

EL IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA MATEMÁTICA EN ESPAÑA

Tomás Chacón Rebollo (Coordinador)
Guillermo Curbera Costello (Coordinador)

Universidad de Sevilla

1. INTRODUCCIÓN

Las matemáticas han producido, en los últimos años, una revolución silenciosa en todos los sectores productivos, que está transformando la economía mundial. La intensidad creativa de las matemáticas se ha acelerado notablemente en los últimos tiempos, y por tanto su aplicación a otras disciplinas –física, química, ingeniería, etc.–, así como a las actividades productivas, ha sido exponencial. En este sentido es relevante señalar que las matemáticas subyacen al surgimiento y desarrollo de las sucesivas disrupciones tecnológicas acontecidas desde el siglo XVIII hasta la actualidad. La sociedad está inmersa en lo que se ha convenido en denominar como tercera revolución industrial, Internet, donde el protagonismo de las matemáticas es absolutamente central. En efecto, las ciencias de la computación, originadas a mediados del siglo XX, los algoritmos y el análisis de bases de datos masivas se encuentran en la base del funcionamiento de las actividades productivas más pujantes de nuestro tiempo. Por otra parte, el horizonte que trazan los avances de frontera en robótica e inteligencia artificial, intensivos en conocimiento matemático por propia definición, no harán sino impulsar en mayor medida si cabe la presencia de las matemáticas en el tejido productivo.

Delimitar y estimar de manera precisa la aportación de las matemáticas a la economía es una tarea ardua. El Producto Interior Bruto (PIB), que es el instrumento básico que mide habitualmente la actividad económica, presenta una limitación natural derivada de su propia construcción a la hora de valorar aquellos bienes que no transitan por el mercado, como, por ejemplo, los bienes públicos. En este sentido, la naturaleza intangible de las matemáticas –que dificulta su medición– y, sobre todo, su categoría de bien no rival (véase más adelante) –que las acerca a la categoría de bien público– impiden valorar su peso

con la lógica de la Contabilidad Nacional, que es el marco general de medición de la actividad económica y del bienestar, en el que el PIB constituye el indicador por excelencia.

Esta explicación pretende resaltar las dificultades metodológicas que entraña determinar la aportación de las matemáticas al proceso económico. Es también una señal de cautela, para advertir que los datos que se presentan a continuación parten de premisas menos ambiciosas, pues la medición del valor económico de las matemáticas solo puede formularse como una aproximación. Dicha aproximación –existen otras, pero fuera del marco de la Contabilidad Nacional y basadas en criterios subjetivos de preferencias– es la de los beneficios apropiables y tangibles para los agentes que detentan el conocimiento matemático y obtienen beneficios particulares de las mismas.

Este es el enfoque seguido por los estudios pioneros en este ámbito, que buscaban la estimación del peso que tiene la matemática en la economía y el empleo, en concreto, los informes siguientes:

- *Measuring the Economic Benefits of Mathematical Science in the UK*, realizado en 2012 por la empresa consultora Deloitte para el Council for the Mathematical Sciences, que agrupa a las sociedades matemáticas del Reino Unido.
- *Mathematical sciences and their value for the Dutch economy*, realizado en 2014 por la consultora Deloitte para la organización Platform Wiskunde Nederland, que representa a la comunidad matemática holandesa.
- *Etude de l'impact socio-économique des Mathématiques en France*, realizado en 2015 por la empresa consultora CMI, por encargo de una serie de organizaciones e institutos matemáticos francesas.

En España, la Red Estratégica en Matemáticas (REM) se configuró en 2016 como una red de todos los nodos de relevancia en la investigación y transferencia matemática en España, integrando de hecho a toda la comunidad investigadora en matemáticas, que contó con la financiación de la Agencia Estatal de Investigación. La REM estaba formada por:

- Centre de Recerca Matemàtica/ Barcelona Graduate School in Mathematics.
- Basque Center for Applied Mathematics.

- Instituto de Ciencias Matemáticas.
- Red de Institutos Universitarios de Matemáticas.
- Red Española Matemática-Industria.
- Centros Públicos de Educación Superior.

Todos estos centros estuvieron coordinados por el Instituto de Matemáticas de la Universidad de Sevilla (IMUS). Dentro de sus planes de acciones de posicionamiento estratégico para las matemáticas españolas, se desarrollaron seis acciones estratégicas, una de las cuales era realizar un estudio del impacto socioeconómico de la investigación y la transferencia de tecnología matemáticas en España, en línea con los estudios arriba mencionados en Reino Unido, Holanda y Francia. Los datos y las conclusiones que se presentan a continuación proceden de dicho estudio, que fue realizado por la empresa consultora Analistas Financieros Internacionales (Afi). Puede consultarse completo en <https://institucionales.us.es/remimus/>. La información más técnica de carácter metodológico aparece en el Anexo 7 del estudio.

2. MATEMÁTICAS Y ECONOMÍA

Las matemáticas son una herramienta de conocimiento y de comunicación que permite resolver problemas económicos vitales para el funcionamiento de una sociedad. Tienen, por tanto, una intensa presencia en la tecnología y la economía. Desde el procesamiento de datos de producción o consumo en un ordenador, al razonamiento lógico utilizado para justificar una u otra decisión de política económica, las matemáticas se encuentran presentes en la realidad cotidiana, posibilitando la propia existencia de relaciones económicas. Podría argumentarse que sin el lenguaje, los resultados y los conceptos matemáticos, los individuos no podrían realizar la inmensa mayoría de las transacciones económicas que tienen lugar habitualmente. Intentemos imaginar el funcionamiento de los mercados con la inexistencia de un sistema de precios, la coordinación de cadenas de distribución o el mantenimiento de una red de comunicaciones sin el apoyo del lenguaje de los números. Así, las matemáticas son un instrumento social que reduce de manera drástica los costes de transacción, posibilitando la interacción entre la oferta de bienes y servicios y la demanda de los mismos. De ahí el interés por entender la naturaleza económica de las matemáticas y la manera en que incide en las actividades económicas.

2.1. Naturaleza económica de las matemáticas

Las matemáticas tienen una doble naturaleza desde el punto de vista económico. Por una parte, son un bien público de club y, por otra, un bien privado. Veamos esto.

A semejanza de otras producciones colectivas (como también ocurre con la lengua), la investigación y el uso intensivo de las matemáticas presentan algunas características de bien público: una vez probado un resultado matemático, su uso no agota las posibilidades de uso posterior por otras personas, con independencia del tiempo o del lugar donde se haga. Es lo que se conoce como un bien “no rival”.

Sin embargo, a diferencia de otros bienes públicos puros –como puede ser el aire o la defensa nacional–, las matemáticas presentan un cierto coste de acceso –es decir, de aprendizaje– que restringe la entrada o incluso excluye a quien no lo conoce o no lo domina suficientemente. Estos costes son tanto más altos cuanto menor predisposición o capacidad de acceso tienen los individuos a su aprendizaje. Así pues, la existencia de los costes de acceso las sitúa como bien público de club. Sin embargo, a diferencia de la mayoría de dichos bienes públicos de club, no presenta economías de congestión, sino de adopción o red, es decir, cuantos más usuarios tienen, mayor es su valor.

Figura 1. Características de bienes privados y públicos

	Exclusión	No exclusión
Rival	Bienes privados Ropa Bienes alimenticios	Bienes comunes de libre acceso Parques públicos Aguas internacionales Bienes de congestión Autopistas sin peaje Educación pública
No rival	Bienes de club Televisión de pago Clubes deportivos	Bienes públicos puros Defensa Investigación

Fuente: Afí.

Las implicaciones de la naturaleza de las matemáticas como bien público de club son diversas. En primer lugar, el mercado no tiene capacidad para producir la cantidad óptima de transmisión de conocimiento, ni de investigación, al no existir “apropiabilidad” y solo exclusión parcial. Esta es una de las razones por las cuales la transmisión del conocimiento en matemáticas precisa de la intervención pública, para que sea provista en cantidades óptimas (educación básica, investigación, etc.) más allá de la que el mercado puede asignar. Las matemáticas estarían en la base de la pirámide del conjunto de ideas y conocimientos que tienen aplicaciones productivas. Las modernas teorías del crecimiento económico ligan la evolución de la renta per cápita a largo plazo a la tasa a la que se acumula ese conocimiento. El efecto económico es además proporcional a la población que puede tener acceso a la utilización de este recurso.

La transmisión de conocimiento matemático genera grandes externalidades positivas que no son habitualmente reconocidas en las estadísticas

Al no ser un recurso apropiable, no existe un valor de mercado que refleje la verdadera utilidad que representa para la sociedad. Este “fallo de mercado” viene determinado por su condición de bien cuasi-público y porque los sistemas de contabilidad nacional solo son capaces de medir bienes privados, es decir, aquellos que tienen asignado un precio de mercado. Otro “fallo de mercado” que dificulta la medición de la aportación de las matemáticas a la economía es que el conocimiento matemático genera externalidades positivas (es decir, beneficios indirectos en otros mercados no reflejados en los precios de las transacciones). Por ejemplo, la enseñanza de matemáticas permite que las personas tomen mejores decisiones (como en la administración de recursos), una utilidad que no se encuentra en el coste de la transferencia de conocimiento (el salario cobrado por un profesor o profesora de Matemáticas).

Así pues, las matemáticas como bien económico, guardan similitudes con el lenguaje ordinario y comparten sus cuatro características básicas, como se muestra en la figura 2.

Miremos ahora a la naturaleza económica de las matemáticas como bien privado. Esto proviene de la existencia de beneficios apropiables por los agentes económicos que detentan el conocimiento matemático. Las matemáticas, desde esta perspectiva, pueden ser entendidas como un activo que precisa de una

inversión inicial en aprendizaje (los costes de acceso) y que a lo largo de la vida de la persona que lo adquiere le genera una serie de flujos de beneficios tangibles.

Así pues, los individuos se enfrentan a la disyuntiva de “invertir” esfuerzo en el aprendizaje matemático, en función de cuál sea ese balance entre flujos de beneficios y costes. Cuando estas ganancias sean fácilmente predecibles y mayores a los costes, las personas invertirán en su educación matemática. Los costes de aprendizaje incluyen tanto los costes monetarios como el valor (coste de oportunidad) de las horas necesarias de esfuerzo para alcanzar el standard requerido. Por el lado de los beneficios, estos podrían expresarse como la diferencia de salario que obtiene a lo largo de la vida laboral el personal trabajador que adquiere estos conocimientos sobre el salario que podría obtener si no dispusiese de ese conocimiento.

Cuanto menores sean los costes de aprendizaje y mayores sean los beneficios retribuidos al conocimiento, mayores serán los incentivos a extender el stock de conocimiento matemático entre los miembros de una determinada comunidad

Figura 2. Características de las matemáticas como bien público



Fuente: Afi.

De lo anterior se deducen una serie de conclusiones relevantes. Entre ellas, que cuanto mayor sea el apoyo público para disminuir los costes de aprendizaje,

mayor será el incentivo a extender, el *stock* de conocimiento matemático entre los y las integrantes de una determinada comunidad. Por el lado de los beneficios, cuanto mayor sea la prima del salario que retribuya ese conocimiento, más incentivos existirán para que las personas *participen* embarcándose en el aprendizaje matemático.

La ventaja de esta aproximación a la naturaleza de las matemáticas como bien económico es que es conciliable con las métricas que dispone la Contabilidad Nacional, en cuanto los “salarios y beneficios” atribuibles a la matemática son observables gracias a la información estadística elaborada por las instituciones públicas.

2.2. Importancia de las matemáticas para las actividades productivas y la economía

La economía es la disciplina de las llamadas ciencias sociales que se ocupa de la toma de decisiones y su interacción. Las matemáticas constituyen, por tanto, una herramienta fundamental para mejorar la toma de decisiones, así como un lenguaje fundamental que permite eliminar o reducir determinados costes de transacción. Por ejemplo, la programación matemática es un instrumento básico para lograr uno de los objetivos fundamentales de la ciencia económica como es la “asignación eficiente de recursos escasos”. Por otra parte, ámbitos de la matemática tan elementales como el álgebra matricial son de gran utilidad para la presentación y tratamiento de información en múltiples campos, desde la econometría a la contabilidad, así como para lograr una mejor gestión empresarial. Los modelos probabilísticos, por su parte, constituyen un instrumento fundamental para afrontar la toma de decisiones en contextos de incertidumbre y riesgo, como, por ejemplo, en el ámbito financiero.

Así, las matemáticas tienen una aplicación transversal a las actividades económicas. Hasta hace pocas décadas, su presencia era preponderante en las ramas industriales y de construcción, dada la intensidad matemática de las distintas ingenierías. Sin embargo, la revolución de Internet ha situado a las matemáticas como input fundamental de la producción, en tanto en cuanto los servicios –que representan en las economías desarrolladas cerca del 70% de la producción final de la economía– han ido incorporando de manera creciente tanto capital físico-tecnológico basado en matemáticas (tecnologías de la información y las comunicaciones, *softwares*, dispositivos electrónicos,

etc.), como capital humano matemático. Por ejemplo, el que se encarga de la realización de análisis de datos para distintas funciones empresariales, desde las estrategias de publicidad o marketing a las estrategias empresariales (fijación de precios) o la optimización de recursos (energéticos, humanos, etc.).

En términos generales, podría resumirse la participación de las matemáticas en la actividad productiva en tres ámbitos clave:

- 1) Diseño, modelaje, simulación y prototipado de productos. Las matemáticas añaden mucha precisión a la fabricación de bienes y servicios, permitiendo la sofisticación de los mismos. El ejemplo ilustrativo más recurrente es el de la automoción, donde las matemáticas han sido un instrumento fundamental para la mejora de los vehículos.
- 2) Optimización de procesos productivos y de organización. Las matemáticas son esenciales para reducir costes de transacción internos y externos, y mejorar la eficiencia (producir al menor coste posible). Un claro ejemplo es la aplicación de la matemática a la logística industrial, para la optimización de la red de distribución (almacén, reparto, ruta, planificación de los horarios, desplazamientos, etc.).
- 3) Análisis de datos. Las matemáticas proporcionan herramientas fundamentales para que la información disponible adquiriera sentido económico y sea aprovechable (por ejemplo, mediante técnicas de análisis de *big data*). En el sector aeronáutico, entre otros, la creación de prototipos de plataforma de análisis de grandes volúmenes de datos desestructurados permite mejorar la eficiencia de los vuelos (consumo de combustible, emisiones, tiempos de vuelo, retrasos, etc.).

3. EL PESO DE LA INVESTIGACIÓN MATEMÁTICA Y DE LA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA MATEMÁTICA EN LA ECONOMÍA ESPAÑOLA

La aproximación metodológica que se muestra, a continuación, para medir el peso en la economía española de la investigación y transferencia tecnológica matemática (en adelante, ITM) ha sido utilizada ampliamente en estudios de estas características, en particular, en los citados al comienzo, realizados en el Reino Unido, Holanda y Francia. Consiste en la consideración de los beneficios apropiables para los agentes que detentan el conocimiento matemático y perciben sus frutos en sus actividades correspondientes.

3.1. La cuantificación de las matemáticas como bien económico

En la medida en que la ITM (investigación y transferencia tecnológica matemática) forma parte del *stock* de capital humano y de capital físico, puede considerarse como un *Input* (oferta). No obstante, existen bienes o servicios cuya naturaleza es matemática (por ejemplo, una prima de seguro), por lo que también pueden considerarse como un *Output* (demanda). Por ello, la manera de aproximarse a la contribución de las matemáticas puede hacerse desde ambas lógicas, donde la clave es discernir la intensidad matemática, tanto de los *inputs* como del *output*. El análisis desarrollado en este trabajo se basa en el enfoque de ocupaciones (oferta). No obstante, también se explora el enfoque de productos (demanda), así como la posibilidad de aprovechar su complementariedad (enfoque combinado).

Un comentario sobre la terminología económica que usaremos a continuación. El Producto Interior Bruto (PIB) es el valor de mercado de los bienes y servicios finales producidos por una economía en un determinado periodo de tiempo (generalmente un año). Coincide con la suma de los valores añadidos del proceso de producción. Por ello, el PIB se identifica con la suma del Valor Añadido Bruto (VAB) y de los impuestos indirectos sobre los productos restando el valor de las subvenciones. En ocasiones se utilizará el VAB en la presentación de datos.

3.1.1. Estimación cuantitativa a través del enfoque de ocupaciones con intensidad matemática

A partir de la metodología del enfoque de ocupaciones, se obtiene que en España habría entre 2,4 y 3,8 millones de personal trabajador Equivalente en Jornada Completa (en adelante, EJC) con intensidad matemática en el año 2016, según el nivel de estudios que hayan completado (véase la figura 3). Estas magnitudes representan entre un 14,1% y un 22,1%, respectivamente, del total de personas ocupadas de la economía española en ese mismo año. En ambos casos, se trata de una estimación de máximos, ya que considera que estos dedican la totalidad de su tiempo de trabajo a la realización de tareas con intensidad matemática. Sin embargo, esto puede no ser así, ya que existen ciertas tareas, también relevantes en el ejercicio de cualquier profesión, que no requieren de conocimientos matemáticos avanzados por parte de la plantilla o que para su ejecución estos últimos no se apoyan sobre herramientas con alto contenido

matemático (maquinaria). Un ejemplo de ello son las relaciones comerciales e institucionales que se celebran de forma presencial, la asistencia a reuniones de coordinación de equipos, etc. Aunque en muchas de estas tareas también se tenga en cuenta el uso del tiempo y la optimización del mismo.

Por ello, resulta conveniente atribuir una proporción de tiempo a cada una de las ocupaciones identificadas con intensidad matemática. La no disponibilidad estadística del uso del tiempo profesional en los microdatos de la Encuesta de Población Activa (EPA) que publica el Instituto Nacional de Estadística (INE) hace necesario el apoyo en personal experto conocedor de la transferencia matemática y de las tareas que desempeñan este tipo de profesionales en su día a día.

Figura 3. Ocupados totales y EJC con intensidad matemática según nivel educativo completado (personas y % total) (2016)

Personas	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Total				
Por nivel educ.	2.350.916	568.165	1.261	801.724
Acumulado	2.350.916	2.919.080	2.920.341	3.722.065
EJC				
Por nivel educ.	2.450.880	582.801	1.401	805.940
Acumulado	2.450.880	3.033.681	3.035.083	3.841.022
% total	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Total				
Por nivel educ.	13,5%	3,3%	0,0%	4,6%
Acumulado	13,5%	16,8%	16,8%	21,4%
EJC				
Por nivel educ.	14,1%	3,3%	0,0%	4,6%
Acumulado	14,1%	17,4%	17,4%	22,1%

Fuente: Afi, INE (microdatos EPA).

Siguiendo el enfoque de ocupaciones, las matemáticas serían responsables de más de 630.000 puestos de trabajo (3,6% del total de ocupados y ocupadas) y de unos 62.000 millones de euros de contribución al VAB (6,1% del total de la economía española de 2016)

Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados revelan que las actividades intensivas en matemáticas contribuirían a la generación de cerca de 630.000 ocupadas y ocupados EJC de forma directa si se abarcase a todo el colectivo,

con independencia de su nivel formativo, lo que equivaldría al 3,6% del total del personal trabajador de la economía española (véase figura 4). Si el impacto se circunscribe a aquellas personas ocupadas que han completado un nivel educativo alto, entonces las actividades intensivas en matemáticas contribuirían a la generación de más de medio millón de empleos.

Figura 4. Estimación de impacto directo de las actividades intensivas en matemáticas sobre el empleo en España según nivel educativo completado por el trabajador/a (personas equivalentes a jornada completa y % total ocupados) (2016)

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Personas	507.641	581.257	581.597	629.239
% total	2,9%	3,3%	3,3%	3,6%

Fuente: Afi, INE (microdatos EPA).

El conocimiento de la productividad por hora trabajada de cada uno de los 63 sectores económicos que proporciona el marco *Input-Output*, junto con la estimación del número de ocupados EJC, permite conocer el Valor Añadido Bruto (VAB) generado por las actividades con intensidad matemática. Podría incluso considerarse que el VAB estaría infraestimado si se atribuyese la productividad media del sector y no una mayor que podría presumírsele a las ocupaciones intensivas en matemáticas. El conocimiento de los salarios de estos y estas profesionales para cada sector económico podría cuantificar esta diferencia, si es que existiese. Sin embargo, la no disponibilidad estadística de la variable de salarios en los microdatos de la EPA que cuentan con el detalle de ocupaciones y sectores indicado con anterioridad (tres dígitos en ambos casos), dificulta la constatación de este hecho. Por ello, se ha procedido a asignar a cada ocupado u ocupada intensiva en matemáticas la misma productividad que la del resto de personas ocupadas del sector económico en que trabaja.

La productividad de las ramas económicas en las que está empleado este tipo de profesionales se sitúa en los 47,2 euros por hora trabajada en 2016, mientras que la media se ubica en los 31,4 euros por hora trabajada

De esta manera, se obtiene que las actividades intensivas en matemáticas contribuirían a la generación de cerca de unos 62.000 millones de euros de VAB de forma directa si se tuviese en cuenta a todo el colectivo de profesionales de

las matemáticas, lo que equivaldría al 6,1% del total del VAB de la economía española de 2016 (véase figura 5). Si solo se considerasen aquellos que han completado estudios universitarios, el impacto directo en VAB se situaría por encima de los 50.000 millones de euros (5% del total).

Nótese que el impacto en términos de VAB supera al estimado para el caso del empleo. Esto se debe al hecho de que este tipo de profesionales predominan en los sectores con la productividad laboral más alta. La productividad promedio de las ramas económicas en las que está empleado este tipo de profesionales se sitúa en los 47,2 euros por hora trabajada en 2016, mientras que la media sectorial se ubica en los 31,4 euros por hora trabajada. Por lo tanto, la contribución económica de las actividades intensivas en matemáticas es mayor que la que se deduce en términos sociales (trabajadores y trabajadoras). Un hecho que contribuye a mejorar la productividad laboral, otra de las debilidades de las que adolece el mercado de trabajo español y que permitiría mejorar la ansiada competitividad de la economía española.

Figura 5. Estimación de impacto directo de las actividades intensivas en matemáticas sobre el VAB en España según nivel educativo completado por el trabajador/a (millones de euros y % total) (2016)

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Mill. Eur.	50.324	57.406	57.466	61.747
% total	5,0%	5,7%	5,7%	6,1%

Fuente: Afi, INE (microdatos EPA).

3.1.2. Estimación cuantitativa a través del enfoque combinado de ocupaciones y productos con intensidad matemática

El enfoque de ocupaciones que hemos visto contempla la penetración de las y los profesionales matemáticos en el tejido productivo y su impacto económico en términos de valor añadido. Pero hay ocasiones en las que su peso en términos de empleo puede ser importante y no captar suficientemente todo el potencial de generación de valor. Por el contrario, el enfoque de productos que se plantea en la metodología puede incurrir en infravaloraciones en aquellas ramas de actividad económica donde las matemáticas presentan un menor peso.

El enfoque de ocupaciones y el de productos tienen, por tanto, un importante grado de complementariedad. Sin embargo, ambos procedimientos no resultan agregables directamente, ya que podría incurrirse en duplicaciones de los agregados calculados. De cara a integrar ambos métodos es preciso tener en cuenta lo siguiente:

- En las ramas de gran especialización en productos matemáticos, no se utilizará el enfoque de las ocupaciones, sino el de productos.
- En aquellas de menor especialización tecnológica, el enfoque de ocupaciones será el que se emplee para la estimación de impacto de las matemáticas.

El enfoque combinado arroja un impacto de más de un millón de ocupados (6% del empleo total) y 103.000 millones de euros de VAB (10,1% del VAB total)

El enfoque combinado de ocupaciones y productos con intensidad matemática revela que el impacto directo en empleo EJC se elevaría hasta el millón de las personas ocupadas, con independencia del nivel de estudios completado por los trabajadores y trabajadoras. Este volumen representaría alrededor del 6 % del empleo total de la economía española en 2016 (véase la figura 6).

Figura 6. Estimación de impacto directo de las actividades intensivas en matemáticas sobre el empleo en España según nivel educativo completado por el trabajador/a (personas equivalentes a jornada completa y % total ocupados) (2016)

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Personas	977.425	1.015.549	1.015.552	1.044.965
% total	5,6%	5,8%	5,8%	6,0%

Fuente: Afi, INE (microdatos EPA).

En lo que respecta al impacto directo en VAB, la estimación apunta a un volumen de unos 103.000 millones de euros, si se abarca a todo el colectivo de profesionales de las matemáticas, que representaría el 10,1% del VAB de España en 2016 (véase la figura 7). Si solo se atendiese a las personas que han completado un nivel educativo alto, entonces el impacto directo se situaría por encima de los 98.000 millones de euros (9,7% del VAB total).

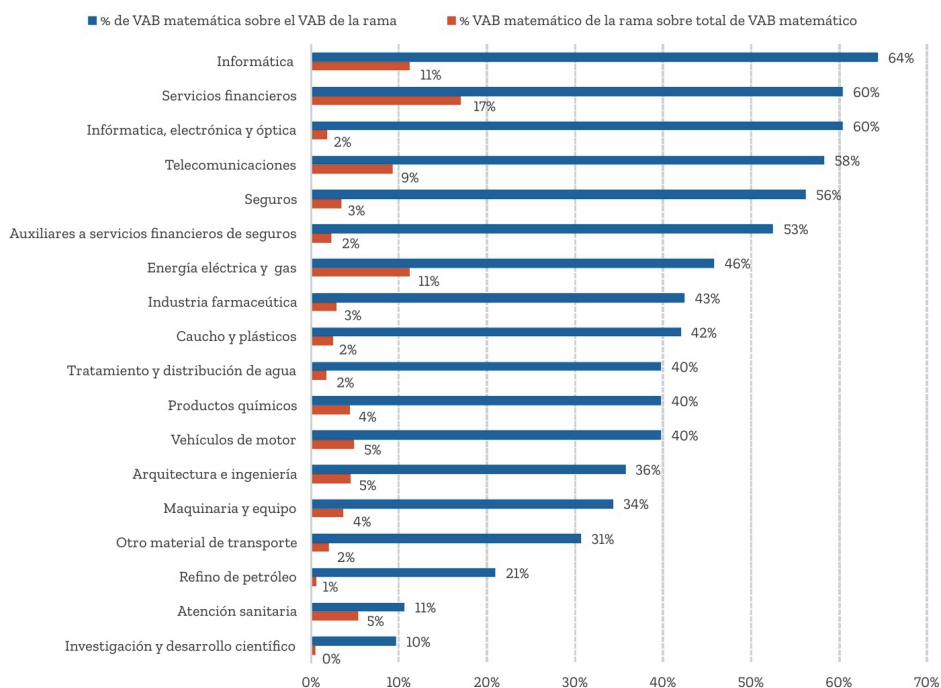
Figura 7. Estimación de impacto directo de las actividades intensivas en matemáticas sobre el VAB en España según nivel educativo completado por el trabajador/a (millones de euros y % total VAB) (2016)

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Mill. Eur.	98.043	100.886	100.886	102.812
% total	9,7%	9,9%	9,9%	10,1%

Fuente: Afi, INE (microdatos EPA).

El análisis por rama de actividad revela que es la informática, seguida de las actividades financieras, los servicios de telecomunicaciones y la rama de energía eléctrica y gas las que mayor impacto directo tienen a consecuencia de la investigación y uso de las herramientas matemáticas. Su VAB no solo está generado en una importante proporción por las matemáticas, sino que explican también el grueso del impacto de las mismas sobre la economía española (véase la figura 8).

Figura 8. Ramas de actividad económica ordenadas de mayor a menor impacto directo de las matemáticas (2016)



Por último, a partir de los tipos efectivos medios de las principales figuras impositivas (el Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas, el Impuesto sobre el Valor Añadido y el Impuesto de Sociedades) y de la cotización media a la Seguridad Social, se puede estimar también la recaudación que realiza el Estado a través de las actividades intensivas en matemáticas. Según esta metodología y las estimaciones de impacto directo en VAB y empleo que se desprenden del enfoque combinado, las actividades intensivas en matemáticas contribuirían a la recaudación de unos 107.000 millones de euros de impuestos y contribuciones a la Seguridad Social, lo que equivaldría al 25,8% del total recaudado por las AA.PP. en el año 2016, si se atiende al colectivo de profesionales en su conjunto (véase la figura 9). Si se circunscribe a los y las profesionales que han completado un nivel educativo alto, entonces la recaudación fiscal se situaría en los 102.000 millones de euros (24,7% del total).

Las actividades intensivas en matemáticas contribuirían a la recaudación de unos 107.000 millones de euros de impuestos y contribuciones a la Seguridad Social, lo que equivaldría al 25,8% del total recaudado por las AA.PP. en el año 2016

Figura 9. Estimación de impacto directo de las actividades intensivas en matemáticas sobre la recaudación fiscal en España según nivel educativo completado por el trabajador/a (millones de euros, % total) (2016)

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Mill. Eur.	102.269	105.246	105.246	107.076
% total	24,7%	25,4%	25,4%	25,8%

Fuente: Afi, INE.

3.1.3. Impacto indirecto e inducido: efectos de arrastre sobre otros sectores económicos

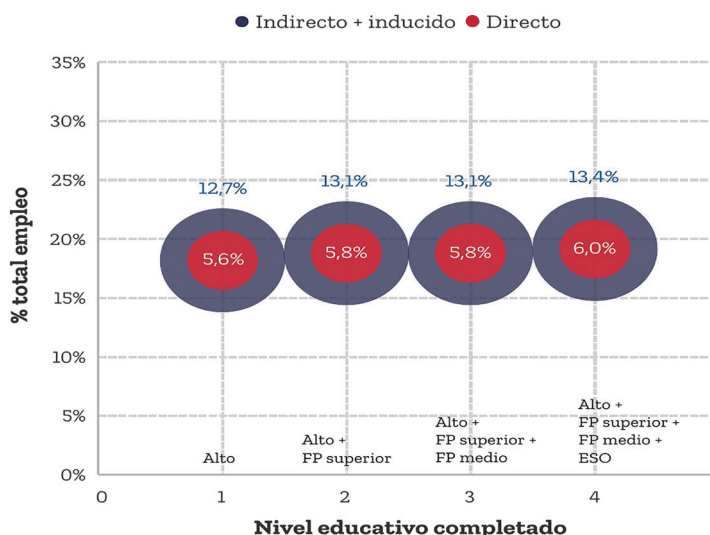
Las actividades intensivas en matemáticas ejercen otro tipo de impactos que van más allá de los generados directamente sobre los y las profesionales, los sectores económicos en los que trabajan y las tecnologías que emplean para desarrollar su trabajo. Este otro tipo de impactos son:

- **Los efectos indirectos**, que se derivan de la propia pertenencia de un sector a una cadena de valor (la relación con proveedores de bienes y servicios, por ejemplo).
- **Los efectos inducidos**, aquellos otros que se generan por el uso de las rentas derivadas de las actividades intensivas en matemáticas (gasto e inversión de las rentas del trabajo que realizan en bienes y servicios los profesionales con intensidad matemática).

Al incluir los efectos indirectos e inducidos, las actividades intensivas en matemáticas explican alrededor del 19% del total del empleo y el 27% del VAB español en el año 2016

Para estimar el impacto indirecto e inducido se emplean los multiplicadores que se desprenden de la Tabla *Input-Output* de 2010 de la economía española que proporciona el INE. Si se contemplasen estos **efectos de arrastre** en la estimación de impacto directo que se deduce del enfoque combinado de ocupaciones y productos, las actividades intensivas en matemáticas contribuirían a la generación de más de tres millones de personas ocupadas, con independencia del nivel educativo completado por estos y estas profesionales (véase la figura 10).

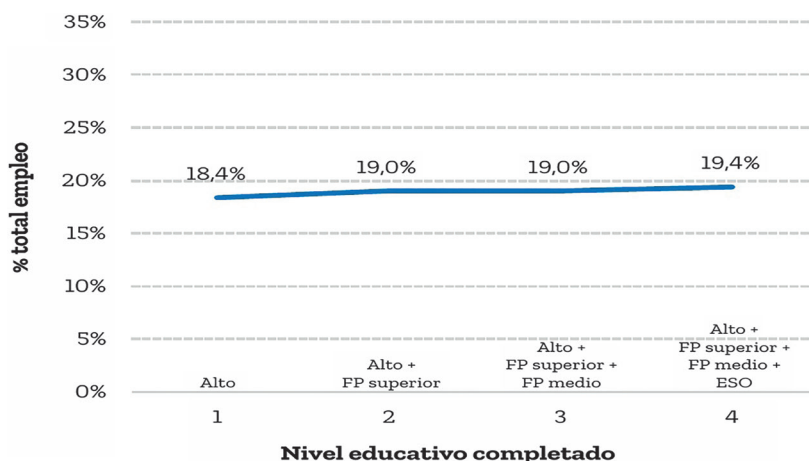
Figura 10. Estimación de impacto directo, indirecto e inducido de las actividades intensivas en matemáticas sobre el empleo en España (% total ocupados/as) según nivel educativo completado (2016)



Fuente: Afi, INE (microdatos EPA, TIO).

En términos relativos, las actividades intensivas en matemáticas estarían explicando alrededor del 19% del total del empleo de la economía española en el año 2016 (véase la figura 11). La parte atribuible al impacto indirecto e inducido, por tanto, arrojaría unos 2,3 millones de personas ocupadas EJC más, distribuidas por todas las actividades económicas, que representarían un 13,4% del total de ocupados y ocupadas de 2016.

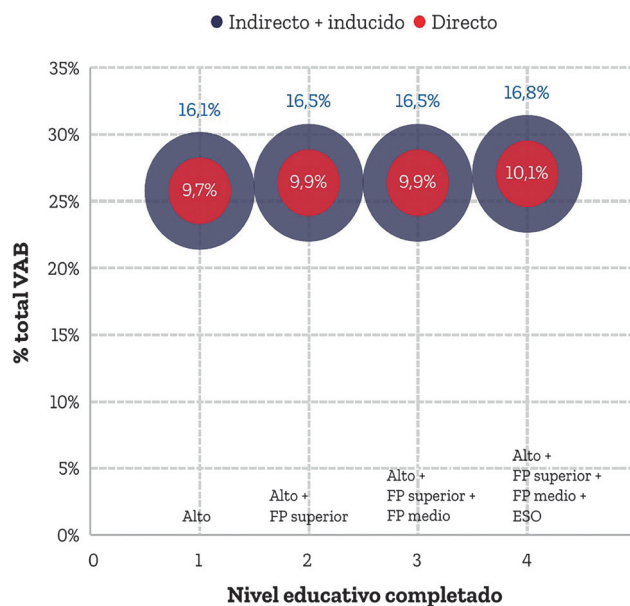
Figura 11. Estimación de impacto total de las actividades intensivas en matemáticas sobre el empleo en España (% total ocupados) según nivel educativo completado (2016)



Fuente: Afi, INE (microdatos EPA, TIO).

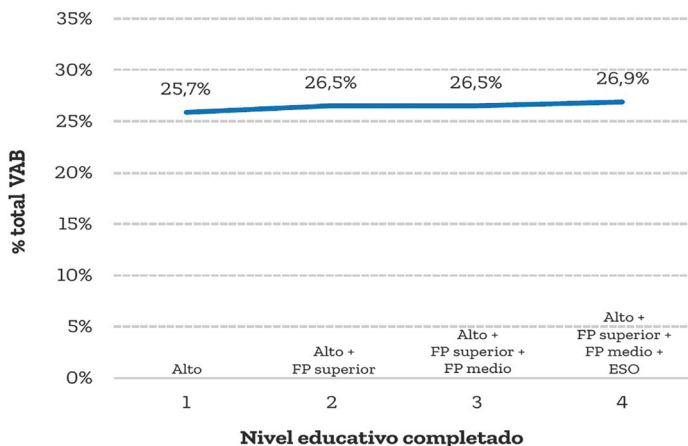
En cuanto al VAB, si se añadiesen los impactos indirectos e inducidos de las actividades intensivas en matemáticas, el impacto global ascendería hasta los 273.000 millones de euros, lo que representaría el 26,9% del total del VAB generado por la economía española en 2016 (véase las figuras 12 y 13). En este caso, el impacto indirecto e inducido generaría unos 170.000 millones de euros en otras actividades económicas, que vendrían a representar el 16,8% del VAB total de la economía española en 2016. La magnitud de estos impactos pone de manifiesto el importante efecto de arrastre que ejercen las actividades intensivas en matemáticas sobre el tejido productivo de nuestro país.

Figura 12. Estimación de impacto directo, indirecto e inducido de las actividades intensivas en matemáticas sobre el VAB en España (% total) según nivel educativo completado (2016)



Fuente: Afi, INE (microdatos EPA, TIO).

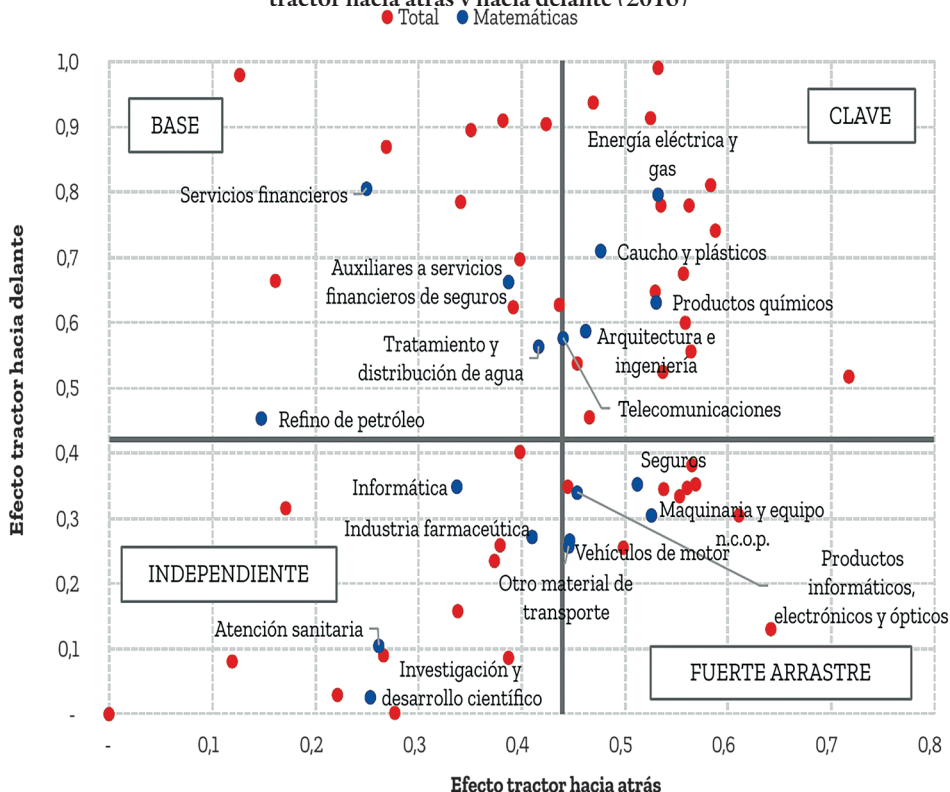
Figura 13. Estimación de impacto total de las actividades intensivas en matemáticas sobre el VAB en España (% total) según nivel educativo completado (2016)



Fuente: Afi, INE (microdatos EPA, TIO).

Si se atiende a la descomposición de dicho efecto de arrastre hacia delante y hacia atrás, las ramas de actividad económica que están relacionadas con las actividades intensivas en matemáticas se pueden clasificar según la tipología de estos “efectos tractores” o eslabonamientos (del inglés, *linkages*). Las ramas más intensivas en matemáticas constituyen sectores clave, tanto por su capacidad de arrastre como de soporte al resto de actividades del tejido productivo. En el cuadrante II (superior derecho) de la figura 14 se concentran las actividades con fuertes eslabonamientos hacia delante y hacia atrás, los considerados como sectores “Clave”. Se denominan así ya que ejercen tanto una labor de arrastre sobre otras actividades, como de soporte para el crecimiento de otros sectores, por lo que revisten un carácter estratégico. En este cuadrante se encuentran la rama de energía eléctrica y gas, la rama industrial de elaboración de caucho y plásticos, la industria química, los servicios de arquitectura e ingeniería y los de telecomunicaciones. Todas estas ramas coinciden, además, con las actividades que presentan un mayor impacto global de intensidad matemática. Sin embargo, el resto de las áreas de actividad económica con mayor impacto de las matemáticas que la media sectorial, como son los servicios financieros, la informática o las actividades de I+D+i, se distribuyen a lo largo de los cuatro cuadrantes, evidenciando la transversalidad de las mismas.

Figura 14. Clasificación de las ramas productivas de intensidad matemática según su efecto tractor hacia atrás y hacia delante (2016)



Fuente: Afi, INE (microdatos EPA, TIO).

3.2. El peso económico de las matemáticas en España en perspectiva comparada

Una manera de evaluar la relevancia de las matemáticas sobre la economía española es compararla con la que representan en otras economías europeas desarrolladas. De este análisis se desprende que el recorrido avanzado por las actividades intensivas en matemáticas en España ha sido mucho y muy loable –a juzgar por la visión trasladada por buena parte de los expertos consultados–, pero que queda amplio camino por recorrer, pues el impacto de las actividades intensivas en matemáticas estimado con anterioridad es menor que el obtenido en otros países europeos donde se ha realizado un estudio similar.

La relevancia de las ocupaciones intensivas en matemáticas es menor en España que en Reino Unido, Francia y Holanda

En términos de empleo directo, la estimación de impacto en España se sitúa en el 6% del empleo total, según el enfoque combinado, mientras que en Reino Unido, Francia y Holanda oscilan entre el 10% y el 11% del total (véase la figura 15).

Lo mismo ocurre en términos de VAB, ya que la estimación de España se eleva hasta el 10,1% del total, mientras que en otros países europeos el impacto directo se sitúa entre el 13% y el 16% del VAB total (véase la figura 16).

Figura 15. Estimación de impacto de las actividades intensivas en matemáticas sobre el empleo en Reino Unido, Francia, Holanda y España (millones de personas equivalentes a jornada completa y % total ocupados)

Empleo (mill.)	Directo	Indirecto	Inducido	Total
Reino Unido	2,8	2,9	4,1	9,8
Francia	2,4	n.d.	n.d.	n.d.
Holanda	0,9	0,5	0,8	2,3
España	1,0	2,3		3,3

Empleo (% total)	Directo	Indirecto	Inducido	Total
Reino Unido	9,8%	10,2%	14,4%	34,4%
Francia	9,0%	n.d.	n.d.	n.d.
Holanda	10,7%	6,2%	9,1%	26,0%
España	6,0%	13,4%		19,4%

Fuente: Afi, INE (microdatos EPA).

Figura 16. Estimación de impacto de las actividades intensivas en matemáticas sobre el VAB en Reino Unido, Francia, Holanda y España (miles de millones de euros, % total)

VAB (mil mill.)	Directo	Indirecto	Inducido	Total
Reino Unido	208	155	192	555
Francia	285	n.d.	n.d.	n.d.
Holanda	71	37	51	159
España	103	170		273

VAB (% total)	Directo	Indirecto	Inducido	Total
Reino Unido	16,0%	12,0%	15,0%	43,0%
Francia	15,0%	n.d.	n.d.	n.d.
Holanda	13,2%	6,9%	9,5%	29,6%
España	10,1%	16,8%		26,9%

Fuente: Afi, Deloitte, CMI.

Si se replicase el ejercicio realizado en estos otros países europeos, basando la estimación en el enfoque de ocupaciones (y no en el combinado) y asignando la proporción media de horas asignada a cada ocupación (en lugar de la trasladada por los expertos consultados), se obtendría que el impacto directo en empleo y VAB (6,4% y 10,7% sobre el total, respectivamente) sería igualmente inferior al observado en Reino Unido, Francia y Holanda (véase la figura 17).

Figura 17. Estimación de impacto directo de las actividades intensivas en matemáticas en España asignando la misma proporción de tiempo que la de los estudios de Reino Unido, Francia y Holanda

Figura 17.1. Sobre empleo (ocupados/as equivalentes a jornada completa, % total), 2016

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Personas	850.635	1.037.990	1.039.170	1.119.966
% total	4,9%	6,0%	6,0%	6,4%

Figura 17.2. Sobre VAB (miles de millones de euros de VAB, % total), 2016

	Alto	Alto + FPsuperior	Alto + FPsuperior + FPmedio	Alto + FPsuperior + FPmedio + ESO
Mill. Eur.	82.142	100.642	100.895	108.859
% total	8,1%	9,9%	9,9%	10,7%

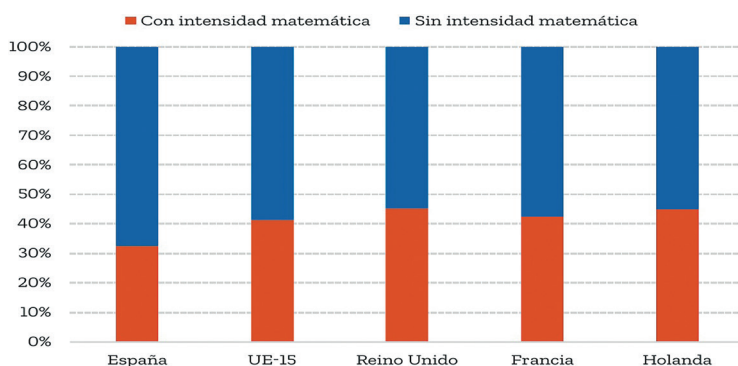
Fuente: Afi, INE (microdatos EPA), Deloitte, CMI.

El hecho de que este impacto sea menor en España que el cuantificado por los estudios consultados en otros países europeos no sorprende en absoluto y responde a la diferente composición de la estructura productiva de la economía española (menor número y proporción de ocupados y ocupadas con intensidad matemática que en estos otros países), así como al grado de competitividad de la misma (menor productividad laboral en términos relativos).

España destaca por estar muy rezagada en profesiones de intensidad matemática como especialistas en bases de datos y redes informáticas, finanzas, profesionales de las tecnologías de la información o diseñadores de software y multimedia

Según Eurostat, la relevancia de las ocupaciones intensivas en matemáticas es menor en España que en Reino Unido, Francia y Holanda. Si se agregan las ocupaciones según sean o no intensivas en matemáticas, se obtiene que en España representan alrededor del 30% del total (véase la figura 18), mientras que en la Unión Europea-15 este mismo porcentaje se eleva hasta el 40%, siendo más alto, incluso, en el caso de Reino Unido, que es el país con el mayor impacto estimado de entre todos los analizados.

Figura 18. Distribución de ocupados según ocupaciones de intensidad matemática en España, UE-15, Reino Unido, Francia y Holanda (% total ocupados) (2015)



Fuente: Afi, Cedefop.

Dentro de estas ocupaciones intensivas en matemáticas, España destaca por estar muy rezagada respecto a Reino Unido, Francia y Holanda, en las siguientes profesiones:

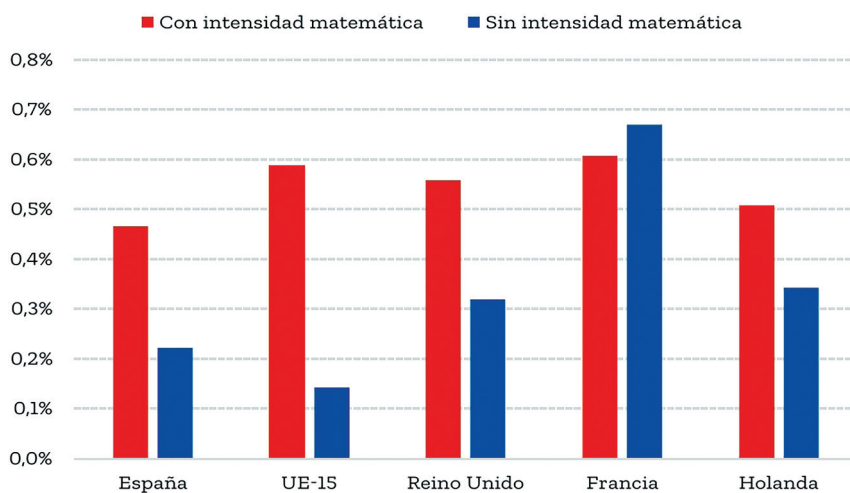
- Especialistas en organización de la Administración pública y de las empresas y en la comercialización, que incluyen ocupaciones como los especialistas en finanzas (código 261 de la CNO-11), especialistas en organización y administración (código 262) y profesionales de ventas técnicas y médicas, excepto las TIC (código 264). Un aspecto que no sorprende, ya que las plazas europeas financieras, así como los centros de poder económico, se distribuyen entre la City de Londres y las ciudades ubicadas en el centro del continente europeo (París, Luxemburgo, Bruselas, etc.).

- Profesionales de las tecnologías de la información, que contempla profesiones, como las de los analistas y diseñadores de software y multimedia (código 271) y especialistas en bases de datos y en redes informáticas (código 272). Aun cuando el personal técnico TIC (programadores informáticos, técnicos audiovisuales y en telecomunicaciones, etc.) tiene un peso relativo mayor en España que en estos otros países europeos, lo cierto es que los ingenieros e ingenieras TIC tienen una menor presencia en el tejido productivo español.

El crecimiento previsto para las ocupaciones intensivas en matemáticas en la próxima década es inferior para España que para los países europeos de referencia

Pero es que, además, según el Centro Europeo para el Desarrollo de la Formación Profesional (Cedefop, organismo de la Comisión Europea dedicado a asunto de educación y formación profesional) las previsiones de crecimiento de las ocupaciones intensivas en matemáticas para la década que comprende entre el año 2015 y el año 2025 son menores para España (se estima que crecerán a un ritmo medio anual del 0,47%) que para estos otros países europeos (0,59% en media anual para el caso de la UE-15, por ejemplo), lo que ampliaría la diferencia existente ya en la actualidad (véase la figura 19). Y eso, a pesar de que las perspectivas de crecimiento del empleo para la próxima década de estas profesiones son mucho más favorables que las del resto de ocupaciones. En concreto, su ritmo de crecimiento (0,47% indicado con anterioridad) más que duplica al del resto de ocupaciones (que lo haría al 0,22% en media anual) para el periodo 2015/2025.

Figura 19. Crecimiento de las personas ocupadas según trabajos de intensidad económica en España, UE-15, Reino Unido, Francia y Holanda (crecimiento medio anual). Previsiones Cedefop 2015/2025



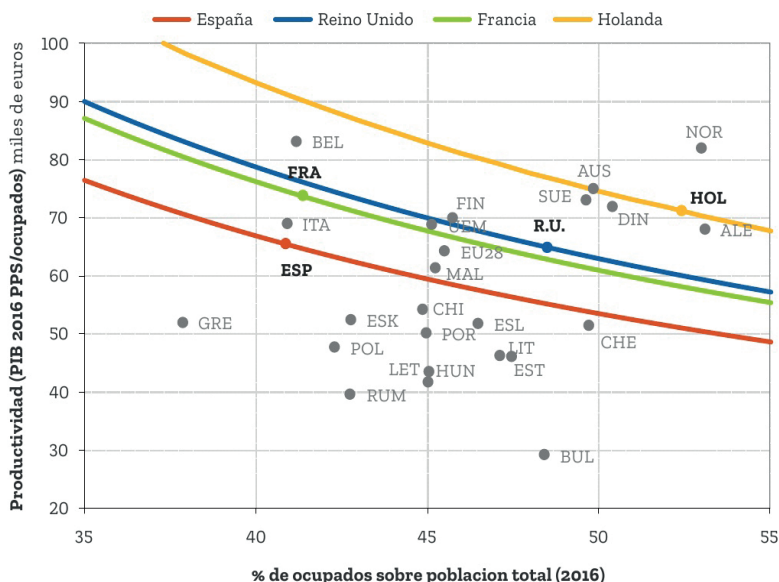
Fuente: Afi, Cedefop.

La diferencia de impacto de las actividades intensivas en matemáticas se explica más bien por la diferente composición de su estructura productiva que por una menor productividad laboral

La productividad que genera cada ocupado en España es sustancialmente inferior a la que presentan Reino Unido, Francia y Holanda. De hecho, en ocasiones se alude a la infrautilización de recursos humanos (menor tasa de empleo) y a la menor productividad laboral (PIB por persona empleada) como dos de los elementos que limitan el crecimiento del PIB per cápita, pues la renta per cápita se puede obtener multiplicando la productividad del trabajo por el porcentaje de población empleada (véase la figura 20). Sin embargo, el escalón existente entre el impacto en empleo y PIB de unos países a otros es prácticamente el mismo, lo que evidencia, de alguna u otra forma, que las y los profesionales matemáticos en España cuentan con una productividad relativa a su media nacional muy semejante a la observada en estos otros países europeos. Por tanto, la diferencia de impacto de las actividades intensivas en matemáticas entre España y Reino Unido, Francia y Holanda se explica más bien por la diferente composición de su estructura productiva, que por una menor productividad laboral.

Las y los profesionales matemáticos en España cuentan con una productividad relativa a su media nacional muy semejante a la observada en estos otros países europeos

Figura 20. Descomposición del PIB per cápita de los principales países europeos (miles de euros y % total población, curvas de Iso-Renta por habitante*) (2016)



Fuente: Afi, INE, Eurostat.

4. LAS MATEMÁTICAS COMO VECTOR ESTRATÉGICO DE CRECIMIENTO Y PROGRESO ECONÓMICO

El conocimiento matemático constituye una de las bases para poder alcanzar mejoras para la combinación de los factores productivos y aumentar, por ende, la capacidad productiva de la economía. En otras palabras, es una herramienta esencial para el impulso de la productividad del trabajo, que es el determinante fundamental del crecimiento económico en el largo plazo del PIB per cápita cuando todos los factores productivos están dispuestos a la producción de bienes y servicios. Afirma Paul Krugman que si bien la productividad del trabajo es importante a corto plazo, “en el largo plazo es casi todo”. Además, al ser un bien no rival, los beneficios económicos del empleo del conocimiento matemático pueden llegar a ser proporcionales a la población, impulsando así procesos de

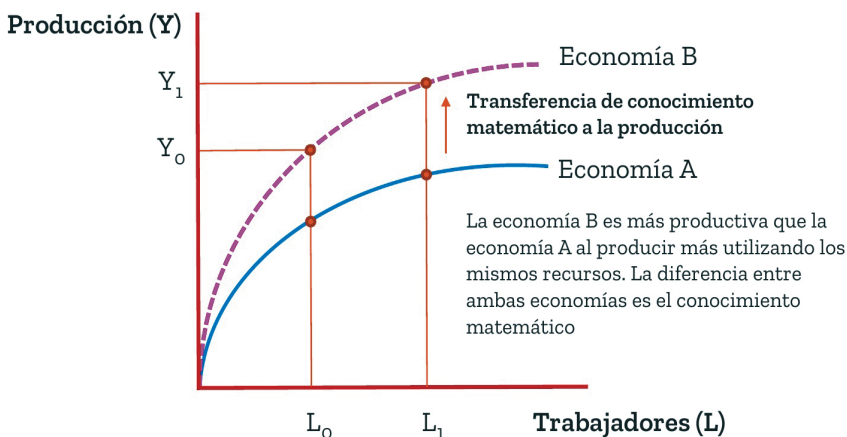
crecimiento muy acelerado, como el que viene observándose en China en las últimas tres décadas.

Las matemáticas se encuentran en la base del aumento de la productividad del trabajo, que es el determinante fundamental del crecimiento económico a largo plazo

Para ilustrar la relación entre las matemáticas y el crecimiento económico, podemos recurrir a una representación sencilla que relaciona la cantidad de personal trabajador de una economía y la producción total de bienes y servicios, donde puede observarse, intuitivamente, por qué el *stock* de conocimiento matemático y su transferencia a las actividades productivas es un determinante fundamental de la capacidad de crecimiento a largo plazo.

En la figura 21 se comparan dos economías imaginarias idénticas (ambas disponen del mismo número de trabajadores y trabajadoras totales), salvo en el conocimiento matemático que atesoran (la economía B incorpora más matemáticas al proceso productivo que la economía A). El personal trabajador de la economía B es capaz de producir una mayor cantidad de bienes y servicios en la misma cantidad de tiempo que el de la economía A, simplemente porque sus “técnicas de producción” son más sofisticadas. Por llevarlo a un ejemplo concreto para facilitar su comprensión, podría suponerse que en la economía B los empleados y empleadas conocen y saben usar algoritmos, mientras que los de la economía A, no. Los algoritmos, en definitiva, permitirían resolver problemas de asignación de manera muy eficiente al personal trabajador de la economía B, ahorrando horas de trabajo necesarias para alcanzar el mismo nivel de producción al mismo y elevando el producto per cápita de la población.

Figura 21. Diferencia de capacidad productiva entre dos economías debido al conocimiento matemático

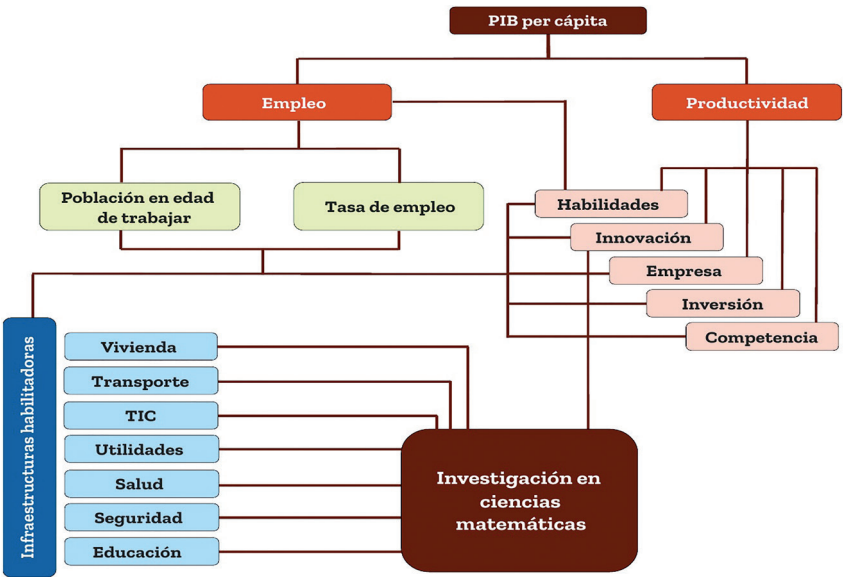


Los canales de transmisión de la investigación matemática a la productividad son diversos. Por un lado, inciden decisivamente en una serie de infraestructuras habilitadoras. Desde la construcción de viviendas e infraestructuras físicas, a bienes básicos como la educación o la sanidad, las *utilities* (suministro de agua, energía, etc.), la seguridad, el transporte o las propias tecnologías de la información y las comunicaciones. Dichas infraestructuras son imprescindibles para aumentar la población, su esperanza de vida y la empleabilidad. Por otro lado, son esenciales para el desarrollo de habilidades técnicas. Como se señalaba al principio del informe, el aprovechamiento de las matemáticas requiere también una inversión. Se estima que la mejora de la educación matemática desde edades tempranas genera una rentabilidad en términos de mejores ocupaciones y mayores salarios en el futuro que oscila entre el 7% y el 10%.

Asimismo, las matemáticas resultan fundamentales para la generación de ecosistemas empresariales, el fomento de la inversión y la competitividad y, sobre todo, el impulso de la innovación, de cuyo desempeño depende crucialmente el avance de la productividad. Muchas de las aplicaciones matemáticas están cada vez más incorporadas en bienes de capital. En los últimos años se ha observado una fuerte reducción del precio de dichos bienes (sobre todo los relacionados con la información y la comunicación), que facilita su utilización masiva incluso por la parte de la población que no tiene conocimientos matemáticos avanzados. Este último fenómeno podría estar permitiendo una difusión más rápida de la tecnología y, en definitiva, un crecimiento mayor en las economías en desarrollo.

Las ciencias matemáticas constituyen, así, un conocimiento estratégico para que la economía española y su tejido empresarial pueda aprovechar las oportunidades derivadas de la revolución tecnológica asociada a la robotización y la Inteligencia Artificial (en adelante, IA). Es hoy un pilar indispensable de la formación de capital humano, de la innovación y del liderazgo en materia de transformación digital.

Figura 22. Relación de largo plazo entre la investigación matemática y el bienestar



Fuente: Afí.

La inteligencia artificial, intensiva en conocimiento matemático, permitirá alcanzar un nuevo estadio en la automatización de tareas que aliviará el efecto negativo del envejecimiento de la población sobre la tasa de crecimiento a largo plazo

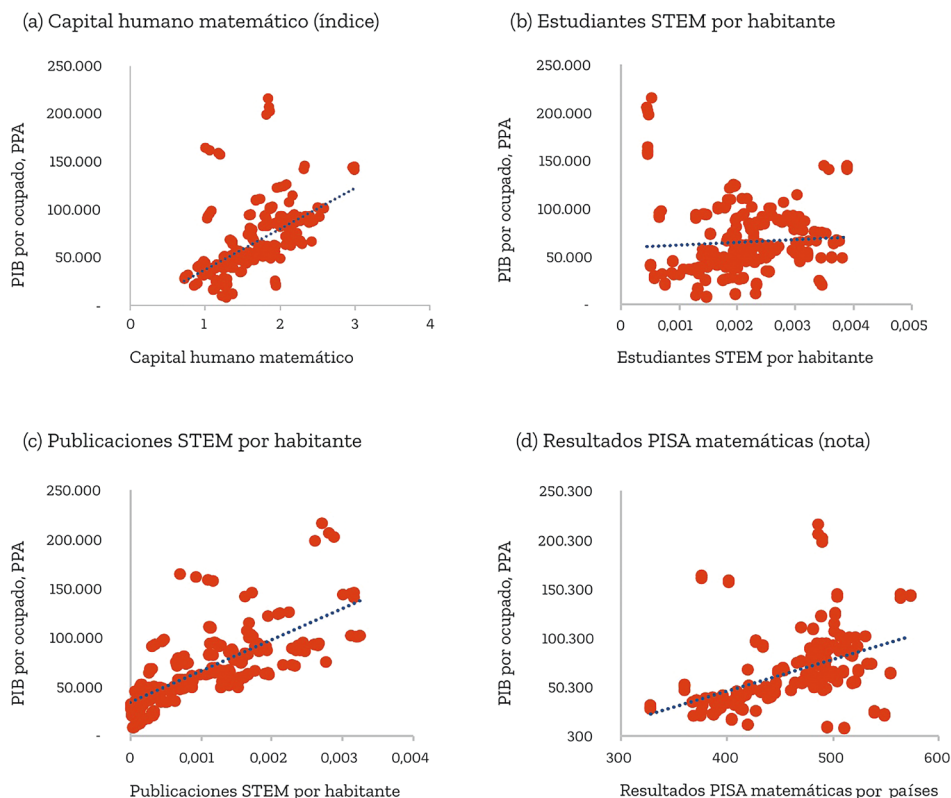
La IA permitirá alcanzar un nuevo estadio en la automatización de tareas que ha caracterizado las distintas fases de progreso tecnológico desde el advenimiento de la revolución industrial. Si se logra que las máquinas repliquen algunas formas de inteligencia humana, se podrán automatizar no solo tareas rutinarias, sino tareas que ahora requieren mayor cualificación, impulsando el crecimiento de la productividad y de los niveles de vida. Esta transformación

se puede aplicar también a la propia función de producción de conocimiento, reduciendo el coste de la investigación. La combinación de ambos efectos podría cambiar la trayectoria reciente del crecimiento a largo plazo y compensar, en gran parte, el efecto negativo que en muchos países desarrollados (entre ellos, España) puede tener el envejecimiento de la población sobre la tasa de crecimiento a largo plazo. En esta línea, el gobierno alemán ha puesto en marcha un plan de inversión para el desarrollo de la IA de 3.000 millones de euros, en aras precisamente de responder a los retos económicos, sociales y demográficos. Dicho plan de inversión contempla la creación de 100 cátedras universitarias y la consolidación de una red de 12 centros de investigación, centrados en el desarrollo y aplicación de tecnologías de IA.

4.1. Efectos dinámicos de las matemáticas en la economía española

En este apartado se presenta una estimación cuantitativa del impacto del capital humano matemático sobre la productividad del trabajo en España en términos dinámicos. La mera observación de relación positiva de algunos indicadores relevantes asociados a la investigación matemática (resultados de evaluación en matemáticas, número de publicaciones citadas en ramas STEM y proporción de graduados en estas disciplinas sobre el total de la población) con la productividad del trabajo por países, ya hace sospechar de su importancia para el desempeño de la misma. Recordamos que STEM es el acrónimo en inglés de *Science, Technology, Engineering y Mathematics*; en este trabajo se han considerado las publicaciones de las ramas de matemáticas, ingeniería, informática, física, astronomía, bioquímica y energía.

Figura 23. PIB por ocupado (dólares, PPA) e indicadores asociados a la investigación matemática por países (2013/2016)



Fuente: Afi, OCDE, SCIMAGO, BANCO MUNDIAL, UNESCO.

La figura 24 muestra los resultados de varias regresiones lineales (en concreto cuatro, una por cada columna) a través de una estimación por mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Se pretende ver qué papel juegan las matemáticas en el PIB por persona ocupada (productividad laboral) de cada país. Las variables económicas empleadas, como el PIB o el *stock* de capital por persona ocupada, están disponibles en la base estadística de Banco Mundial, lo que garantiza homogeneidad en el cálculo de estas macromagnitudes y comparabilidad entre países. Sin embargo, las variables que reflejan el nivel matemático de un país son menos evidentes. En este caso, se han seleccionado las siguientes:

- Alumnado en ramas STEM por habitante.
- Publicaciones académicas en ramas STEM por habitante.

- Resultados en el examen PISA en el apartado de matemáticas.

Mediante una metodología de análisis de datos de panel para un total de 66 países en el periodo 2013/2016, se estiman importantes efectos positivos de estos tres indicadores en la productividad de los trabajadores y trabajadoras cuando se tienen en cuenta otros factores, como el nivel de capital físico por persona trabajadora (véase la figura 24).

Figura 24. Relación entre el índice de capital humano y sus componentes con el PIB por ocupado u ocupada. Estimación MCO (2013/2016)

	PIB por ocupado(en logaritmo-logs)			
Capital humano matemático (logs)	0.323*** (0,071)			
Estudiantes STEM (logs)		0.073** (0,037)		
Publicaciones STEM (logs)			0.070*** (0,016)	
Resultados PISA matemáticas (logs)				0.565*** (0,205)
Stock de capital por ocupado (logs)	0.717*** (0,025)	0.762*** (0,023)	0.672*** (0,029)	0.723*** (0,029)
Europa Mediterráneos	-	-	-	-
Europa Centro	0.131** (0,053)	0.181*** (0,052)	0.168*** (0,049)	0.147*** (0,052)
Europa Escandinavia	0.078 (0,052)	0.144*** (0,046)	0.121** (0,047)	0.132*** (0,046)
Europa Este	0.108* (0,051)	0.115** (0,054)	0.110** (0,055)	0.106* (0,055)
Anglosajones	0.200*** (0,052)	0.241*** (0,049)	0.246*** (0,048)	0.244*** (0,048)
América Latina	0.254*** (0,060)	0.189*** (0,059)	0.243*** (0,065)	0.216*** (0,060)
Oriente Medio	0.320*** (0,066)	0.275*** (0,065)	0.291** (0,066)	0.321*** (0,065)
Asia Oriental	-0.002 (0,058)	0.015 (0,061)	0.041 (0,061)	-0.025 (0,066)
Control de año (dummy)	Sí	Sí	Sí	Sí
Países	66	66	66	66
Observaciones	264	264	264	264
R ²	0,897	0,890	0,894	0,892

Nota: los coeficientes están expresados en logaritmos. Las desviaciones típicas robustas aparecen entre paréntesis. *, ** y *** indican significatividad estadística al 10%, 5% y 1%, respectivamente.

Fuente: Afí, OCDE, SCIMAGO, BANCO MUNDIAL, UNESCO.

Si bien las estimaciones realizadas con los tres indicadores ofrecen lecturas similares, quizá la variable que mejor aproxima el nivel de capital humano matemático es la proporción de población con formación STEM (estudiantes STEM), puesto que se relaciona con el *stock* de conocimiento matemático de la población, en mayor medida que la calidad de la educación primaria o los resultados de la investigación académica.

Si España incrementase la proporción de personas graduadas STEM sobre el total de la población al mismo nivel que en Francia, la productividad del trabajo podría aumentar en un 2,2% sobre los valores actuales

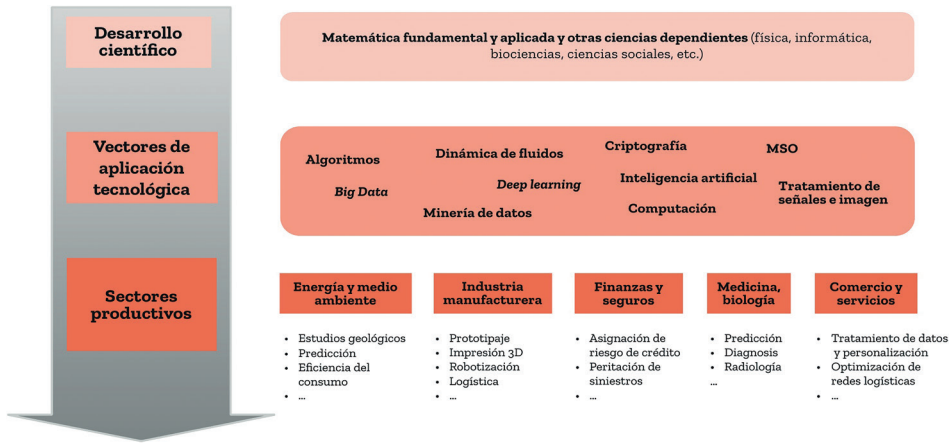
Así, un sencillo ejercicio de convergencia, en el que España alcanzara el mismo *stock* de capital humano matemático que Francia, refleja los notables incrementos de productividad del trabajo que podrían derivarse. En particular, si España incrementase la proporción de personas graduadas STEM sobre el total de la población al mismo nivel que en Francia, la productividad del trabajo podría aumentar en un 2,2% sobre los valores actuales.

4.2. Transferencia de tecnología matemática al tejido productivo y externalidades positivas asociadas. Algunos ejemplos en España

Una de las peculiaridades de la transferencia de tecnología matemática a las actividades productivas es que su aportación, a pesar de ser determinante, pasa desapercibida, puesto que muchas veces subyace a lo realmente observable. Actualmente en el mundo desarrollado, las sociedades viven en una realidad supertecnológica, donde cualquier herramienta cotidiana funciona utilizando algoritmos u otras aplicaciones matemáticas. Por aportar algún ejemplo, una señal GPS, utilizada a menudo para encontrar un destino desconocido a través de un dispositivo móvil, es un cálculo trigonométrico a partir de información de satélites que sitúa a personas y objetos en su ubicación geográfica exacta. Asimismo, las comunicaciones a través de mensajes de móvil son señales digitales reconvertidas a números, pero cuya realidad no es percibida por el o la usuaria como tal.

El proceso de transferencia tecnológica parte de la imbricación entre el conocimiento matemático más abstracto incorporado en sus vectores de aplicación a los problemas específicos de cada sector productivo (véase la figura 25). Este proceso de transferencia parte de la idea de que cualquier fenómeno o proceso a estudiar puede ser representado adecuadamente con la ayuda de las matemáticas.

Figura 25. Transferencia de la ciencia matemática y aplicación a sectores productivos



Fuente: Afi.

Una vez desarrollado un modelo, la tarea del matemático es comprender sus implicaciones y establecer juicios críticos sobre su adaptación. Para ello, suele recurrir, cada vez más, al uso de herramientas de computación y su combinación con matemática estadística, que sirven para validar dichos modelos a través del uso de datos reales o simulaciones en escenarios concretos del fenómeno investigado. En algunos casos, estos modelos precisan ser mejorados a la luz de la validación y el proceso puede iterar entre la comparación con la observación y el desarrollo de modelos posteriores, cuyo objetivo último es que consiga capacidad predictiva ante el fenómeno de interés.

En España, la tecnología matemática es un fenómeno creciente gracias a la generación de grupos multidisciplinares y la incorporación de perfiles matemáticos a problemáticas muy diversas

En España, la transferencia de tecnología matemática es un fenómeno creciente, acelerado en la última década a una diversidad de sectores, gracias a la generación de grupos multidisciplinares y la incorporación de perfiles matemáticos a problemáticas muy diversas. Sin embargo, todavía queda un largo camino por recorrer para alcanzar el nivel óptimo de vinculación de las matemáticas al mundo económico. El panel de personas consultadas es coincidente en señalar dos aspectos de diagnóstico de las trabas o retos que debe afrontar España para impulsar la transferencia matemática:

- La necesidad de mejorar el engarce entre el modelo de formación en matemáticas y las necesidades del tejido productivo. Los planes de estudio, desde la educación básica a la universitaria, no están lo suficientemente adaptados a lo que el entorno demanda, tanto en centros tecnológicos como en las propias empresas privadas. Si bien la educación en ciencias matemáticas proporciona la capacidad analítica, de formulación de problemas y el desarrollo de modelos matemáticos, estas habilidades no son suficientes para el éxito en el ámbito profesional, generando dos distorsiones al objetivo de mayor presencia matemática en las actividades productivas:
 - Desde la educación básica no se inculca suficientemente la aplicabilidad de las matemáticas a los problemas reales, y los propios egresados y egresadas ven con recelo salidas profesionales alternativas a la docencia o la investigación.
 - Gran parte de las personas egresadas universitarias en matemáticas que no desean dedicarse a la docencia o la investigación y desconocen la enorme demanda potencial de profesionales de las matemáticas en disciplinas y actividades económicas diversas.
- Superar las barreras del tejido productivo para insertar matemáticos y matemáticas, derivadas, por una parte, del desconocimiento del valor que ofrece el capital humano matemático para resolver problemas organizacionales, mejorar la eficiencia y desarrollo de negocio y, por otra, en el reducido tamaño medio de las empresas, que es un factor limitador inherente al tejido productivo español.

A continuación se ofrecen algunos casos de éxito en transferencia matemática en España en sectores concretos.

Caso de éxito 1. Las matemáticas en el sector energético

Cerca del 50% de la contribución al VAB del sector energético es explicada por el *input* matemático. No es de extrañar un resultado tan aparentemente llamativo. Y es que las diversas actividades que componen el sector energético son altamente demandantes de matemáticas, dado el elevado grado de capitalización. Efectivamente, las matemáticas están presentes en prácticamente todas las fases de la cadena de valor de este sector económico. Desde los estudios previos a las perforaciones de búsqueda de yacimientos, hasta los que tratan de estimar la fiabilidad de la duración de una red eléctrica. Asimismo, el modelaje matemático permite realizar predicciones de consumo eléctricos y detección de fraude, así como la optimización de los activos generadores o las redes de transporte de energía.

Caso de éxito 2. Las matemáticas en el sector financiero, de auditoría y de seguros

Las matemáticas son la herramienta más poderosa de la que disponen los humanos para enfrentarse a la toma de decisiones en contextos de incertidumbre. Esta es la razón esencial por la que tienen una presencia tan destacada en el sector financiero y de seguros. Precisamente, en este último ámbito, el producto transado entre una entidad aseguradora y un asegurado es una prima de seguro, que en realidad refleja un cálculo actuarial o probabilístico. Asimismo, la algoritmia es una herramienta de ayuda para la peritación en casos de siniestro. Así, cerca del 60% del VAB del sector de seguros corresponde al *input* matemático. Un porcentaje similar al que representa en el sector financiero, muy vinculado a este último, en cuanto su actividad es dependiente tanto de modelización y gestión de riesgos, así como de uso intensivo de fórmulas diversas de capitalización. La enorme liberación de información en tiempo real que han permitido los últimos desarrollos tecnológicos es un enorme campo de experimentación para la introducción de matemáticas en diversas partes de la actividad financiera, como, por ejemplo, la predicción de la demanda de efectivo en cajeros electrónicos.

Caso de éxito 3. Las matemáticas en el sector biosanitario

Uno de los ámbitos de transferencia quizá más relevante por sus claras externalidades positivas a la sociedad es la que tiene que ver con el ámbito biosanitario. En España se han desarrollado, en los últimos años, diversas iniciativas de enorme alcance, como, por ejemplo, el diseño e implementación de marcadores para la detección precoz del Alzheimer, la generación de modelos probabilísticos para el diagnóstico del cáncer o el modelado del metabolismo celular. Por otra parte, las herramientas matemáticas han servido para avanzar en la sofisticación de diversos tratamientos, como las prótesis adaptadas a la estructura de un paciente determinado, la robótica en intervenciones de traumatología, etc. Otros desarrollos reseñables son la reconstrucción 3D de órganos o a la aplicación de algoritmos para la clasificación de muestras biológicas o modelos de optimización de la logística en hospitales en regiones con mucha dispersión, como es el caso de Castilla y León.

Caso de éxito 4. Las matemáticas en el medio ambiente

Otro de los ámbitos de creciente relevancia de aplicación matemática con generación de externalidades positivas es el medio ambiente. En un contexto marcado, además, por la urgencia de políticas de freno de las tendencias de cambio climático

que amenazan el equilibrio y la sostenibilidad de los ecosistemas. En España, un país que atesora por otra parte un enorme patrimonio natural, han proliferado en las últimas décadas iniciativas de transferencia matemática para mitigar los efectos de problemas medioambientales con modelos de predicción de sequía, inundaciones o diversos fenómenos atmosféricos adversos. Asimismo, destaca la aplicación de modelos de riesgo de incendio, uno de los problemas medioambientales que suele azotar determinadas zonas de la península recurrentemente.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA

Las principales conclusiones del estudio realizado por Afi sobre el impacto socioeconómico de las matemáticas en España son las siguientes:

- La naturaleza económica de las matemáticas es compleja. Alterna características de bien público de club, con una condición de bien privado, por los beneficios apropiables que se derivan de su uso en las actividades económicas.
- La participación de las matemáticas en las actividades productivas es transversal, pues afecta a todos los sectores, así como interviene en las distintas fases del proceso productivo. Desde el diseño, modelaje, simulación y prototipado de productos, a la optimización de procesos productivos y de organización y el análisis de datos.
- La revolución de Internet ha situado a las matemáticas como *input* fundamental de la producción, en tanto en cuanto los servicios han ido incorporando de manera creciente tanto capital físico tecnológico basado en matemática (tecnologías de la información y las comunicaciones, *softwares*, dispositivos electrónicos, etc.), como capital humano matemático.
- Las actividades con intensidad matemática generaron un millón de ocupados en 2016, lo que representó el 6% del empleo total de la economía española. Si se sumasen los efectos indirectos e inducidos, el impacto en empleo se elevaría hasta el 19,4% del total.
- En términos de VAB, el impacto de las actividades con intensidad matemática se situó hasta el 10,1% del total en 2016 (26,9% del total si se añadiesen los efectos de arrastre).
- Las actividades económicas con mayor impacto de las matemáticas son la informática, las actividades financieras, los servicios de telecomunicaciones y la rama de energía eléctrica y gas.

- La magnitud de estos impactos es menor que la obtenida en otros países europeos donde se ha realizado un estudio similar, ya que en términos de empleo, el impacto directo oscila entre el 10%-11% del total, mientras que en VAB el intervalo se encuentra entre el 13%-16% del total.
- La diferencia se explica, eminentemente, por la estructura productiva española, que está más orientada hacia actividades con menor presencia de profesiones que requieran cierta intensidad matemática.
- Las matemáticas están en la base del aumento de la productividad del trabajo, constituyendo un conocimiento estratégico para que la economía española y su tejido empresarial puedan aprovechar las oportunidades derivadas de la revolución tecnológica asociada a la robotización y la inteligencia artificial.
- Si España incrementase la proporción de personas graduadas STEM sobre el total de la población al mismo nivel que en Francia, la productividad del trabajo podría aumentar en un 2,2% sobre los valores actuales.

A partir de esas conclusiones, el informe de Afi propone las siguientes recomendaciones:

- Repensar el modelo educativo para lograr que: 1) Las matemáticas estén más presentes en los programas educativos; y 2) Las y los matemáticos tengan una mayor comprensión de la capacidad de aplicación al mundo real de las herramientas y habilidades adquiridas en su proceso de formación.
- Mejorar el engarce entre el modelo de formación en matemáticas y las necesidades del tejido productivo, aproximando la universidad y centros de investigación a las empresas mediante la celebración de reuniones, convenios de colaboración, prácticas profesionales de estudiantes, etc.
- Impulsar el gasto en I+D+i en las ciencias matemáticas, puesto que derivan claras externalidades tanto al conjunto de ciencias STEM como en sus vectores de aplicación tecnológica al tejido productivo, redundando en ganancias de bienestar para el conjunto de la sociedad.
- Incrementar los incentivos a las matemáticas aplicadas, tratando de equipararlos a los ofrecidos a la investigación científica, para que los avances sean trasladados al tejido productivo.
- Visibilizar en el entorno empresarial la utilidad que reporta la incorporación de profesionales de las matemáticas en las diversas fases del proceso productivo, así como en el conjunto de las organizaciones, mediante la celebración de encuentros entre ambos perfiles, el acercamiento universidad-empresa, la puesta en común de casos de éxito, etc.