

## Análisis bibliométrico: Borurización

### Bibliometric analysis: Boriding

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>

---

#### Abstract:

Boriding is a thermochemical surface treatment widely investigated for its ability to improve the tribological performance of metallic materials, including enhanced hardness, wear resistance, and thermal stability. This study presents a structured scientific review based on a bibliometric analysis of 955 articles published between 2000 and 2025, sourced from the Web of Science database. The analysis, performed using Bibliometrix and its Biblioshiny interface, identified key trends, prominent authors, institutions, and leading journals. The review is organized into five main themes: theoretical background, treated materials, boriding processes, diffusion models, and characterization techniques for assessing tribological behavior. Notable attention has been given to low-alloy steels, stainless steels, titanium alloys, and high-entropy alloys. Additionally, emerging methods such as plasma- and laser-assisted boriding, as well as advances in kinetic modeling and surface analysis via EBSD and nanoindentation, are discussed. The results highlight the consolidation of knowledge in the field and point toward new applications under extreme service conditions.

#### Keywords:

*Boriding, bibliometric, bibliometrix, biblioshiny.*

---

#### Resumen:

El tratamiento termoquímico de borurización es ampliamente reconocido por mejorar el desempeño tribológico de materiales metálicos al incrementar su dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica. Este estudio presenta una revisión científica estructurada, respaldada por un análisis bibliométrico de 955 artículos publicados entre 2000 y 2025, extraídos de la base de datos Web of Science. Mediante el uso de Bibliometrix y su interfaz Biblioshiny, se identificaron las principales tendencias, autores destacados, instituciones líderes y revistas más influyentes en el área. La revisión se organiza en cinco ejes temáticos: fundamentos teóricos, materiales tratados, procesos de borurización, modelos de difusión y técnicas de caracterización. Se enfatiza el creciente interés en la borurización de aceros de baja aleación, aceros inoxidables, aleaciones de titanio y aleaciones de alta entropía. Además, se analizan técnicas emergentes como la borurización asistida por plasma y láser, así como avances en modelado y caracterización (por ejemplo, EBSD y nanoindentación). La revisión concluye destacando a los principales investigadores y grupos que han impulsado el desarrollo del área, así como las proyecciones hacia nuevas aplicaciones en condiciones extremas.

#### Palabras Clave:

*Borurización, bibliométrico, bibliometrix, biblioshiny.*

---

<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

## Introducción

A lo largo de las últimas décadas, el tratamiento termoquímico de borurización ha sido un tema de interés tanto para investigadores en el área de ingeniería de superficies, como también en el sector industrial, esto debido a su capacidad para mejorar las propiedades tribológicas de los materiales metálicos; como la dureza superficial, la resistencia al desgaste, la estabilidad térmica (Cai et al., 2020) y la resistencia a la corrosión (Soydan et al., 2008). El proceso de borurización consiste en la difusión de átomos de boro desde la superficie al interior de una matriz metálica para formar boruros metálicos; en los aceros borurados suelen formarse capas de boruro de hierro compuestas por las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B (ver Figura 1), que se caracterizan por una elevada dureza que alcanza valores entre 1800 y 2200 HV (Ortiz Domínguez et al., 2022).

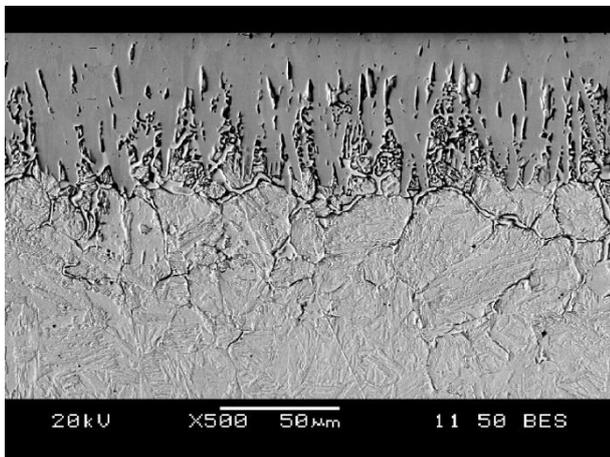


Figura 1. Micrografía del frente de crecimiento de las capas de boruro de hierro Fe<sub>2</sub>B formadas en la superficie de un acero AISI P20. Fuente: Elaboración propia.

En este trabajo se presenta un estudio de la literatura científica relacionada al tema de borurización utilizando una técnica de análisis estadístico conocida como análisis bibliométrico. Esta metodología permitió identificar las principales tendencias de investigación relacionadas con este tratamiento, y su desarrollo a lo largo del tiempo. Con base en los resultados obtenidos, se llevó a cabo una revisión bibliográfica estructurada que permitió clasificar y analizar los avances más relevantes en este campo. Además, se pudo identificar que la evolución en las investigaciones suele enfocarse en cinco campos de estudio: fundamentos teóricos, los materiales tratados, los procesos de borurización empleados, los modelos de difusión desarrollados y las técnicas de caracterización utilizadas para evaluar el comportamiento tribológico de las capas.

## Fundamentos teóricos

Algunas de las investigaciones publicadas más importantes se basan en el estudio de los principios teóricos que sustentan el proceso de borurización en aleaciones ferrosas; algunos artículos han explicado el comportamiento termodinámico del sistema Fe–B, los mecanismos de crecimiento de las capas boruradas, y la influencia de la microestructura del sustrato sobre la cinética de formación de los boruros.

El diagrama de fases hierro-boro (Fe–B) (ver Figura 2) es fundamental para comprender la formación de capas boruradas en aceros tratados termoquímicamente. Este permite identificar las fases estables que se generan en función de la temperatura y el contenido atómico de boro; y ha sido empleado en el desarrollo de técnicas de borurización en polvo, pasta y por plasma. Dentro de este sistema destacan dos fases intermetálicas: Fe<sub>2</sub>B y FeB. La fase Fe<sub>2</sub>B, con estructura tetragonal centrada en el cuerpo, se forma en composiciones cercanas al 9 wt.% B y es la más común en recubrimientos borurados debido a su alta dureza (1800–2000 HV), buena adherencia al sustrato y menor fragilidad. En cambio, la fase FeB, con estructura ortorrómbica, aparece en composiciones próximas al 16 wt.% B, presentando una dureza aún mayor pero también una mayor tendencia a la fragilización, lo que puede comprometer la integridad mecánica del recubrimiento (Palumbo et al., 2001).

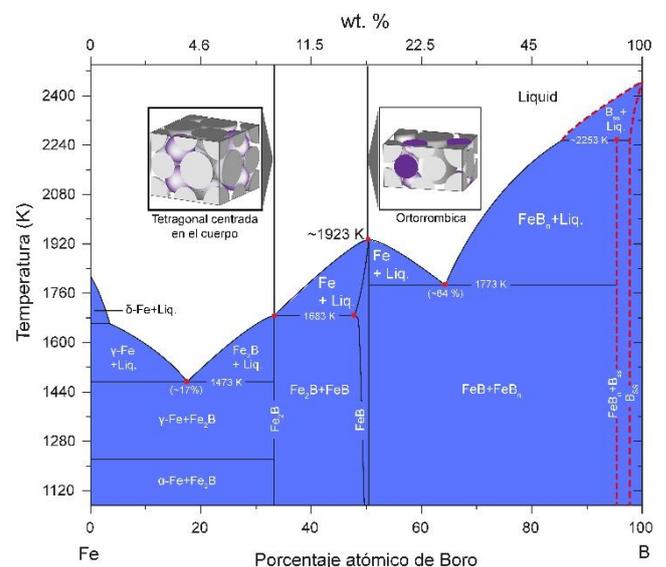


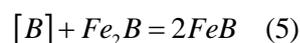
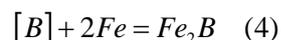
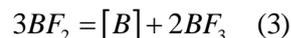
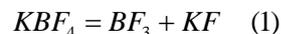
Figura 2. Diagrama de fases Fe-B. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra el mecanismo de formación de capas boruradas en un acero tratado mediante borurización en polvo. En la parte superior se muestra el sistema de aporte

de boro, compuesto por una mezcla de polvo con activador ( $KBF_4$ ), fuente de boro ( $B_4C$ ) y diluyente ( $SiC$ ), así como las reacciones químicas que generan especies activas de boro ( $BF_2$ ,  $BF_3$ ) responsables de la activación del proceso. En la sección central, se representa la adsorción y difusión de átomos de boro en la fase  $\gamma$ -Fe (austenita), lo cual conduce primero a la formación de la capa de  $Fe_2B$  (fase tetragonal) y posteriormente a la formación de  $FeB$  (fase ortorrómbica) mediante la difusión adicional de boro. Finalmente, en la parte inferior, se esquematiza la cinética de crecimiento en tres etapas: incubación de  $Fe_2B$ , incubación de  $FeB$  y crecimiento parabólico de ambas capas, con ecuaciones que describen el avance de las interfaces en función del tiempo.

La formación de capas boruradas durante el proceso de borurización en polvo ocurre a través de una serie de reacciones en las que intervienen el sustrato y las mezclas borurantes que suelen estar compuestas por  $KBF_4$  (activador) y  $B_4C$  (fuente de B). La reacción comienza cuando debido a la temperatura el  $KBF_4$  se activa para

formar  $BF_3$  el cual da lugar al  $BF_2$  que se ioniza formando  $[B]$  y  $BF_3$ . Posteriormente, se produce la difusión del boro hacia el interior del sustrato, generando la formación de cristales y crecimiento de las fases de boruro de hierro (ver Figura 3) (Campos-Silva et al., 2021):



Tomando en cuenta lo anterior queda claro que el potencial de boro en la atmósfera borurante es un factor determinante en la formación de las fases  $FeB$  y  $Fe_2B$ .

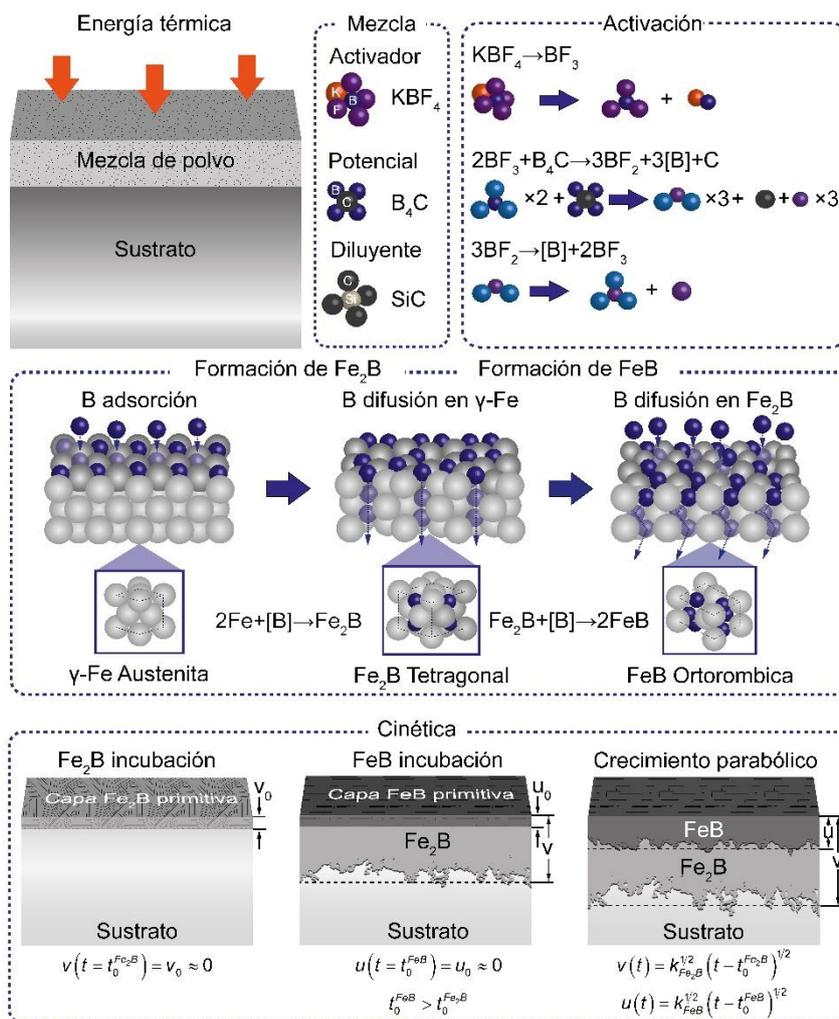


Figura 3. Mecanismo de crecimiento de las capas de boruro de hierro FeB/Fe<sub>2</sub>B. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de difusión del boro durante el tratamiento de borurización es favorecido por su pequeño radio atómico ( $R_a = 0.87 \text{ \AA}$ ), en comparación con el del hierro ( $R_a = 1.558 \text{ \AA}$ ) (Ortiz-Domínguez et al., 2023). Esta diferencia permite que el boro se aloje en sitios intersticiales de la red cristalina del hierro. La estructura cristalina del sustrato tiene un impacto significativo en la cinética de difusión ya que el coeficiente de difusión del boro en Fe- $\gamma$  (austenita) puede ser hasta 10 veces mayor que en Fe- $\alpha$  (ferrita), debido a que el boro forma una solución intersticial sólida en la red Fe- $\gamma$  y una solución sustitucional en Fe- $\alpha$  (Krukovich et al., 2016). Por esta razón, el tratamiento de borurización se realiza comúnmente en el rango de 850 a 1123 K, donde el acero adopta una estructura austenítica. La Figura 4 muestra las estructuras cristalinas de los boruros de hierro. En (a) se presenta la celda unitaria de la fase Fe<sub>2</sub>B, que tiene una estructura tetragonal centrada en el cuerpo, donde los átomos de boro ocupan posiciones intersticiales entre los átomos de hierro. En (b) se observa la celda unitaria de la fase FeB, con una estructura ortorrómbica simple, la cual tiene una mayor concentración de boro. Las imágenes (c) y (d) muestran una representación tridimensional del empaquetamiento atómico en ambas fases, evidenciando la distribución asimétrica del boro en Fe<sub>2</sub>B y su mayor presencia en FeB, lo que influye en sus propiedades mecánicas y en la estabilidad térmica.

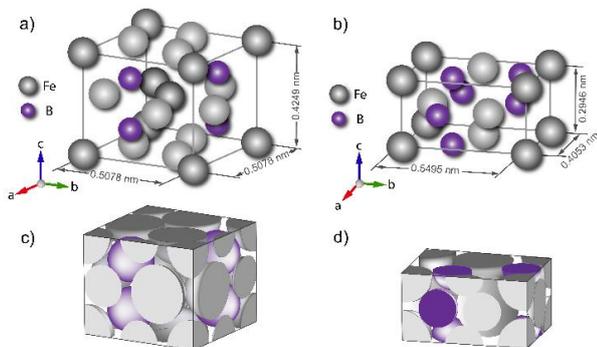


Figura 4. Celdas unitarias de los boruros de hierro formados durante la borurización: (a) estructura tetragonal centrada en el cuerpo de Fe<sub>2</sub>B y (b) estructura ortorrómbica de FeB. Los átomos de hierro se representan en gris y los átomos de boro en púrpura. Las imágenes (c) y (d) muestran la visualización tridimensional del empaquetamiento atómico, destacando la distribución y densidad de los átomos de boro en ambas fases. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los primeros trabajos que propusieron un mecanismo de crecimiento de las capas de boruro de hierro durante el proceso de borurización en polvo fue propuesto inicialmente por Martini, quien realizó un importante trabajo experimental en el que varió el potencial químico del borurante, para analizar las etapas de crecimiento de los boruros mediante microscopía óptica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX). De acuerdo con sus resultados el mecanismo se divide en tres etapas, en la primera, durante el tiempo de incubación, se forma una capa primitiva de Fe<sub>2</sub>B con cristales orientados aleatoriamente en la superficie. En la segunda etapa, los cristales comienzan a crecer interactuar entre sí, lo que fuerza un crecimiento preferencial hacia el interior del sustrato, de forma perpendicular a la superficie. Finalmente, en la tercera etapa, se desarrolla una capa con orientación cristalográfica definida, especialmente en el plano (002), formando una textura característica (ver Figura 5) (Martini et al., 2004). Estudios posteriores, utilizando técnicas de caracterización avanzada como la espectroscopía de electrones retrodispersados EBSD, que han sugerido que la presencia de esta textura orientada puede estar relacionada con la existencia de esfuerzos residuales entre los cristales de Fe<sub>2</sub>B durante su crecimiento (Zhong et al., 2019).

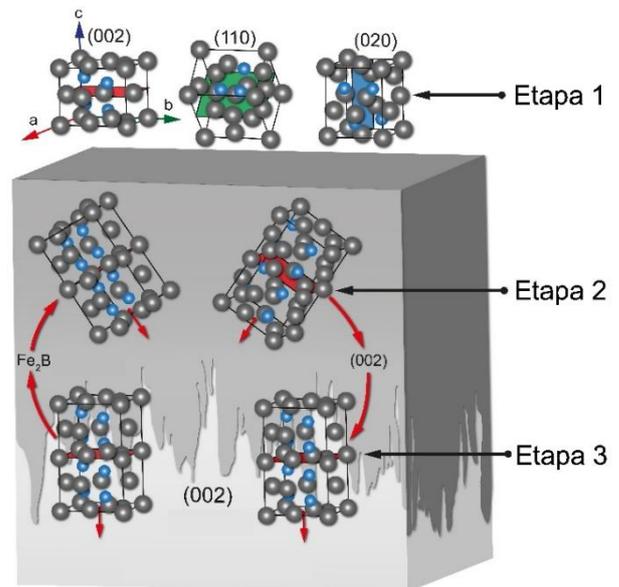


Figura 5. Secuencia de formación y reorientación cristalográfica de la fase Fe<sub>2</sub>B durante el proceso de borurización. En la Etapa 1, se observa el crecimiento inicial de cristales de Fe<sub>2</sub>B con diferentes orientaciones cristalográficas ((002), (110) y (020)). En la Etapa 2, ocurre una reorientación progresiva de los cristales hacia

una orientación preferente. Finalmente, en la Etapa 3, predomina la orientación (002) paralela a la superficie del sustrato, evidenciando una textura preferencial inducida por el crecimiento direccional. Las flechas rojas indican la rotación cristalográfica hacia dicha orientación dominante. Fuente: Elaboración propia.

### Materiales tratados mediante borurización

Las investigaciones sobre el tratamiento de borurización han abarcado progresivamente una mayor diversidad de materiales metálicos como aleaciones ferrosas y no ferrosas e incluso super aleaciones. Debido a su importancia en aplicaciones industriales, la mayoría de investigaciones se ha enfocado en aceros con bajo contenido de carbono y de baja aleación como los grados AISI 4140 y 1018. En los que se ha reportado la formación de capas uniformes con morfología tipo diente de sierra que se caracteriza por tener una buena adherencia con el sustrato (Kulka, Makuch, Pertek, et al., 2013).

Las investigaciones también han abordado el estudio de aceros grado herramienta como las aleaciones D2, H13 y M2 en los que se forman capas bifásicas compuestas por las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B, que han mostrado elevar la resistencia al desgaste por contacto incluso a altas temperaturas (Makuch & Kulka, 2016). además, se han estudiado aceros inoxidable como el AISI 304L y 420, cuya capa pasiva inicial dificulta la difusión del boro lo que conduce a la formación de capas bifásicas FeB y Fe<sub>2</sub>B con morfología plana (Ortiz-Domínguez, Keddám, et al., 2024). No obstante, mediante técnicas de activación previa (Araz et al., 2021) o el uso de borurización asistida por plasma permiten generar capas densas y funcionales (Günen et al., 2015).

Las investigaciones más recientes se han enfocado en el tratamiento de aleaciones de alta entropía (HEAs) las cuales han mostrado una importante mejora en el comportamiento tribológico. En las aleaciones tipo Fe<sub>40</sub>Mn<sub>20</sub>Cr<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub>, se ha observado una reducción del desgaste y del coeficiente de fricción en un amplio rango de temperaturas (200–600 °C), mientras que en HEAs multicomponente con elementos como Co, Cr, Fe, Mn, Ni y Al, el tratamiento con polvos nanométricos generó capas de boruros complejas, con alta dureza (hasta 2800 HV) y buena resistencia en medios corrosivos como HCl al 5% (Günen, 2021).

Las aleaciones de titanio también han sido objeto de estudio; recientemente se ha analizado el comportamiento del titanio puro mediante el proceso de borurización por pasta asistida, con el que se han generado capas

compuestas por una zona externa de TiB<sub>2</sub> y una interna de TiB con morfología tipo *whiskers*. A mayor temperatura, el espesor de la capa aumenta, mejorando la resistencia al desgaste y a la corrosión. La capa compacta de TiB<sub>2</sub> ofrece mayor protección, mientras que la estructura de TiB presenta menor resistencia. En general, el tratamiento mejora notablemente el comportamiento superficial del titanio frente a ambientes agresivos (Dziarski & Makuch, 2024).

### Procesos de borurización empleados

De acuerdo con la literatura, uno de los procesos con mayor número de publicaciones es la técnica de borurización en polvo (pack boriding), esto debido a su simplicidad operativa, lo que se traduce en menores costos de producción y una fácil implementación a nivel industrial (Soydan et al., 2008). No obstante, esta técnica presenta algunas áreas que siguen en desarrollo como el control en la precisión del espesor de capa y en la uniformidad del tratamiento. Una de las limitaciones de esta técnica es su incapacidad para tratar múltiples piezas, esto ha dado lugar al desarrollo de variantes como el tratamiento de borurización en gas, el cual emplea fuentes como BCl<sub>3</sub> o B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Łukaszewicz et al., 2023).

El tratamiento de borurización por plasma representa otro avance importante, especialmente en su variante de pasta asistida por plasma, que reduce la temperatura y el tiempo de tratamiento, promoviendo una difusión más eficiente del boro y capas de mayor adherencia (Keddám et al., 2020). Asimismo, se ha reportado la viabilidad de realizar borurización por láser, con ventajas como la formación localizada de capas, bajo impacto térmico y ausencia de tratamientos postproceso (Kulka, Makuch, & Pertek, 2013).

Dentro de las nuevas tendencias se ha buscado un enfoque integral desde el que se han desarrollado tratamientos híbridos, como la borocarburización simultánea (Makuch et al., 2020), el nanobainizado combinado con borurización (Łukaszewicz et al., 2023) y la aplicación de corriente pulsada para mejorar la distribución del campo eléctrico durante la difusión (Rosales-Lopez et al., 2025).

### Modelos de difusión desarrollados

Dentro de las publicaciones analizadas en este trabajo se identificaron trabajos dedicados al estudio de la cinética de crecimiento de las capas de boruro de hierro mediante modelos de difusión. Estos modelos son ecuaciones matemáticas que buscan simular el crecimiento de las capas en función de los parámetros del tratamiento como

son el tiempo y la temperatura. Estas investigaciones han cobrado una gran relevancia debido al impacto que tienen en el sector industrial en el control y automatización de los procesos de borurización.

Las primeras investigaciones utilizaron leyes parabólicas clásicas, derivadas de la segunda ley de Fick, para describir la evolución del espesor en función del tiempo de tratamiento (Campos-Silva et al., 2013), (Keddani et al., 2014). Posteriormente, se desarrollaron modelos bifásicos, capaces de simular el crecimiento simultáneo de las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B, con condiciones de frontera móviles e interacción entre interfaces (Makuch et al., 2017).

Investigadores como Ortiz-Domínguez han formulado modelos basados en soluciones analíticas de ecuaciones diferenciales algebraicas (DAE), análisis inverso tipo Boltzmann–Matano y métodos de integración numérica (Ortiz-Domínguez, Morales-Robles, et al., 2024). Una de sus contribuciones más importantes ha sido la constante adimensional  $\varepsilon^{\text{Fe}_2\text{B}}$ , la cual permite expresar el crecimiento de la capa como una función parabólica del tiempo, facilitando la comparación entre diferentes materiales y condiciones de proceso.

### **Técnicas de caracterización y evaluación tribológica**

Al igual en la mayoría de las investigaciones científicas relacionadas a las ciencias de los materiales, las técnicas de caracterización han sido fundamentales para el análisis de borurización en diversas aleaciones metálicas. Una de las técnicas más importantes ha sido la microscopía electrónica de barrido (MEB) que ha permitido el estudio de la morfología de las capas boruradas, al generar imágenes de alta resolución a partir de electrones secundarios y retro dispersados que provocan un contraste topográfico y composicional, facilitando la identificación de zonas con distinta microestructura (Asthana et al., 2007). Por su parte, la difracción de rayos X (DRX) y la espectroscopía de energía dispersiva (EDS) han sido empleadas para la identificación de fases presentes y la determinación de perfiles composicionales en la zona tratada (PRAHU, 2007).

Técnicas avanzadas como la difracción de electrones retrodispersados (EBSD), ha permitido estudiar con gran detalle la orientación cristalográfica, la textura y la distribución de fases en recubrimientos formados por borurización. Esta técnica ha revelado que las fases boruradas tienden a crecer con morfología columnar y una orientación preferencial en la dirección [001], como consecuencia de la anisotropía cristalina y de la energía superficial de los planos atómicos compactos. Asimismo,

los mapas de desorientación local obtenidos por EBSD han evidenciado la presencia de esfuerzos compresivos en las interfaces entre columnas, los cuales influyen directamente en la dirección de crecimiento y en la morfología final de las capas de boruro de hierro (Zhong et al., 2019).

Herramientas como el microanálisis por sonda electrónica (EPMA) y la espectroscopía de emisión óptica por descarga luminiscente (GDOES) permiten evaluar con alta precisión la redistribución de los elementos de aleación provocada por la difusión del boro en la matriz ferrosa, además de identificar las fases formadas y distinguir entre zonas transformadas y no transformadas. En estudios recientes, estas técnicas han sido empleadas para establecer perfiles de concentración y correlacionar la composición local con la morfología de las capas boruradas (Litoria et al., 2020).

Las técnicas de caracterización mecánica han sido fundamentales para evaluar el rendimiento de los recubrimientos formados por tratamientos termoquímicos. En este sentido se han empleado técnicas de nanoindentación para determinar propiedades como la dureza y el módulo de elasticidad de fases boruradas. Mediante el uso de un indentador Berkovich, se logró diferenciar el comportamiento de las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B, siendo la primera más dura pero también más frágil. Además, la técnica de microindentación Vickers permitió estimar la tenacidad a la fractura ( $K_{Ic}$ ) a partir de las grietas generadas por las marcas de indentación. Estos análisis también revelaron diferencias significativas en la respuesta mecánica en función de la profundidad y orientación de los cristales, así como un aumento en la fragilidad en la interfaz FeB/Fe<sub>2</sub>B, atribuida a la diferencia en propiedades mecánicas y coeficientes de expansión térmica entre ambas fases (Kulka et al., 2017).

Finalmente, las pruebas tribológicas son esenciales para evaluar el comportamiento al desgaste de los recubrimientos obtenidos mediante borurización. Entre las metodologías comúnmente utilizadas destacan los ensayos de desgaste por deslizamiento Pin on disk o ball on block, en condiciones de deslizamiento en seco o lubricado; también se han utilizado los análisis de erosión por partículas sólidas a alta temperatura, donde se simulan condiciones severas de impacto. Estas pruebas permiten cuantificar el coeficiente de fricción, la tasa de desgaste volumétrica y observar los mecanismos de daño, como desgaste abrasivo, oxidativo, por delaminación o fractura frágil. En, los recubrimientos borurados suelen exhibir una marcada mejora en la resistencia al desgaste debido al aumento de la dureza superficial, la formación de boruros compactos y la

reducción de la deformación plástica. Además, se han desarrollado bancos de prueba especializados para reproducir flujos gas-sólido a alta temperatura y medir con precisión la pérdida de masa, la velocidad de impacto y la morfología de las rayaduras (Guo et al., 2021).

### Materiales y métodos

Se realizó un análisis de la literatura académica relacionada con el tratamiento termoquímico de borurización, para esto se consultó la base de datos Web of Science de Clarivate. Para la consulta de información se plantearon dos términos clave para planear la ecuación de búsqueda "Boriding (Topic)" OR "Boronized (All fields)", además se consideraron las palabras clave "boriding", "boronizing", "pack boriding", "Boride layer" y "boride layers" con el objetivo de ampliar el espectro de información relacionada al tema de borurización.

Para mejorar la calidad de los datos recolectados se aplicaron algunos filtros para eliminar los datos marginales del análisis. En este sentido solo se consideraron exclusivamente artículos científicos escritos en inglés y publicados entre 2000 y 2024; en total se consultaron 955 documentos.

Posteriormente los metadatos de la consulta fueron exportados en un archivo BibTeX, el cual incluye la información bibliográfica de forma ordenada para su análisis. Posteriormente este archivo fue procesado mediante el paquete Bibliometrix en R y para facilitar el análisis y visualización de los datos, se utilizó la interfaz web interactiva Biblioshiny.

El reporte general de los resultados del análisis bibliométrico se presenta en la Tabla 1. El análisis cubre el periodo de 2000 a 2025, con un total de 955 artículos científicos publicados en 213 fuentes, principalmente revistas especializadas. Se observó una tasa de crecimiento anual en el número de publicaciones del 10.73%; la edad promedio de los documentos fue de 8.34 años lo que indica que una parte significativa de las publicaciones es relevante actualmente. También se pudo analizar el impacto de las publicaciones y se encontró que en promedio cada artículo publicado tiene 19.11 citas, dando una evidencia de la relevancia de la influencia de estas publicaciones en la comunidad científica. Además, los datos analizados muestran un total de 14419 referencias.

Se pudo realizar un análisis del contenido y el software pudo identificar 934 palabras clave (Keywords Plus) utilizadas en las publicaciones, mientras que los autores asignaron 1742 palabras clave (keywords) a sus trabajos,

dando una muestra de la diversidad de enfoques del estudio de este tratamiento termoquímico.

Tabla 1. Resumen de resultados del análisis bibliométrico sobre el tema de borurización. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Valor
Periodo de estudio	2000-2025
Número de documentos	955
Fuentes	213
Tasa de crecimiento anual (%)	10.73%
Edad promedio de los documentos	8.34
Citas promedio por documento	19.11
Número de referencias	14419
Keywords Plus	934
Keywords de autores	1742
Número de autores	2751
Documentos con un solo autor	61
Promedio de coautores por documento	5.15
Colaboración internacional (%)	18.95
Tipo de documento	Artículo científico
Cantidad de documentos	955

En cuanto a los autores el estudio reveló que un total de 2751 investigadores han contribuido a las publicaciones realizadas. De hecho, es importante mencionar que solo 40 autores han realizado publicaciones en solitario y únicamente 61 artículos han sido escritos por un solo autor mientras que el promedio de coautores por documento es de 5.15; esto refleja la importancia de la investigación colaborativa en este campo de estudio. Finalmente es importante mencionar que el 18.95% de los artículos fueron realizados en colaboración internacional.

### Resultados y discusión

En esta sección se presentan y discuten los principales hallazgos derivados del análisis de 955 artículos científicos publicados entre los años 2000 y 2025. Los resultados se agrupan en torno a indicadores clave como la evolución temporal de publicaciones y citas, las revistas más relevantes, los autores más productivos y citados, las redes de colaboración científica y la distribución geográfica de las publicaciones. Esta información permite caracterizar el estado actual de la investigación en borurización, identificar los principales actores académicos y establecer líneas temáticas predominantes, lo cual resulta fundamental para orientar futuras

investigaciones y fortalecer la cooperación científica internacional.

### Evolución temporal de la producción científica

El análisis estadístico permitió examinar el crecimiento anual del número de publicaciones y citas relacionadas al tema de borurización, permitiendo identificar tendencias de investigación y posibles etapas de consolidación del campo de estudio.

La Figura 6 muestra el historial del número de publicaciones y citas por año sobre el tratamiento termoquímico de borurización; en donde se puede observar la evolución del tema que paso de ser poco estudiado a una línea de investigación en expansión con impacto en diversas industrias. Las investigaciones sobre el tratamiento termoquímico de borurización han mostrado un crecimiento anual sostenido a partir del año 2000, con un aumento significativo a partir del año 2013 y un pico de 93 publicaciones en el año 2022. La tasa de crecimiento anual de 10.56% es congruente con el aumento de interés por el tratamiento impulsado por su aplicación en materiales avanzados y recubrimientos industriales. En los años 2023 y 2024 la producción científica se ha estabilizado lo que sugiere una consolidación del campo de estudio.

Sin embargo, el número de citas ha disminuido, lo que sugiere que los artículos antiguos son las principales fuentes de conocimiento ya que abordan los fundamentos teóricos del proceso. Esta tendencia indica una posible maduración de la línea de investigación que actualmente se enfoca en la optimización de procesos y aplicaciones específicas en lugar de descubrimientos fundamentales.

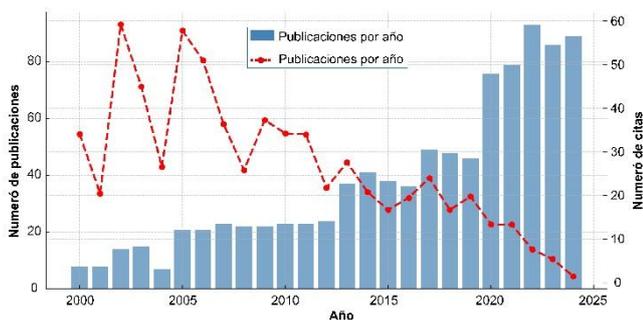


Figura 6. Publicaciones y citas anuales sobre borurización (2000–2025). Fuente: Elaboración propia.

### Revistas científicas más relevantes

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de las revistas científicas que han contribuido a la difusión del conocimiento sobre

borurización, en este análisis se tomo en cuenta la cantidad de artículos publicados, el número de citas recibidas, así como la concentración de conocimiento de acuerdo con la ley de Bradford.

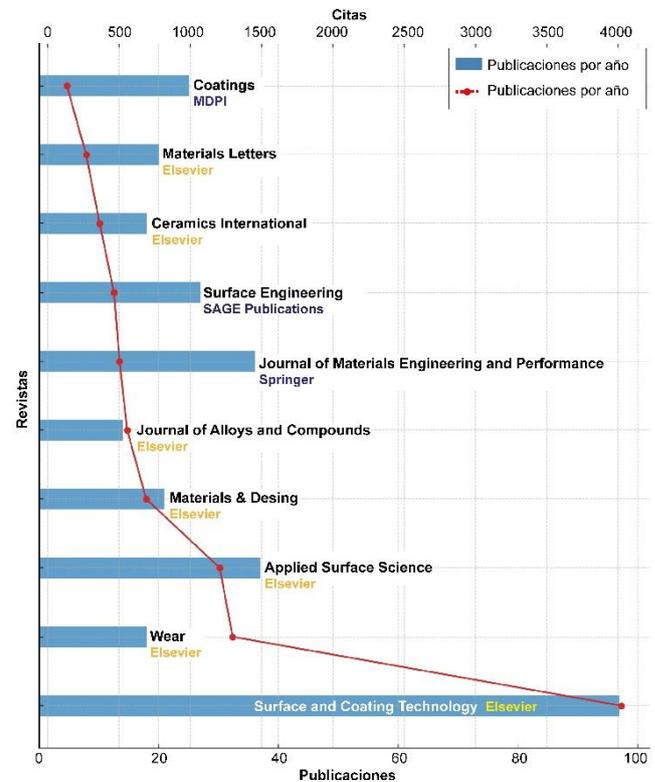


Figura 7. Principales revistas científicas con publicaciones sobre borurización. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7, se presentan una gráfica de barras con las revistas científicas más relevantes en el tema de borurización comparándolas con el número de publicaciones y de citas de estas publicaciones. En la gráfica también se puede identificar el grupo editorial de cada revista, y se observa la influencia que tiene el grupo editorial Elsevier en las publicaciones científicas. La revista científica Surface and Coatings Technology de Elsevier es la más influyente con un total de 97 artículos publicados con 4021 citas.

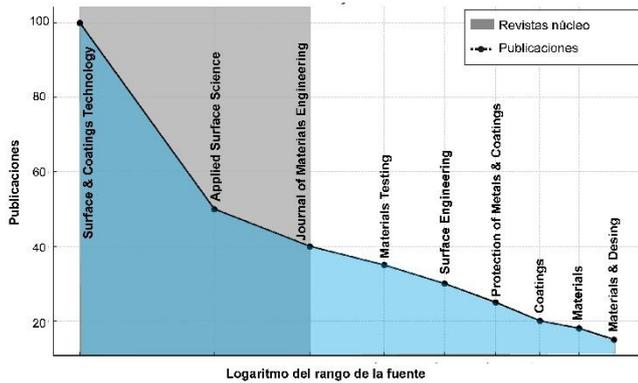


Figura 8. Distribución de publicaciones por revista según la ley de Bradford. Las revistas en la zona gris representan el núcleo, concentrando la mayor cantidad de artículos sobre borurización. Fuente: Elaboración propia.

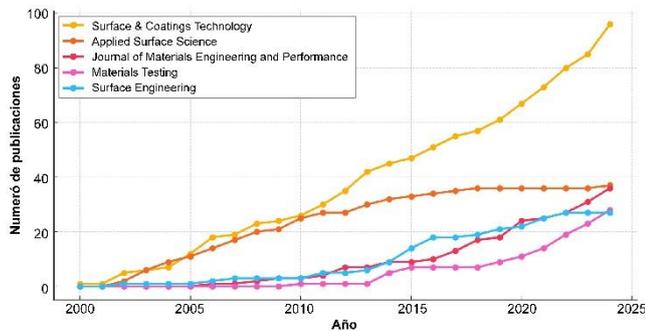


Figura 9. Evolución anual del número de publicaciones sobre borurización en las cinco revistas con mayor productividad entre 2000 y 2025. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 8, se observa el gráfico denominado ley de Bradford el cual muestra la distribución de artículos científicos dentro del área de investigación, en el gráfico se observa como un pequeño número de revistas concentra la mayor parte de los artículos relevantes, la gráfica confirma que Surface & Coatings Technology es la revista más relevante seguida de Applied Surface Science, y se observa un patrón descendente de publicaciones de las demás revistas. En la Figura 9, se puede observar la evolución de las publicaciones sobre borurización en las principales revistas científicas. La revista Surface & Coatings Technology es la que presenta un crecimiento sostenido a lo largo de las últimas dos décadas. Además, Applied Surface Science muestra una curva estable lo que sugiere que la revista ha mantenido el interés por el tema en los últimos años. Por otro lado, a partir de 2010, las revistas Journal of Materials Engineering and Performance,

Materials Testing y Surface Engineering han realizado más publicaciones sobre este tema.

### Autores con mayor impacto

El análisis realizado permitió identificar aquellos autores que han realizado contribuciones significativas al estudio del tratamiento termoquímico de borurización; como se muestra en la Figura 10, en la que se presenta una gráfica de barras en la que se enlistan aquellos con mayor número de publicaciones en este campo. Entre los más destacados se encuentran Mourad Keddad, Iván Enrique Campos-Silva, Michal Kulka, Natalia Makuch y Martín Ortiz-Domínguez, cuyas investigaciones abarcan desde el modelado cinético y la difusión de boro, hasta la caracterización microestructural y la mejora de propiedades superficiales. A continuación, se describen brevemente sus principales aportaciones, las cuales fueron identificadas a partir del análisis de sus trabajos más citados, lo que permite resaltar su impacto en el desarrollo del estado del arte.

Mourad Keddad, adscrito a la Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB) en Argelia, es ampliamente reconocido por sus investigaciones en la cinética de crecimiento de capas de boruros de hierro (FeB y Fe<sub>2</sub>B) formadas mediante borurización en medios como polvo, pasta, gas y plasma. Este autor cuenta con 84 publicaciones sobre el tema, ha desarrollado modelos matemáticos y de difusión que permiten predecir el espesor de las capas, la energía de activación y su evolución microestructural en diferentes aceros y aleaciones. Su trabajo ha influido notablemente en la optimización de procesos industriales, y ha colaborado con investigadores como M. Ortiz-Domínguez, M. Kulka y M. Elías-Espinosa, consolidando una red científica de alto impacto.

Iván Enrique Campos-Silva, investigador de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME Zacatenco) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en México, ha contribuido con 64 publicaciones enfocadas en tratamientos termoquímicos como la boruración por pasta. De acuerdo con el análisis de sus publicaciones más citadas, sus estudios se centran en la influencia de parámetros como el espesor de la pasta de boro, así como en la determinación de coeficientes de difusión y energías de activación. Su enfoque combina el modelado matemático, la experimentación y la caracterización microestructural. Por otro lado, ha colaborado estrechamente con investigadores como José Francisco Martínez-Trinidad, Martín Ortiz-Domínguez y Alfonso Meneses-Amador, integrando un grupo de investigación sólido en el ámbito de la ingeniería de superficies.

Michal Kulka, profesor en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Poznan University of Technology en Polonia, este autor cuenta con 54 publicaciones centradas en el desarrollo y caracterización de procesos de borurización. Según sus trabajos más citados, destaca por la implementación de técnicas avanzadas como la boruración asistida por láser, aplicadas a aceros, superaleaciones y materiales biomédicos. Entre sus aportes se incluyen estudios sobre la cinética de formación de capas de FeB/Fe<sub>2</sub>B, simulaciones de difusión de boro y la mejora de propiedades como la dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Ha sido pionero en la combinación de tratamientos termoquímicos y técnicas de aleación superficial, colaborando frecuentemente con investigadores como Natalia Makuch y Mourad Keddam.

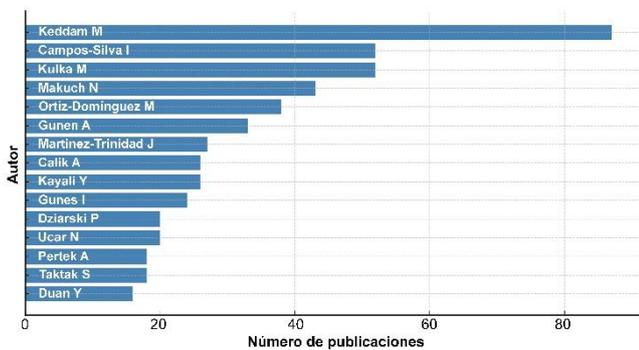


Figura 10. Principales autores en publicaciones sobre borurización según número de artículos registrados hasta 2025. Fuente: Elaboración propia.

Natalia Makuch, investigadora de la misma institución que Kulka, ha enfocado su trabajo en el desarrollo de tratamientos termoquímicos avanzados, en particular la boruración asistida por láser, carburización y modificación superficial de aleaciones metálicas. De acuerdo con sus publicaciones más citadas, sus investigaciones han profundizado en la formación de capas de FeB/Fe<sub>2</sub>B, así como en el análisis de sus efectos sobre las propiedades tribológicas y mecánicas. Su enfoque combina métodos experimentales con caracterización estructural, microdureza y pruebas de desgaste. Ha colaborado con autores como Piotr Dziarski y Adam Piasecki, fortaleciendo la línea de investigación en superficies funcionales para aplicaciones exigentes.

Martín Ortiz-Domínguez, adscrito a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) en México, ha publicado al menos 36 trabajos sobre borurización. Sus publicaciones más citadas se basan en el estudio y modelado de este tratamiento en diversas aleaciones ferrosas. En su investigación ha desarrollado modelos de

difusión, estimaciones de energía de activación y predicciones del espesor de capa en función de variables como el tiempo y la temperatura. De igual forma sus artículos integran una caracterización microestructural y tribológica, aportando tanto a la comprensión científica como a la aplicación tecnológica del proceso. Ha establecido colaboraciones con Mourad Keddam, Iván Campos-Silva, M. Elías-Espinosa, entre otros.

En la Figura 12 se presenta un gráfico de burbujas que describe la evolución e impacto de los principales autores en el tema de borurización, comparando su producción científica con su número de citas. Mourad Keddam lidera con una trayectoria consolidada y alta citación, seguido por Iván Campos-Silva, cuya producción ha crecido de manera sostenida. Michal Kulka, aunque con menos artículos, muestra un alto impacto en citas, mientras que Natalia Makuch y Martín Ortiz-Domínguez han incrementado su producción en los últimos años. Estos datos muestran la consolidación de investigadores líderes y el ascenso de nuevos referentes en el campo.

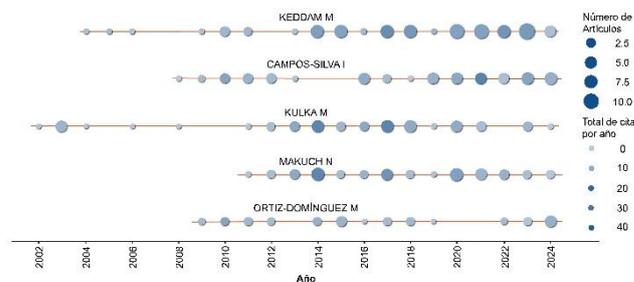


Figura 11. Producción científica y citas anuales de los cinco autores más destacados en borurización. El tamaño de los círculos representa el número de artículos y el tono indica el total de citas por año. Fuente: Elaboración propia.

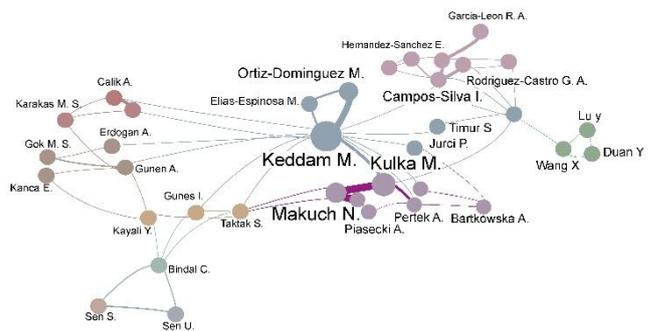


Figura 12. Red de colaboración entre los autores más relevantes en investigaciones sobre borurización. El grosor de las líneas representa la intensidad de colaboración y los colores indican agrupaciones de coautoría. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12, muestra la red de colaboración entre autores con publicaciones relacionadas con el tratamiento de borurización. Cada nodo corresponde a un investigador, y su tamaño se relaciona al número de publicaciones en las que ha participado. Las líneas que conectan los nodos indican coautorías, siendo su grosor proporcional a la frecuencia de colaboración entre los autores. Además, los colores distinguen grupos de investigación o *clústeres*, este análisis se realizó mediante algoritmos de detección de comunidades, lo que permite visualizar las dinámicas de colaboración y la estructura interna del campo de estudio.

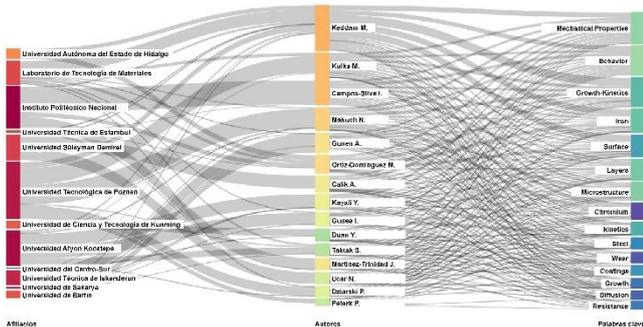


Figura 13. Relación entre afiliaciones, autores y palabras clave más frecuentes en estudios sobre borurización. Se observa la conexión temática y colaborativa entre instituciones, investigadores y líneas de investigación. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la red, destacan tres autores como nodos centrales por su alta producción científica y número de colaboraciones: Keddam M., Kulka M. y Makuch N. En particular, Makuch N. colabora estrechamente con Piasecki A., Pertek A. y Bartkowska A., conformando un grupo consolidado que probablemente corresponde a un centro de investigación en Polonia, como la Universidad Tecnológica de Poznan. Por otro lado, Keddam M. se posiciona como un autor altamente influyente y con múltiples conexiones hacia otros clústeres, evidenciando su papel integrador en la comunidad científica. Entre sus colaboraciones más destacadas se encuentra la establecida con Ortiz-Domínguez M., cuya participación resalta en la red a través de conexiones directas con otros autores como Elias-Espinosa M., lo que sugiere una fuerte vinculación con el grupo liderado por Keddam.

Además, se identifica un grupo conformado por investigadores latinoamericanos afiliados al Instituto Politécnico Nacional, entre ellos Campos-Silva I., Hernández-Sánchez E., Rodríguez-Castro G. A. y García-León R. A., cuya colaboración es estrecha y con proyección internacional, dado que también mantiene vínculos con Keddam y otros autores europeos.

Asimismo, se observa un grupo relevante de investigadores turcos, como Calik A., Karakas M. S., Kanca E., Kayali Y. y Bindal C., que forman una comunidad densa de colaboración. Finalmente, en una sección periférica de la red se encuentra un grupo de investigadores chinos, entre ellos Lu Y., Wang X. y Duan Y., que trabajan de manera conjunta, aunque con menos conexiones hacia el núcleo de la red.

La Figura 13, muestra un diagrama de Sankey que relaciona instituciones, autores y palabras clave en publicaciones sobre tratamientos superficiales en materiales metálicos. Se destacan instituciones como la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Técnica de Estambul, con fuerte producción científica y colaboración. Autores como Keddam M., Kulka M. y Campos-Silva I. aparecen como los más influyentes, vinculados a múltiples temas de investigación. Las palabras clave más frecuentes incluyen propiedades mecánicas, comportamiento, cinética de crecimiento, hierro, y microestructura, lo que evidencia el enfoque en el estudio del rendimiento y evolución de capas en los recubrimientos.



Figura 14. Publicaciones sobre borurización por país (2000–2025). Fuente: Elaboración propia.

### Distribución geográfica de la producción científica

Finalmente se presenta un estudio de la distribución geográfica de la producción científica en el tema de borurización, para lo cual se elaboró un mapa mundial con base en los datos extraídos de la base Web of Science (ver Figura 14), en muestra el número de publicaciones científicas por país entre los años 2000 y 2025, lo que permite identificar regiones con alta actividad de investigación. Turquía lidera la producción con 727 artículos, seguido de China (503), México (483), Argelia (232) y Polonia (206), esto como consecuencia de la

consolidación de grupos de investigación activos en estas naciones. Asimismo, se observa una participación relevante de países como Estados Unidos (156), Australia (180) y Pakistán (196), así como una creciente contribución de países latinoamericanos, particularmente México y Brasil. Esta representación permite visualizar la globalización del conocimiento en este campo y resalta la importancia de la cooperación científica internacional.

## Conclusiones

Se realizó un análisis bibliométrico tomando en cuenta 955 artículos publicados entre 2000 y 2025 cuyos resultados permitieron identificar las principales tendencias, autores, revistas, instituciones y países involucrados en la investigación sobre el tratamiento termoquímico de borurización. Los resultados muestran un crecimiento constante en la producción científica, con una tasa anual del 10.73 % y un aumento notable a partir del año 2013, lo que refleja la consolidación del tema como una línea de investigación madura y relevante en ingeniería de superficies.

Surface and Coatings Technology se posiciona como la revista más influyente, mientras que autores como Mourad Keddam, Iván Campos-Silva y Michal Kulka destacan por su productividad y número de citas. La red de colaboración evidencia clústeres consolidados en países como México, Polonia, Turquía y China, con una participación significativa de instituciones como el IPN, la UAEH y la Universidad Tecnológica de Poznan. Asimismo, el 18.95 % de los artículos se elaboraron en colaboración internacional, lo que confirma el carácter global del desarrollo científico en este campo.

En esta revisión se abordaron cinco ejes temáticos principales: los fundamentos teóricos de la borurización, los materiales metálicos tratados, las variantes del proceso (como borurización en polvo, plasma y láser), los modelos de difusión empleados para describir el crecimiento de capas, y las técnicas de caracterización microestructural y tribológica utilizadas para evaluar el comportamiento de los recubrimientos. Esta estructura permitió organizar el conocimiento existente y comparar enfoques tradicionales con avances recientes en cada una de estas áreas.

## Referencias

Araz, S. O., Gumus, H., Bayca, S. U., & Aydin, A. (2021). Investigation of gamma-ray attenuation coefficients for solid boronized 304L stainless steel. *Applied Radiation and Isotopes*, 170, 109605.

Asthana, P., Liang, H., Usta, M., & Ucisik, A. (2007). *Wear and surface characterization of boronized pure iron*.

Cai, L.-X., Li, Y., Wang, S.-S., He, Y., Li, F., & Liu, Z.-K. (2020). Investigation of the erosion damage mechanism and erosion prediction of boronized coatings at elevated temperatures. *Materials*, 14(1), 123.

Dziarski, P., & Makuch, N. (2024). Characterization of Wear Resistance and Corrosion Resistance of Plasma Paste Borided Layers Produced on Pure Titanium. *Materials*, 17(16), 3922.

Günen, A. (2021). Tribocorrosion behavior of boronized Co1. 19Cr1. 86Fe1. 30Mn1. 39Ni1. 05Al0. 17B0. 04 high entropy alloy. *Surface and Coatings Technology*, 421, 127426.

Günen, A., Küçük, Y., Er, Y., Cay, V. V., Öge, M., & Gök, M. S. (2015). Effect of the powder particle size on the wear behavior of boronized AISI 304 stainless steel. *Materials Testing*, 57(5), 468–473.

Guo, X., Jin, X., Shi, X., Yang, H., Zhang, M., & Qiao, J. (2021). Tribological behavior of boronized Fe40Mn20Cr20Ni20 high-entropy alloys. *Metals*, 11(10), 1561.

Kulka, M., Makuch, N., & Pertek, A. (2013). Microstructure and properties of laser-borided 41Cr4 steel. *Optics & Laser Technology*, 45, 308–318.

Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., & Małdziński, L. (2013). Simulation of the growth kinetics of boride layers formed on Fe during gas boriding in H<sub>2</sub>-BCl<sub>3</sub> atmosphere. *Journal of Solid State Chemistry*, 199, 196–203.

Kulka, M., Makuch, N., & Piasecki, A. (2017). Nanomechanical characterization and fracture toughness of FeB and Fe<sub>2</sub>B iron borides produced by gas boriding of Armco iron. *Surface and Coatings Technology*, 325, 515–532.

Litoria, A., Figueroa, C., Bim, L., Pruncu, C., Joshi, A., & Hosmani, S. (2020). Pack-boriding of low alloy steel: Microstructure evolution and migration behaviour of alloying elements. *Philosophical Magazine*, 100(3), 353–378.

Lukaszewicz, G., Tacikowski, M., Kulka, M., Chmielarz, K., & Świątnicki, W. A. (2023). The Effect of hybrid treatment combining boriding and nanobainitising on the tribological and mechanical properties of 66SiMnCrMo6-6-4 bearing steel. *Materials*, 16(9), 3436.

Makuch, N., Dziarski, P., & Kulka, M. (2020). Gas technique of simultaneous borocarburing of armco iron using trimethyl borate. *Coatings*, 10(6), 564.

Makuch, N., & Kulka, M. (2016). Fracture toughness of hard ceramic phases produced on Nimonic 80A-alloy by gas boriding. *Ceramics international*, 42(2), 3275–3289.

Makuch, N., Kulka, M., & Mikołajczak, D. (2017). Corrosion behavior of hard boride layer produced on Nimonic 80A-alloy by gas boriding. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70, 2509–2527.

Martini, C., Palombarini, G., & Carbucicchio, M. (2004). Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron. *Journal of Materials Science*, 39, 933–937.

Morales-Robles, Á.J.; Ortiz-Domínguez, M.; Gómez-Vargas, O.A.; Moreno-González, M.d.l.L., (2024) Boronize Coatings Studied with a NewMassTransfer Model. *Materials*, 17, 5309. <https://doi.org/10.3390/ma17215309>

Ortiz-Domínguez, M., Keddam, M., Gómez Vargas, O. A., Ares de Parga, G., & Zuno Silva, J. (2022). Bilayer growth kinetics and tribological characterization of boronized AISI M2 steel. *Materials Testing*, 64(4), 473–489.

- Ortiz-Domínguez, M., Keddám, M., & Morales-Robles, Á. J. (2024). Characterizations and boron diffusion modelling on the AISI H13 steel. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 00, 29–29.
- Ortiz-Domínguez, M., Morales-Robles, Á. J., Gómez-Vargas, O. A., & de Jesús Cruz-Victoria, T. (2023). Analysis of Diffusion Coefficients of Iron Monoboride and Diiron Boride Coating Formed on the Surface of AISI 420 Steel by Two Different Models: Experiments and Modelling. *Materials*, 16(13), 4801.
- Ortiz-Domínguez, M., Morales-Robles, Á. J., Gómez-Vargas, O. A., & Moreno-González, G. (2024). Surface Growth of Boronize Coatings Studied with Mathematical Models of Diffusion. *Metals*, 14(6), 670.
- Palumbo, M., Cacciamani, G., Bosco, E., & Baricco, M. (2001). Thermodynamic analysis of glass formation in Fe-B system. *Calphad*, 25(4), 625–637.
- Prahu, I. P. P. M. (2007). Analysis of the boronized layer on K 190 PM tool steel. *Materiali in tehnologije*, 41(2), 81–84.
- Rosales-Lopez, J., Olivares-Luna, M., Castillo-Vela, L., Chaparro-Pérez, K., Espino-Cortés, F., & Campos-Silva, I. (2025). Insights on the Pulsed-DC Powder-Pack Boriding Process: Effect of current density and electric field implications on the FeB and Fe<sub>2</sub>B growth kinetics. *Surface and Coatings Technology*, 502, 131965.
- Soydan, Y., Köksal, S., Demirer, A., & Çelik, V. (2008). Sliding friction and wear behavior of pack-boronized AISI 1050, 4140, and 8620 steels. *Tribology Transactions*, 51(1), 74–81.
- Zhong, J., Qin, W., Wang, X., Medvedovski, E., Szpunar, J. A., & Guan, K. (2019). Mechanism of texture formation in iron boride coatings on low-carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50, 58–62.