		
				Correspondencia entre lo declarado y lo demostrado		
	Reproducibilidad	Determina	Consistencia bajo condiciones similares	Capacidad de repetir procedimientos		
				Obtención de resultados		
	Integridad documental	Examina	Presencia completa	Caracterización técnica		
				Manuales		
				Reportes experimentales		
				Matrices de evidencia		
	Coherencia técnica	Verifica	Relación lógica y consistente	Descripción tecnológica		
				Métodos aplicados		
				Consistencia en métodos y resultados		

El peso de importancia (W_i), es una escala de ponderación, la cual permite asignar un valor relativo a cada criterio según su relevancia dentro del proceso de validación del nivel de madurez tecnológica (TRL). Esta escala establece una jerarquización de los criterios en función de su contribución a la validación del paquete tecnológico, diferenciando aquellos de influencia parcial, sustento intermedio o alta relevancia en la evaluación global. La Tabla 2 presenta la escala utilizada para la asignación del peso de importancia.

Tabla 2. Escala de ponderación del peso de importancia.

Nivel de importancia	Interpretación técnica	Valor (W_i)
Bajo	El indicador influye parcialmente en la validación del TRL	1
Medio	El indicador sustenta el TRL, pero no lo suficiente	2
Alto	El indicador es relevante para la validación del TRL	3

El nivel de cumplimiento de los indicadores (C_i), permite cuantificar el grado en que el sustento respalda el criterio de cada dimensión para la validación del paquete tecnológico. Esta escala traduce la calidad y suficiencia de la evidencia en valores numéricos, diferenciando entre cumplimiento total, cumplimiento parcial con observaciones y ausencia de evidencia verificable. La Tabla 3 presenta la escala utilizada para la asignación del nivel de cumplimiento.

Tabla 3. Escala de ponderación del nivel de cumplimiento.

Nivel de cumplimiento	Interpretación técnica	Valor (C_i)
Cumple	Existe evidencia completa, verificable y consistente	3,0
Medianamente cumple	Existe evidencia parcial o con observaciones menores	1,5
No cumple	No existe evidencia suficiente verificable	0,0

Para establecer un valor normalizado entre el peso de importancia y el nivel de cumplimiento, se calcula un valor ponderado global mediante la sumatoria del producto de ambos componentes para todos los indicadores evaluados, dividido entre el número total de indicadores considerados en el modelo. Esta normalización permite estandarizar el resultado y evitar distorsiones derivadas de la cantidad de indicadores evaluados. La expresión utilizada es la siguiente:

$$VPG = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot C_i)}{n}$$

Donde:

VPG = Valor ponderado

W_i = Peso de importancia

C_i = Nivel de cumplimiento

i = indicadores

n = número de indicadores = 15

La variable incertidumbre (u), definida como el nivel de inconsistencia, debilidad metodológica o insuficiencia documental presente en la función matemática para la evaluación tecnológica, se expresa en un rango entre 0 y 1, donde valores cercanos a 0 representan baja incertidumbre y valores cercanos a 1 representan alta incertidumbre. Para su operacionalización, se establecen tres niveles: baja incertidumbre ($u = 0,10$), incertidumbre media ($u = 0,30$) y alta incertidumbre ($u = 0,60$). Para la reducción proporcional de la incertidumbre ante vacíos, inconsistencias o limitaciones en la evidencia presentada, se introduce un factor correctivo: $(1 - u)$. Con todas las mediciones declaradas, se obtiene el índice de validación tecnológica con incertidumbre para el TRL:

$$IVTI_{TRL_n} = VPG \cdot (1 - u)$$

Donde:

$IVTI_{(TRL_n)}$ = Índice de validación tecnológica con incertidumbre para el TRL declarado

VPG = Valor ponderado global

u = Incertidumbre

Factor de corrección = $(1 - u)$

TRL_n = Nivel de madurez tecnológica para los indicadores

El modelo de validación objetiva del paquete tecnológico con incertidumbre, se aplica mediante la evaluación estructurada de evidencia documental asociada a cada indicador definido. La aplicación del índice de validación tecnológica con incertidumbre para el TRL declarado, requiere la asignación previa de valores a las variables W_i , C_i y u , a partir de escalas establecidas. El cálculo del índice se realiza únicamente cuando todos los criterios han sido evaluados individualmente según la matriz de operacionalización.

El procedimiento se desarrolla en cuatro etapas. En la primera etapa se identifican las dimensiones, criterios, sustento e indicadores para la evaluación del paquete tecnológico. En la segunda etapa se asignan los valores de peso de importancia (W_i) y nivel de cumplimiento (C_i), según las escalas definidas. En la tercera etapa se calcula el valor ponderado para cada indicador mediante la expresión: $VP_i = \frac{W_i \cdot C_i}{15}$

Así como la sumatoria global del conjunto de indicadores. En la cuarta etapa se aplica el factor de incertidumbre $(1 - u)$ para obtener el índice de validación tecnológica con incertidumbre para el TRL declarado.

El modelo se aplica a partir de información documental estructurada correspondiente a cada paquete tecnológico evaluado. Cada indicador, se analiza de forma independiente mediante su correspondencia con evidencia técnica disponible, la cual es clasificada según niveles de cumplimiento previamente definidos. El valor de incertidumbre (u) se asigna en función de la consistencia, completitud y calidad de la evidencia disponible.

El modelo se utiliza exclusivamente como herramienta de cálculo para la evaluación de paquetes tecnológicos en función de su nivel de madurez tecnológica (TRL). Su aplicación requiere la existencia de información documental mínima que permita la asignación de valores a todas las variables del sistema.

El modelo se aplica bajo indicadores de objetividad, consistencia y trazabilidad de la información. La evaluación se basa exclusivamente en evidencia documental verificable, y no en interpretaciones subjetivas no sustentadas. En casos donde la información esté sujeta a confidencialidad, se permite el uso de mecanismos de acceso controlado que no afecten la verificabilidad del proceso.

RESULTADOS

La Tabla 4, muestra la ponderación que establece rangos de interpretación técnica del valor ponderado global (VPG) para la validación objetiva del paquete tecnológico. Los resultados obtenidos permiten diferenciar tres niveles de cumplimiento asociados a la suficiencia y consistencia de la evidencia técnica presentada.

Tabla 4. Rangos de interpretación del valor ponderado global (VPG), según el estado de cumplimiento.

Rango del VPG	Interpretación técnica	Estado de cumplimiento
0,0 – 1,5	Evidencia insuficiente o débil para sustentar el indicador	No cumple

3,0 – 4,5	Evidencia parcialmente consistente; requiere subsanación o fortalecimiento	Medianamente cumple
6,0 – 9,0	Evidencia sólida, verificable y consistente para validar el indicador	Cumple

Los valores entre 0,0 y 1,5 correspondieron a evidencia insuficiente o débil para sustentar el indicador evaluado, clasificándose como “No cumple”. Los valores entre 3,0 y 4,5 representaron evidencia parcialmente consistente, susceptible de subsanación o fortalecimiento documental, clasificándose como “Medianamente cumple”. Finalmente, los valores entre 6,0 y 9,0 representaron evidencia sólida, verificable y consistente, correspondiente al estado “Cumple”.

Con la finalidad de evaluar el comportamiento operativo del modelo propuesto, se desarrolló un caso aplicado utilizando un paquete tecnológico hipotético asociado a un nivel de madurez tecnológica TRL 6. El análisis consideró los 15 indicadores establecidos en la matriz de operacionalización, distribuidos en las dimensiones de evidencia verificable, trazabilidad documental, reproducibilidad, integridad documental y coherencia técnica.

Durante la evaluación, los indicadores relacionados con evidencia experimental, resultados documentados y coherencia técnica recibieron un peso de importancia alto ($W_i = 3$), mientras que indicadores asociados a trazabilidad documental y componentes complementarios fueron clasificados con importancia media ($W_i = 2$). Asimismo, la mayoría de indicadores presentaron evidencia parcialmente consistente, asignándose un nivel de cumplimiento medio ($C_i = 1,5$), mientras que algunos criterios críticos alcanzaron cumplimiento total ($C_i = 3,0$).

La sumatoria total de los productos ($W_i \cdot C_i$) obtenidos para los 15 indicadores evaluados fue igual a 54. En consecuencia, el valor ponderado global (VPG), se calculó mediante la siguiente expresión:

$$VPG = 54/15 = 3,6$$

Considerando la Tabla 5, el resultado obtenido ($VPG = 3,6$) ubicó al paquete tecnológico dentro del rango de “Medianamente cumple”, indicando evidencia parcialmente consistente y necesidad de fortalecimiento documental. Posteriormente, debido a la existencia de observaciones menores relacionadas con trazabilidad y reproducibilidad experimental, el nivel de incertidumbre fue clasificado como medio ($u = 0,30$). Por tanto, el índice de validación tecnológica con incertidumbre para el TRL declarado se calculó mediante:

$$IVTI_{TRLn} = 3,6 \cdot (1 - 0,30)$$

$$IVTI_{TRLn} = 3,6 \cdot 0,70 = 2,52$$

El valor final obtenido ($IVTI_{TRLn} = 2,52$) se ubicó dentro del rango correspondiente al estado “Medianamente cumple”, evidenciando que, aunque el paquete tecnológico presenta soporte técnico relevante, todavía requiere mejoras metodológicas y documentales para validar objetivamente el TRL declarado.

Tabla 5. Rangos del índice de validación tecnológica con incertidumbre, según el estado de cumplimiento.

Estado de cumplimiento	Rango del valor ponderado global (VPG)	Nivel de incertidumbre	Valor de (u)	Factor (1-u)	Rango del $IVTI_{TRLn}$	Interpretación técnica
No cumple	0,0 – 1,5	Alta	0,60	0,40	0,0 – 0,6	La evidencia es insuficiente o inconsistente para validar el TRL
Medianamente cumple	3,0 – 4,5	Media	0,30	0,70	2,1 – 3,15	Existe evidencia parcialmente consistente; requiere subsanación
Cumple	6,0 – 9,0	Baja	0,10	0,90	5,4 – 8,1	La evidencia es sólida, verificable y consistente para validar el TRL

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demostraron que el modelo matemático propuesto, permitió transformar criterios tradicionalmente cualitativos de validación tecnológica en una estructura cuantificable basada en indicadores, su cumplimiento y el cálculo de la incertidumbre. Este hallazgo coincide con lo señalado por Townes (2026), quien sostiene que los sistemas convencionales de evaluación de madurez tecnológica presentan limitaciones relacionadas con la variabilidad interpretativa y la necesidad de instrumentos más estructurados para la medición objetiva de la madurez tecnológica. Asimismo, la incorporación del valor ponderado global (VPG) y del factor de incertidumbre representa un avance metodológico respecto a los esquemas tradicionales TRL, al introducir mecanismos explícitos para diferenciar niveles de cumplimiento y reducir posibles sobreestimaciones del nivel de madurez declarado, aspecto también destacado en estudios recientes sobre evaluación tecnológica basada

en evidencia y gestión del riesgo tecnológico (Rauch et al., 2020; Rodríguez et al., 2023).

Uno de los principales aportes del modelo fue la integración explícita de la incertidumbre dentro del proceso de validación tecnológica. En la mayoría de esquemas convencionales de evaluación TRL, la clasificación depende predominantemente del juicio experto y de interpretaciones cualitativas de la evidencia disponible. Este resultado coincide con lo señalado por Verma & Allen (2024), quienes indican que los marcos tradicionales de TRL presentan limitaciones para capturar factores adicionales que influyen en la madurez tecnológica, debido a su énfasis predominante en la evaluación tecnológica convencional. De igual manera, Voltan et al. (2024) señalan que los procedimientos de evaluación de los niveles de madurez medibles, continúan dependiendo en gran medida de criterios interpretativos y métodos heterogéneos de valoración. En contraste, el modelo propuesto incorporó un factor correctivo de incertidumbre ($1 - u$), que penalizó automáticamente inconsistencias metodológicas, vacíos documentales y limitaciones de reproducibilidad. Este comportamiento permitió diferenciar tecnologías con evidencia sólida de aquellas con soporte técnico parcial o insuficiente, fortaleciendo la objetividad y consistencia del proceso de validación tecnológica.

La estructura de ponderación utilizada mediante los valores W_i y C_i también permitió asignar distinta relevancia a los criterios de evaluación, según su contribución al sustento del TRL. Desde una perspectiva metodológica, este resultado coincide con investigaciones recientes que señalan que la evaluación de la madurez tecnológica requiere considerar múltiples dimensiones con diferentes niveles de influencia, debido a que los modelos lineales tienden a simplificar excesivamente la complejidad inherente de los sistemas tecnológicos (Lowe et al., 2024). Asimismo, Voltan et al. (2024) destacan que los procedimientos de TRL incorporan diversos criterios de análisis cuya importancia relativa puede variar según el contexto tecnológico evaluado, lo que justifica el empleo de esquemas jerárquicos de valoración. De igual manera, Khanal et al. (2024) demostraron que los enfoques multicriterio basados en ponderaciones diferenciales permiten mejorar la consistencia de los procesos de evaluación al reconocer que no todos los criterios contribuyen de manera equivalente a la toma de decisiones. En este contexto, la diferenciación jerárquica entre criterios críticos y complementarios favoreció una evaluación más coherente con la complejidad real de los paquetes tecnológicos.

Asimismo, la normalización matemática del valor ponderado global evitó distorsiones derivadas del número total de indicadores evaluados. Este aspecto fue particularmente relevante debido a que diferentes tecnologías pueden presentar distinta cantidad de evidencia documental o experimental. La división entre el número total de indicadores permitió obtener resultados comparables entre distintos paquetes tecnológicos, favoreciendo la estandarización del proceso de evaluación. Este hallazgo coincide con lo señalado por Li et al. (2024), quienes destacan que los procedimientos de normalización constituyen un componente esencial para garantizar la comparabilidad de resultados dentro de modelos multicriterio, evitando sesgos derivados de diferencias de escala entre los indicadores. De manera similar, Ersoy & Keleş (2024), demostraron que la normalización influye directamente en la consistencia y comparabilidad de los resultados obtenidos mediante métodos de evaluación multicriterio. También, Zhang et al. (2024), sostienen que la estandarización de indicadores mejora la robustez de los sistemas de evaluación compuestos al reducir distorsiones producidas por la heterogeneidad de los datos evaluados. Por tanto, la normalización incorporada en el modelo propuesto favoreció la comparación objetiva entre paquetes tecnológicos con diferente volumen de evidencia disponible.

El caso aplicado evidenció además que pequeñas variaciones en el nivel de incertidumbre modificaron significativamente el valor final del índice de validación tecnológica. Este comportamiento confirmó la sensibilidad del modelo frente a debilidades metodológicas y documentales, aspecto que fortalece su capacidad para detectar sobrevaloraciones del TRL declarado. En consecuencia, el modelo no solo evaluó el cumplimiento técnico de los indicadores, sino también la robustez de la evidencia utilizada para sustentar la validación tecnológica.

Desde una perspectiva científica y regulatoria, el modelo propuesto podría contribuir al fortalecimiento de los procesos de evaluación tecnológica en sistemas institucionales basados en TRL, debido a que proporciona un mecanismo cuantitativo reproducible y trazable para la toma de decisiones. Este planteamiento coincide con Townes (2026), quien señala la necesidad de contar con marcos de evaluación más estandarizados y consistentes para mejorar la interpretación de la madurez tecnológica entre diferentes contextos de aplicación. Asimismo, Voltan et al. (2024), destacan que la heterogeneidad metodológica existente en los procedimientos de TRL puede afectar la reproducibilidad y comparabilidad de las evaluaciones, por lo que recomiendan el uso de criterios estructurados y verificables. De manera complementaria, Verma & Allen (2024) sostienen que la incorporación explícita de variables asociadas a incertidumbre, riesgo y factores contextuales permite obtener evaluaciones

más robustas y representativas de la realidad tecnológica. En este sentido, la incorporación de la incertidumbre como variable formal dentro del cálculo matemático constituye un aporte metodológico relevante para reducir la subjetividad entre evaluadores y mejorar la consistencia de los procesos de validación tecnológica.

No obstante, el modelo requiere futuras aplicaciones empíricas utilizando paquetes tecnológicos reales pertenecientes a distintos sectores productivos y niveles TRL, con la finalidad de evaluar su sensibilidad, estabilidad y capacidad de generalización. Asimismo, futuras investigaciones podrían incorporar métodos estadísticos multicriterio y análisis de confiabilidad para fortalecer la robustez matemática del índice propuesto.

CONCLUSIONES

El modelo matemático propuesto permitió desarrollar un índice cuantitativo de validación tecnológica con incertidumbre para la evaluación objetiva de paquetes tecnológicos basados en niveles de madurez tecnológica. La integración entre el valor ponderado global y el factor correctivo de incertidumbre permitió transformar criterios tradicionalmente cualitativos en un sistema estructurado, reproducible y verificable de evaluación tecnológica.

La incorporación de las dimensiones de evidencia verificable, trazabilidad documental, reproducibilidad, integridad documental y coherencia técnica permitió establecer una estructura metodológica integral para la evaluación objetiva del cumplimiento tecnológico. Asimismo, la asignación de pesos de importancia y niveles de cumplimiento facilitó la jerarquización técnica de los indicadores evaluados, según su contribución relativa al sustento del TRL declarado.

Los resultados evidenciaron que el factor de incertidumbre (u) modificó proporcionalmente el valor final del índice de validación tecnológica, penalizando escenarios con inconsistencias metodológicas, debilidad documental o insuficiencia de evidencia verificable. Este comportamiento permitió reducir la subjetividad inherente a los procesos tradicionales de evaluación tecnológica basados exclusivamente en juicio experto.

El caso aplicado demostró la operatividad del modelo y su capacidad para clasificar objetivamente distintos estados de cumplimiento tecnológico mediante rangos cuantitativos definidos. La normalización matemática implementada favoreció además la comparabilidad entre paquetes tecnológicos con diferente cantidad de indicadores evaluados.

Finalmente, el modelo constituye una propuesta metodológica con potencial aplicación en procesos institucionales de validación tecnológica, evaluación de innovación y certificación de madurez tecnológica, debido a que proporciona un mecanismo transparente, trazable y cuantificable para la toma de decisiones técnicas basadas en evidencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anokhov, I. V. (2022). Trl technological readiness level scale and its modification perspectives. *Стратегии Бизнеса*, 10(11), 289-294. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2022-11-289-294>
- Austin, M. F., Ahalt, V., Doolittle, E., Homberger, C., Polacek, G. A., & York, D. G. (2024). Applying bayesian networks to TRL assessments – innovation in systems engineering. *Insight*, 27(6), 47-54. <https://doi.org/10.1002/inst.12516>
- Balmuş, C. (2024). Using technology readiness levels (TRLs) in UAS development. *Bulletin of "Carol I" National Defense University*, 13(3), 65-73. <https://doi.org/10.53477/2284-9378-24-30>
- Bhattacharya, S., Kumar, V., & Nishad, S. N. (2021). Technology Readiness Level: An assessment of the usefulness of this scale for translational research. *Productivity*, 62(2), 112-124. <https://doi.org/10.32381/PROD.2021.62.02.2>
- Chen, W., Liu, W., Gao, Y., & Han, F. (2013). Approach and application of technology readiness assessment based-on multilevel reference condition. *International Conference on Management Science and Engineering*, 1993-1998. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2013.6586538>
- Ersoy, N., & Keleş, N. (2024). Comparison of multi-criteria decision-making methods with the same normalization procedure based on real-life applications. *Operations Research and Decisions*, 34(3), 87-100. <https://doi.org/10.37190/ord240305>
- Faidi, S. (2020). Identifying gaps in automating the assessment of technology readiness levels. *Proceedings of the design society: DESIGN Conference*, 1, 551-558. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.160>
- Khanal, S., Nghiem, S., Miller, M., Scuffham, P., & Byrnes, J. (2024). Development of a prioritization framework to aid healthcare funding decision making in health technology assessment: Application of multicriteria decision analysis.

Li, Y., He, X., Martínez, L., Zhang, J., Wang, D., & Liu, X. A. (2024). Comparative analysis of three categories of multi-criteria decision-making methods. *Expert Systems with Applications*, 238(Part B), 121824. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121824>

Lowe, D. C., Justham, L., & Everitt, M. J. (2024). Multi-index analysis with readiness levels for decision support in product design. *Technological Forecasting and Social Change*, 206, 123559. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123559>

Neves, V. J. L., Girardi, R., Galdino, J., & Ribeiro, G. R. (2024). A review and classification of technology readiness assessment techniques based on TRL scale. *Coleção Meira Mattos*, 18(61), 1-28.

Nilchiani, R., Caddell, J., & Taramsari, H. B. (2025). The extended technology readiness level (eTRL): From deployment to obsolescence. *IEEE Open Journal of Systems Engineering*, 3, 1-9. <https://doi.org/10.1109/ojse.2025.3527288>

Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R. A., Gualtieri, L., Woschank, M., & Matt, D. T. (2020). A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. *Sustainability*, 12(9), 3559. <https://doi.org/10.3390/su12093559>

Rodríguez, L. N., Alvarez, C. J. V., Cuiñas, M. C., & Ortega, F. F. (2023). Applicability of technology maturity level evaluation methodologies within small- and medium-sized organizations: prospects and proposals. *Systems*, 11(8), 387. <https://doi.org/10.3390/systems11080387>

Salazar, G., & Russi, V. M. N. (2021). Technology readiness level as the foundation of human readiness level. *Ergonomics in design: The Quarterly of Human Factors Applications*, 29(4), 25-29. <https://doi.org/10.1177/10648046211020527>

Townes, M. S. (2026). A generalized technology readiness level scale for measuring technology maturity: Development and pilot validation study. *Journal of Research Management and Administration*, 5(1), 1-40. <https://doi.org/10.18552/jorma.v5i1.1285>

Verma, A., & Allen, T. (2024). A sociotechnical readiness level framework for the development of advanced nuclear technologies. *Nuclear Technology*, 210(9), 1722-1739. <https://doi.org/10.1080/00295450.2024.2336355>

Volcan, J. L., Girardi, R., Galdino, J., & Goldschmidt, R. R. (2024). A review and classification of technology readiness assessment techniques based on TRL scale. *Coleção Meira Mattos*, 18(61), 49-76. <https://doi.org/10.52781/cmm.a121>

Zhang, Y., Liang, T., Wei, X., & Wang, H. (2024). An improved indicator standardization method for multi-indicator composite evaluation: A case study in the evaluation of ecological civilization construction in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 108, 107600. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107600>

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Declaración de responsabilidad de autoría

El autor del manuscrito declara haber contribuido de manera directa y sustancial a su contenido intelectual, así como a la generación, análisis e interpretación de los datos presentados. En consecuencia, asume la responsabilidad pública sobre el contenido del trabajo y acepta que su nombre figure en la lista de autor. Asimismo, declara el cumplimiento de los requisitos éticos establecidos por la publicación, habiendo revisado y aceptado la Declaración de Ética y Buenas Prácticas en la Publicación.

George Argota Pérez: conceptualización, recolección de datos, curación de datos, análisis formal, adquisición de financiamiento, investigación, metodología, recursos, administración del proyecto, supervisión, validación, redacción: preparación del borrador original, redacción: revisión y edición