

Una revisión y clasificación de las técnicas de medición de la madurez tecnológica basadas en la escala TRL

A review and classification of technology readiness assesment techniques based on TRL scale

Resumen: La Escala de Madurez Tecnológica (TRL) fue propuesta por la Agencia Espacial Estadounidense (NASA) a fines de los años 1970. Se divide en nueve niveles que buscan medir la madurez de una tecnología o producto. El proceso que determina el nivel TRL de una tecnología o producto se denomina Evaluación de Madurez Tecnológica (EMT). A principios de los años 2000, la escala TRL comenzó a ser utilizada por la industria y los gobiernos de todo el mundo, lo que hizo que la EMT ha cobrado relevancia. En este contexto, este estudio tuvo como objetivo realizar una búsqueda en la literatura acerca de los enfoques existentes para la ejecución de la EMT basada en la escala TRL. Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura basada en artículos científicos y repositorios de tesis. Como resultado, se identificaron tres grupos de enfoques: el enfoque basado en expertos humanos, el que utiliza una calculadora para apoyo del experto y el enfoque que emplea herramientas semiautomáticas o automáticas, como indicadores bibliométricos y algoritmos de minería de texto. Este estudio permitió recopilar las ventajas y desventajas de cada uno de estos enfoques, además de conocer lagunas aún abiertas en la literatura.

Palabras clave: TRL; escala de madurez tecnológica; TRA; evaluación de madurez tecnológica.

Abstract: The Technology Readiness Levels (TRL) emerged in the late 1970s, proposed by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). There are nine levels that seek to measure the maturity of a technology or product. The process that aims to assess the TRL level of a technology or product is called Technology Readiness Assessment (TRA). In the early 2000s, the TRL scale began to be used by industry and governments around the world, leading to an increase in the importance of TRA. Given this scenario, this work aimed to investigate the existing approaches in the literature for the execution of TRA based on the TRL scale. For that, a systematic review of the literature was conducted on scientific article databases and thesis and dissertation repositories. As a result of the review, three groups of approaches were identified: one based on human experts, another that uses a calculator to support the expert, and, finally, a third that uses semi-automatic or automatic tools, such as bibliometric indicators and text mining algorithms. The study identified the advantages and disadvantages of each of these approaches, as well as gaps still open in the literature.

Keywords: TRL; Technology Readiness Levels; TRA; Technology Readiness Assessment.

José Luiz Neves Voltan 

Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
voltan.jose@ime.eb.br

Rômulo Girardi 

Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
romullogirardi@ime.eb.br

Juraci Ferreira Galdino 

Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
galdino.juraci@eb.mil.br

Ronaldo Ribeiro Goldschmidt 

Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
ronaldo.rgold@ime.eb.br

Recebido: 03 Abr. 2023

Aprobado: 10 Oct. 2023

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833

<http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/index>



1 INTRODUCCIÓN

En los años 1970, Stan Sadin, un trabajador de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), desarrolló una Escala de Madurez Tecnológica (del inglés *Technology Readiness Levels*, TRL). La escala que contenía seis o siete niveles medía la madurez de una tecnología y facilitaba la comunicación entre los involucrados en el proyecto aunque no definía cada nivel en detalle (Mankins, 2009).

Con el tiempo, se hizo necesario que la NASA utilizara y estandarizara la escala, especialmente después de la pérdida del transbordador espacial Challenger en 1986, lo que provocó un proceso de reestructuración de las bases tecnológicas de la agencia (Mankins, 2009).

En 1995, Mankins que también trabajaba en la NASA publicó el documento *White paper* (Mankins, 1995) en el que ampliaba la escala TRL a nueve niveles y mejoraba la definición de cada uno.

Desde los años 2000, la escala TRL es utilizada por numerosas instituciones, agencias y empresas, como el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (*United States Department of Defense*, USDOD) y la Agencia Espacial Europea (*European Space Agency*, ESA) (Mankins, 2009). Algunos utilizan la escala definida por la NASA con la inserción de pequeñas modificaciones que implican la sustitución de términos vinculados al entorno espacial. Este es el caso del Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos. Otros como la Agencia Espacial Europea (Straub, 2015) han creado variaciones de la TRL de la NASA al detallar cada nivel.

Brasil tuvo varias instituciones que adoptaron el uso de la escala TRL, por ejemplo, la Agencia Espacial Brasileña (Xavier *et al.*, 2020), el Departamento de Ciencia y Tecnología Aeroespacial (Rocha, 2016) y el Departamento de Ciencia y Tecnología del Ejército Brasileño (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

Recientemente, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Brasil publicó la Ordenanza MCTI N.º 6.449, de 17 de octubre de 2022, por la cual trata el uso del Sistema de Medición e Identificación del Nivel de Madurez Tecnológica en el ámbito de este Ministerio para contribuir a la selección de proyectos que serán financiados, así como para recaudar recursos no presupuestarios, ofreciendo criterios ágiles que permitan al sector privado reconocer oportunidades de inversión (Brasil, 2022).

La escala TRL permite determinar el nivel de fiabilidad de una tecnología, es decir, cuánto ya se ha probado y certificado, puesto que esta herramienta identifica las etapas ya cumplidas. Por ejemplo, la TRL 9 confirma una tecnología operativa en un sistema probado en un entorno real. Por otra parte, la TRL 4 asegura la validación de la tecnología en un entorno de laboratorio. Esta idea de confiabilidad es muy importante en el desarrollo de tecnologías críticas, como las utilizadas en el entorno espacial (Mankins, 2009).

A pesar de que la escala TRL es utilizada de manera amplia, su limitación consiste en determinar el nivel de madurez correspondiente a una determinada tecnología. A este proceso lo titulan Evaluación de Madurez Tecnológica¹ (EMT) (Girardi; França Junior; GALDINO, 2022).

1 Del inglés *Technology Readiness Assessment* (TRA).

Tradicionalmente, la EMT es utilizada para determinar el nivel de madurez de un producto o tecnología. No obstante, en la literatura también se reporta su uso en la evaluación del desarrollo de una tecnología en un sentido más amplio, más cercano a la prospección tecnológica². Esto indica que esta herramienta es un éxito a medida que surgen nuevas aplicaciones.

Dada la escasez de estudios que aborden el estado del arte sobre la forma de aplicación de la EMT, particularmente en el contexto de proyectos de investigación y desarrollo (I + D), este trabajo tiene como objetivo identificar y analizar diferentes aplicaciones de la EMT en función de la escala TRL. Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura, en la que se encontraron 180 artículos en cinco bases de datos. Una vez aplicados los criterios de inclusión y expansión de la búsqueda, se alcanzaron 18 artículos y una tesis en el contexto evaluado. Los datos se agruparon en tres grupos, mediante una taxonomía propuesta en este artículo.

Cabe señalar que existen enfoques de EMT que combinan la escala TRL con otras escalas, por ejemplo, la *Manufacturing Readiness Levels* (MRL) (Wu *et al.*, 2017) y el *Commercial Readiness Level* (CRL) (Gerd Sri; Manotungvorapun, 2021). Este trabajo no se centra en estos enfoques porque van más allá del objetivo propuesto, es decir, trascienden el contexto de I + D. La LMR se concentra en evaluar la madurez de la fabricación y es especialmente útil para identificar riesgos y lagunas en el proceso de transición entre tecnología y fabricación (Wu *et al.*, 2017). Por otra parte, el CRL analiza aspectos relacionados con la comercialización del producto y su mercado de consumo (Gerd Sri; Manotungvorapun, 2021).

Dado lo anterior, este artículo está estructurado de la siguiente manera: el apartado 2 presenta el marco teórico sobre la EMT basada en la escala TRL. El apartado 3 detalla los aspectos metodológicos de la revisión de la literatura realizada. El apartado 4 presenta los enfoques existentes, clasificados a través de una taxonomía propuesta en el trabajo. El apartado 5 aborda la EMT mostrando el contexto de cada uno de los enfoques identificados. Y el último apartado teje las conclusiones del trabajo, señalando las lagunas en la literatura.

2 MARCO TEÓRICO

La NASA actualmente adopta nueve niveles de madurez tecnológica. El nivel 1 representa el más básico, en que se observan los principios básicos, mientras que el nivel 9 se refiere a un sistema real que ha llevado a cabo en operaciones con éxito. La Figura 1 ilustra estos niveles.

El NPR 7123.1C (National Aeronautics and Space Administration, 2020), publicado en 2020, contiene una reciente definición de niveles de madurez al especificarlos para aplicaciones basadas en *software* o *hardware*. Este documento prevalece sobre otras directrices de la NASA con respecto a las definiciones de los niveles de TRL. Esto es esencial para promover un entendimiento común sobre el tema teniendo en cuenta diversas propuestas de modificaciones a la definición de los niveles, que se vienen realizando.

En Brasil, la norma ABNT NBR ISO 16290:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015) se ocupa de los sistemas espaciales, las definiciones y los criterios de evaluación

² Proceso mediante el cual se puede alcanzar una comprensión más completa de las fuerzas que configuran el futuro a largo plazo y que deben tenerse en cuenta en la formulación de políticas, la planificación y la toma de decisiones (Coates, 1985).

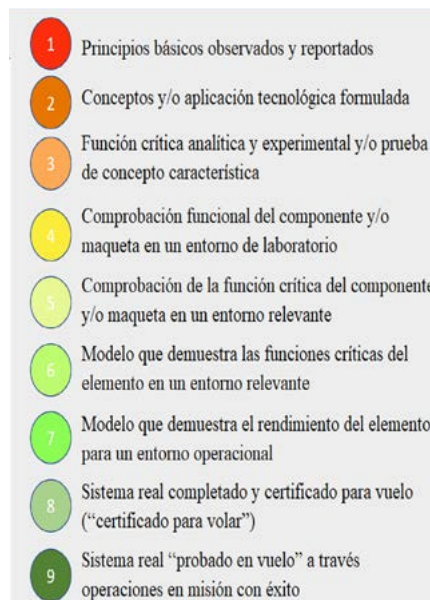
de los niveles de TRL. Basándose en la ISO 16290:2013, la norma ABNT NBR ISO 16290:2015 plantea estándares para la definición de términos relevantes, contribuyendo así a promover un acuerdo común. Además, explica cada nivel de la escala, incluso con ejemplos que los enmarcan en los niveles de la escala y afirma que, aunque estos niveles están determinados para sistemas espaciales, se puede aplicarlos en un contexto más amplio. La Figura 2 resume las definiciones de cada nivel de la escala TRL (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

Figura 1 – Escala de madurez tecnológica



Fuente: Adaptado de Hirshorn, Voss y Bromley (2017)

Figura 2 – Definiciones de los niveles de la escala TRL



Fuente: Adaptado de la Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015)

De hecho, la escala TRL comenzó a aplicarse en contextos distintos al espacial, a través de adaptaciones de la propuesta original realizada por la NASA, como la aviación, la defensa, el sector de la medicamentación, la energía de las olas y el reciclaje de compuestos (White *et al.*, 2022). Estas adaptaciones se producen en las definiciones, cantidades y terminologías utilizadas en la escala.

Merece la pena destacar que cuanto más bajo es el nivel de TRL, más amplio es el espectro de posibles aplicaciones de la tecnología. A medida que se desarrolla la investigación y se alcanzan nuevos niveles de madurez, las tecnologías se vuelven más específicas (White *et al.*, 2022).

Otro punto que señala la literatura es que al realizar una EMT conforme la concepción original para los niveles más altos de la escala se considera el elemento insertado en un producto objetivo. Por lo tanto, el mismo elemento puede tener un alto TRL en un producto y un bajo TRL cuando se emplea en otro producto.

En este contexto, el estudio de França Junior y Galdino (2022) discute esta característica de la clasificación de la madurez tecnológica mediante el ejemplo del programa de modernización de los medios blindados del Ejército, particularmente el vehículo Cascavel. Se evaluaron algunos subsistemas y tecnologías automotrices existentes en el mercado, los cuales podrían ser considerados en el proceso de modernización del mencionado vehículo debido a que ya se encuentran en operación en ciertas plataformas, por lo tanto, con TRL máximo. A pesar de la prueba y certificación considerando los requisitos específicos de estos productos o plataformas, cuando se evalúan para cumplir con los requisitos específicos del vehículo Cascavel, alcanzaron un TRL intermedio de, como máximo, nivel 6.

3 METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó una revisión en la literatura para buscar los enfoques existentes sobre la aplicación de EMT basados en la escala TRL. Para ello, se seleccionaron cinco bases de datos relevantes para el tema, se construyó una *string* de búsqueda y se aplicaron criterios de inclusión. La técnica de bola de nieve y la sugerencia de expertos se utilizaron para complementar la búsqueda.

Para la búsqueda de los artículos analizados se consultaron las siguientes bases de datos: ACM Digital Library, IEEE, ScienceDirect, Scopus y SpringerLink. Con el fin de delimitar el alcance de la investigación en los trabajos que utilizan el análisis textual de documentos en EMT basado en la escala TRL, la *string* de búsqueda consistió en la unión de los términos “*Technology Readiness Levels*” (TRL), “*text mining*” y términos sinónimos para esta última expresión. De este modo, la *string* de búsqueda consistió en: “*text mining*” OR “*text-mining*” OR “*data mining*” OR “*data-mining*” OR “*tech mining*” OR “*tech-mining*”) AND (“*technology readiness level*” OR “*trl*”). Se realizaron pequeñas adaptaciones para cada una de las bases.

Conviene destacar que se optó por utilizar el acrónimo TRL en la *string* de búsqueda en lugar de TRA, puesto que algunos autores, a pesar de realizar una evaluación de madurez tecnológica, no utilizaron el acrónimo TRA o la expresión *Technology Readiness Assessment* en el título, resumen y palabras clave. Incluso, se utilizó el acrónimo TRL por ser uso corriente de la escala.

Los criterios de inclusión adoptados fueron texto escrito en portugués o inglés y la completa disponibilidad del artículo. Además, la publicación debería tener como tema la EMT o TRL. Los resultados de esta última se utilizaron en el marco teórico de este trabajo. La Tabla 1 muestra el

número de publicaciones encontradas por cada base y el número final después de la aplicación de los criterios de inclusión mencionados. En la línea “Total” se considera la remoción de duplicados, de tal manera que artículos idénticos indexados simultáneamente por dos o más bases se cuentan una sola vez.

Después de esta búsqueda inicial, se utilizó la técnica de bola de nieve, con el fin de identificar artículos de interés que citan o son citados por los artículos seleccionados. También se buscó otros textos escritos por los autores de los artículos seleccionados. El uso de esta técnica permitió encontrar ocho artículos, que no están incluidos en la Tabla 1, además de manuales, ordenanzas y normas relevantes.

Tabla 1 – Resultado de las consultas por cada base

Base	Artículos encontrados	Artículos retenidos
ACM Digital Library	1	0
IEEE	5	1
ScienceDirect	2	0
Scopus	15	2
SpringerLink	150	3
Total (<i>sim duplicados</i>)	168	6

Fuente: elaborado por los autores (2023).

Específicamente la base de datos SpringerLink presentó muchos falsos positivos, puesto que el acrónimo TRL adopta diferentes significados en diferentes áreas. Por ejemplo, en medicina se puede usarlo para referirse al término *Triglyceride-Rich Lipoproteins*. En informática, corresponde a las expresiones *Traditional Reinforcement Learning* o incluso *Transfer Rule Learner*. A pesar de que se encontró una gran cantidad de artículos en esta base de datos, fueron pocos los que se mantuvieron después de la aplicación de los criterios de inclusión.

Además de la búsqueda en las bases de datos mencionadas, se realizaron entrevistas a expertos en la materia, buscando relevar artículos, tesis relevantes en el contexto nacional, a través de las cuales se identificaron los siguientes trabajos: Rocha (2016); França Junior y Galdino (2019, 2022); Xavier *et al.* (2020); y Girardi, França Junior y Galdino (2022).

En total, se seleccionaron 18 artículos y una tesis, algunos con consolidadas bases teóricas sobre TRL y otros relacionados con EMT. Durante la búsqueda, no se encontraron trabajos de tipo encuesta similares a este trabajo.

Entre los estudios relacionados con la EMT e/o identificación del nivel de TRL de una tecnología o producto, se encontraron tres conjuntos de enfoques: (1) uso de un equipo de expertos; (2) uso de herramientas de apoyo al experto, por ejemplo, calculadoras; y (3) uso de herramientas automatizadas.

La taxonomía que se propone en este texto permite agrupar las soluciones por el nivel de automatización de la EMT. La solución basada en expertos corresponde a una evaluación exclusivamente humana. El uso de herramientas de apoyo (calculadoras) fusiona las habilidades de los

expertos con las del *software*. Finalmente, las herramientas automatizadas son parte de un proceso parcialmente automatizado, es decir, el proceso incluye una etapa de identificación y recolección de documentos, generalmente manual, seguida de un análisis cuantitativo o cualitativo automatizado.

En cuanto a la EMT se pudo observar que algunos autores analizan el TRL de una tecnología o producto específico (sentido *stricto*), mientras otros lo hacen de manera más amplia, buscando identificar el escenario general de esta tecnología (sentido *lato*). Este tema será tratado en el apartado 5.

4 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se presentarán los resultados, que se discutirán desde la categorización de las soluciones presentadas en el apartado 3: equipo de expertos, herramientas de apoyo y automatización.

4.1 Equipo de expertos

Una de las formas más básicas de realizar una EMT es a través de un equipo de expertos, que está compuesto no solo por profesionales con un alto nivel técnico en el área de aplicación, sino también por personal cualificado en la metodología de evaluación de la escala TRL (Britt *et al.*, 2008).

El experto puede establecer, por ejemplo, las funciones críticas de rendimiento, los entornos de prueba de laboratorio relevantes, así como evaluar si las pruebas y los procedimientos adoptados para realizar el ajuste de la escala son exitosos. Hay varios puntos subjetivos en la evaluación que dependen de la interpretación del experto.

Este enfoque se remonta a los orígenes de TRL y varios estudios lo han utilizado para evaluar tecnologías. Hrica *et al.* (2022), por ejemplo, realizan una revisión de tecnologías orientadas a la predicción y alerta de colisiones de camiones de transporte minero a partir de una escala de madurez TRL adaptada al dominio minero por Carr (2019). La Figura 3 muestra la comparación entre las definiciones adoptadas por NASA, USDOD y Carr (2019).

En este análisis de madurez tecnológica, los autores señalaron que la escala TRL tiene un lenguaje claro sobre el estado de la tecnología, facilitando la comunicación. La escala también permite identificar los riesgos asociados a la transición tecnológica³.

En este estudio, los autores inicialmente seleccionaron los documentos⁴ que sirvieron de base para la clasificación de tecnologías a partir del uso de tres bases (Compendex, Scopus y OneMine). Con la eliminación de los duplicados, quedaron 432 artículos. Una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión, este número se redujo a 64 artículos. Algunos artículos abordaron más de una tecnología. En total, se analizaron 97 casos (Hrica *et al.*, 2022).

3 Se refiere al proceso en el que una tecnología más antigua y madura es reemplazada por una más nueva que ofrece una ventaja competitiva. Como ejemplo se menciona la transición del transistor al circuito integrado (Weck, 2022).

4 Publicaciones científicas disponibles abiertamente, como artículos de revistas revisados por pares, actas de conferencias e informes gubernamentales.

Para asignar el nivel de TRL de cada tecnología abordada en cada artículo, hubo una reunión del equipo por teleconferencia, en la cual se debatió la información importante sobre cada publicación y, mediante un consenso de al menos tres miembros del equipo, se alcanzó una clasificación final (Hrica *et al.*, 2022). Es importante tener en cuenta que los expertos que acceden a la misma información, en algunos casos, atribuyen diferentes niveles de madurez a la misma tecnología.

Figura 3 – Comparación entre las definiciones de TRL NASA, USDOD y minería

	NASA	USDOD	Mineração
1	Principios básicos observados y relatados	Principios básicos observados y relatados	Principios básicos observados y relatados
2	Concepto y/o aplicación tecnológica formulada	Concepto y/o aplicación tecnológica formulada	Concepto y/o aplicación tecnológica formulada
3	Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica	Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica	Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica
4	Validación de componente y/o breadboard en un entorno de laboratorio	Validación de componente y/o breadboard en un entorno de laboratorio	Validación de componente y/o breadboard en un entorno de laboratorio
5	Validación de componente y/o breadboard en un entorno relevante	Validación de componente y/o breadboard en un entorno relevante	Validación de componente y/o breadboard en un entorno relevante
6	Demonstración de modelo de sistema/ subsistema en un entorno relevante (tierra o espacio)	Demonstración de modelo de sistema/ subsistema en un entorno relevante	Demonstración de modelo de sistema/ subsistema en un entorno relevante
7	Demonstración de prototipo del sistema en un entorno espacial	Demonstración de prototipo del sistema en un entorno operacional	Demonstración de prototipo del sistema en un entorno operacional representativo de minería
8	Sistema real completado y certificado para vuelo ("certificado para volar") a través de pruebas y demostraciones (tierra o espacio)	Sistema real completado y certificado a través de pruebas y demostraciones	Sistema real concluido y probado a través de pruebas de campo
9	Sistema real "probado en vuelo" a través de operaciones en misión con éxito	Sistema real probado a través de misiones operacionales con éxito	Sistema real probado a través de uso con éxito en actividades de minería exitosas bajo una serie de condiciones previstas

Fuente: Adaptado de Carr (2019) *apud* Hrica *et al.* (2022).

Al final del estudio, los autores encontraron pocas publicaciones que presentaran tecnologías a niveles altos (TRL > 6). Esto se debió a que solo se consideraron publicaciones científicas revisadas por pares en el estudio, que generalmente se ocupan de resultados que se adhieren a niveles bajos e intermedios de TRL, y no se consideraron publicaciones comerciales y *white papers* (Hrica *et al.*, 2022), que pueden presentar bases de iniciativas con alto TRL.

Otro estudio que adoptó la metodología del experto fue el de Hardiyati *et al.* (2018). Los autores utilizaron revistas indexadas por Scopus y Google Scholar, publicadas hasta marzo de 2017. Uno de los objetivos del estudio fue analizar el nivel de madurez tecnológica de las publicaciones sobre biomedicina en Indonesia. Se analizaron 1.258 publicaciones, de las cuales solo 546 incluían I + D de nuevos fármacos. Los autores utilizaron expertos para clasificar los artículos en una nueva escala adaptada a la biomedicina⁵, como se muestra en la Figura 4, y crearon un diccionario con las palabras clave típicas de cada nivel. Esto podría usarse en nuevos enfoques, incluido el objetivo de automatizar el proceso de EMT.

Figura 4 – Relación entre el TRL y la escala propuesta

TRL 9	Ensayo clínico
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	
TRL 5	Preclínico (in vivo)
TRL 4	Preclínico (in vitro)
TRL 3	Descubrimiento de fármacos
TRL 2	
TRL 1	Investigación básica

Fuente: Adaptado de Hardiyati *et al.* (2018)

Los autores concluyeron que pocos estudios alcanzaron la última etapa de madurez, generando un producto para la industria. También señalaron que el proceso de producción de nuevos fármacos es largo y costoso (Hardiyati *et al.*, 2018).

Este enfoque, en general, tiene la ventaja de contar con profesionales con capacidad para interpretar la documentación, inferir información (que no es explícita) y, finalmente, llegar a una conclusión con base en sus conocimientos. Sin embargo, la desventaja es la excesiva dependencia de la experiencia y cualificación técnica del equipo de expertos, insertando subjetividad en el proceso, induciendo problemas de comunicación, además de hacer que el proceso sea costoso y lento (Britt *et al.*, 2008) (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018).

⁵ Modelo conceptual para la clasificación de la investigación biomédica desarrollado por los autores. Se presenta la descripción de cada nivel y la equivalencia con el TRL (Hardiyati *et al.*, 2018).

4.2 Herramientas de apoyo

Con el fin de reducir el posible sesgo de los expertos, varios estudios han desarrollado calculadoras TRL. En este enfoque, el experto no necesita tener un conocimiento de la escala, basta con responder una serie de preguntas. Al final, la calculadora presenta el nivel de TRL que mejor representa la tecnología evaluada.

La calculadora puede tener un grado variable de especificidad, ya que sus preguntas pueden ser muy precisas y definidas o ser más genéricas, lo que permite un empleo restringido a una aplicación o más amplio.

De los estudios que utilizan este enfoque, White *et al.* (2022) examinaron el uso de la escala TRL para medir la madurez de las tecnologías destinadas a la detección temprana de plagas y patógenos en árboles. Para la investigación, los autores realizaron entrevistas con expertos y pudieron observar la dificultad en posicionar ciertas tecnologías en la escala TRL. De este modo, para ayudar a EMT en tecnologías relacionadas con el medioambiente, con el objetivo de aportar mayor objetividad, se desarrolló una calculadora. Instituciones como la NASA y el *Air Force Research Laboratory* también desarrollaron calculadoras para apoyar el proceso de evaluación del nivel de TRL de una tecnología o producto (White *et al.*, 2022).

Las calculadoras TRL constan de un conjunto de preguntas que se implementan generalmente en el *software* genérico, como editores de hojas de cálculo, y que proporcionan madurez de la tecnología evaluada al final del proceso (White *et al.*, 2022), como la que puso a disposición la *New York State Energy Research and Development Authority* (NYSERDA)⁶, desarrollada originalmente para la industria de tecnología limpia. Esta calculadora cuenta con una serie de preguntas cerradas (respuesta sí o no), que están distribuidas en siete secciones: resumen general de la madurez tecnológica; mercado y necesidad del cliente; diseño y desarrollo; integración; prueba y validación; medioambiente y seguridad; y, finalmente, fabricación y expansión (White *et al.*, 2022).

Basándose en esta calculadora, White *et al.* (2022) desarrollaron otra centrada en el área de bioseguridad, la cual está ilustrada en la Figura 5. Sin embargo, a diferencia de aquella calculadora, cuyas preguntas estaban dirigidas al contexto de la ingeniería y abordaban cuestiones de fabricación, para la nueva área se debía adoptar un enfoque de múltiples actores, con la inclusión de *stakeholders* y los usuarios finales, puesto que las partes interesadas pueden presentar diferentes interpretaciones de la madurez de la tecnología, lo que requería una evaluación más amplia (White *et al.*, 2022).

Además, hubo una modificación en el número de secciones, de siete a tres, que pasaron a ser: desarrollo de tecnología; tecnología e implementación; y desarrollo de negocios. Otra modificación se dio en las preguntas que antes estaban cerradas y ahora comenzaron a admitir respuestas como “no conoce” o “no aplica” (White *et al.*, 2022). El trabajo de White *et al.* (2022) no tiene un ejemplo de uso de la calculadora, no se profundiza en la metodología (cómo se llega el nivel de madurez a partir de las respuestas), tampoco deja claro cómo trata los nuevos tipos de respuestas “no conoce” o “no aplica”.

⁶ Disponible en: files.masscec.com/innovate-clean-energy/NYSERDA-TRL-Calculator.xlsm. Acceso el: 23 nov. 2023.

Otra iniciativa para crear una calculadora TRL es la presentada por Girardi, França Junior y Galdino (2022). Los autores abordan el tema de la personalización del proceso de EMT desde una perspectiva organizacional del Ejército Brasileño (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

Figura 5 – Pantalla de la calculadora

TECHNOLOGY DEPLOYMENT AND COMMERCIALISATION		
3-1	Has a preliminary technology development plan to reach deployment been outlined?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-2	Have provisional arrangements been made for real-life testing?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-3	Have you identified any hazards associated with your technology?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-4	Have you undertaken an assessment to identify risks to end-users?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-5	Has the safety of the technology been assessed and confirmed?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-6	Has your technology been shown to be safe to use in the environment?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-7	Have test partners been identified?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-8	Has an aftercare strategy (maintenance, troubleshooting guide or failure analysis document, support plan) been developed?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-9	Have all safety documents been completed?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-10	Have all necessary end-user documents been developed and made available?	<input type="radio"/> YES <input checked="" type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA

Please briefly explain the deployment of your technology

Instructions | Glossary | Summary | Development | Business Planning | **Technology Deployment** | Results

Fuente: White *et al.* (2022)

Como resultado, se agregaron dos niveles de TRL en la escala tradicional. Hasta el nivel 9, la escala propuesta se parece mucho a la tradicional. El nivel 10 abarca la repetibilidad de la producción, mientras que el nivel 11 incluye la valoración del usuario del producto en operación (Girardi; França Junior; Galdino, 2022). La necesidad de crear esta escala personalizada para el Ejército brasileño es abordada por França Junior y Galdino (2019).

El trabajo detalla el proceso de creación de la calculadora y consta de 9 etapas: diagnóstico inicial, revisión bibliográfica, primer borrador de la calculadora, taller con 22 expertos de cuatro grupos focales, versión 1 de la calculadora, uso experimental en casos reales⁷, consulta interna dentro del ámbito institucional del Ejército Brasileño, versión 2 de la calculadora y, finalmente, la disponibilidad de la calculadora (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

La calculadora fue implementada en una interfaz web por la Agencia de Gestión e Innovación Tecnológica (AGITEC)⁸, y se puede accederla en la red corporativa del Ejército brasileño. El experto responde un máximo de 11 preguntas para obtener la clasificación TRL del objeto bajo análisis. Con el fin de obtener una clasificación con pocas preguntas, se adoptó un enfoque de resolución del problema de clasificación de nivel TRL en dos etapas. Primero, se realiza una estimación en uno de los rangos de TRL, como se ilustra en la Figura 6 (Girardi; França Junior;

⁷ Los programas fueron los siguientes: *Diretriz Estratégica para a Formulação Conceitual dos Meios Blindados do Exército Brasileiro, Rádio Definido por Software e Míssil Solo – Solo 1.2*. [Guía Estratégica para la Formulación Conceptual de Medios Blindados del Ejército Brasileño, Radio Definida por Software y Misiles Terrestres – Tierra 1.2].

⁸ Organización Militar del Ejército Brasileño.

Galdino, 2022). Segundo, se asignan indicadores a cada nivel de TRL. De esta manera, una vez respondida la pregunta inicial, se realiza un refinamiento y confirmación con otras preguntas, considerando el nivel más alto en que se han cumplido los indicadores (Girardi; França Junior; Galdino, 2022). La Figura 7 muestra la pantalla de inicio de la calculadora.

Xavier *et al.* (2020) abordan la relación entre la escala TRL y la gestión de riesgos, especialmente la noción intuitiva de riesgo tecnológico y señalan la importancia de desarrollar una calculadora. Los autores explican que existen varias calculadoras (archivos XLS) a disposición gratuitamente en Internet, pero que necesitan el programa MS Excel o similar. Además, señalan que estas calculadoras distribuidas en archivos XLS o similares tienen varias desventajas, como problemas de seguridad y susceptibilidad a errores humanos (Wirth 1976; Jackson, 2001 *apud* Xavier *et al.*, 2020). Otra desventaja es la falta de una estructura de datos centrada en el almacenamiento.

Figura 6 – Rangos de la primera etapa

TRL 11	Experimentación y feedback del usuario Producción y evaluación del lote piloto
TRL 10	
TRL 9	Integración, concepción y evaluación del prototipo
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Desarrollo y pruebas
TRL 5	
TRL 4	
TRL 3	Estudios iniciales
TRL 2	
TRL 1	

Fuente: elaborado por los autores (2023) con base en los datos de Girardi, França Junior y Galdino (2022)

Figura 7 – Pantalla de la calculadora



Fuente: captura de pantalla de la calculadora, disponible en la página de AGITEC

Los autores proponen una calculadora centrada en el entorno espacial. Para ello, presentan una metodología que utiliza su descripción analítica al evaluar la madurez de un producto a través de una estructura de desglose del producto (del inglés *Product Breakdown Structure*, PBS), en que los elementos del producto se desglosan y detallan, jerárquicamente, en subsistemas, montajes y componentes (Xavier *et al.*, 2020).

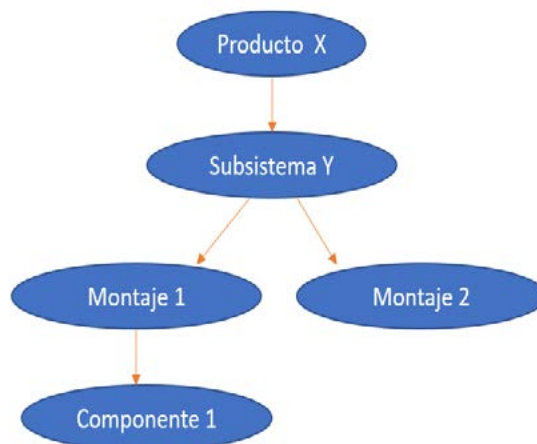
La Figura 8 ejemplifica cómo se aplicó este concepto a la calculadora. La Figura 9 muestra la estructura del ejemplo de la Figura 8 desde una estructura de árbol. Se puede ver que el Producto X tiene el subsistema Y, que a su vez tiene el Montaje 1 y el Montaje 2. Finalmente, el Montaje 1 tiene el Componente 1.

Figura 8 – PBS aplicado a la calculadora



Fuente: captura de pantalla obtenida de: <https://imatec.aeb.gov.br/#/createProduct2>

Figura 9 – Presentación de PBS en estructura de árbol



Fuente: elaborado por los autores (2023).

Los autores exponen que la madurez de un producto es igual o inferior a la madurez de los elementos que lo constituyen (Xavier *et al.*, 2020). En el ejemplo de la Figura 8, se observa que si el Componente 1 recibió el nivel 3, entonces el Montaje 1 podría haber recibido un nivel menor o igual a 3. Si el Montaje 1 recibió el nivel 2 y el Montaje 2 tuvo el nivel 6, el Subsistema Y podría haber recibido un nivel menor o igual a 2.

La calculadora desarrollada por estos autores se tituló IMATEC Lite, cuya letra I está asociada a la palabra índice y MATEC a la madurez tecnológica. La palabra *lite* indica la intención de los autores de expandirla, abarcando un conjunto más amplio de herramientas que involucran aspectos programáticos y de fabricación. En cuanto al uso de la calculadora, el usuario hace inicialmente un montaje de la estructura del producto (PBS), la cual se almacena en una estructura de datos exportable. A continuación, responde a una serie de preguntas, creadas con base en *National Aeronautics and Space Administration* (2014)⁹, las cuales admiten sí o no como respuesta.

La calculadora utiliza una lógica de “si-entonces” (*if-else*) para guiar las preguntas en función de las respuestas a las preguntas anteriores. Es decir, cuando todas las respuestas a las preguntas de un nivel determinado son afirmativas, se muestran las preguntas del siguiente nivel superior. El nivel alcanzado corresponde al nivel más alto que tuvo todas las respuestas “sí” (Xavier *et al.*, 2020).

La calculadora no requiere instalación y utiliza una interfaz web disponible en la Internet¹⁰. Una vez respondidas las preguntas, el usuario recibe un informe detallado que enumera no solo el nivel del producto final, sino también los elementos que lo componen. En cuanto a las tecnologías utilizadas, los autores informan que las credenciales de inicio de sesión se almacenan en una base de datos MongoDB, la aplicación se ejecuta en nodeJS, los módulos en AngularJS, mientras que la parte visual utilizó el *framework* Bootstrap CSS (Xavier *et al.*, 2020).

Los autores realizaron un estudio de caso en el sistema Serpens, acrónimo de Sistema Espacial para la Realización de Investigaciones y Experimentos con Nanosatélites, que se descompuso a través de PBS utilizando 3 niveles. Después, el equipo respondió las preguntas y el sistema obtuvo el nivel 6 en la escala TRL (IMATEC 6). A partir de este resultado, los autores infirieron que el sistema Serpens tenía las funciones críticas de sus elementos verificadas y su desempeño probado en un entorno relevante (Xavier *et al.*, 2020).

Otro trabajo que desarrolló una calculadora TRL fue realizado por Rocha (2016). El autor aborda en su estudio que es necesario una evaluación que incluya cuestiones más allá de los aspectos tecnológicos, como el económico, documental y político-legal. Esta inclusión busca adecuarse al contexto brasileño.

Por otra parte, Rocha (2016) determina cinco etapas en su metodología TRL: decisión de aplicación, definición del equipo, identificación de las tecnologías, recolección de materiales y evaluación. Esta última etapa se puede subdividir en: demostración de la metodología de evaluación de TRL, datos sobre la tecnología evaluable y evaluación de TRL.

La evaluación utiliza una calculadora creada en el *software* Microsoft Excel, que consta de 89 preguntas. Hay preguntas basadas en una lista de verificación de NBR ISO 16290:2015,

9 Disponible en: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7123&s=1B>. Acceso el: 6 dic. 2022.

10 Ver: <https://imatec.aeb.gov.br/#/home>.

y otras en requisitos técnicos, económicos, documentales y político-legales que admiten un porcentaje de logro. Otra ventaja de la calculadora es que funciona con un índice de tolerancia. De esta manera, a diferencia de la NBR ISO 16290:2015, un nivel de TRL puede considerarse cumplido, incluso sin que se hayan observado todos los requisitos (Rocha, 2016).

Al finalizar el trabajo, se aplicó la metodología propuesta en tres tecnologías aeroespaciales: compuestos termoestructurales reforzados con fibra de carbono, motor L75 y cohete VSB 30, y en una tecnología militar: blindaje mixto para aeronaves militares. La evaluación incluyó a técnicos, gerentes de las tecnologías evaluadas y un facilitador responsable de completar la calculadora. Por último, Rocha (2016) realizó un análisis comparativo entre los niveles alcanzados a través de la metodología propuesta y que se obtendría a través de un análisis basado exclusivamente en la NBR ISO 16290:2015, en que se obtuvo que, en el 75% de los casos, el TRL con el uso de NBR ISO 16290:2015 fue superior al de la calculadora TRL IAE/ITA-2016-1. El autor considera que este hallazgo demuestra la subjetividad de la citada norma.

Por lo tanto, con respecto al enfoque con herramientas de apoyo, se puede concluir que el uso de calculadoras simplifica el proceso al aplicar una serie de preguntas estandarizadas. El experto en tecnología no necesita conocer la escala TRL. Cabe señalar también que se pueden formular preguntas para reflejar las necesidades de la organización. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la superficialidad de las preguntas puede inducir inexactitudes en la clasificación.

La construcción de la calculadora se puede llevar a cabo mediante un proceso elaborado, como lo presentado por Girardi, França Junior y Galdino (2022). Luego, la aplicación de la EMT con este uso la simplifica por no requerir expertos en la escala y por reducir la subjetividad. En este sentido, se puede citar el caso de éxito de la calculadora TRL-EB, desarrollada para el Ejército brasileño y que había sido aplicada aproximadamente a 694¹¹ tecnologías y productos de interés para la Defensa Nacional. El soporte para su uso se basa únicamente en los analistas de AGITEC para resolver cualquier duda específica de los equipos encargados de la clasificación de madurez.

4.3 Automatización

Varios métodos buscan automatizar el logro del nivel de madurez tecnológica de una tecnología o producto a partir de publicaciones científicas, noticias y documentación de patentes. Algunos son cuantitativos, exploran la bibliometría y se basan en el volumen de documentos, y están más relacionados con la prospección tecnológica.

Por otra parte, otros analizan los documentos con técnicas de minería de texto y lenguaje natural. Este segundo grupo puede acercarse al uso tradicional de la escala cuando los documentos se refieren a una tecnología o producto objetivo bien determinado. O de la prospección tecnológica cuando la colección se centra en una tecnología en un sentido amplio.

Lezama-Nicolás *et al.* (2018), a partir del trabajo de Watts y Porter (1997), construyeron un método cuantitativo que utiliza indicadores bibliométricos en un enfoque semiautomático titulado *Bibliometric Method for Assessing Technological Maturity* (BIMATEM). Se establece una

11 Número de accesos hasta la fecha (abril 2023) desde la disponibilidad de la herramienta en el ámbito del Ejército Brasileño (EB).

relación entre las etapas del ciclo de vida (Introducción, Crecimiento y Madurez), del inglés *Technology Life Cycle* (TLC)¹², los tipos de fuentes bibliométricas y los niveles de la escala TRL, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1 – Relación TLC, fuentes bibliométricas y TRL

TLC	Fuentes bibliométricas	TRL
Introducción	-	1
	-	2
	Publicaciones científicas	3
	Publicaciones de ingeniería	4
		5
Crecimiento	Patentes	6
		7
Madurez	Registro de noticias	8
		9

Fuente: Watts y Porter (1997) adaptado por Lezama-Nicolás *et al.* (2018)

El método consiste en definir la tecnología que será evaluada, seleccionar las bases de consulta, formular la *string* de búsqueda y ejecutar la consulta en las bases. En la siguiente etapa se realiza una tabulación de los registros. Por último, se realiza la evaluación matemática de los resultados recuperados y, así, se asigna el TRL (rango) correspondiente (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018). Para ilustrar la utilidad de BIMATEM, los autores la utilizaron en un estudio de caso que involucra tecnologías de fabricación aditiva.

Cabe destacar que BIMATEM tiene en cuenta que las tecnologías presentan una trayectoria de innovación lineal (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018), en que las iniciativas avanzan progresando en el nivel de madurez en el tiempo a medida que se realizan actividades de I + D. Sin embargo, según comentan White *et al.* (2022), no siempre es así como se realiza el desarrollo tecnológico. Una tecnología que haya alcanzado un cierto TRL puede retroceder a un TRL más bajo, cuando se encuentran resultados inesperados en alguna prueba. Esta situación también puede ocurrir, incluso con mayor frecuencia, cuando se modifica el objeto objetivo al que se debe integrar la tecnología de interés. Este caso está ilustrado en el apartado 2, a través del estudio de caso del vehículo Cascavel presentado por França Junior y Galdino (2022), en que una tecnología madura al usarse en otro producto retrocede a niveles de TRL más bajos.

Faidi y Olechowski (2020) pone de relieve la importancia del TRL para la evaluación y planificación durante el desarrollo de un producto o tecnología, destacan el papel de esta escala para el diseño de prototipos y consideran la automatización como la forma de superar los principales problemas del uso de esta escala: la subjetividad y el alto costo de emplear equipos de expertos.

¹² Las etapas de TLC son tecnología emergente, en crecimiento y madurez. No se considera la etapa de declive por no estar relacionada con la escala TRL (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018).

Los autores evalúan la coherencia de la relación entre el tipo de documento (por ejemplo, noticias, patentes y artículos científicos) y el TRL (Faidi; Olechowski, 2020).

Faidi y Olechowski (2020) señalan que estudios como el de Lezama-Nicolás *et al.* (2018) asocian los artículos científicos y de ingeniería con los niveles más bajos de TRL, las patentes con niveles intermedios y las noticias con niveles más maduros. Para refutar esta hipótesis, los autores eligieron 15 tecnologías del sector de la nanotecnología con un bajo TRL, basándose en la clasificación realizada en el documento *NASA Technology Roadmaps TA 10: Nanotechnology* (2015)¹³. Se eligieron y analizaron cinco tecnologías de cada uno de los TRL 2, 3 y 4 (Faidi; Olechowski, 2020).

Los autores utilizaron tres tipos de documentos (patentes, publicaciones científicas y noticias de la industria), restringieron la recolección al período de 2009 a 2015 y los resultados muestran que, después del análisis, no se verificó el mapeo de los tipos de publicación a niveles TRL (Faidi; Olechowski, 2020).

Por ejemplo, se constató que las tecnologías TRL 3 obtuvieron una cantidad creciente de patentes durante el período evaluado, como las láminas de grafeno que reunieron más de 50 patentes solo en 2015. La ocurrencia de patentes en este bajo nivel de TRL contradice a algunas consideraciones en la literatura que asocia las patentes con niveles intermedios. Una situación similar ocurrió cuando se identificaron registros de noticias para tecnologías de este mismo TRL, lo que solo se esperaría TRL más altos (Faidi; Olechowski, 2020).

Los autores suponen que la especificidad del nombre de la tecnología y el uso natural de nombres más generales a niveles más iniciales de desarrollo dificultan la búsqueda de documentos relacionados con las tecnologías analizadas (Faidi; Olechowski, 2020).

Aunque los métodos de este grupo, que utilizan indicadores bibliométricos, tienen la ventaja de automatizar parte del proceso, siguen siendo muy dependientes de la *string* de búsqueda formulada en las consultas y las bases utilizadas. Otra crítica corresponde al desarrollo de tecnologías distintas que puede no ser uniforme, lo que dificulta la búsqueda de un patrón. Además, este grupo de métodos está mucho más relacionado con la prospección tecnológica que con la evaluación de productos o tecnologías específicas, que tienen diferentes características en términos de funciones críticas de rendimiento y especificaciones técnicas. El TRL no es un número absoluto, puesto que depende del contexto (França Junior; Galdino, 2022) no siempre explícito o identificable en los documentos. Esto también puede convertirse en un problema de este enfoque, dada la necesidad de flexibilizar algunos conceptos, como las funciones críticas de desempeño, induciendo subjetivamente el proceso.

Otro grupo de métodos que tiene como objetivo automatizar el proceso consiste en aplicar técnicas de minería de texto. En este enfoque, entre otros tipos de modelos, se pueden aplicar los de Inteligencia Artificial (IA) dirigidos a la función de clasificación.

En los estudios sobre la clasificación de publicaciones científicas en Indonesia sobre biomedicina, Hardiyati *et al.* (2018) encontraron que los modelos predictivos computarizados basados en la minería de texto proporcionan una clasificación efectiva y eficiente, especialmente

13 Disponible en: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2015_nasa_technology_roadmaps_ta_10_nanotechnology_final.pdf.

cuando se trata de un gran volumen de documentos. En este contexto, los autores publicaron un trabajo que trataba el enfoque de minería de texto (Silalahi *et al.*, 2018).

Su objetivo fue construir un modelo automatizado para clasificar las publicaciones en uno de los 4 niveles de madurez propuestos por la escala orientada a la biomedicina (Figura 4), es decir, investigación básica, descubrimiento de fármacos, ensayo preclínico y clínico. Cabe señalar que los niveles preclínicos *in vivo* e *in vitro* se transformaron en un solo nivel (Silalahi *et al.*, 2018).

Para ello, el trabajo analizó los algoritmos KNN, Naive Bayes y SVM. La muestra contó con el total de 539 artículos, distribuidos de manera desequilibrada entre las clases. La clase investigación básica tenía mayor número de artículos (291); y el ensayo clínico, el menor (9) (Silalahi *et al.*, 2018). Por lo general, los modelos de IA que utilizan el aprendizaje supervisado separan el conjunto de datos, en este caso, las publicaciones, en un conjunto de capacitación y pruebas. El primero tiene como objetivo ajustar los parámetros del modelo. El segundo lo evalúa.

El análisis realizado en el citado trabajo estuvo limitado al resumen de los artículos. Primero, se realizó un preprocesamiento con eliminación de *stopwords*¹⁴ y aplicación de *stemming*¹⁵. Luego, se aplicó un filtro a las palabras, basado en el *Term Frequency-Inverse Document Frequency* (TF-IDF)¹⁶ (Silalahi *et al.*, 2018).

Después del entrenamiento de los modelos, se realizaron sus evaluaciones. En esta etapa, hay varias métricas que buscan transmitir la idea de asertividad del modelo, incluida la precisión y la F1-score. La precisión representa el número total de respuestas correctas dividido por el número total de predicciones, es decir, cuántas publicaciones se clasificaron correctamente en relación con el número total de publicaciones en el conjunto de pruebas. La F1-score es una métrica de agregación basada en otras métricas (precisión y anulación), utilizada comúnmente para indicar la calidad general del modelo.

Los autores llegaron a la conclusión de que el modelo Naive Bayes presentó los mejores resultados con una precisión del 80,46% y una F1-score promedio del 82,61% (Silalahi *et al.*, 2018).

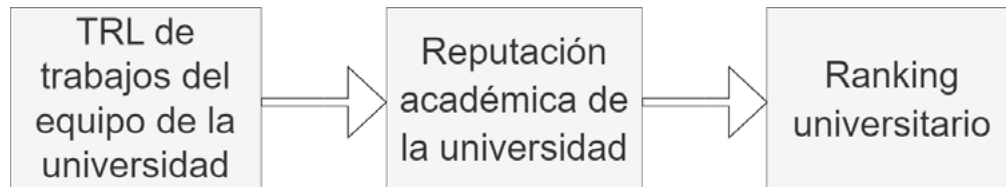
Una de las posibles aplicaciones del TRL que señala la literatura es evaluar estudios en las universidades. Para este propósito, el Gobierno de la República de Indonesia utiliza TRL a través de una variación, titulada *Tingkat Kesiaapterapan Teknologi* (TKT). El resultado se utiliza en programas de financiación de estudios. En la metodología adoptada por el Gobierno, los empleados aplican manualmente un cuestionario conocido como *Teknometer* con el fin de obtener el TRL de encuestas (Rintyarna; Sarno; Yuananda, 2018).

Tres estudios proponen que este uso pueda extenderse a la construcción de un *ranking* universitario, basado en la evaluación de la reputación académica mediante la estimación automatizada de TRL de las publicaciones académicas realizadas por personas vinculadas a universidades (Aliyanto; Sarno; Rintyarna, 2017; Rintyarna; Sarno; Yuananda, 2018; Rintyarna *et al.*, 2021). Esta asociación está ilustrada en la Figura 10.

14 *Stopwords* son palabras que no tienen o tienen poco significado como preposiciones y conjunciones.

15 Consisten en eliminar prefijos y sufijos de las palabras dejando solo su raíz.

16 Es una técnica de Procesamiento del Lenguaje Natural que considera el número de ocurrencias de una palabra en un documento (*Term Frequency* –TF) y lo inverso del número de documentos que tienen esa palabra (*Inverse Document Frequency* –IDF) (Jurafsky; Martin, 2023).

Figura 10 – Asociación propuesta

Fuente: Basado en Aliyanto, Sarno y Rintyarna (2017); Rintyarna, Sarno y Yuananda (2018); Rintyarna *et al.* 2021.

La automatización propuesta consiste en combinar una expansión de la taxonomía de Bloom con técnicas de minería de textos, como alternativa al proceso de entrevistas manuales a expertos, considerado costoso y lento (Aliyanto; Sarno; Rintyarna, 2017).

Los resúmenes de las publicaciones recopiladas utilizaron varios algoritmos de minería de texto y de Inteligencia Artificial para respaldar la clasificación del nivel TRL, como: *Supervised Probabilistic Latent Semantic Analysis* (sPLSA) (Aliyanto; Sarno; Rintyarna, 2017); *LDA-Adaboost.MH* (Rintyarna; Sarno; Yuananda, 2018) y *Labelled Latent Dirichlet allocation* (LLDA) (Rintyarna *et al.*, 2021).

Los estudios mostraron diferentes grados de éxito y utilizaron diferentes métricas al comparar el *ranking* universitario obtenido con el de la referencia (*QS World University Rankings*).

Tanto en Aliyanto, Sarno y Rintyarna (2017) como en Rintyarna, Sarno y Yuananda (2018) y Rintyarna *et al.* (2021) no se detallaron algunas etapas intermedias del proceso, como el proceso de entrenamiento de los modelos de clasificación y la precisión de los modelos con respecto a TRL. Esto se debe a que la obtención del TRL es un proceso intermedio, y no el fin del proceso de trabajo.

En resumen, el enfoque que utiliza la minería de texto tiene la ventaja de hacer que el proceso de EMT sea escalable, realizando varias clasificaciones a veces significativamente más bajas que el proceso manual. En este enfoque, el modelo es capaz de clasificar el nivel TRL correspondiente a una tecnología o publicación puntual.

Como desventaja se destaca que el lenguaje natural tiene peculiaridades, como la ambigüedad y la vaguedad, lo que puede ser difícil en la construcción de un modelo asertivo. Además, se encuentran pocos estudios que utilizaron este enfoque, y aún menos los que detallaban los procedimientos realizados.

Aunque es posible utilizar algoritmos de IA y minería de texto para analizar un conjunto de documentos de un producto objetivo bien definido, no se encontraron estudios que realmente los utilizaran en la literatura.

5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez proporcionada una visión general de las técnicas EMT identificadas en la literatura centrada en la I + D y el uso de la escala TRL, es necesario discutir algunos puntos importantes identificados a lo largo del estudio.

5.1 Marco de las técnicas de EMT en los enfoques *stricto* y *lato*

De los análisis de los estudios encontrados, fue posible inferir algunas variaciones respecto al uso de la escala TRL. La escala se desarrolló con el propósito de medir la madurez tecnológica de una tecnología asociada a un producto objetivo a partir de un conjunto bien definido de indicadores para cada nivel, este enfoque aquí se llamó análisis estricto (*stricto*). Ante la popularización de la escala, surgieron otras posibilidades, como el uso en apoyo de tareas de prospección y gestión tecnológica, aflojando algunos conceptos esenciales para un análisis estricto. Esta categoría de obras se clasificó aquí como de sentido amplio (*lato*).

En el análisis estricto (*stricto*) de uso de la escala más tradicional, podemos mencionar el estudio de caso del sistema *Serpens* propuesto por Xavier *et al.* (2020). De hecho, la calculadora que proponen los autores permite al usuario descomponer el sistema en partes más pequeñas para fines de evaluación, llegando a la medición objetiva de su nivel de madurez. El sistema tiene requisitos bien definidos, lo que le permite evaluar si una prueba en un entorno determinado fue exitosa o no.

Consideraciones similares también son válidas para los trabajos de White *et al.* (2022), con la calculadora enfocada en tecnologías para la detección temprana de plagas y patógenos en árboles; para los estudios de Girardi, França Junior y Galdino (2022), con la calculadora enfocada en productos de defensa; y también para Rocha (2016) con la calculadora TRL IAE/ITA-2016-1. Por lo tanto, se infiere que la EMT basada en el uso de calculadoras se ve más afectada por el enfoque *stricto*, teniendo en cuenta que existe una definición clara de los indicadores que una tecnología debe lograr para permitir su integración en un producto objetivo.

Para el uso de la escala TRL en un sentido amplio, algunos conceptos deberán flexibilizarse, por ejemplo, la función crítica de un elemento. En la definición original, la función crítica es específica de la tecnología con respecto a un producto objetivo. Cuando lo aplica en un sentido *amplio*, este concepto se vuelve más genérico.

Como aplicación de la herramienta en sentido amplio, destaca el uso de la escala TRL en apoyo a las actividades de prospección tecnológica. En este contexto, podemos mencionar los trabajos de Lezama-Nicolás *et al.* (2018) y de Faidi y Olechowski (2020) quienes abordaron el uso de indicadores bibliométricos en la definición de niveles de escala.

Otra área en que se ha empleado el enfoque *lato* es la gestión de la innovación o la gestión tecnológica. En este ámbito, Faidi y Olechowski (2020) mostraron que las grandes organizaciones tecnológicas, como la NASA, se vienen utilizando la escala TRL para fundamentar la construcción de sus hojas de ruta tecnológicas (*roadmaps*), mientras que Aliyanto, Sarno y Rintyarna (2017), Rintyarna, Sarno y Yuananda (2018) y Rintyarna *et al.* (2021) presentaron la personalización de la escala de madurez para la construcción de *rankings* universitarios. Estos ejemplos ilustran que las iniciativas relacionadas con la automatización de EMT, ya sean cuantitativas (bibliometría) o cualitativas (minería de texto), se ven aún más afectadas por el enfoque *lato* dada la complejidad de EMT y la escasez de *datasets* que tienen un conjunto de documentos etiquetados.

Por lo tanto, estas variaciones en el uso de la escala TRL están relacionadas con la granularidad del análisis. En el enfoque *stricto*, se utiliza un “*zoom*” más grande, que permite la identificación de una tecnología específica asociada con un producto objetivo, con varias características particulares,

como los requisitos y las funciones críticas de rendimiento. Este fue el objetivo original diseñado por la NASA y juega un papel clave en el monitoreo de I + D de productos y sistemas de alta tecnología. En la segunda variación (enfoque *lato*), se reduce el “*zoom*”, aportando una visión más general, trabajando con una agrupación de productos y tecnologías. Este aspecto ha difundido el uso de la escala TRL en apoyo a las actividades de prospección y gestión tecnológica.

Se percibe que los enfoques tienen diferentes propósitos, aunque utilizan la escala de madurez como referencia.

5.2 Uso de patentes en EMT

Conforme se ha mencionado en el apartado 4.3, el uso de patentes en el análisis de madurez es un tema complejo y discutible, como las críticas dirigidas por Faidi y Olechowski (2020) a la metodología BIMATEM propuesta por Lezama-Nicolás *et al.* (2018).

Esta complejidad se debe a que las patentes de invención se utilizan para diversos fines, como los que se enumeran a continuación:

- Las empresas buscan aumentar su presencia en el mercado al construir una cartera con registros de patentes, incluso si estas no representan un gran avance tecnológico y tienen un bajo potencial de comercialización.
- Los inventores individuales pueden utilizar el registro de patentes como una herramienta para enriquecer sus currículums. Un ejemplo emblemático de que es posible patentar algo claramente no patentable es el caso del investigador Henry Jun Susuki. Para probar esta hipótesis, Susuki realizó con éxito todos los trámites burocráticos necesarios para iniciar el registro de patente de un emoji (BR 102018004918-6 A2) y esto quedó demostrado que es posible que un inventor contabilizara registros engañosos en su cartera (Suzuki, 2019).
- Algunos países con bajas tasas de registros pueden establecer políticas para fomentar la innovación mediante el incremento en el número de patentes de invención. Por ejemplo, los registros de patentes de invención en Brasil comenzaron a considerarse en las evaluaciones de los programas de posgrado del cuatrienio 2017-2020, lo que provocó que varios programas incrementaran sustancialmente este indicador. Para ilustrar este movimiento se cita el incremento de los registros en el ámbito de la gestión de la propiedad intelectual del Instituto Militar de Ingeniería (IME). Según los datos obtenidos de IME¹⁷, en la transición entre los cuatrienios de evaluación 2013-2016 y 2017-2020, el registro de patentes pasó de 2 a 21, lo que representa un incremento del 950%.

Para que el uso de patentes en la EMT sea efectivo, se debe considerar la solidez e impacto de cada documento de patente a partir de los campos en las bases de datos asociadas. Una patente se considera sólida y de impacto cuando la negocian y/o la citan ampliamente. Aquellas que son negociadas tienen una alta posibilidad de ser utilizadas en productos, lo que implica una alta madurez.

17 <https://intraime.ime.eb.br/propriedade-intelectual.html>

Aquellas que son muy citadas abren rutas tecnológicas. De este modo, no basta con realizar un trabajo exclusivamente cuantitativo, puesto que los registros de patentes de invención pueden indicar desde hallazgos de baja madurez o de alta madurez e impactos tecnológicos insignificantes hasta aquellas que establecen nuevas rutas tecnológicas y que pueden apoyar innovaciones disruptivas. Para obtener resultados más asertivos con esta fuente de datos, es fundamental complementar el análisis cuantitativo con el cualitativo.

Por lo tanto, hay muchas preguntas abiertas para el uso de patentes en EMT. Como se ha mencionado en el párrafo anterior, una posible dirección es emplear herramientas automatizadas para explorar los campos existentes en las bases de datos de patentes.

5.3 Ventajas y desventajas de los enfoques de EMT

Además de la diferencia en el uso de la escala TRL (apartado 5.1), existen algunas diferencias con respecto a la forma de evaluación de la tecnología/producto dentro de las técnicas presentadas. Para resumir todas las observaciones realizadas a lo largo del apartado 4, a continuación el Cuadro 2 presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas de cada uno de los enfoques de EMT.

Cuadro 2 – Ventajas y desventajas de las técnicas de EMT presentadas

		Ventajas	Desventajas
Equipo de expertos		- Análisis más profundo - Mayor flexibilidad	- Mayor subjetividad - Mayor costo - Proceso más lento
Herramientas de apoyo (impacta más al enfoque <i>stricto</i>)		- Posibilidad de insertar una visión institucional en las preguntas - Mayor estandarización durante el análisis	- Necesidad de expertos en la formulación de preguntas - Necesidad de que los expertos respondan las preguntas
Automatización (impacta más al enfoque <i>lato</i>)	Cuantitativa (bibliometría)	- Más rápida, ya que no analiza el contenido de los documentos - Costo más bajo	- Resultados aún se refutan en la literatura - Dificultad para formular una buena <i>string</i> de búsqueda
	Cualitativa (minería de texto)	Menor costo y rapidez	- Necesidad de documentos que retraten el estado real de la tecnología - Todavía poco estudiado en la literatura - Escasez de bases de datos públicas de documentos etiquetados

Fuente: elaborado por los autores (2023).

Es importante señalar que la revisión bibliográfica realizada en este trabajo mostró que los equipos de expertos y calculadoras fueron más utilizados en el contexto del enfoque clásico (sentido *stricto*). Mientras tanto, las técnicas de EMT automatizadas se han utilizado en el sentido amplio, con usos más recientes y amplia gama de preguntas abiertas.

6 CONSIDERACIONES FINALES

La escala TRL ha ganado relevancia en varias áreas y ha sido utilizada por diferentes segmentos (industria, academia y gobierno) en muchos países. Esta herramienta permite una mejor comunicación entre los equipos en un proyecto de I + D, así como un mejor seguimiento en relación con la evolución de la madurez y fiabilidad de una tecnología. Además de su uso inicial, también se ha utilizado como herramienta en la prospección y gestión tecnológica para estimar los avances tecnológicos.

Dada la escasez de estudios sobre el estado del arte de las formas de realización de la EMT utilizando TRL, este artículo busca contribuir a llenar este vacío, analizando diferentes trabajos sobre el tema.

Este trabajo analizó 180 documentos, conjunto que se redujo al aplicar los criterios de inclusión. Con respecto a la EMT, se identificaron tres enfoques, sus puntos positivos y negativos.

El primer enfoque hace uso de un equipo de expertos y utiliza su conocimiento sobre la tecnología y la escala TRL para clasificar el nivel de madurez tecnológica.

En el segundo se combinan expertos con herramientas de apoyo (calculadoras). De este modo, el experto de la aplicación tecnológica responde a una serie de preguntas sobre el desarrollo de la tecnología. Estas preguntas, formuladas de antemano, pueden definirse o estructurarse para incorporar la visión institucional en el proceso de evaluación.

Por último, el tercer enfoque busca automatizar el proceso mediante la extracción de información de publicaciones relacionadas con una tecnología de interés. Para ello, se forma un modelo de inteligencia artificial basado en ejemplos previamente etiquetados. Luego, se presentan nuevos ejemplos al modelo para fines de clasificación de madurez.

En cuanto a las lagunas existentes, se pudo identificar en la literatura la existencia de pocos trabajos centrados en la EMT utilizando minería de texto. Esto podría ser como apoyo de una calculadora, como una forma de validar la información proporcionada o incluso como un proceso independiente. A excepción de Hrica *et al.* (2022), no se encontraron *datasets* públicos que tengan un conjunto de documentos etiquetados, asociando la tecnología presente con un nivel de TRL.

Aún como lagunas identificadas en el estudio, se encontró que existen preguntas abiertas relacionadas con el uso de patentes en la EMT. Una dirección sugerida fue emplear herramientas automatizadas para explorar los campos existentes en las bases de datos de patentes.

Además de las citadas lagunas, se busca considerar en futuros trabajos la realización de análisis de EMT que combine la escala TRL con otras escalas, como, por ejemplo, la *Manufacturing Readiness Levels* (MRL) (Wu *et al.*, 2017) y el *Commercial Readiness Level* (CRL) (Gerdski; Manotungvorapun, 2021), extrapolarlo la lista de aplicaciones más allá de las actividades de I + D, foco de este texto.

Otro tema poco explorado y que puede fomentar nuevas investigaciones es el análisis sobre cómo los Núcleos de Innovación Tecnológica (NIT) están llevando a cabo la EMT para subvencionar los procesos de I + D, la acumulación de capacidad tecnológica y la priorización del desarrollo científico y tecnológico de las ICT soportadas.

REFERENCIAS

ALIYANTO, D.; SARNO, R.; RINTYARNA, B. S. Supervised Probabilistic Latent Semantic Analysis (sPLSA) for estimating Technology Readiness Level. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION & COMMUNICATION TECHNOLOGY AND SYSTEM*, 11., 2017, Surabaya. **Anais [...]**. Surabaya: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICTS.2017.8265650.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 16290:2015 Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BRASIL. Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações. **Portaria MCTI no 6.449, de 17 de outubro de 2022**. Brasília, DF: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mcti-n-6.449-de-17-de-outubro-de-2022-437609158>. Acesso em: 9 dez. 2022.

BRITT, B. L.; BERRY, M. W.; BROWNE, M.; MERRELL, M. A.; KOLPACK, J. Document classification techniques for automated technology readiness level analysis. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 675-680, 2008.

CARR, J. L. **An investigation into the factors that govern success for new safety and health technologies in the mining industry and the efficacy of those factors to predict the likelihood of success for emerging technologies**. 2019. Tese (Doutorado) – The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2019.

COATES, J. F. Foresight in federal government policy making. **Futures Research Quarterly**, Bethesda, v. 1, n. 2, p. 29-53, 1985.

FAIDI, S.; OLECHOWSKI, A. Identifying gaps in automating the assessment of Technology Readiness Levels. *In: PROCEEDINGS OF THE DESIGN SOCIETY: DESIGN CONFERENCE*, 2020, Cambridge. **Anais [...]**. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. p. 551-558.

FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. Gestão de sistemas de material de emprego militar: o papel dos níveis de prontidão tecnológica. **Coleção Meira Mattos: Revista das Ciências Militares**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 47, p. 155-176, 2019. DOI: 10.22491/cmm.a009.

FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. Aquisição de sistemas e produtos de defesa: conciliando objetivos de curto e longo prazo. *In: AZEVEDO, C. E. F.; RAMOS, C. E. de F. (org.). Estudos de defesa: inovação, estratégia e desenvolvimento industrial*. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2022. p. 42-71.

GERDSRI, N.; MANOTUNGVORAPUN, N. Readiness assessment for IDE startups: A pathway toward sustainable growth. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 24, p. 13687, 2021. DOI: 10.3390/su132413687.

GIRARDI, R.; FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. A customização de processos de avaliação de prontidão tecnológica baseados na escala TRL: desenvolvimento de uma metodologia para o Exército Brasileiro. **Coleção Meira Mattos: Revista das Ciências Militares**, v. 16, n. 57, 2022. DOI: 10.52781/cmm.a084.

HARDIYATI, R.; SILALAH, M.; AMELIA, M.; NADHIROH, I. M.; RAHMAIDA, R.; HANDAYANI, T. A Conceptual Model for Classification of Biomedicine Research. *In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE*, 2018, Bristol. **Anais** [...]. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/197/1/012006.

HIRSHORN, S. R.; VOSS, L. D.; BROMLEY, L. K. **NASA Systems Engineering Handbook No. HQ-E-DAA-TN38707**. Houston: Nasa, 2017.

HRICA, J. K.; BELLANCA, J. L.; BENBOURENANE, I.; CARR, J. L.; HOMER, J.; STABRYLA, K. M. A Rapid Review of Collision Avoidance and Warning Technologies for Mining Haul Trucks. **Mining, Metallurgy and Exploration**, New York, v. 39, n. 4, p. 1357-1389, 2022. DOI: 10.1007/s42461-022-00633-w.

JACKSON, Michael. **Problem frames: Analysing and structuring software development problems**. Boston: Addison-Wesley, 2001.

JURAFSKY, D.; MARTIN, J. H. **Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition**. 3. ed. Stanford: Stanford University Press, 2023.

LEZAMA-NICOLÁS, R.; RODRÍGUEZ-SALVADOR, M.; RÍO-BELVER, R.; BILDOSOLA, I. A bibliometric method for assessing technological maturity: the case of additive manufacturing. **Scientometrics**, New York, v. 117, n. 3, p. 1425-1452, 2018. DOI: 10.1007/s11192-018-2941-1.

MANKINS, J. C. **Technology Readiness Levels: a white paper**. Houston: Nasa, 1995.

MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: A retrospective. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **NASA Systems Engineering Processes and Requirements (w/Change 2) – NPR 7123.1C**. Houston: Nasa, 2020. Disponível em: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7123&s=1B>. Acesso em: 6 dez. 2022.

RINTYARNA, B. S.; SARNO, R.; FITRIANTO, P.; SATYAJI, Y. Automatic Assessment of Technology Readiness Level Using LLDA-Helmholtz for Ranking University. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, Hoboken, v. 11, n. 6, p. 2416-2421, 2021. DOI: 10.18517/ijaseit.11.6.14525.

RINTYARNA, B. S.; SARNO, R.; YUANANDA, A. L. Automatic ranking system of university based on technology readiness level using LDA-Adaboost.MH. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY*, 2018, Yogyakarta. Anais [...]. Yogyakarta: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. p. 495–499. DOI: 10.1109/ICOIACT.2018.8350706.

ROCHA, D. **Uma Adaptação Da Norma NBR ISO 16290: 2015 Aplicada Em Projetos Do Setor Aeroespacial**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.

SILALAH, M.; HARDIYATI, R.; NADHIROH, I. M.; HANDAYANI, T.; AMELIA, M.; RAHMAIDA, R. A text classification on the downstream potential of biomedicine publications in Indonesia. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY*, 2019, Yogyakarta. **Anais [...]**. Yogyakarta: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. p. 515-519. DOI: 10.1109/ICOIACT.2018.8350778.

STRAUB, J. In search of technology readiness level (TRL) 10. **Aerospace Science and Technology**, Amsterdam, v. 46, p. 312-320, 2015. DOI: 10.1016/j.ast.2015.07.007.

SUZUKI, H. J. Método educativo para demonstrar que quantidade de pedidos de patentes não é uma boa métrica de inovação. **NEITEC/EQ/UFRJ**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.neitec.eq.ufrj.br/noticias/metodo-educativo-para-demonstrar-que-quantidade-de-pedidos-de-patentes-nao-e-uma-boa-metrica-de-inovacao/>. Acesso em: 26 mar. 2023.

WATTS, R. J.; PORTER, A. L. Innovation forecasting. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 56, n. 1, p. 25-47, 1997. DOI: 10.1016/S0040-1625(97)00050-4.

WECK, O. L. **Technology Roadmapping and Development: A Quantitative Approach to the Management of Technology**. Berlin: Springer Nature, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-88346-1.

WHITE, R.; MARZANO, M.; FESENKO, E.; INMAN, A.; JONES, G.; AGSTNER, B.; MUMFORD, R. Technology development for the early detection of plant pests: a framework

for assessing Technology Readiness Levels (TRLs) in environmental science. **Journal of Plant Diseases and Protection**, New York, v. 129, p. 1249-1261, 2022. DOI: 10.1007/s41348-022-00599-3.

WIRTH, N. **Algorithms+Data Structures=Programs**. New Jersey: Prentice Hall, 1976.

WU, C.; WANG, B.; ZHANG, C.; WYSK, R. A.; CHEN, Yi-Wen. Bioprinting: an assessment based on manufacturing readiness levels. **Critical reviews in biotechnology**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 333-354, 2017. DOI: 10.3109/07388551.2016.1163321

XAVIER, A.; VELOSO, A.; SOUZA, J.; CÁS, P. K.; CAPPELLETTI, C. AEB online calculator for assessing technology maturity: IMATEC. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 12, n. 1, e1320, 2020. DOI: 10.5028/jatm.v12.1098.

