

## Análisis bibliométrico: TiN

## Bibliometric Analysis: TiN

Ángel J. Morales Robles <sup>a</sup>, Martín Ortiz Domínguez <sup>b</sup>, Edgar Cardoso Legorreta <sup>c</sup>, Arturo Cruz Avilés <sup>d</sup>, Quirino Estrada <sup>e</sup>

### Abstract:

This work presents the methodology and results of the analysis of scientific publications registered in the Scopus database related to titanium nitride (TiN) in the period from 1979 to 2025. For this purpose, the metadata of 1458 documents were analyzed using the statistical tools Bibliometrix, and the Biblioshiny interface, all operating within the RStudio environment. The results show a sustained growth of research with an average annual rate of 8.1%, a mean age of 12.3 years per document, and an average of 26.88 citations per publication. The production is mainly composed of research articles (84%), followed by conference papers (13.7%) and a smaller proportion of review articles (1.6%). A total of 4361 authors were identified, with a predominance of collaborative work (4.61 co authors per article) and an international collaboration rate of 22.57%. The thematic analysis revealed consolidated lines in synthesis and characterization of TiN coatings, along with emerging areas linked to tribology, advanced manufacturing, and sustainability. Overall, this study provides a comprehensive view of the scientific and technological development of TiN, highlighting its strategic role in surface engineering and in the consolidation of functional coatings with high industrial impact.

### Keywords:

TiN, Bibliometrix, Biblioshiny, Scopus, PVD

### Resumen:

El tratamiento termoquímico de carburización es un proceso de endurecimiento superficial empleado para aumentar la resistencia al desgaste en diferentes aceros y aleaciones ferrosas. Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre el tema de la literatura publicada entre 1967 y 2024, para lo cual se analizaron los metadatos de 4590 publicaciones extraídos de Scopus. Se realizó un análisis estadístico de los datos en el entorno R mediante las plataformas Bibliometrix, Biblioshiny y TALL AI las cuales permiten estudiar el desarrollo de las líneas de investigación mediante indicadores bibliométricos. Se observó un crecimiento anual del 6.6 %, destacando China (1485 artículos), India y EE. UU. como países más productivos, y J. G. Li como autor más prolífico (43 artículos). Las revistas líderes fueron Materials Science Forum, JMRT y Surface and Coatings Technology. El análisis temático asistido por inteligencia artificial permitió identificar los principales tópicos abordados en la literatura, con énfasis en técnicas industriales, propiedades tribológicas y modelado computacional del proceso, temas que se tomaron como referencia para identificar las tendencias actuales de investigación. Los resultados ofrecen una visión integral del desarrollo científico y tecnológico de la carburización, sus aplicaciones industriales y las tendencias emergentes que orientan la investigación actual.

### Palabras Clave:

TiN, Bibliometrix, Biblioshiny, PVD

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-6810-6565>, Email: mo298963@uaeh.edu.mx

<sup>b</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin\_ortiz@uaeh.edu.mx

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-2893-2064>, Email: edgarc@uaeh.edu.mx

<sup>d</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo\_cruz8085@uaeh.edu.mx

<sup>e</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez | Instituto de Ingeniería y Tecnología | Ciudad Juárez-Chihuahua | México, <https://orcid.org/0000-0003-0623-3780>, Email: quirino.estrada@uacj.mx

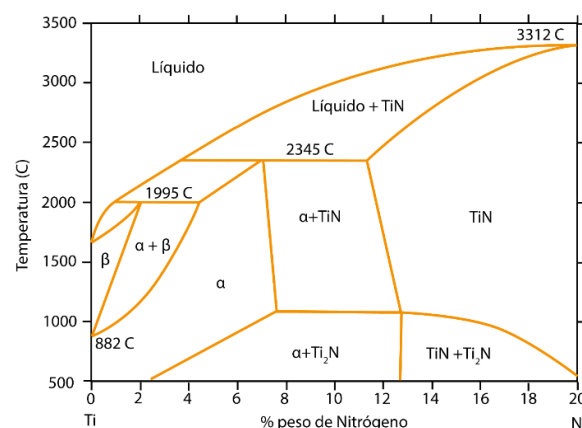
## Introducción

Desde hace algunas décadas, el revestimiento de nitruro de titanio (TiN) se ha consolidado en el ámbito industrial por su alto impacto en ramas de la ingeniería, como la manufactura avanzada. Este material cerámico se adhiere a la superficie de un elemento metálico, formando una película delgada (5–10  $\mu\text{m}$ ) que confiere propiedades tribológicas y químicas mejoradas, al tiempo que conserva intactas las características mecánicas del núcleo. De este modo, el sistema resultante puede considerarse un compuesto funcional, en el que el sustrato aporta la tenacidad y el recubrimiento la dureza y resistencia al desgaste, logrando un equilibrio que mejora el desempeño global del componente.

En la actualidad el TiN se ha consolidado como un recubrimiento utilizado en herramientas de corte para aleaciones de alta dureza. En la tecnología de recubrimientos se han desarrollado materiales avanzados como el TiAlN (Sagás et al., 2011), CrN (Polcar et al., 2009) y el nitruro de boro cúbico (c-BN) (Wang et al., 2018), este último reconocido por su gran dureza y estabilidad térmica en aplicaciones de corte extremo. Aun así, el TiN sigue siendo un recubrimiento de referencia, valorado por su practicidad, versatilidad y equilibrio entre costo y desempeño, además de haber marcado un hito en la ingeniería de superficies moderna (Deng et al., 2020).

El TiN se clasifica como un cerámico técnico de alta resistencia termomecánica, debido a su ordenamiento cristalino cúbico tipo cloruro de sodio (NaCl), en el cual los átomos metálicos y no metálicos se alternan en posiciones octaédricas y cúbicas, formando una red compacta y altamente simétrica (L. Malhotra et al., 1978). Esta misma estructura, característica de los nitruros y carburos de metales de transición como ZrN, HfN, TiC o ZrC, es responsable de su elevada dureza, estabilidad química y resistencia a altas temperaturas, propiedades que hacen del TiN uno de los recubrimientos más eficientes en la ingeniería de superficies. Además, el TiN presenta una conductividad eléctrica moderada, atribuibles a la alta densidad de enlaces Ti–N y a su disposición cristalina. Las películas monofásicas presentan durezas entre 2000 y 2500  $\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}$ , una resistividad eléctrica de 20–30  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , y excelente resistencia a la oxidación y baja difusividad, características que lo hacen útil como barrera térmica y de difusión. Se caracteriza, además, su baja densidad ( $\sim 5.22 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), su alto punto de fusión ( $\sim 2930 \text{ }^\circ\text{C}$ ), y un

coeficiente de fricción que varía entre 0.4–0.9 en seco y 0.1–0.3 bajo lubricación, propiedades que determinan su papel fundamental en sistemas tribológicos sometidos a desgaste severo (Roy, 2013).



*Figura 1. Diagrama de fases del sistema Ti–N, que muestra la región de estabilidad del TiN y la presencia de fases intermedias ( $\text{Ti}_2\text{N}$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ ) en función de la temperatura y el contenido de nitrógeno (Okamoto, 2013). Fuente: Elaboración propia*

El comportamiento termodinámico del sistema Ti–N puede analizarse a partir de su diagrama de fases (ver figura 1), en el cual se identifican las regiones de equilibrio de las fases intermedias, como  $\text{Ti}_2\text{N}$ , así como las soluciones sólidas de titanio correspondientes a las fases  $\alpha$  y  $\beta$ . Destaca especialmente la amplia región de estabilidad del TiN, ubicada en composiciones próximas al 50 % atómico de nitrógeno y a altas temperaturas, lo que evidencia su carácter de compuesto estable y resistente, capaz de preservar sus propiedades estructurales y químicas bajo condiciones extremas de temperatura (QIU et al., 2011).

El TiN se suele aplicar en aleaciones ferrosas y superaleaciones destinadas a herramientas para mecanizado debido a la capacidad de mantener sus propiedades incluso a altas temperaturas. Esta capacidad contribuye de a disminuir el desgaste abrasivo, mejorar la lubricidad y reducir la demanda energética del proceso de corte, lo que se traduce en acabados superficiales de mayor calidad y un aumento sustancial en la vida útil de los componentes recubiertos. (Lang & Yu, 2001). Un ejemplo directo de este impacto industrial son los insertos recubiertos con TiN (ver Figura 2).



*Figura 2. Insertos para mecanizado recubiertos con TiN, ampliamente utilizados en la industria metalmecánica por su alta dureza y resistencia al desgaste. Fuente: Elaboración propia*

El revestimiento de TiN se sintetiza principalmente mediante procesos en fase de vapor, de naturaleza química (CVD) y física (PVD), los cuales difieren en sus mecanismos de deposición, condiciones de proceso y propiedades resultantes. En el CVD, la síntesis del recubrimiento ocurre mediante reacciones químicas entre precursores gaseosos a temperaturas elevadas (850–1100 °C) produciendo recubrimientos compactos, homogéneos y fuertemente adheridos al sustrato. Sin embargo, las condiciones térmicas elevadas del proceso pueden inducir transformaciones metalúrgicas en el material base, como difusión o formación de fases Intermetálicas en la interfaz, lo que restringe su uso en aceros templados y superaleaciones destinadas a herramientas de mecanizado (von Fieandt et al., 2018).

En contraste, los procesos PVD se desarrollan a temperaturas moderadas (200–500 °C), permitiendo preservar el tratamiento térmico de aceros y carburos cementados, además de controlar las propiedades finales del recubrimiento mediante el ajuste de parámetros como el espesor, la morfología y la estequiometría. Se ha demostrado que espesores cercanos a 12  $\mu\text{m}$  ofrecen la mejor resistencia al desgaste, mientras que capas menores a 6  $\mu\text{m}$  presentan baja eficacia frente a la corrosión (Lang & Yu, 2001).

En conclusión, los recubrimientos de TiN mejoran significativamente las propiedades tribomecánicas de las herramientas de corte, aunque la uniformidad y el control de los parámetros de deposición siguen siendo factores determinantes que impulsan la investigación actual (Baptista et al., 2018).

### **Procesos de deposición física de vapor (PVD) aplicados a TiN**

Existen diversos métodos físicos para la formación de recubrimientos delgados en materiales metálicos de ingeniería. Estos procesos implican la atomización del blanco metálico mediante bombardeo iónico, lo que provoca la eyección controlada de átomos o moléculas, que se depositan sobre la superficie del sustrato para formar una película de alta pureza. El control del vacío, la energía de las partículas y la temperatura del sustrato garantizan recubrimientos uniformes, densos y con excelente adherencia, optimizando el desempeño superficial del material base (Baptista et al., 2018).

La deposición física de películas delgadas se realiza en atmósferas de alto vacío, donde el bombardeo iónico del blanco metálico provoca la eyección controlada de átomos que se condensan sobre el sustrato formando una capa de alta pureza. La calidad del recubrimiento depende de las propiedades del blanco y del sustrato, del tratamiento superficial previo y de las condiciones de operación, tales como la presión y tipo de gas, la potencia aplicada, la temperatura y polarización del sustrato, la distancia blanco-sustrato, la velocidad y el tiempo de deposición (Roy, 2013).

Los principales métodos PVD comprenden la evaporación en vacío, la pulverización catódica (sputtering) (Nordin et al., 1999), el revestimiento iónico (ion plating) (Huang et al., 2003), la deposición asistida por haz de iones (IBAD) (Hühne et al., 2011) y la deposición por arco al vacío (Sobol et al., 2011), diferenciándose por el mecanismo de transporte y energía empleado para transferir el material hacia el sustrato. (Pinto et al., 2018).

### **Pulverización catódica (Sputtering)**

Se trata de un proceso de erosión catódica que permite obtener recubrimientos mediante un flujo de iones energéticos, habitualmente de argón, que impacta sobre el blanco metálico liberando átomos que posteriormente son transferidos y condensados sobre el sustrato. Este proceso se desarrolla en una cámara con atmósfera controlada al alto vacío, permite la formación controlada de capas delgadas con elevada pureza y homogeneidad (ver Figura 3). Esta dinámica sinérgica da lugar a recubrimientos densos, estables y firmemente adheridos, capaces de formarse incluso a temperatura ambiente (Liang et al., 2018).

Existen distintas variantes del proceso, entre ellas el sputtering de diodo (Liang et al., 2018), de radiofrecuencia (RF) (Logan, 1990). El sputtering magnetrón desbalanceado (Mayrhofer et al., 2002) es

uno de los más utilizados por su eficiencia y uniformidad, logrando altas tasas de deposición y buena densidad de película.

El rendimiento de pulverización depende principalmente de la energía iónica, la presión del gas (1–10 mTorr), la potencia aplicada y la temperatura del sustrato. Al aumentar la energía de los iones, se incrementa el número de átomos expulsados del blanco, siendo más eficiente en metales de baja masa o punto de fusión y menor en materiales refractarios. Este comportamiento está gobernado por la transferencia de momento entre los iones incidentes y los átomos del blanco, lo que influye directamente en la tasa de deposición, la adherencia y la densidad del recubrimiento (Ranjan et al., 2001). La Figura 4 muestra la variación teórica del rendimiento de pulverización con la energía de los iones de argón, donde se aprecia que metales como Cd, Pb o Zn presentan los valores más altos, mientras que materiales refractarios como el carbono y el titanio muestran rendimientos considerablemente menores, evidenciando la influencia de la energía de enlace superficial y la masa atómica en la eficiencia del proceso (Sproul et al., 2005).

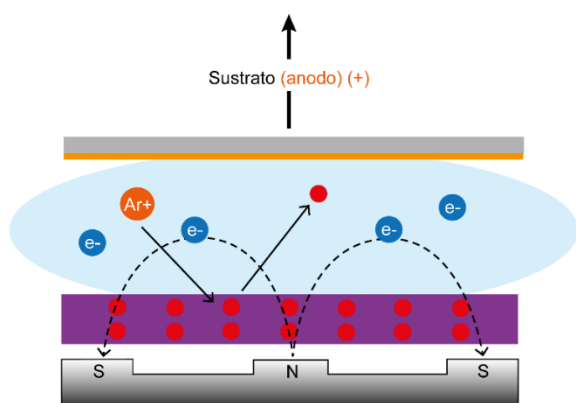


Figura 3. Esquema de la pulverización catódica (sputtering) mostrando la interacción de iones  $Ar^+$  con el blanco y la transferencia de átomos al sustrato. Fuente: Elaboración propia

### Ion plating e implantación asistida por plasma

El fundamento de esta técnica acopla la vaporización del material con un proceso concurrente de bombardeo iónico, lo que incrementa la energía superficial y favorece una mayor migración de los átomos. Este proceso mejora la adherencia del revestimiento, reduce la porosidad y permite obtener películas densas y homogéneas incluso sobre superficies con geometrías complejas (Huang et al., 2000). El bombardeo iónico favorece un crecimiento ordenado y una alineación cristalográfica definida, dando

lugar a recubrimientos compactos y de baja resistividad, como los obtenidos mediante deposición asistida por haz iónico (IBAD) (Iwata et al., 2003).

Por la naturaleza del proceso los iones energéticos actúan limpiando la superficie del sustrato eliminando contaminantes y óxidos, al tiempo que incrementan la densidad de sitios de nucleación y mejoran la difusión atómica superficial, lo que conduce a la formación de recubrimientos densos con tensiones residuales controladas y mejor integridad estructural. (ver figura 5) (Laing et al., 1999). Los estudios han mostrado que la naturaleza del plasma y la energía de bombardeo influyen directamente en las tensiones residuales y la anisotropía del esfuerzo (Elstner et al., 1996).

La IBAD permite obtener películas estables y de alto desempeño, donde el control de la energía de bombardeo define la textura cristalina, las tensiones internas y las propiedades dinámicas del recubrimiento. Los estudios muestran que los recubrimientos de TiN producidos por AIP presentan una orientación (111) dominante, microestructura densa y una mayor capacidad de amortiguamiento mecánico, vinculada a la energía del arco y la morfología superficial (Du et al., 2012).

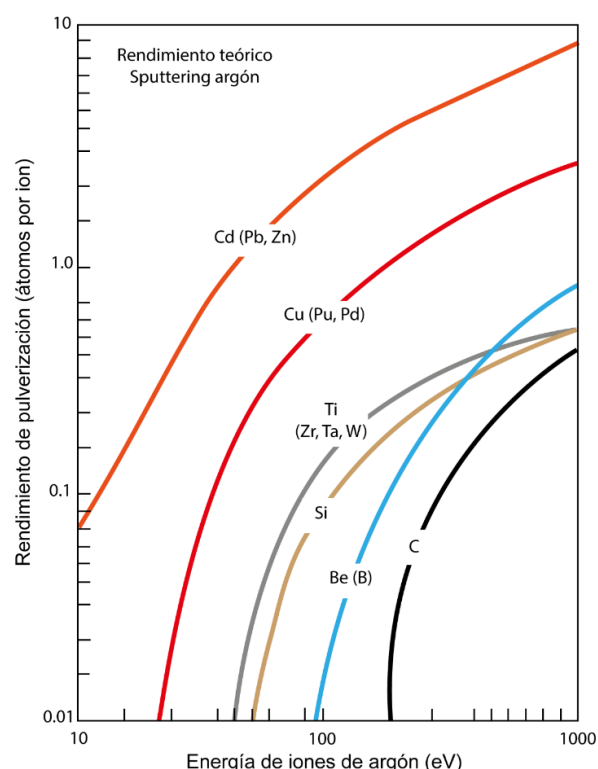


Figura 4. Rendimiento de pulverización teórico en función de la energía de iones de argón para distintos metales (Cd, Cu, Ti, Si, C). Fuente: Elaboración propia



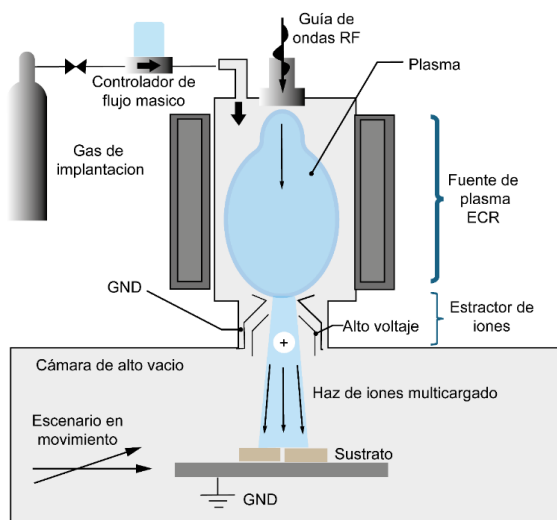


Figura 5. Esquema de un sistema de ion plating asistido por plasma ECR, con control de flujo de gas, fuente de plasma y extracción iónica dirigida al sustrato. Fuente: Elaboración propia

### Deposición asistida por haz de iones (IBAD)

En el proceso IBAD (Ion Beam Assisted Deposition), las especies provenientes de la evaporación son impactadas de manera simultánea por un haz iónico, lo que favorece una mayor adherencia, compactación y control de las tensiones internas del recubrimiento (Hirvonen, 2003). La energía del haz, que suele variar entre 50 y 1000 eV, determina la textura y morfología de la película, posibilitando la síntesis de nitruros y óxidos con microestructuras densas y estables (Dong & Srolovitz, 1999).

El bombardeo iónico continuo genera desplazamientos atómicos que densifican la película y eliminan vacíos, mientras que el ajuste del flujo de iones reactivos regula la estequiometría del compuesto (Guglya & Lyubchenko, 2018). Las películas IBAD presentan alta adherencia, baja tensión y excelente uniformidad superficial, con microestructuras nanocristalinas o amorfas según los parámetros del proceso (Zhang et al., 2003)

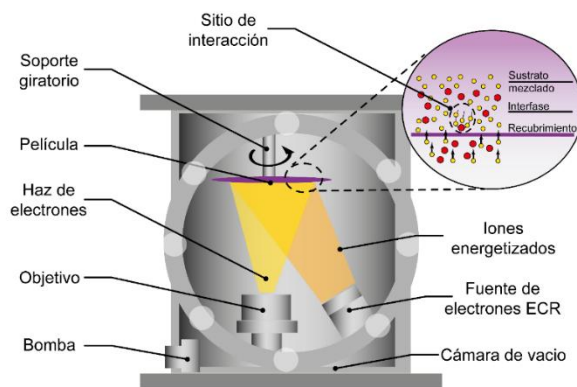


Figura 6. Esquema de deposición asistida por haz de iones (IBAD), mostrando el aporte simultáneo de material evaporado y el bombardeo con iones energizados sobre el sustrato. Fuente: Elaboración propia

### Evaporación en vacío

El principio de esta técnica consiste en atomizar el material objetivo mediante una fuente térmica para luego condensar los átomos sobre el sustrato en un entorno de vacío elevado ( $10^{-5}$ – $10^{-9}$  Torr), evitando colisiones con moléculas residuales y garantizando una deposición uniforme y de alta pureza. La evaporación térmica en ultra-alto vacío emplea fuentes resistivas o de haz de electrones para alcanzar la temperatura requerida, lo que permite un control preciso de la tasa de deposición, el espesor y la homogeneidad de la película. Factores como la distancia entre la fuente y el sustrato, la limpieza del sistema y la estabilidad del vacío influyen directamente en la calidad del recubrimiento. Este método se utiliza ampliamente para la fabricación de películas metálicas y auto-soportadas, por su baja contaminación, alta pureza y excelente control del proceso (ver Figura 6) (Colligon & Vishnyakov, 2020).

Entre las características más favorables de esta técnica destacan la composición libre de impurezas, la deposición direccional y el control preciso de la tasa de crecimiento. Este proceso permite que las partículas de vapor se depositen directamente sobre el sustrato, formando capas uniformes y compactas sin colisiones con moléculas residuales. Su simplicidad y bajo costo la convierten en una de las técnicas más utilizadas dentro de los métodos PVD. Además, posibilita la obtención de películas metálicas, cerámicas o compuestas sobre distintos materiales, con excelentes propiedades de adherencia y estabilidad estructural. Por estas razones, se emplea ampliamente en la fabricación de recubrimientos ópticos, electrónicos y decorativos, así como en componentes industriales que requieren superficies de alta pureza y control dimensional preciso (Shahidi et al., 2015).

El proceso requiere un control preciso de la temperatura del sustrato, normalmente cercana a 500 °C, así como de la tasa de evaporación, la cual puede monitorizarse mediante un cristal de cuarzo. Durante la vaporización de aleaciones, el comportamiento del sistema obedece a la Ley de Raoult, según la cual los elementos con mayor presión de vapor se evaporan con mayor rapidez, lo que puede modificar la composición química del recubrimiento si no se ajustan adecuadamente las condiciones de deposición (Nimalan & Begam, 2024).

El proceso requiere un control preciso de la temperatura del sustrato (alrededor de 500 °C) y de la tasa de evaporación, normalmente monitorizada con un cristal de cuarzo. Durante la vaporización de aleaciones, los elementos con mayor presión de vapor se evaporan más rápidamente conforme a la Ley de Raoult, pudiendo alterar la composición del recubrimiento. Para reducir la pérdida de componentes volátiles, se aplica la evaporación reactiva, donde un gas como oxígeno o nitrógeno reacciona con el material en fase de vapor, formando compuestos como TiN o TiO<sub>2</sub> con microestructura estable y composición controlada (Nguyen, 2010). El espesor de la película y su uniformidad dependen de la geometría de la fuente y la orientación del sustrato (Mattox, 2010).

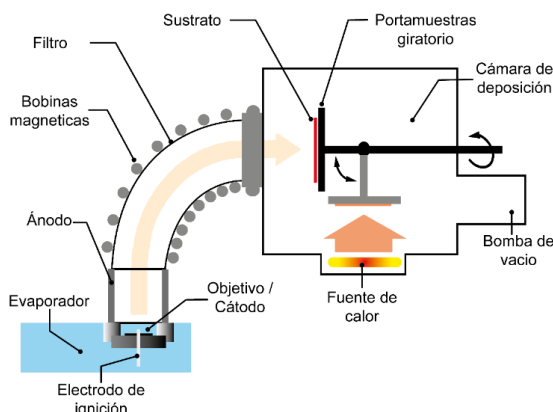


Figura 7. Esquema de evaporación en vacío para deposición de TiN, con sistema de evaporador, bobinas magnéticas, filtro y portamuestras giratorio. Fuente: Elaboración propia

A pesar de que el nitrato de titanio (TiN) ha sido objeto de numerosos estudios experimentales orientados a su síntesis mediante diversas técnicas de deposición, así como al análisis de su microestructura, propiedades mecánicas, tribológicas y de resistencia a la corrosión y a altas temperaturas, el conocimiento generado permanece disperso en diferentes áreas del saber. Los resultados reportados en la literatura, aunque valiosos, se encuentran fragmentados en campos como la ciencia de materiales, la ingeniería mecánica, la física aplicada y la

microelectrónica, lo que dificulta construir una visión unificada sobre la evolución de este recubrimiento en el ámbito académico y tecnológico. En este contexto, se vuelve fundamental la aplicación de un análisis bibliométrico que permita sistematizar la producción científica existente y revelar las dinámicas que han impulsado el desarrollo del TiN a nivel global. Este enfoque posibilita identificar tendencias de investigación, autores e instituciones de mayor relevancia, así como las áreas de aplicación que han cobrado mayor protagonismo en las últimas décadas. Al ofrecer una perspectiva integral que complementa la evidencia experimental, el análisis bibliométrico contribuye a comprender el papel estratégico del TiN en la consolidación de tecnologías de manufactura avanzada y en la generación de recubrimientos funcionales con alto impacto en la industria y en la investigación científica contemporánea.

## Metodología

En esta sección se describe la metodología empleada para la adquisición y el procesamiento de los metadatos de las publicaciones relacionadas con el nitrato de titanio (TiN) registradas en la base de datos *Elsevier Scopus*. Para el análisis se utilizaron las herramientas Bibliometrix y su interfaz Biblioshiny, desarrolladas en lenguaje R, que permiten realizar estudios bibliométricos avanzados. El propósito de este enfoque es examinar la evolución histórica de la producción científica, identificar las principales tendencias de investigación y mapear las redes de colaboración que han acompañado el desarrollo de este recubrimiento cerámico en los ámbitos científico y tecnológico.

La estrategia metodológica se organizó en cuatro fases principales:

1. **Definición del enfoque temático.** Se delimitó el campo de investigación en torno al TiN como recubrimiento cerámico de aplicación tecnológica en la ingeniería de superficies, considerando estudios relacionados con su síntesis, microestructura, propiedades tribológicas y aplicaciones industriales.
2. **Búsqueda y selección de documentos.** Se construyó un corpus bibliográfico a partir de la base de datos Scopus, aplicando como criterio de búsqueda el término "*titanium nitride*" en títulos, resúmenes o palabras clave. La consulta se restringió a documentos publicados entre 1979 y 2025, en idioma inglés y vinculados con las áreas de ciencia de materiales, física, química aplicada e ingeniería. Se excluyeron áreas no relacionadas como medicina, biología molecular y ciencias sociales. Como resultado,

se obtuvo un conjunto final de 1458 documentos científicos, distribuidos en 349 fuentes (revistas, libros y actas de congreso).

3. **Extracción y análisis de datos.** Con el apoyo de Bibliometrix, se calcularon indicadores clave: tasa de crecimiento anual (8.1 %), edad promedio de los documentos (12.3 años), promedio de citas por publicación (26.88) y patrones de colaboración académica, que reflejan un promedio de 4.61 coautores por documento y una coautoría internacional del 22.57 %.
4. **Evaluación de resultados y tendencias.** Finalmente, se interpretaron los indicadores de producción científica, incluyendo la distribución por tipo de documento (1221 artículos, 201 ponencias en congresos y 22 revisiones), así como la evolución temporal de las publicaciones y las dinámicas de colaboración entre autores e instituciones. De manera complementaria, el análisis temático permitió reconocer líneas de investigación consolidadas en síntesis y caracterización de recubrimientos de TiN, así como nuevas áreas de aplicación emergentes relacionadas con manufactura avanzada, tribología y sostenibilidad.

En síntesis, la metodología aplicada integra el análisis cuantitativo de indicadores bibliométricos con la exploración cualitativa de patrones semánticos, lo que permite ofrecer una visión integral del estado y evolución de la investigación sobre TiN en el periodo 1979–2025.

### Discusión y resultados

El análisis bibliométrico identificó 1458 documentos publicados entre 1979 y 2025, con un crecimiento anual de 8.1 %, lo que confirma la expansión sostenida del campo. La literatura presenta una edad media de 12.3 años y se distribuye en 349 fuentes, alcanzando en promedio 26.88 citas por documento, lo que evidencia su alta relevancia académica. En la Tabla 1 se presentan el resumen los resultados obtenidos mediante el análisis bibliométrico.

En el plano temático, se registraron 7345 Keywords Plus y 2872 palabras clave de autor, mostrando la diversidad de tópicos investigados. La autoría involucró a 4361 investigadores, con solo 53 autores individuales, lo que resalta el predominio del trabajo colaborativo (4.61 coautores por documento en promedio), mientras que el 22.57 % de las publicaciones fueron fruto de colaboraciones internacionales.

En cuanto al tipo de producción, predominaron los

artículos de investigación (84 %), seguidos por ponencias en congresos (13.7 %) y un número reducido de revisiones (1.6 %). Este último dato sugiere una oportunidad para desarrollar estudios de síntesis y estado del arte con mayor potencial de impacto.

Tabla 1 Resumen de resultados. Fuente: Elaboración propia

Indicador	Valor
Periodo analizado	1979–2025
Fuentes (revistas, libros, etc.)	349
Documentos	1458
Crecimiento anual promedio	8.1 %
Edad promedio de documentos	12.3 años
Citas promedio por documento	26.88
Keywords Plus (ID)	7345
Palabras clave de autor (DE)	2872
Total de autores	4361
Autores individuales	53
Documentos de autor único	55
Coautores por documento	4.61
Colaboración internacional	22.57 %
Artículos	1221
Ponencias en congresos	201
Revisiones	23
Otros (duplicados en metadatos)	12

En esta sección se presentan los principales indicadores bibliométricos obtenidos a partir del análisis de los documentos publicados en el periodo considerado. Estos resultados permiten caracterizar la producción científica en términos de volumen, fuentes de publicación, citación y colaboración entre autores. Asimismo, se muestran las

tendencias temporales de crecimiento y el impacto académico asociado, lo que ofrece una visión integral del desarrollo del campo de estudio.

La Figura 8, muestra la evolución conjunta de la producción científica anual y el promedio de citas por año entre 1979 y 2025. La producción exhibe un crecimiento sostenido, con un incremento notable a partir de 2008 y máximos cercanos a 100 artículos anuales en 2018–2022. La caída en 2024–2025 se atribuye a la

incompletitud de registros recientes. En paralelo, las citas presentan picos aislados (1986, 2003) asociados a trabajos de alto impacto, mientras que en las últimas dos décadas se mantienen en un rango moderado (1–3 citas promedio). En conjunto, la Figura 8, refleja un campo en expansión cuantitativa, acompañado de un impacto estable, con oportunidades de elevar la visibilidad mediante revisiones de síntesis.

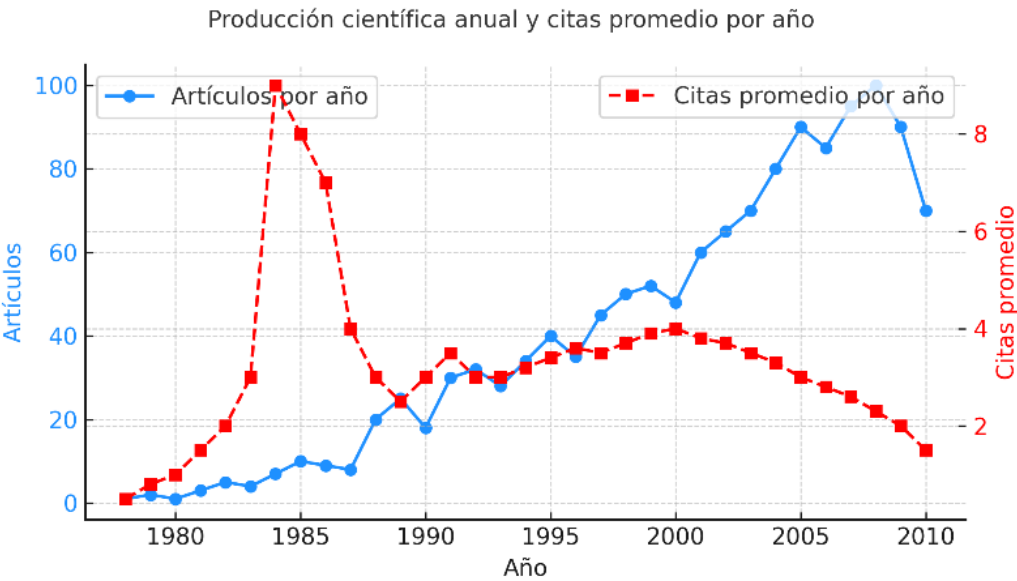


Figura 8. Evolución de la producción científica anual (línea azul, eje izquierdo) y del promedio de citas por año (línea roja, eje derecho) en el periodo 1979–2025. Fuente: Elaboración propia

El análisis de las fuentes de publicación constituye un indicador clave para determinar los canales de difusión predominantes y la especialización temática de la investigación en el área. Este enfoque permite identificar las revistas que concentran la mayor productividad y, en consecuencia, los espacios de mayor visibilidad e impacto para la comunidad científica.

La Figura 9, muestra las revistas con mayor número de documentos publicados en el periodo estudiado. *Materials* lidera con 224 artículos, consolidándose como la principal fuente de referencia. Le siguen *Metals* (81) y *Ceramics International* (49), mientras que títulos especializados como *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* (42) y *Surface & Coatings Technology* (40) ocupan posiciones destacadas. El conjunto de las diez revistas principales evidencia una clara orientación hacia la ciencia de materiales, recubrimientos, cerámicos y manufactura avanzada, confirmando el carácter interdisciplinario y aplicado de la producción científica en este campo.

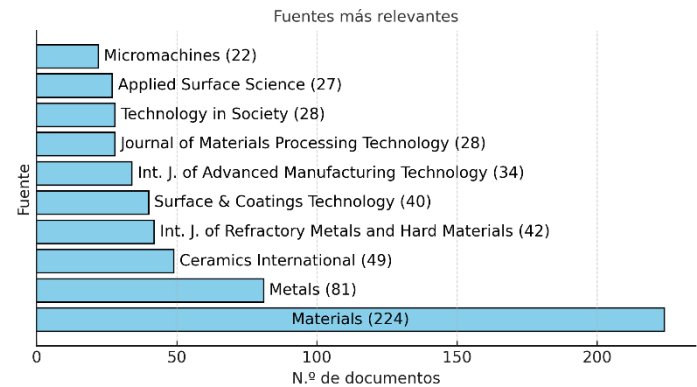


Figure 9. Revistas más relevantes en el periodo 1979–2025, clasificadas por número de documentos publicados. Fuente: Elaboración propia

La Figura 10, muestra la aplicación de la Ley de Bradford al conjunto de publicaciones analizadas. Se observa que un reducido grupo de revistas conforma el núcleo de



difusión del tema, concentrando la mayor parte de los artículos. Entre estas destacan Surface Coat. Technol. (224 artículos), Wear (81) y Ceram. Int. (49), seguidas por títulos especializados como Int. J. Refract. Met. Hard Mater. (42), Thin Solid Films (40), Int. J. Adv. Manuf. Technol. (34) y J. Mater. Process. Technol. (28).

la producción científica se concentra en pocas fuentes altamente especializadas, mientras que la larga cola refleja una dispersión en múltiples revistas periféricas con baja productividad individual. Este patrón es consistente con la distribución de Bradford, en la que el núcleo actúa como canal principal de visibilidad e impacto académico.

La pendiente pronunciada en la zona inicial confirma que

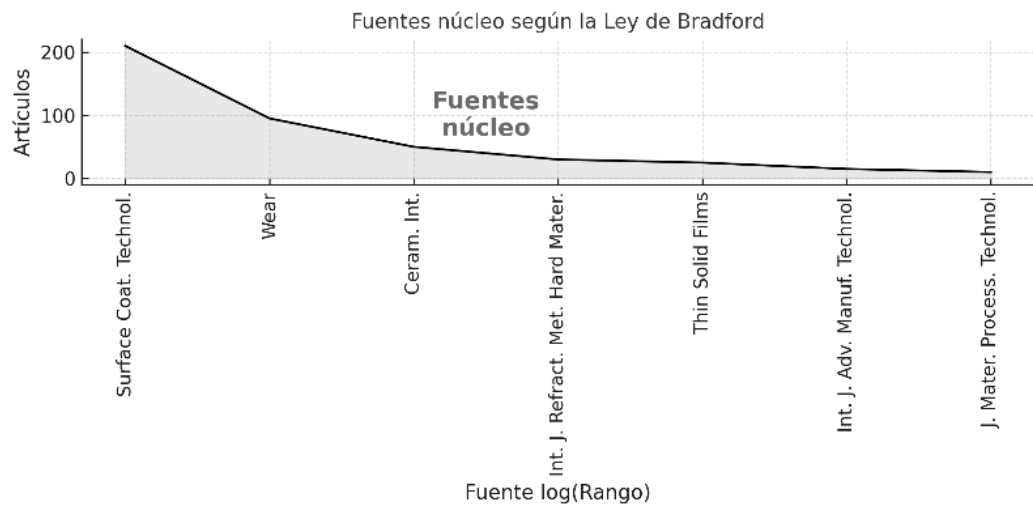


Figura 10. Fuentes núcleo según la Ley de Bradford, destacando las revistas con mayor productividad en el tema. Fuente: Elaboración propia

La gráfica de barras evidencia la concentración de la productividad científica en un núcleo de investigadores clave dentro del campo. El liderazgo lo ostenta Wiecek M.A. (23 artículos) y Mimura C. (21), seguidos por Celik I. (18) y Cetin M. (17), lo que configura un grupo de alta productividad. Autores como Campos-Silva I. (16), Li J. y Keddham M. (15 cada uno) mantienen una contribución significativa, mientras que Milosevic M., Wang C. y Zhang Q. (14) completan el conjunto de mayor impacto. El rango estrecho entre los valores máximo y mínimo del top (23–14 documentos) sugiere una distribución relativamente homogénea de la producción, característica de un campo con colaboración activa y sostenida, donde varios autores desempeñan un rol protagónico en la generación de conocimiento y en el establecimiento de redes de investigación internacionales.

La evolución de la producción científica muestra que Surface and Coatings Technology ha sido la revista líder en publicaciones relacionadas con el tema, con un crecimiento acelerado desde principios de los años noventa y una clara consolidación hasta 2025. En contraste, Wear y Thin Solid Films mantienen un crecimiento estable pero más moderado. Por otro lado, Ceramics International y el International Journal of Refractory Metals and Hard Materials presentan un crecimiento más tardío, especialmente después de 2010, lo que indica una diversificación reciente en las fuentes de publicación. Esta tendencia refleja cómo la investigación en el área se ha expandido hacia diferentes revistas especializadas, aunque la mayor parte de la producción sigue concentrada en una fuente principal.

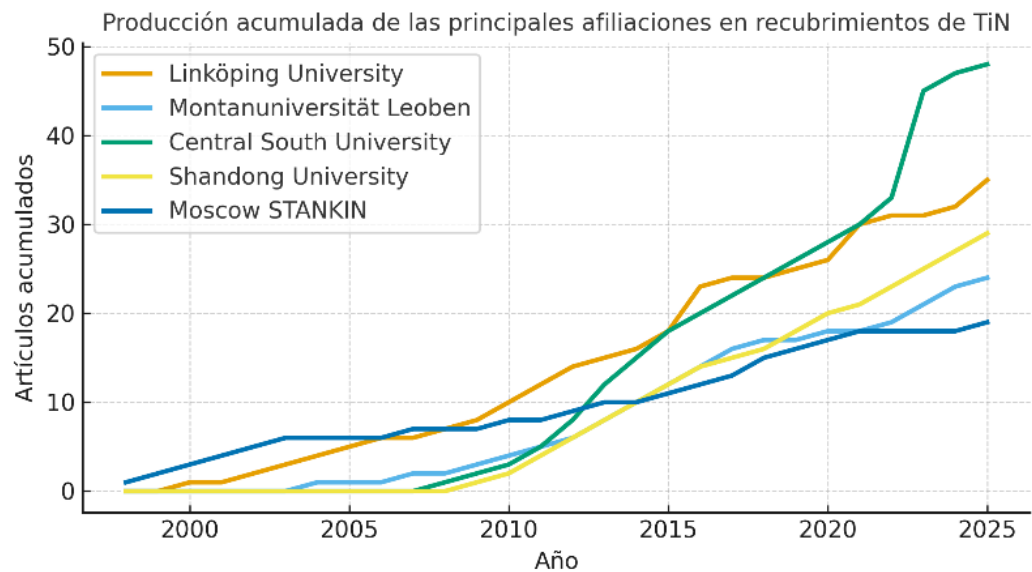


Figura 11. Producción acumulada de artículos (1979–2025) en las principales revistas, con dominio de Surface and Coatings Technology y crecimiento reciente en Ceramics International y International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Fuente: Elaboración propia

El análisis de los autores más relevantes evidencia que Wiecek M.A. y Mimura C. destacan como líderes en producción científica, con 23 y 21 publicaciones respectivamente, consolidándose como referentes en el campo. Les siguen Celik I. (18) y Cetin M. (17), quienes también muestran una notable contribución. En un nivel intermedio se encuentran Campos-Silva I., Li J. y Keddám M., con entre 15 y 16 artículos, reflejando una actividad constante en la investigación. Finalmente, Milosevic M., Wang C. y Zhang Q. completan el grupo con 14 documentos cada uno. Esta distribución evidencia la presencia de un núcleo de investigadores consolidados y una base amplia de colaboradores que sostienen el crecimiento de la producción científica en el área.

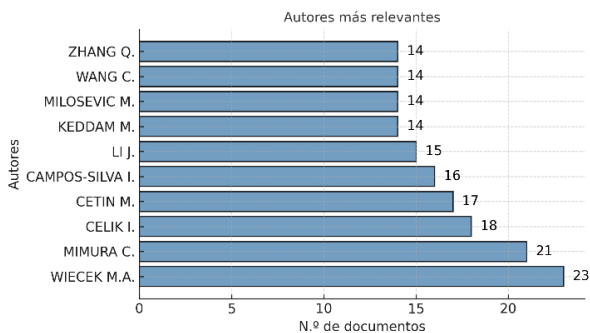


Figura 11. Autores más relevantes por número de publicaciones. Fuente: Elaboración propia

La Figura 12, muestra la producción científica de los autores más influyentes en el estudio de recubrimientos duros y tribología a lo largo del tiempo. En el eje horizontal se representan los años de publicación y en el eje vertical se listan los autores analizados. El tamaño de las burbujas corresponde al número de artículos publicados por cada autor en un año específico, mientras que la escala de color refleja el promedio de citas anuales, lo cual permite identificar tanto la productividad como el impacto académico de cada contribución.

Se aprecia que autores como Vereschaka A y Milovich F presentan una intensa actividad en los últimos años, con varias publicaciones anuales de relevancia. Por su parte, Mayrhofer PH y Mitterer C concentran aportaciones destacadas en periodos anteriores, manteniendo un rol fundamental en el desarrollo del campo. Asimismo, Zhang S y Chen L destacan por una trayectoria prolongada, con contribuciones desde los años noventa y repuntes recientes. En conjunto, la distribución temporal refleja un incremento sostenido de la producción y un crecimiento del impacto académico entre 2018 y 2022, evidenciando el auge de la investigación en esta área.

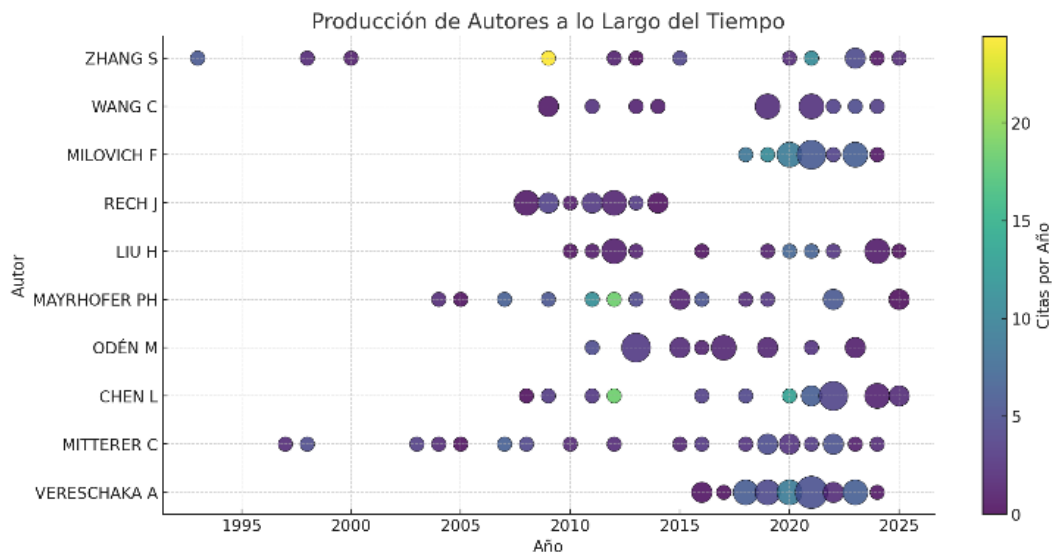


Figura 12. Producción de autores en recubrimientos de TiN a lo largo del tiempo. El tamaño de las burbujas indica el número de publicaciones y el color el promedio de citas por año. Fuente: Elaboración propia

La Figura 13, muestra la distribución de productividad de autores en el tema de recubrimientos de TiN, representada según la Ley de Lotka. En el eje horizontal se indican los documentos escritos y en el eje vertical el porcentaje de autores correspondiente. La curva sólida refleja los datos empíricos obtenidos de la base analizada, mientras que la línea discontinua corresponde a la distribución teórica prevista por el modelo de Lotka.

La Figura 14, evidencia que la gran mayoría de los investigadores ( $\approx 75\%$ ) ha publicado únicamente un

documento, mientras que una proporción decreciente de autores concentra entre 2 y 5 publicaciones. Solo un número reducido de especialistas alcanza una productividad superior a las 10 contribuciones.

Este comportamiento confirma el patrón clásico descrito por Lotka: un núcleo pequeño de autores prolíficos sostiene gran parte de la producción científica, mientras que la mayoría participa con aportaciones esporádicas.

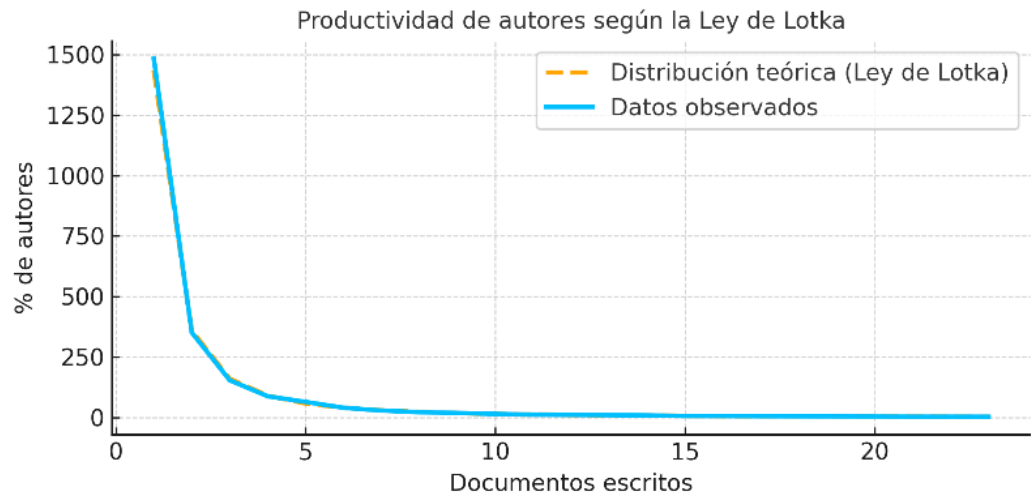


Figura 13. Distribución de productividad de autores en recubrimientos de TiN según la Ley de Lotka. La curva sólida representa la distribución empírica y la discontinua la distribución teórica. Fuente: Elaboración propia

La gráfica muestra que la producción científica en recubrimientos de TiN está liderada por Montanuniversität Leoben (47 artículos) y Linköping University (34), seguidas por Moscow STANKIN (26) y las

universidades chinas Central South y Shandong (24 cada una). En un nivel intermedio se ubican Uppsala University (22) y un grupo de instituciones con 13–14 artículos, entre ellas Tsinghua University y MISIS.

Estos resultados evidencian una alta concentración de la investigación en centros europeos y chinos, lo que refleja su papel estratégico en el desarrollo de recubrimientos avanzados.

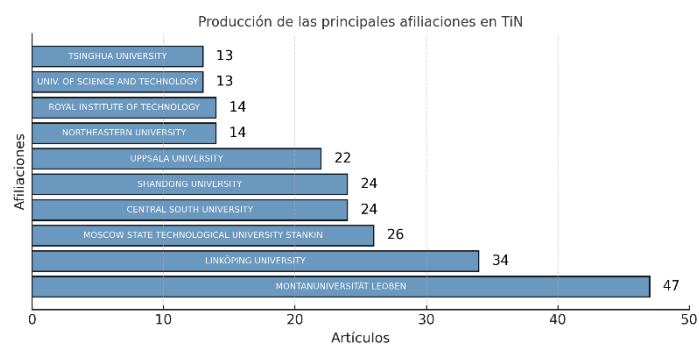


Figura 14. Principales afiliaciones con publicaciones sobre recubrimientos de TiN, donde destacan Montanuniversität Leoben y Linköping University como líderes en productividad científica. Fuente: Elaboración propia

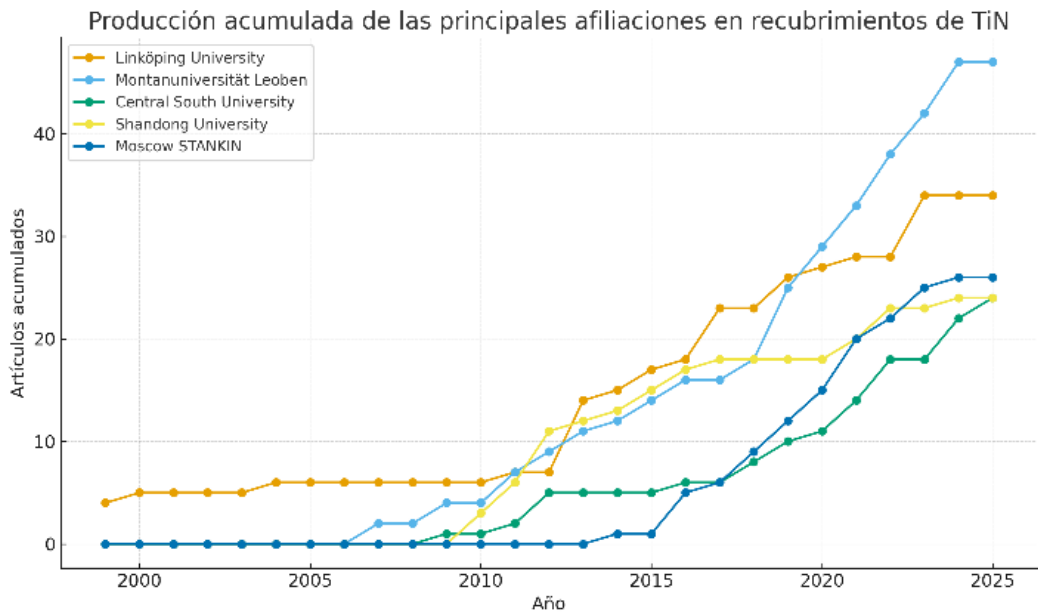


Figura 15. Producción acumulada de las principales instituciones en recubrimientos de TiN (2000–2025). Fuente: Elaboración propia

La Figura 15, muestra la evolución de la producción acumulada de artículos sobre recubrimientos de TiN en las principales afiliaciones entre 1999 y 2025. Se observa que Montanuniversität Leoben lidera con 47 publicaciones, seguida de Linköping University con 34, ambas con un crecimiento sostenido a partir de mediados de la década del 2000 y un marcado incremento después de 2015. En contraste, las universidades chinas Central South University y Shandong University presentan una

producción más reciente, pero en ascenso constante, alcanzando 24 artículos cada una en 2025. Por su parte, Moscow STANKIN muestra un aumento significativo desde 2014, llegando a 26 publicaciones en el mismo año. Estos resultados reflejan el papel de Europa como núcleo histórico de investigación y el ascenso acelerado de China y Rusia como actores clave en la producción científica sobre recubrimientos de TiN.

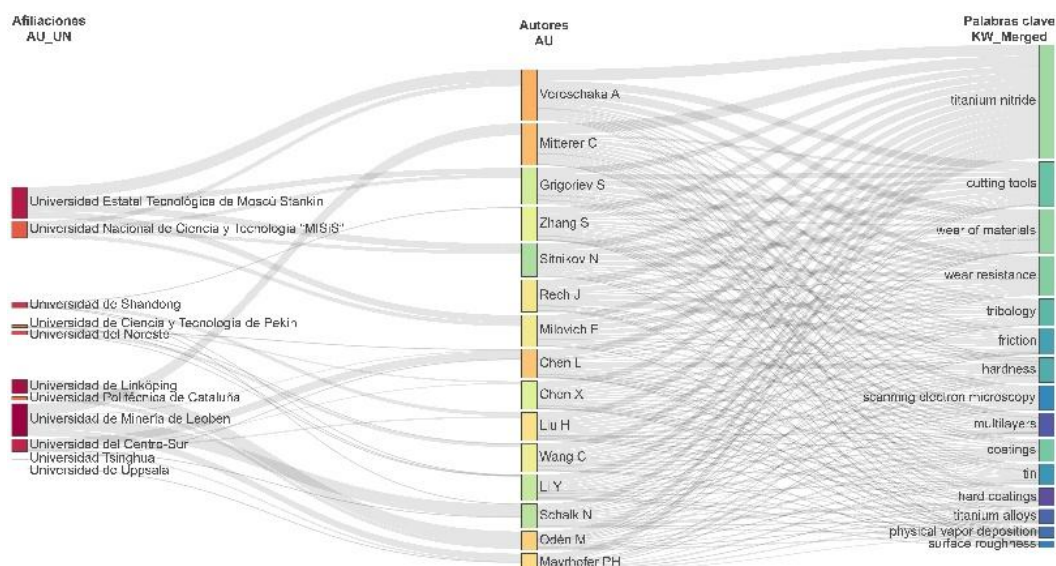


Figura 16. Red de colaboración entre afiliaciones, autores y palabras clave en estudios sobre recubrimientos de TiN.  
Fuente: Elaboración propia

El diagrama de Sankey muestra la interrelación entre instituciones, autores y palabras clave en la producción científica sobre recubrimientos de nitruro de titanio (TiN). Se observa que las universidades de Rusia (Moscú Stankin, MISiS), China (Shandong, Ciencia y Tecnología de Pekín, Noreste, Centro-Sur, Tsinghua), y Europa (Linköping, Politécnica de Cataluña, Minería de Leoben, Uppsala) destacan como los principales centros de investigación en este campo.

Entre los autores más influyentes se encuentran Vereschaka A, Mitterer C, Grigoriev S, Zhang S y Mayrhofer PH, quienes mantienen múltiples conexiones tanto con instituciones como con temáticas clave, lo que evidencia su papel central en las redes de colaboración académica.

En cuanto a las palabras clave, resaltan titanium nitride, cutting tools, wear resistance, tribology, hardness, coatings y physical vapor deposition, lo que refleja una clara orientación hacia el desarrollo y aplicación de recubrimientos duros en herramientas de corte y la evaluación de sus propiedades tribológicas (desgaste, fricción, dureza y rugosidad superficial).

En conjunto, la Figura 16, pone de manifiesto que la investigación en TiN se ha consolidado como un área estratégica dentro de la ingeniería de superficies, con una fuerte vinculación entre instituciones europeas y asiáticas, y un enfoque común en mejorar el rendimiento de materiales y recubrimientos para aplicaciones industriales.

## Conclusiones

El presente análisis bibliométrico permitió sistematizar la evolución de la investigación sobre recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) entre 1979 y 2025, evidenciando un crecimiento sostenido de la producción científica con una tasa anual promedio del 8.1 %. La mayor parte de las contribuciones provienen de artículos de investigación, lo que refleja el carácter experimental y aplicado de este campo, mientras que el reducido número de revisiones sugiere un área de oportunidad para generar estudios de síntesis con mayor impacto.

Se identificaron instituciones líderes como Montanuniversität Leoben y Linköping University, junto con un ascenso progresivo de universidades chinas y rusas, lo que confirma la internacionalización de la investigación en TiN. En cuanto a la autoría, predomina el trabajo colaborativo con redes activas y una tasa de colaboración internacional del 22.57 %, indicador de un campo dinámico y globalizado.

El análisis temático reveló líneas consolidadas en la síntesis y caracterización de recubrimientos, así como tendencias emergentes en tribología, manufactura avanzada y sostenibilidad, confirmando que el TiN mantiene un papel estratégico en la ingeniería de superficies. En conjunto, estos hallazgos permiten comprender las dinámicas que han impulsado el desarrollo de este recubrimiento y orientan futuras investigaciones hacia la optimización de sus propiedades y aplicaciones industriales.



## Referencias

- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>
- Colligon, J., & Vishnyakov, V. (2020). Thin films: Sputtering, PVD methods, and Applications. *Surface and Interface Science: Volume 9: Applications of Surface Science I*, 9, 1–55.
- Deng, Y., Chen, W., Li, B., Wang, C., Kuang, T., & Li, Y. (2020). Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. *Ceramics International*, 46(11), 18373–18390.
- Dong, L., & Srolovitz, D. J. (1999). Mechanism of texture development in ion-beam-assisted deposition. *Applied physics letters*, 75(4), 584–586.
- Du, G. Y., Tan, Z., Liu, K., Chai, H., & Ba, D. C. (2012). Research on Damping Properties of TiN Coating Prepared with Arc Ion Plating. *Applied Mechanics and Materials*, 184–185, 1167–1170. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.1167>
- Elstner, F., Gautier, C., Moussaoui, H., Piot, O., & Machet, J. (1996). A comparative study of structure and residual stress in chromium nitride films deposited by vacuum arc evaporation, ion plating, and DC magnetron sputtering. *physica status solidi (a)*, 158(2), 505–521.
- Guglya, A., & Lyubchenko, E. (2018). Chapter 4—Ion-beam-assisted deposition of thin films. En A. Barhoum & A. S. H. Makhoulf (Eds.), *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures* (pp. 95–119). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51254-1.00004-X>
- Hirvonen, J. K. (2003). Ion beam assisted deposition. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 792, R12-5.
- Huang, J.-H., Lin, C.-H., Ma, C.-H., & Chen, H. (2000). Low energy ion beam assisted deposition of TiN thin films on silicon. *Scripta Materialia*, 42(6), 573–579. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00393-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00393-0)
- Huang, M., Lin, G., Zhao, Y., Sun, C., Wen, L., & Dong, C. (2003). Macro-particle reduction mechanism in biased arc ion plating of TiN. *Surface and Coatings Technology*, 176(1), 109–114.
- Hühne, R., Gärtner, R., Oswald, S., Schultz, L., & Holzapfel, B. (2011). Coated conductor architectures based on IBAD-TiN for high-Jc YBCO films. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 471(21–22), 966–969.
- Iwata, K., Sakemi, T., Yamada, A., Fons, P., Awai, K., Yamamoto, T., Matsubara, M., Tampo, H., & Niki, S. (2003). Growth and electrical properties of ZnO thin films deposited by novel ion plating method. *Thin Solid Films*, 445(2), 274–277.
- L. Malhotra, G., K. Sharma, S., Choudhuri, S., & K. Pal, A. (1978). Nucleation, Growth and Microstructure of Vapour Deposited Tin Film on NaCl Single Crystal Substrate. *Journal of the Physical Society of Japan*, 45(3), 930–935. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.45.930>
- Laing, K., Hampshire, J., Teer, D., & Chester, G. (1999). The effect of ion current density on the adhesion and structure of coatings deposited by magnetron sputter ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 112(1–3), 177–180.
- Lang, F., & Yu, Z. (2001). The corrosion resistance and wear resistance of thick TiN coatings deposited by arc ion plating. *Surface and Coatings Technology*, 145(1), 80–87. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01284-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01284-1)
- Liang, W., Ling, Y., Liu, K., Hu, Y., Yin, A., Zhu, F., Chen, L., & Zhang, Z. (2018). Corrosion resistance and mechanism of CeN, TiN and CeN/TiN bilayer composite film deposited by dual ion beam sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 335, 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.12.033>
- Logan, J. S. (1990). RF diode sputtering. *Thin solid films*, 188(2), 307–321.
- Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- Mayrhofer, P., Kunc, F., Musil, J., & Mitterer, C. (2002). A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings. *Thin solid films*, 415(1–2), 151–159.
- Nguyen, C. L. (2010). Surface properties and finishing of aluminium casting alloys.
- Nimalan, T., & Begam, M. (2024). Physical and chemical methods: A review on the analysis of deposition parameters of thin film preparation methods. *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec.*, 13, 59–66.
- Nordin, M., Larsson, M., & Hogmark, S. (1999). Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN. *Wear*, 232(2), 221–225.
- Okamoto, H. (2013). N-Ti (Nitrogen-Titanium). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 34(2), 151–152. <https://doi.org/10.1007/s11669-012-0153-6>
- Pinto, G., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Baptista, A., & Fernandes, L. (2018). A critical review on the numerical simulation related to Physical Vapour Deposition. 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USA Global Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity, 17, 860–869. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.138>
- Polcar, T., Martinez, R., Vitù, T., Kopecký, L., Rodriguez, R., & Cavaleiro, A. (2009). High temperature tribology of CrN and multilayered Cr/CrN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 203(20), 3254–3259. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.04.005>
- QIU, A., LIU, L., PANG, W., LU, X., & LI, C. (2011). Calculation of phase diagram of Ti-Ni-O system and application to deoxidation of TiNi alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(8), 1808–1816. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60935-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60935-7)
- Ranjan, R., Allain, J. P., Hendricks, M. R., & Ruzic, D. N. (2001). Absolute sputtering yield of Ti/TiN by Ar<sup>+</sup>/N<sup>+</sup> at 400–700 eV. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 19(3), 1004–1007. <https://doi.org/10.1116/1.1362678>
- Roy, M. (2013). *Surface engineering for enhanced performance against wear*. Springer.
- Sagás, J., Duarte, D., Irala, D., Fontana, L., & Rosa, T. (2011). Modeling reactive sputter deposition of titanium nitride in a triode magnetron sputtering system. *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 1765–1770.
- Shahidi, S., Moazzenchi, B., & Ghoranneviss, M. (2015). A review-application of physical vapor deposition (PVD) and related methods in the textile industry. *The European Physical Journal Applied Physics*, 71(3), 31302.

- Sobol, O., Andreev, A., Stolbovoj, V., Grigor'ev, V., Volosova, S., Aleshin, S., & Gorban, V. (2011). Physical characteristics, structure and stress state of vacuum-arc TiN coating, deposition on the substrate when applying high-voltage pulse during the deposition; Mekhanicheskie kharakteristiki, struktura i napryazhennoe sostoyanie vakuumno-dugovykh TiN-pokrytij, osazhdennykh pri podache na podlozhku vysokovol'tnykh impul'sov v protsesse osazhdeniya. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*.
- Sproul, W. D., Christie, D. J., & Carter, D. C. (2005). Control of reactive sputtering processes. *Thin solid films*, 491(1-2), 1-17.
- von Fieandt, L., Larsson, T., Lindahl, E., Bäcke, O., & Boman, M. (2018). Chemical vapor deposition of TiN on transition metal substrates. *Surface and Coatings Technology*, 334, 373-383. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.063>
- Wang, J., Mu, X., Wang, X., Wang, N., Ma, F., Liang, W., & Sun, M. (2018). The thermal and thermoelectric properties of in-plane C-BN hybrid structures and graphene/h-BN van der Waals heterostructures. *Materials Today Physics*, 5, 29-57.
- Zhang, Q., Zhao, W., Wang, P., Wang, L., Xu, J., & Chu, P. (2003). Microstructure, morphology and their annealing behaviors of alumina films synthesized by ion beam assisted deposition. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 206, 357-361