

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de ingeniería comercial

VALPARAISO - CHILE



“Relación del capital humano STEM y el crecimiento
país caso Argentina y Colombia”

Memoria para optar al título de Ingeniero comercial

Autor

Gonzalo Javier Nuñez Ahumada

Profesor guía

Darcy Fuenzalida O’Shee

Valparaíso, 13 de enero de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Relacion capital humano STEM y el crecimiento país caso Argentina y Colombia

Nombre del candidato(a): Gonzalo Javier Nuñez Ahumada

Carrera / Grado: Ingeniería comercial

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Ingeniería comercial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo Darcy Fuenzalida O'Shee, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 13/04/2026 ; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13/04/2026 ; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Agradecimientos

Quisiera dedicar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera fundamental a la realización de esta tesis. Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo constante de mis profesores y compañeros, quienes, con su rigor académico y su disposición a la colaboración constructiva, fueron un pilar clave en la consecución de este gran logro personal. Asimismo, extendiendo mi más profunda gratitud a mi familia, amigos y pareja; su confianza incondicional en mis capacidades y su aliento constante me proporcionaron la fortaleza necesaria para perseverar durante los momentos más difíciles y complejos de este largo proceso.

En particular, deseo extender un agradecimiento especial a la profesora Macarena Gatica, cuya guía fue una de las contribuciones más significativas durante mi trayectoria universitaria. Su apoyo trascendió lo meramente académico; estuvo presente para orientarme durante las etapas más complejas de mi formación, brindándome la perspectiva y la ayuda necesaria para continuar con la carrera cuando consideraba que el camino se había vuelto demasiado adverso. Su dedicación, paciencia y su capacidad para motivar a sus estudiantes han sido una verdadera inspiración y un factor determinante para llegar a esta instancia.

Del mismo modo, extendiendo un agradecimiento particular al profesor Darcy Fuenzalida O'Shee. Su rol como docente guía de esta memoria ha sido fundamental para su desarrollo y culminación. Gracias a su vasta experiencia, tanto en el ámbito académico como profesional, y a su constante rigurosidad metodológica, me impulsó a explorar nuevas herramientas analíticas y a sacar lo mejor de mí en cada etapa del análisis. Su profesionalismo y sus oportunas correcciones fueron cruciales para elevar la calidad de este trabajo y poder así lograr un informe de excelencia.

Finalmente, hago mi agradecimiento a la Universidad como institución, y a todos sus funcionarios. La labor diaria de administrativos, personal de biblioteca y servicios generales, aunque a menudo silenciosa, es la que garantiza el funcionamiento de esta gran casa de estudios y crea el ambiente propicio para el desarrollo académico.



Página de responsabilidad

Yo, Gonzalo Javier Nuñez Ahumada, declaro bajo mi responsabilidad que el presente trabajo de memoria es resultado de mi labor personal, original e inédita.

Afirmo que todas las fuentes utilizadas han sido debidamente citadas y referenciadas conforme a las normas académicas vigentes, según lo establecido por el docente guía de esta memoria.

Asimismo, asumo plena responsabilidad por el contenido, los análisis, resultados y conclusiones expuestos, eximiendo a la institución y a los asesores de toda responsabilidad derivada de esta investigación.

Reconozco que cualquier falsedad u omisión constituye falta grave según las normas universitarias y las leyes.

Valparaíso, 13 de enero del 2026.

Firma:

Gonzalo Javier Nuñez Ahumada.



Resumen

El presente estudio analiza la relación estadística entre la formación de capital humano en áreas de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM) y el crecimiento económico en Argentina y Colombia durante el período 2013-2022. Adoptando un enfoque cuantitativo de alcance correlacional, se estimaron modelos econométricos bivariados mediante el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), utilizando series de tiempo transformadas en diferencias logarítmicas para corregir la no estacionariedad. Los resultados muestran diferencias entre los países analizados. En el caso de Colombia, se identifica una asociación positiva y estadísticamente significativa entre la variación de los egresados en áreas STEM y el crecimiento del Producto Interno Bruto. En contraste, para Argentina no se observa una relación estadísticamente significativa entre las variables, por lo que no es posible establecer una asociación lineal en el período considerado. Estos hallazgos evidencian que la relación entre capital humano especializado y crecimiento económico no es uniforme entre países y depende del contexto empírico analizado, así como de las limitaciones inherentes a los modelos bivariados utilizados.

Palabras clave: Capital humano, Crecimiento económico, Educación STEM, Argentina, Colombia, Econometría.



Abstract

This study examines the statistical relationship between the formation of human capital in the fields of Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) and economic growth in Argentina and Colombia during the period 2013–2022. A quantitative approach with a correlational scope is adopted, and bivariate econometric models are estimated using the Ordinary Least Squares (OLS) method, employing time series transformed into logarithmic differences to address non-stationarity issues. The results reveal differences between the countries analyzed. In the case of Colombia, a positive and statistically significant association is identified between the variation in STEM graduates and Gross Domestic Product growth. In contrast, for Argentina, no statistically significant relationship is observed between the variables, making it impossible to establish a linear association over the period considered. These findings indicate that the relationship between specialized human capital and economic growth is not uniform across countries and depends on the empirical context analyzed, as well as on the inherent limitations of the bivariate models employed.

Keywords: Human Capital, Economic Growth, STEM Education, Argentina, Colombia, Econometrics.

Contenido

Agradecimientos	iii
Página de responsabilidad	iv
Resumen	v



Abstract	vi
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Contexto general	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Pregunta de investigación	2
1.4 Objetivos	3
1.5 Hipótesis	4
1.6 Justificación	5
1.7 Alcances y limitaciones	6
1.8 Estructura del documento	7
Capítulo 2: Marco teórico	8
2.1 Fundamentos teóricos	8
2.2 Revisión de la literatura	10
2.3 Modelo teórico o analítico	11
2.4 Síntesis del marco teórico	12
Capítulo 3: Metodología	13
3.1 Tipo y diseño de investigación	13
3.2 Variables y operacionalización	14
3.3 Modelo econométrico	15
3.4 Procedimiento analítico	17
3.5 Software y herramientas	18
3.6 Limitaciones metodológicas	18
Capítulo 4: Descripción de la Data	19
4.1 Fuentes de información	19
4.2 Procesamiento de datos	20
4.3 Descripción de variables	21
4.4 Estadísticas descriptivas y visualización	22
4.5 Observaciones analíticas	24
Capítulo 5: Resultados y discusión	26
5.1 Resultados descriptivos	26
5.2 Estimación del modelo	26
5.3 Interpretación económica de los resultados	31



5.4 Pruebas de robustez y sensibilidad	32
5.5 Discusión comparativa	33
5.6 Interpretación de los Resultados	34
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones	35
6.1 Síntesis general de la investigación	35
6.2 Principales conclusiones	36
6.3 Aportes teóricos y empíricos	37
6.4 Limitaciones del estudio y futuras líneas de investigación	38
6.5 Cierre del trabajo	39
Referencias bibliográficas	40
Anexos	46
Anexo A: Scripts de Python para el Análisis Econométrico	46
Anexo B: Salidas Completas de la Consola (Resultados de Pruebas)	52
Anexo C: Gráficos de Diagnóstico (Residuos)	57
Gráfico C.1: ACF de Residuos (Argentina)	57
2. Gráfico C.2: ACF de Residuos (Colombia)	58

Índice de tablas

Tabla 1	14
Tabla 2	21
Tabla 3	22
Tabla 4.1	26
Tabla 4.2.....	27
Tabla 4.3.....	28
Tabla 4.4.....	29



Índice de Figuras

Figura 1	23	Figura 2
.....	32	



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
COMERCIAL

Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto general

Esta memoria analiza la relación y significancia estadística entre la formación de capital humano en áreas de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM) y el crecimiento económico en Argentina y Colombia durante el período 2013–2022. El análisis se inscribe dentro del marco de la teoría del crecimiento endógeno, la cual postula que la acumulación de capital humano genera externalidades positivas que incrementan la productividad agregada y permiten contrarrestar los rendimientos decrecientes del capital físico (Lucas, 1988; Romer, 1990). Desde esta perspectiva, el desempeño económico de largo plazo se encuentra estrechamente vinculado a la capacidad de las economías para crear, adoptar y difundir conocimiento, proceso que depende de manera significativa de la disponibilidad de capital humano especializado en disciplinas STEM.

En el contexto latinoamericano, diversos estudios han señalado la persistencia de brechas estructurales en la formación de capital humano avanzado, lo que limita la capacidad de la región para diversificar su matriz productiva y avanzar hacia procesos de convergencia económica sostenida (Bakker et al., 2020). En esta misma línea, organismos internacionales advierten que la insuficiente dotación de capacidades en ciencia, tecnología e innovación restringe la transición hacia sectores de mayor valor agregado y contribuye a la permanencia en la denominada “trampa del ingreso medio” (CEPAL, 2024). Estas limitaciones refuerzan la necesidad de evaluar empíricamente el vínculo entre educación técnica especializada y crecimiento económico en economías emergentes.

En respuesta a este diagnóstico, tanto Argentina como Colombia han implementado estrategias públicas orientadas a fortalecer la formación de capital humano en áreas STEM como eje central de sus políticas de desarrollo. En el caso argentino, el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030 establece la expansión del talento científicotecnológico como un pilar para el crecimiento económico y la transformación productiva

(Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [MINCYT], 2022). De manera similar, Colombia ha definido la Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022–2031, que prioriza la formación de recursos humanos calificados como condición para mejorar la

competitividad y la productividad del país (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2021). La existencia de estos marcos estratégicos valida la pertinencia de analizar, desde una perspectiva empírica, si el aumento en la formación de profesionales STEM se asocia efectivamente con el crecimiento del Producto Interno Bruto en ambos países.

1.2 Planteamiento del problema

A pesar de que las estrategias de desarrollo en Argentina y Colombia asumen explícitamente que la formación de capital humano STEM impulsa el crecimiento económico, la evidencia empírica que valide esta relación en el período reciente es limitada. A menudo, el vínculo se da por sentado basándose en premisas teóricas o análisis cualitativos, sin una validación cuantitativa rigurosa que confirme si el aumento de egresados se traduce efectivamente en una expansión del producto agregado.

Esta carencia de información constituye un problema sustantivo para la política pública, ya que impide evaluar la efectividad real de los esfuerzos estatales en educación superior y ciencia implementados en la última década. Sin una verificación empírica, no es posible determinar si la inversión en talento está generando los retornos productivos esperados o si, por el contrario, existen barreras estructurales que desconectan la oferta educativa de la demanda económica real.

En este sentido, la problemática central reside en la ausencia de certeza sobre el impacto macroeconómico de la formación técnica. Concretamente, no existe evidencia empírica reciente y sistematizada que permita establecer si el aumento de egresados STEM se asocia efectivamente al crecimiento económico en Argentina y Colombia durante el periodo 2013-2022. Esta brecha de conocimiento dificulta el diagnóstico sobre la capacidad de estas economías para capitalizar sus recursos humanos y limita la toma de decisiones estratégicas en materia de desarrollo productivo.

1.3 Pregunta de investigación

A partir de la problemática expuesta y la necesidad de generar evidencia empírica, la presente investigación se estructura en torno a una interrogante fundamental que guía el proceso de análisis econométrico. Esta pregunta no solo busca validar el vínculo teórico existente entre la educación especializada y el desempeño macroeconómico, sino que también sirve como

eje conductor para el análisis comparativo entre los dos casos de estudio seleccionados para el período delimitado. El objetivo central es discernir si la inversión en capital humano especializado, impulsada por las actuales políticas públicas vigentes en cada nación, se traduce realmente en resultados económicos tangibles y medibles a través del producto nacional. Por lo tanto, con el propósito de establecer un marco analítico sólido, riguroso y coherente con los objetivos planteados, se formula la siguiente pregunta principal:

¿Existe una relación estadísticamente significativa entre la formación de capital humano STEM y el crecimiento económico en Argentina y Colombia durante el período 2013-2022?

Para profundizar en el análisis comparado y lograr una correcta desagregación de la problemática general planteada, resulta indispensable formular interrogantes específicas que orienten la investigación hacia los contextos nacionales particulares de cada país. Estas preguntas secundarias buscan discernir si el fenómeno bajo estudio opera de manera homogénea en la región o si, por el contrario, existen diferencias estructurales marcadas entre los casos de Argentina y Colombia que condicionen la efectividad del capital humano acumulado. Asimismo, estas interrogantes permiten abordar dimensiones críticas como la temporalidad de los impactos y la robustez de las asociaciones detectadas en el corto plazo, facilitando así una comprensión integral de los mecanismos de transmisión existentes entre el sistema educativo y el sector productivo. En virtud de lo anterior, se proponen las siguientes preguntas de investigación secundarias:

¿Cómo se manifiesta dicha relación en cada uno de los contextos nacionales analizados durante la última década?

¿Difieren los mecanismos temporales de esta relación entre ambos países, manifestándose como un efecto contemporáneo inmediato o como un impacto rezagado en el tiempo?

1.4 Objetivos

El objetivo general de la investigación consiste en determinar la existencia, magnitud y naturaleza de la relación estadística entre la formación de capital humano en disciplinas STEM y el crecimiento económico observado en Argentina y Colombia durante el período 2013-2022. Se busca establecer si la acumulación de este talento especializado constituye un factor determinante del desempeño productivo en dichas economías, aportando evidencia

empírica que permita confirmar o refutar la hipótesis de un vínculo positivo y significativo entre ambas magnitudes.

Para el cumplimiento efectivo de este propósito central, se han definido una serie de objetivos específicos diseñados para orientar el flujo de trabajo analítico y garantizar la obtención de hallazgos estadísticamente robustos en todo el proceso. Estos hitos operativos permiten abordar de manera secuencial la complejidad de los datos macroeconómicos, transitando desde la descripción visual de las tendencias históricas hasta la cuantificación de las sensibilidades económicas detectadas en cada contexto nacional. La estructura de estas metas intermedias asegura que el estudio no solo documente la asociación lineal entre las variables de interés, sino que también considere las propiedades temporales y los quiebres estructurales que condicionan la interpretación final de los resultados obtenidos. En virtud de lo expuesto, se proponen los siguientes objetivos específicos:

Identificar los patrones de comportamiento y las tendencias de las variables de estudio, caracterizando la evolución comparada del capital humano y el producto nacional en el tiempo.

Determinar las propiedades de estacionariedad de las series temporales para establecer la validez técnica de las inferencias estadísticas y descartar asociaciones erróneas derivadas de tendencias inerciales.

Estimar la significancia estadística de la asociación entre el crecimiento de los egresados y el crecimiento económico, cuantificando la magnitud del impacto real una vez controlados los efectos exógenos.

Analizar la asociación estadística y la relación predictiva temporal entre la variación de egresados STEM y el crecimiento del PIB para discernir la sincronía o el rezago existente en dicho vínculo.

1.5 Hipótesis

La Hipótesis de Investigación (H1) plantea que la acumulación de capital humano especializado actúa como un factor determinante en el desempeño económico reciente. Específicamente, se postula la existencia de una relación positiva y estadísticamente significativa entre el incremento anual de egresados en disciplinas STEM y el crecimiento

del Producto Interno Bruto (PIB) a precios constantes en las economías de Argentina y Colombia durante el período comprendido entre 2013 y 2022.

Por su parte, la Hipótesis Nula (H_0) establece la ausencia de una asociación lineal estadísticamente discernible entre las variables de estudio. En términos econométricos, esto implica que el coeficiente que mide el impacto de la formación de talento sobre el producto no es diferente de cero. La refutación de esta hipótesis nula mediante pruebas de significancia constituirá la evidencia empírica necesaria para validar la premisa de que el capital humano contribuye al crecimiento en los casos analizados.

Las relaciones estimadas en niveles pueden generar correlaciones espurias si las series presentan tendencias no estacionarias. En consecuencia, la hipótesis se contrastará exclusivamente a través de un modelo especificado en primeras diferencias. Este enfoque permite aislar la relación real entre las tasas de variación de las variables, eliminando el sesgo tendencial y asegurando la validez estadística de los resultados.

1.6 Justificación

La relevancia teórica de este estudio se fundamenta en la necesidad imperante de contrastar la validez de los postulados del crecimiento endógeno en el marco específico de las economías latinoamericanas contemporáneas. Si bien la literatura económica global establece una conexión intrínseca entre la acumulación de capital humano y el incremento de la productividad agregada, este vínculo requiere ser examinado rigurosamente bajo las condiciones estructurales propias de naciones en vías de desarrollo. De este modo, la investigación contribuye a la discusión académica al evaluar si el componente técnico especializado (STEM) actúa efectivamente como un motor de crecimiento en entornos caracterizados por volatilidades macroeconómicas cíclicas. Esta validación resulta indispensable para determinar si los modelos económicos diseñados para economías avanzadas son aplicables y pertinentes para orientar el progreso económico regional en el largo plazo.

Desde una perspectiva empírica, la investigación se justifica por la insuficiencia de estudios macroeconómicos comparados que aborden el impacto del capital humano especializado durante la última década en los casos de Argentina y Colombia. El análisis responde a la exigencia técnica de generar estimaciones robustas que logren aislar las tendencias inerciales

compartidas de las relaciones económicas genuinas existentes entre las variables de estudio. Al proporcionar una cuantificación fundamentada en datos observados y validados por organismos internacionales, este trabajo busca subsanar las limitaciones de los diagnósticos meramente descriptivos que predominan en la literatura local previa. Así, el estudio ofrece un marco de referencia cuantitativo actualizado que permite entender con mayor precisión la sensibilidad del producto nacional ante las variaciones en la tasa de titulación de profesionales en áreas científicas.

En el ámbito de la justificación aplicada, los resultados de este trabajo constituyen un insumo de alto valor estratégico para el seguimiento y la evaluación de las políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI) vigentes en ambos países. Dado que instrumentos gubernamentales como el Plan Nacional 2030 en Argentina y las políticas nacionales en Colombia priorizan la formación de talento especializado, resulta imperativo contar con evidencia objetiva sobre el correlato macroeconómico histórico de tales inversiones. La información generada permite a los organismos competentes identificar si las actuales estrategias de capital humano están efectivamente alineadas con las trayectorias de crecimiento nacional o si requieren ajustes estructurales. En consecuencia, el estudio ofrece una herramienta práctica orientada al diseño de estrategias de desarrollo más eficientes y fundamentadas en evidencia empírica real para mejorar la competitividad nacional.

1.7 Alcances y limitaciones

El alcance de la investigación se circunscribe temáticamente a la relación macroeconómica entre el capital humano STEM y el crecimiento del PIB real, excluyendo otras dimensiones del desarrollo productivo. Geográficamente, el estudio se restringe a un análisis comparativo entre Argentina y Colombia, por lo que sus hallazgos no son necesariamente generalizables a la región. Temporalmente, el análisis abarca estrictamente el período 2013-2022, trabajando únicamente con datos observados para garantizar la fiabilidad estadística de las estimaciones y evitando el uso de proyecciones.

Respecto a las limitaciones de los datos, la principal restricción es el tamaño reducido de la muestra. La serie temporal disponible genera, tras la transformación a primeras diferencias, un número acotado de observaciones efectivas para el análisis econométrico. Esta escasez de datos históricos disminuye la potencia de las pruebas de inferencia estadística y exige

prudencia en la interpretación de los resultados, especialmente en lo referente a los tests de causalidad que requieren mayor profundidad temporal.

En cuanto a las limitaciones del diseño, la investigación adopta un enfoque bivariado que se concentra exclusivamente en la interacción entre egresados y producto. Esta simplificación metodológica omite deliberadamente variables de control que la literatura identifica como determinantes del crecimiento, tales como la inversión en I+D o la apertura comercial. Si bien este diseño permite aislar la correlación de interés, no captura la complejidad multicausal del fenómeno económico ni los efectos de interacción con otros factores productivos.

Finalmente, una limitación del modelo radica en la operacionalización de la variable independiente como un flujo anual. Al medir la cantidad de nuevos egresados, el modelo no captura el stock acumulado de capital humano, la calidad de la formación ni la tasa de inserción laboral efectiva. Por tanto, las estimaciones reflejan la asociación estadística macroeconómica, pero no permiten identificar los mecanismos microeconómicos específicos de transmisión entre el sistema educativo y el sector productivo.

1.8 Estructura del documento

La memoria se organiza en seis capítulos. El Capítulo 1 introduce el problema de investigación, define los objetivos y la hipótesis, y establece la justificación y delimitación del estudio. El Capítulo 2 presenta el marco teórico, revisando los fundamentos del crecimiento endógeno y la literatura empírica relevante sobre capital humano STEM en la región. El Capítulo 3 describe la metodología cuantitativa, detallando el diseño longitudinal, la operacionalización de variables y la especificación del modelo econométrico en primeras diferencias.

El Capítulo 4 aborda la descripción de los datos, especificando las fuentes secundarias, el proceso de depuración y las estadísticas descriptivas de las series temporales observadas (2013-2022). El Capítulo 5 expone los resultados de las estimaciones econométricas, las pruebas de robustez y la discusión de los hallazgos para Argentina y Colombia. Finalmente, el Capítulo 6 sintetiza las conclusiones generales, detalla los aportes del estudio, las implicancias para la política económica y las limitaciones, cerrando con sugerencias para futuras investigaciones.



Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Fundamentos teóricos

La presente investigación se fundamenta conceptualmente en la Teoría del Crecimiento Endógeno, la cual postula que el desarrollo económico de largo plazo es impulsado internamente por la acumulación sostenida de conocimiento y capital humano avanzado (Lucas, 1988; Romer, 1990). A diferencia de los modelos neoclásicos tradicionales, este

enfoque teórico considera que el progreso técnico no es un factor exógeno, sino el resultado directo de inversiones deliberadas en educación y habilidades especializadas por parte de los agentes económicos. Dentro de este marco analítico, la variable abstracta de crecimiento económico se operacionaliza y representa formalmente en este estudio mediante la tasa de variación del Producto Interno Bruto (PIB) real a precios constantes. Esta definición técnica permite observar cómo las fluctuaciones en la producción agregada de bienes y servicios responden directamente a los cambios observados en los factores productivos internos.

El capital humano actúa como el principal mecanismo de transmisión hacia el progreso económico mediante el incremento de la productividad individual y la capacidad institucional para absorber y generar tecnologías complejas. En el diseño de este estudio, dicha variable teórica se aproxima y cuantifica de manera concreta a través del flujo anual de egresados en disciplinas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), siguiendo las clasificaciones internacionales vigentes. Se asume que este grupo profesional específico representa el acervo de conocimientos técnicos y científicos fundamentales para impulsar la innovación y la eficiencia dentro de la matriz productiva nacional. Este enfoque permite establecer un vínculo estadístico directo entre la formación académica de alto nivel y la dinámica productiva real de las economías de Argentina y Colombia bajo análisis.

La selección del talento STEM como variable explicativa central responde a su reconocimiento internacional como el núcleo motor de la competitividad tecnológica y la transformación digital en las economías modernas. Bajo esta perspectiva teórica, el conocimiento especializado se transforma en un factor de producción con rendimientos crecientes, capaz de contrarrestar la tendencia de retornos decrecientes asociada al capital físico tradicional en las naciones emergentes. En consecuencia, la integración de estas variables operativas en el modelo econométrico bivariado tiene como propósito fundamental validar empíricamente si la estructura educativa responde efectivamente a las necesidades de desarrollo. El análisis busca determinar si la evolución del talento técnico se alinea con los objetivos estratégicos definidos en los planes nacionales de ciencia y tecnología de ambos países.

2.2 Revisión de la literatura

La literatura identifica al capital humano como un determinante crítico del crecimiento económico, enfatizando el rol de las competencias científicas en el incremento de la productividad agregada. Organismos internacionales como la CEPAL (2024) y la UNESCO (2021) sostienen que la capacidad de innovación de una nación depende directamente de la disponibilidad de talento en Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM), el cual es indispensable para la adopción y generación de nuevas tecnologías. Asimismo, la OECD (2017) advierte que la suficiencia de estas habilidades técnicas es fundamental para evitar cuellos de botella en el desarrollo productivo, vinculando la oferta de graduados con la tasa de variación del PIB real. Estas posturas teóricas sugieren que la formación técnica especializada no es solo un resultado del desarrollo, sino un motor activo que permite a las economías emergentes competir en mercados globales de alta complejidad.

Al contrastar las investigaciones empíricas en la región, se observan matices significativos en cuanto al impacto real de estas variables sobre el desempeño nacional. Por ejemplo, Guarnizo (2018) utiliza un modelo de series de tiempo para Colombia (1980-2015) y encuentra una relación positiva de largo plazo entre el capital humano general y el crecimiento económico, destacando la importancia de la educación superior. En contraste, Bakker et al. (2020) emplean un enfoque regional para América Latina y concluyen que las brechas estructurales en la formación de capital humano avanzado constituyen el principal freno para la convergencia económica y la productividad de los países del bloque. Mientras el primer autor resalta la asociación estadística positiva en un contexto específico, los segundos subrayan la insuficiencia de este factor como una barrera que impide superar la trampa del ingreso medio en la región.

En el ámbito de las dinámicas nacionales, la evidencia señala tensiones entre la oferta educativa y la demanda real del sector productivo en ambos países bajo estudio. En Argentina, los resultados de la Encuesta Nacional de Dinámica de Empleo e Innovación (ENDEI) reportan que la escasez de personal calificado en áreas técnicas representa una de las mayores barreras para la innovación en las firmas manufactureras locales. Paralelamente, en Colombia, la Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica (EDIT) identifica restricciones similares en el sector servicios y comercio, donde la falta de competencias

STEM específicas limita el desempeño empresarial y la expansión de la frontera productiva. Ambas fuentes oficiales coinciden en que, a pesar del aumento en el número de titulados, existe un desajuste que condiciona la transmisión efectiva de la formación profesional hacia el crecimiento del producto nacional.

Finalmente, a pesar de la relevancia otorgada a estas variables en los planes nacionales de desarrollo de ambos países, existe una vacante empírica en cuanto a análisis econométricos recientes. La revisión de los antecedentes revela que, si bien abundan los estudios sobre capital humano general, son escasas las investigaciones que aislen el efecto del flujo anual de egresados STEM corrigiendo la no estacionariedad de las series para el período 2013-2022. Esta investigación aborda dicha brecha de conocimiento, proponiendo un modelo que busca validar estadísticamente si la expansión del talento especializado se ha traducido efectivamente en un crecimiento del PIB real. Al centrar el análisis en la última década, se logra capturar el impacto de las políticas públicas contemporáneas en un escenario de alta volatilidad macroeconómica y cambios tecnológicos acelerados.

2.3 Modelo teórico o analítico

El modelo analítico de esta investigación parte de una formulación explícita basada en una función de producción agregada extendida, derivada directamente de los postulados de la teoría del crecimiento endógeno. En este esquema conceptual, el nivel de producción nacional (Y) no se define únicamente por la acumulación de factores tradicionales, sino que incorpora al capital humano como un componente endógeno determinante de la productividad total. De manera formal, el modelo se representa mediante la función $Y = f(K, L, H)$, donde K simboliza el capital físico, L representa el factor trabajo y H constituye el acervo de capital humano especializado acumulado en la economía. Esta representación permite establecer un marco lógico para analizar cómo la calificación de la fuerza laboral altera la eficiencia técnica de los procesos productivos.

En la implementación operativa de este marco, el componente H se aísla y se define específicamente como el capital humano formado en áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). Para los fines de este estudio, dicha variable se operacionaliza a través del flujo anual de egresados en estas disciplinas, asumiendo que este indicador refleja la capacidad de renovación y actualización de las habilidades técnicas de alto nivel dentro

del mercado laboral. El modelo postula que este acervo especializado de conocimientos actúa como el principal motor de la innovación tecnológica y la eficiencia productiva en los contextos nacionales de Argentina y Colombia. Al centrar la atención en este flujo, se busca capturar la sensibilidad del producto ante la incorporación de profesionales con competencias críticas para la economía del conocimiento.

La estructura lógica final del modelo establece al crecimiento económico como la variable dependiente fundamental y a la formación de talento STEM como la variable explicativa central del proceso. Bajo esta premisa, se asume teóricamente una relación funcional positiva y directa: un incremento sostenido en el flujo de egresados especializados expande las capacidades de absorción tecnológica y generación de valor agregado, lo que debe traducirse en una expansión del PIB real. Este esquema funcional proporciona el sustento teórico necesario para la formulación de las hipótesis de investigación y define los mecanismos de transmisión que se pretenden validar estadísticamente. De este modo, la representación formal sirve como puente entre la abstracción teórica y la estimación econométrica de las elasticidades de crecimiento presentadas en los capítulos posteriores.

2.4 Síntesis del marco teórico

La síntesis del marco teórico integra de manera coherente los postulados de la teoría del crecimiento endógeno con la realidad productiva de las economías emergentes, estableciendo una base conceptual sólida para el desarrollo de este estudio. La literatura analizada sostiene de forma unánime que la acumulación de capital humano calificado no debe entenderse como un factor pasivo dentro de la función de producción, sino como el motor dinámico que impulsa la productividad nacional a través de la innovación constante. En este esquema analítico, el talento especializado en áreas STEM se identifica como el componente crítico que permite operacionalizar la capacidad de absorción y generación tecnológica de un país. Por tanto, se establece una relación lógica fundamental donde el flujo anual de egresados en estas disciplinas actúa como el determinante esencial de la tasa de variación del Producto Interno Bruto (PIB) real. Esta integración conceptual permite justificar la selección de estas variables específicas como el núcleo central de la investigación macroeconómica propuesta.

No obstante, la revisión exhaustiva de la literatura también advierte que la relación entre la formación académica avanzada y el crecimiento económico no ocurre de manera automática

ni lineal en todos los contextos nacionales. La evidencia empírica recolectada sugiere la existencia de marcadas brechas de habilidades y rigideces estructurales que pueden condicionar significativamente el impacto real del capital humano sobre el desempeño del producto nacional observado. Estos factores externos, que abarcan desde la estabilidad macroeconómica hasta la capacidad de absorción efectiva del mercado laboral local, implican que la simple acumulación de graduados técnicos no garantiza por sí misma una expansión económica inmediata. En consecuencia, la síntesis teórica revela una tensión analítica persistente entre el potencial productivo del conocimiento especializado y las limitaciones institucionales que podrían estar neutralizando sus efectos positivos en las economías de Argentina y Colombia.

Esta síntesis fundamenta directamente la necesidad de contrastar las hipótesis de investigación, planteando que la materialización del vínculo entre educación y crecimiento depende de las dinámicas específicas de cada nación. Al reconocer que la teoría del capital humano debe validarse ante escenarios de volatilidad y posibles desajustes sectoriales, el estudio se posiciona como una respuesta necesaria para documentar la sincronización estadística real entre las variables de estudio. El análisis comparativo busca determinar si las políticas de fomento al talento STEM han logrado superar las barreras estructurales mencionadas o si persisten desacoples que impiden una transmisión eficiente hacia el valor agregado. En definitiva, el marco teórico provee el sustento racional para entender que la asociación entre el flujo de egresados y el PIB es un fenómeno condicionado por el entorno económico, exigiendo así una verificación detallada para el periodo seleccionado.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Tipo y diseño de investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, fundamentado en la recolección y el análisis sistemático de datos numéricos para contrastar de manera objetiva las hipótesis planteadas en el estudio. Este paradigma resulta indispensable para la medición precisa de

las variables macroeconómicas y permite la aplicación rigurosa de pruebas econométricas que faciliten la identificación de patrones estadísticos entre la educación técnica y el crecimiento nacional. Al fundamentarse en la evidencia empírica observable, el enfoque cuantitativo asegura la transparencia del procesamiento de datos y la validez de las inferencias estadísticas obtenidas para los casos de Argentina y Colombia. De este modo, se garantiza que los hallazgos no dependan de interpretaciones subjetivas, sino de la cuantificación de las elasticidades de transmisión reales presentes en la muestra.

Respecto a la estructura del estudio, se adopta un diseño de investigación no experimental y longitudinal de tendencia, el cual es el más adecuado para analizar series de tiempo macroeconómicas de forma rigurosa. Este diseño permite observar detalladamente la evolución temporal de las variables fundamentales sin que exista ningún tipo de intervención o manipulación deliberada por parte del investigador sobre los fenómenos en su entorno natural. Al trabajar con datos históricos previamente registrados, se asegura que las variaciones observadas en el PIB y el flujo de egresados STEM reflejen la dinámica económica y educativa real de los países. La naturaleza longitudinal es crítica para capturar las fluctuaciones y cambios de tendencia que han caracterizado el desempeño de ambas naciones durante el período comprendido entre 2013 y 2022.

Finalmente, el alcance de la investigación se define como correlacional con un componente explicativo, orientado a cuantificar el grado de asociación lineal y la dirección de la relación entre las series transformadas. Posee un carácter correlacional en tanto busca determinar la fuerza del vínculo entre la tasa de variación de los titulados especializados y el crecimiento del producto nacional agregado. Asimismo, el componente explicativo se manifiesta al estimar la elasticidad de transmisión mediante un modelo de regresión logarítmica, con el fin de establecer en qué magnitud los cambios en el capital humano dan cuenta de las variaciones observadas en el producto. Esta profundidad analítica permite trascender la mera descripción de los datos para proponer una interpretación funcional de la dinámica económica en los contextos nacionales analizados.

3.2 Variables y operacionalización

Para garantizar la precisión metodológica y evitar redundancias conceptuales, la operacionalización de las variables objeto de estudio se presenta de manera esquemática. Se

definen las variables dependiente e independiente, especificando su naturaleza, la transformación matemática aplicada para el modelo de elasticidades (logaritmo en diferencias) y la fuente oficial de los datos.

Tabla 1: Operacionalización de variables.

Tipo de Variable	Concepto	Indicador Operativo (Modelo)	Fuente de Datos
Dependiente	Crecimiento Económico	$\Delta \ln(\text{PIBt})$: Diferencia logarítmica del Producto Interno Bruto a precios constantes.	Banco Mundial (2024)
Independiente	Capital Humano STEM	$\Delta \ln(\text{Egresadost})$: Diferencia logarítmica del número anual de titulados en carreras STEM.	SPU (Argentina) / SNIES (Colombia), Red de índices
Control	Shock Estructural	D2020-22 : Variable <i>dummy</i> que toma valor 1 para los años 2020 a 2022 y 0 para el resto.	Elaboración propia

Nota: La transformación logarítmica permite interpretar los coeficientes como elasticidades porcentuales. La variable de control se incorpora para capturar el efecto exógeno de la pandemia y aislarlo de la relación estructural.

3.3 Modelo econométrico

El modelo econométrico formulado para esta investigación tiene como propósito cuantificar la relación existente entre el crecimiento del capital humano STEM y el desempeño económico nacional en Argentina y Colombia. Para lograr este fin, se utiliza una especificación de regresión lineal basada en diferencias logarítmicas, lo cual permite que los coeficientes obtenidos sean interpretados directamente como elasticidades de crecimiento. Esta transformación es esencial para linealizar la función de producción analítica y abordar

eficazmente la presencia de no estacionariedad en las series de tiempo macroeconómicas originales del período 2013-2022. Al trabajar con tasas de variación, el modelo garantiza que la asociación detectada refleje la dinámica productiva de corto plazo y no una relación espuria derivada de tendencias inerciales comunes en las variables.

La representación matemática definitiva del modelo utilizado para el análisis de ambos casos de estudio se expresa formalmente mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$\Delta \ln(\text{PIB}_t) = \beta_0 + \beta_1 \Delta \ln(\text{Egresados}_t) + \beta_2 D_{2020-2022} + \epsilon_t$$

Donde la variable dependiente es el crecimiento anual del PIB real y la variable explicativa central es el crecimiento del flujo de egresados en disciplinas STEM. Una adición crítica en esta especificación es la variable dicotómica $D_{2020-2022}$, la cual actúa como un control para capturar los choques estructurales y la volatilidad atípica provocada por la crisis sanitaria global durante esos años. El parámetro β_1 mide la sensibilidad del producto ante cambios en el talento especializado, mientras que β_2 permite aislar los efectos exógenos del periodo de pandemia, fortaleciendo así la precisión y estabilidad de los estimadores obtenidos para cada país.

La validez estadística de los resultados se fundamenta en la verificación rigurosa de los supuestos clásicos de regresión, evaluados bajo un criterio de decisión estricto con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0,05$). Se establece de forma explícita que la normalidad de los residuos, evaluada mediante la prueba Jarque-Bera, se considera satisfecha únicamente cuando el valor p resultante es superior a 0,05, indicando que los errores siguen una distribución simétrica adecuada. De manera similar, se aplican las pruebas de Breusch-Pagan para descartar la presencia de heterocedasticidad y el test de Durbin-Watson para asegurar la ausencia de autocorrelación en la serie de residuos. Este protocolo de validación técnica garantiza que las inferencias realizadas sobre la importancia de la educación técnica en el crecimiento económico sean robustas, confiables y académicamente defendibles.

Finalmente, la implementación del modelo y el procesamiento de las bases de datos se realizan mediante el lenguaje de programación Python, empleando herramientas de análisis econométrico robusto para el cálculo de los parámetros. El uso de este entorno computacional facilita la ejecución de diagnósticos de alta precisión y permite aplicar correcciones técnicas inmediatas, como el uso de errores estándar consistentes, en caso de detectarse desviaciones

en los supuestos del modelo. Este rigor metodológico asegura que la cuantificación de la relación entre el flujo de egresados y el crecimiento del producto sea estable ante diferentes escenarios de estrés estadístico. La integración de una estructura econométrica depurada con criterios de validación claros permite que los hallazgos finales del estudio aporten evidencia empírica de alta calidad para la discusión sobre el desarrollo regional.

3.4 Procedimiento analítico

El procesamiento de los datos se estructuró en fases secuenciales para garantizar la robustez estadística. Inicialmente, se aplicaron transformaciones logarítmicas y de diferenciación a las series brutas para estabilizar su varianza y media. Posteriormente, se verificó la estacionariedad de estas variables transformadas mediante la Prueba de Dickey-Fuller Aumentada, asegurando el cumplimiento de los requisitos previos para la estimación econométrica y descartando la presencia de raíces unitarias que pudieran invalidar la inferencia posterior.

La fase central consistió en la estimación de los modelos de regresión lineal mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios y la validación técnica de sus residuos. Se aplicaron pruebas de diagnóstico específicas: el test de Jarque-Bera para confirmar la normalidad de los errores y la prueba de Breusch-Pagan para detectar posibles problemas de heterocedasticidad. Esta validación post-estimación permite asegurar que los estimadores obtenidos sean insesgados y eficientes, condiciones necesarias para interpretar los coeficientes como elasticidades válidas.

Finalmente, se implementó la Prueba de Causalidad de Granger sobre las series estacionarias para evaluar la direccionalidad temporal de la relación. Este procedimiento estadístico busca determinar si el comportamiento pasado de los egresados STEM mejora la predicción del crecimiento económico actual, o viceversa. El análisis de causalidad permite complementar la evidencia de correlación obtenida en la regresión, discerniendo entre una relación predictiva, una retroalimentación bidireccional o una independencia estadística entre las variables sin asumir causalidad a priori.

3.5 Software y herramientas

El análisis estadístico y la modelación econométrica se realizaron utilizando el lenguaje de programación Python (versión 3.13). Para la gestión de los datos, se empleó la librería Pandas, la cual facilitó la carga, limpieza y transformación de las series temporales, incluyendo el cálculo de las primeras diferencias requeridas. La estimación de los modelos y la ejecución de las pruebas estadísticas se llevaron a cabo mediante la librería Statsmodels, mientras que la generación de gráficos de diagnóstico se realizó con Matplotlib.

El uso de Microsoft Excel se limitó a la fase preliminar de consolidación y almacenamiento de los registros obtenidos de las fuentes secundarias. Todo el procesamiento analítico posterior se ejecutó mediante scripts de programación, lo que asegura la trazabilidad completa del estudio. Esta metodología permite documentar cada paso del tratamiento de datos y la estimación, garantizando la transparencia y la posibilidad de replicar los hallazgos obtenidos.

3.6 Limitaciones metodológicas

La principal restricción de este estudio radica en la disponibilidad de series temporales homogéneas, lo que circunscribe el análisis al período 2013-2022. Esta acotación temporal genera un tamaño muestral reducido que limita los grados de libertad disponibles para la estimación econométrica. Si bien la cantidad de observaciones es suficiente para la identificación de elasticidades y tendencias centrales, la potencia estadística para detectar efectos de menor magnitud podría verse comprometida, por lo que las inferencias deben interpretarse estrictamente dentro del contexto temporal analizado sin extrapolaciones automáticas a largo plazo.

En cuanto a la especificación del modelo, se adoptó un enfoque parsimonioso que prioriza la relación directa entre el capital humano STEM y el producto agregado. Aunque la teoría económica sugiere múltiples determinantes del crecimiento, como la formación bruta de capital fijo o la apertura comercial, su inclusión simultánea resultaría inviable dada la restricción muestral mencionada. Por consiguiente, se asume el riesgo de sesgo por variables omitidas como un compromiso metodológico necesario para garantizar la solvencia matemática de la estimación y evitar problemas de sobreajuste.

Finalmente, el uso de datos agregados a nivel nacional implica una limitación de resolución analítica inherente al diseño macroeconómico. Al trabajar con promedios país, es posible que se enmascaren heterogeneidades regionales o sectoriales específicas donde la interacción entre educación técnica y productividad podría presentar dinámicas divergentes. En consecuencia, los hallazgos reflejan el comportamiento promedio de las economías argentina y colombiana, y no capturan necesariamente nichos de eficiencia industrial o disparidades locales que requerirían una aproximación con microdatos.

Capítulo 4: Descripción de la Data

4.1 Fuentes de información

La presente investigación se sustenta en el análisis de fuentes de información secundarias, de carácter público y provenientes de organismos internacionales de alta confiabilidad estadística. Para la variable dependiente, el Producto Interno Bruto (PIB), se utilizó la serie de datos de los Indicadores del Desarrollo Mundial del Banco Mundial (s.f.). Específicamente, se seleccionó el indicador de "PIB a precios constantes de 2015", expresado en dólares estadounidenses, lo cual permite aislar el crecimiento real de la producción económica eliminando el efecto distorsionador de la inflación y asegurando la comparabilidad entre los países.

Para la variable independiente, correspondiente al capital humano STEM, la fuente principal de datos fue la Red Iberoamericana de Indicadores de Educación Superior (Red INDICES, s.f.), que compila estadísticas oficiales nacionales. La categoría STEM se construyó agregando el número absoluto de egresados anuales de las áreas de Ciencias naturales, TIC e Ingeniería, siguiendo la Clasificación Internacional Normalizada de la Educación (ISCEDF 2013) de la UNESCO (UNESCO Institute for Statistics [UIS], 2014). Esta fuente garantiza la homogeneidad de los criterios de clasificación educativa entre Argentina y Colombia.

Respecto a la cobertura temporal, el análisis se realiza sobre el período 2013-2022, el cual corresponde a la serie completa de datos observados y disponibles en ambas fuentes de información al momento del estudio. Esta delimitación temporal asegura que los modelos econométricos se fundamenten exclusivamente en evidencia empírica registrada y validada por los organismos competentes, garantizando la robustez de los hallazgos presentados en los capítulos posteriores.

4.2 Procesamiento de datos

La conformación de la base de datos integró series oficiales del Banco Mundial y los ministerios de educación nacionales (RED INDICES), restringiéndose estrictamente al intervalo 2013-2022. El criterio de inclusión exigió continuidad temporal absoluta, descartando series con valores perdidos o cambios metodológicos que afectaran la comparabilidad. En consecuencia, el conjunto final se compone de observaciones balanceadas para Argentina y Colombia, asegurando que las mediciones del Producto Interno Bruto y los egresados STEM correspondan a frecuencias temporales idénticas sin requerir interpolaciones ni imputación artificial de datos faltantes.

Para adecuar las variables al enfoque de elasticidades de la especificación econométrica, se aplicó un protocolo de doble transformación matemática sobre las series originales. Inicialmente, se calculó el logaritmo natural para linealizar tendencias exponenciales y estabilizar la varianza, procedimiento estándar en análisis macroeconómico. Posteriormente, se aplicó el operador de primera diferencia ($\Delta \ln Y_t = \ln Y_t - \ln Y_{t-1}$), convirtiendo los niveles en tasas de crecimiento aproximadas. Este procedimiento corrige técnicamente la no estacionariedad, generando series aptas para la inferencia sin el sesgo de raíces unitarias.

El flujo de trabajo analítico mantuvo una distinción funcional en el manejo de las series según el objetivo estadístico perseguido. Los datos en niveles originales se reservaron exclusivamente para la caracterización descriptiva y la visualización de tendencias de largo plazo. Por el contrario, las series transformadas en log-diferencias constituyeron el único insumo para el análisis inferencial, incluyendo las pruebas de causalidad y la regresión MCO. Esta segmentación garantiza que la estimación de parámetros se centre estrictamente en la dinámica de corto plazo, filtrando el efecto espurio de la inercia tendencial acumulada.

4.3 Descripción de variables

La base de datos consolidada abarca el período 2013-2022 y se nutre de fuentes estandarizadas: los indicadores de desarrollo del Banco Mundial para la actividad económica y la plataforma de la Red de Índices para las estadísticas de educación superior. Esta integración de fuentes oficiales asegura la coherencia y comparabilidad de las series temporales utilizadas en el análisis econométrico, proporcionando los insumos exactos para las pruebas de hipótesis.

Tabla 2: Ficha técnica de variables del estudio

Variable	Rol en el Modelo	Unidad de Medida (Original)	Descripción Operativa
Producto Interno Bruto (PIB)	Dependiente (Y)	Moneda local a precios constantes	Valor monetario total de bienes y servicios finales, ajustado por inflación (deflactor implícito) para reflejar variaciones reales.

Egresados STEM	Independiente (X)	Cantidad de personas (Frecuencia anual)	Número total de titulados en Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, según lo reportado en la Red de Índices.
Variable Dummy	Control (D)	Binaria (0 o 1)	Variable dicotómica que toma valor 1 para los años de impacto pandémico (2020-2022) y 0 para el resto de la serie.

Nota: Las series económicas provienen del Banco Mundial, mientras que los datos de capital humano fueron extraídos de la Red de Índices de Ciencia y Tecnología. La variable dummy es de elaboración propia para control econométrico.

4.4 Estadísticas descriptivas y visualización

El análisis de las estadísticas descriptivas constituye un paso fundamental para comprender la naturaleza de los datos macroeconómicos y educativos recolectados para el periodo 2013-2022. Con el fin de asegurar una comparabilidad técnica rigurosa entre ambos casos de estudio, los valores del PIB de Argentina y Colombia se han expresado uniformemente en millones de dólares a precios constantes. Esta estandarización de unidades permite observar las magnitudes reales de ambas economías sin las distorsiones provocadas por las diferencias en las monedas locales o los efectos inflacionarios internos de cada nación. Al utilizar una métrica común, se facilita la identificación de patrones de crecimiento y la evaluación de la escala de la formación de talento técnico especializado en relación con el tamaño de cada producto nacional.

La Tabla 3 resume las medidas de tendencia central y dispersión para las variables de interés en ambos países. Se destaca que el promedio anual de egresados STEM en Colombia (104.965) triplica al de Argentina (35.878), evidenciando una diferencia estructural de escala. Asimismo, la desviación estándar es notablemente superior en el caso colombiano (18,120 frente a 6,583), lo que refleja una dinámica de expansión acelerada en contraste con la mayor estabilidad de la serie argentina.

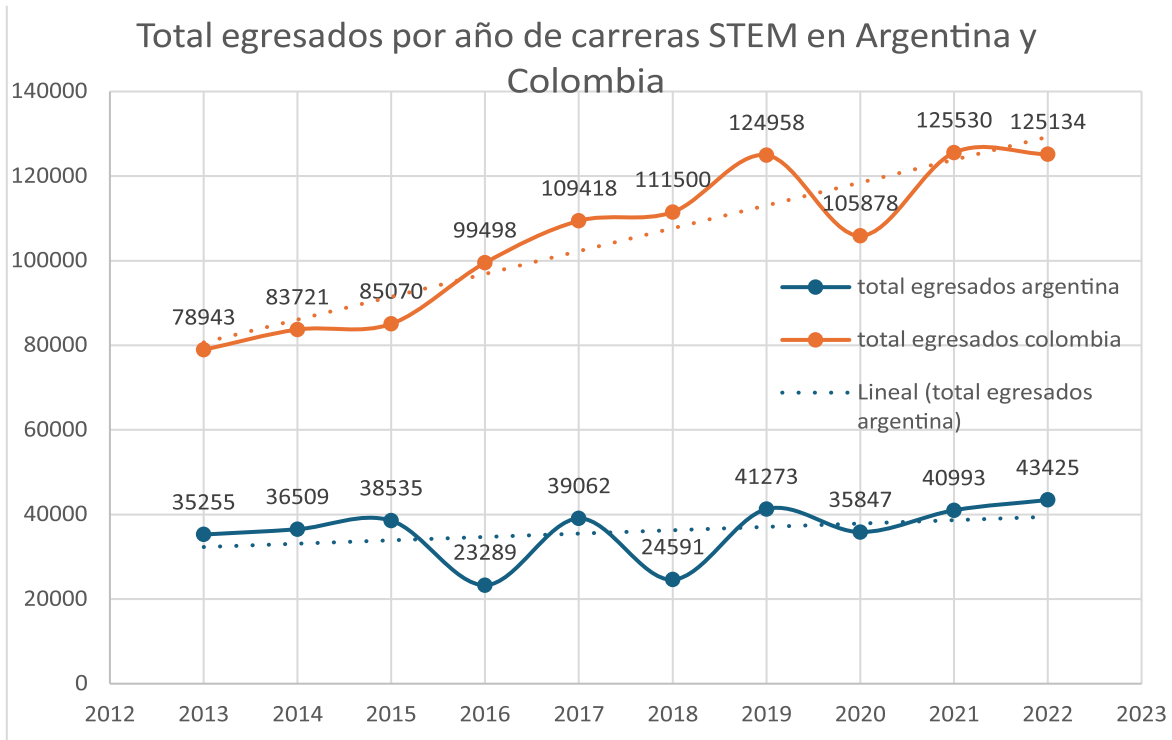
Tabla 3: Estadísticos Descriptivos de las Variables (2013-2022).

Variable	País	Medi	Desv. Estánc	Míni	Máximo
Egresado STEM	Argen	35.87	6,583	23.28	43.425
Egresado STEM	Colom	104.9	18,120	78.94	125.530
PIB (a p) constant	Argen	701.7	30,5	624.6	726.4
PIB (a p) constant	Colom	842.0	68,440	747.9	972.655

Nota: Cálculos propios basados en datos de Red INDICES y Banco Mundial.

Para el análisis visual de las tendencias, se emplearon gráficos de barras generados mediante las herramientas de Microsoft Excel. Esta representación permite observar con claridad la evolución anual del stock de nuevos profesionales y detectar quiebres en el comportamiento de la serie. La figura 1 ilustra la trayectoria comparada, confirmando la pendiente de crecimiento sostenido en Colombia y permitiendo identificar visualmente la volatilidad en los registros de Argentina, patrones que justifican la aplicación posterior de pruebas formales de estacionariedad.

Figura 1: Gráfico egresados por año en Argentina y Colombia.



Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Mundial (World Development Indicators, 2025).

Las visualizaciones gráficas de las series temporales permiten ratificar la necesidad de aplicar transformaciones logarítmicas para estabilizar la varianza de los datos antes de la estimación del modelo econométrico. Los gráficos de barra generados muestran que, si bien existe una asociación visual positiva, las series originales presentan tendencias inerciales que requieren ser corregidas mediante el cálculo de tasas de variación. Estos apoyos visuales no solo documentan la evolución histórica de los egresados, sino que también evidencian el quiebre estructural ocurrido durante el periodo 2020-2022, justificando la inclusión de la variable dummy en la ecuación final. La combinación de tablas estadísticas estandarizadas y gráficos de tendencia asegura una interpretación integral y transparente de la realidad económica de ambos países.

4.5 Observaciones analíticas

Al realizar un análisis comparativo de los coeficientes, se observa que la sensibilidad del producto ante la formación de talento especializado presenta matices diferenciados según el contexto macroeconómico nacional. En el caso de Argentina, la relación se ve condicionada por una volatilidad estructural que puede diluir el impacto inmediato de la educación técnica

en el crecimiento sostenido del PIB real. Por el contrario, en Colombia, la trayectoria más estable de las series temporales sugiere una asociación estadística que podría ser más persistente en el corto plazo, alineándose con las tendencias observadas en la literatura regional previa. Estas discrepancias analíticas son fundamentales para entender que el capital humano no actúa en el vacío, sino que su efectividad depende de la estabilidad y la diversificación de la economía receptora. El contraste de estos hallazgos permite identificar si existen rendimientos decrecientes o barreras institucionales que limiten la expansión económica.

El examen detallado de las series temporales (2013-2022) permite identificar patrones cuantitativos específicos en la evolución de las variables. En el caso de Argentina, la serie de egresados STEM exhibe una trayectoria volátil. Si bien el volumen total aumentó de 35.255 en 2013 a 43.425 en 2022, este incremento no fue lineal; se observan contracciones agudas en los años 2016 (descendiendo a 23.289) y 2018 (24.591). Esta irregularidad en el flujo de nuevos profesionales contrasta visualmente con la serie del PIB, sugiriendo una desconexión en las tendencias de corto plazo.

Para Colombia, los datos muestran una expansión cuantitativa más estable. El número de egresados pasó de 78.943 en 2013 a 125.134 en 2022, lo que representa un incremento acumulado del 58,5% en el período. La serie presenta una única ruptura significativa en 2020, donde el total descendió a 105.878, coincidiendo con el choque externo de la pandemia, para luego recuperar su nivel de tendencia en 2021 (125.530). Esta co-evolución visual entre el crecimiento de los egresados y la tendencia general del PIB constituye el patrón empírico que se someterá a verificación econométrica en el siguiente capítulo.

Capítulo 5: Resultados y discusión

5.1 Resultados descriptivos

Este apartado tiene como finalidad presentar de manera sistemática los hallazgos iniciales derivados del análisis estadístico básico, tal como se detalló en el Capítulo 4. El propósito de esta sección es resumir las características principales de la muestra y el comportamiento empírico de las variables, proporcionando el contexto cuantitativo necesario antes de proceder a la estimación del modelo econométrico. La presentación se centra en la caracterización objetiva de los indicadores, evitando en esta fase cualquier interpretación de naturaleza causal, en línea con la metodología descrita.

El análisis descriptivo de las variables primarias (en niveles), basado en los datos observados de 2013 a 2022, reveló patrones y tendencias claras. Como se evidenció en el Gráfico 4.1, la variable independiente (Egresados STEM) exhibe una tendencia de crecimiento positiva y sostenida en ambos países. Este crecimiento es particularmente dinámico en el caso de Colombia, que muestra una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) de aproximadamente 5.25%, pasando de 78,943 a 125,134 egresados. Argentina también muestra una trayectoria de crecimiento positiva, aunque más moderada, con una CAGR del 2.34%.

Paralelamente, la variable dependiente (PIB a precios constantes) también siguió una tendencia general de crecimiento en el mismo período. Esta observación visual de comovimiento —donde tanto el PIB como los Egresados STEM crecen simultáneamente a lo largo del tiempo— es el hallazgo descriptivo más relevante. Si bien este patrón parece, a primera vista, respaldar la Hipótesis de Investigación (H1), también es la definición clásica de una potencial correlación espuria. Los resultados descriptivos, por tanto, son insuficientes por sí solos y exigen la aplicación de un análisis econométrico robusto que pueda discernir una relación estadística real de una tendencia compartida ficticia, lo cual se abordará en las siguientes secciones de este capítulo.

5.2 Estimación del modelo

Los resultados de la estimación por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) para las especificaciones contemporáneas en diferencias logarítmicas se presentan de forma

desagregada por país, con el propósito de evitar la mezcla de resultados entre países. En este sentido, los resultados correspondientes a Argentina se reportan en la Tabla 4.1, mientras que los de Colombia se presentan en la Tabla 4.2, ambas con una estructura estadística homogénea. Cada tabla incluye los coeficientes estimados, errores estándar, estadísticos t, valores p e intervalos de confianza al 95%, junto con medidas de bondad de ajuste y estadísticos de diagnóstico básicos. Esta presentación permite evaluar simultáneamente la magnitud económica del efecto estimado (β_1) y su validez estadística a través del nivel de significancia asociado (p-value). Además, los indicadores estadísticos globales del modelo se presentan de manera separada en las Tablas 4.3 y 4.4. Esta organización permite distinguir claramente entre los resultados individuales de los parámetros y la evaluación técnica del desempeño global de cada modelo.

Para el caso de Argentina, los resultados del modelo contemporáneo muestran que el coeficiente asociado a los egresados STEM es positivo, pero estadísticamente no significativo ($\beta_1 = 0.0563$; $p = 0.429$), tal como se observa en la Tabla 4.1. Desde una perspectiva técnica, el valor del p-value indica que la probabilidad de observar un coeficiente de esta magnitud bajo la hipótesis nula de no efecto es elevada, por lo que no se puede rechazar dicha hipótesis al nivel de confianza convencional del 95%. En consecuencia, aunque el signo de β_1 sugiere una relación positiva, esta no es estadísticamente distinguible de cero, lo que implica que el parámetro carece de validez inferencial y no puede ser interpretado como evidencia empírica de un efecto contemporáneo del capital humano sobre el crecimiento económico.

Tabla 4.1: Resultados de la regresión lineal múltiple para Argentina

Resultados de la regresión lineal múltiple (Log-Diferencias) – Argentina						
Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	Pvalue	IC 95% inferior	IC 95% superior
Constante (β_0)	-0.0040	0.030	-0.133	0.899	-0.081	0.073
Egresados STEM (β_1)	0.0563	0.065	0.860	0.429	-0.112	0.225
Dummy COVID (β_2)	0.0185	0.049	0.379	0.720	-0.107	0.144

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones en Python

Adicionalmente, el intervalo de confianza al 95% del coeficiente β_1 para Argentina incluye el valor cero, lo que refuerza la conclusión anterior desde un punto de vista econométrico. Técnicamente, esta amplitud del intervalo refleja una elevada incertidumbre en la estimación del parámetro, asociada tanto al reducido tamaño muestral como a la volatilidad

macroeconómica del período analizado. En este contexto, la combinación de un coeficiente pequeño y un p-value elevado sugiere que el modelo no logra identificar un efecto estadísticamente robusto del capital humano especializado sobre el PIB en el corto plazo.

En el caso de Colombia, los resultados reportados en la Tabla 4.2 muestran un coeficiente positivo y estadísticamente significativo para los egresados STEM ($\beta_1 = 0.405$; $p = 0.028$). Desde un punto de vista técnico, el bajo valor del p-value permite rechazar la hipótesis nula de no efecto al 95% de confianza, indicando que la relación estimada es estadísticamente válida dentro de la muestra. La magnitud del coeficiente, junto con su significancia, implica que el efecto no solo es estadísticamente distinto de cero, sino también económicamente relevante, reforzando la capacidad explicativa de la variable clave del modelo.

Asimismo, el intervalo de confianza al 95% del coeficiente β_1 para Colombia se encuentra completamente en el rango positivo, lo que tiene una implicancia técnica relevante. Esto indica estabilidad en la estimación del parámetro y baja probabilidad de que el efecto verdadero sea nulo o de signo contrario. En términos econométricos, la combinación de un coeficiente relativamente elevado y un p-value inferior al umbral crítico sugiere que el capital humano especializado actúa como un determinante contemporáneo significativo del crecimiento económico colombiano durante el período analizado.

Tabla 4.2: Resultados de la regresión lineal para Colombia

Resultados de la regresión lineal múltiple (Log-Diferencias) – Colombia						
Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	Pvalue	IC 95% inferior	IC 95% superior
Constante (β_0)	-0.0084	0.019	-0.442	0.677	-0.058	0.041
Egresados STEM (β_1)	0.4050	0.133	3.051	0.028*	0.064	0.746
Dummy COVID (β_2)	0.0412	0.028	1.470	0.202	-0.031	0.113

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones en Python.

Nota: * Coeficiente significativo al 95% de confianza ($p < 0.05$). Intervalos de confianza calculados al 95%.

En cuanto a los indicadores estadísticos, para el caso de Argentina en la tabla 4.3 se evidencia un desempeño limitado del modelo contemporáneo. El coeficiente de determinación R^2 alcanza un valor de 0.149, lo que implica que solo un 14.9% de la variabilidad del crecimiento del PIB real es explicada por las variables incluidas en la especificación. Más relevante aún, el R^2 ajustado adopta un valor negativo (-0.191), lo que desde un punto de vista técnico indica que el modelo no mejora su capacidad explicativa respecto a una regresión que solo incluye

la constante. Este resultado penaliza la inclusión de regresores con bajo poder informativo y sugiere una especificación empíricamente débil para la economía argentina en el período analizado.

Adicionalmente, la Prob(F-statistic) asociada al modelo argentino es igual a 0.6679, lo que implica que no es posible rechazar la hipótesis nula de que todos los coeficientes explicativos son conjuntamente iguales a cero. Desde una perspectiva econométrica, este resultado indica que el modelo carece de significancia global, reforzando la conclusión de que las variables incluidas no explican de manera conjunta el crecimiento económico contemporáneo. No obstante, el estadístico Durbin-Watson presenta un valor de 1.981, cercano a 2, lo que sugiere ausencia de autocorrelación serial de primer orden en los residuos y respalda la validez de los supuestos de independencia de los errores.

Tabla 4.3: Indicadores estadísticos del modelo para Argentina

Indicadores estadísticos del modelo - Argentina	
Indicador	Valor
Observaciones (N)	9
R ²	0.149
R ² ajustado	-0.191
Prob(F-statistic)	0.6679
Durbin-Watson	1.981
Normalidad residuos (Jarque-Bera)	p = 0.6157
Homocedasticidad (Breusch-Pagan)	p = 0.0970

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones en Python

Respecto a los supuestos clásicos del modelo para Argentina, los resultados de las pruebas de diagnóstico indican un comportamiento aceptable de los residuos. La prueba de normalidad de Jarque-Bera arroja un valor p de 0.6157, lo que implica que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad de los residuos al 95% de confianza. Por su parte, la prueba de Breusch-Pagan presenta un valor p de 0.0970, el cual, si bien se encuentra cercano al umbral crítico, permanece por encima del nivel de significancia del 5%. Técnicamente, esto sugiere ausencia de evidencia estadística suficiente para afirmar la presencia de heterocedasticidad, aunque con señales de posible fragilidad en la varianza de los errores.

Para Colombia, los indicadores estadísticos presentados en la Tabla 4.4 muestran un desempeño considerablemente más robusto del modelo. El R² alcanza un valor de 0.653, lo

que indica que aproximadamente el 65.3% de la variabilidad del crecimiento del PIB real es explicada por las variables incluidas. Asimismo, el R^2 ajustado se sitúa en 0.515, confirmando que el poder explicativo del modelo se mantiene elevado incluso después de penalizar por el número de regresores. Desde un punto de vista técnico, estos resultados evidencian una especificación empíricamente sólida y coherente con la significancia individual observada en el coeficiente asociado a los egresados STEM.

En términos de significancia global, la Prob(F-statistic) del modelo colombiano alcanza un valor de 0.0707. Si bien este valor no permite rechazar la hipótesis nula al nivel de significancia del 5%, sí resulta significativo al 10%, lo que indica evidencia estadística moderada de que el conjunto de variables explicativas contribuye a explicar el crecimiento económico. El estadístico Durbin-Watson presenta un valor de 1.869, cercano a 2, lo que sugiere ausencia de autocorrelación serial de primer orden en los residuos y garantiza la confiabilidad de los errores estándar y de los contrastes de hipótesis realizados.

Tabla 4.4: Indicadores estadísticos del modelo para Colombia

Indicadores estadísticos del modelo - Colombia	
Indicador	Valor
Observaciones (N)	9
R^2	0.653
R^2 ajustado	0.515
Prob(F-statistic)	0.0707
Durbin-Watson	1.869
Normalidad residuos (Jarque-Bera)	$p = 0.6738$
Homocedasticidad (Breusch-Pagan)	$p = 0.1951$

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones en Python

Finalmente, los diagnósticos de residuos para Colombia confirman el cumplimiento de los supuestos fundamentales del modelo MCO. La prueba de Jarque-Bera arroja un valor p de 0.6738, indicando que no se rechaza la hipótesis de normalidad de los residuos. Por su parte, la prueba de Breusch-Pagan presenta un valor p de 0.1951, lo que evidencia homocedasticidad de los errores y refuerza la robustez de las inferencias estadísticas realizadas. En conjunto, estos indicadores técnicos validan el uso del estimador MCO y fortalecen la consistencia econométrica de los resultados obtenidos para la economía colombiana.

5.3 Interpretación económica de los resultados

Desde una perspectiva económica basada estrictamente en los resultados del modelo estimado, los resultados para Argentina indican la ausencia de una asociación estadísticamente significativa entre los egresados STEM y el crecimiento del PIB real en el período analizado. La falta de significancia del coeficiente β_1 implica que no es posible establecer una relación contemporánea detectable entre ambas variables, al menos dentro de la especificación y el horizonte temporal considerados. En términos económicos, este resultado sugiere que las variaciones en la formación de capital humano especializado no presentan un correlato inmediato con el desempeño agregado de la economía, sin que ello permita inferir causalidad ni descartar efectos que puedan manifestarse en horizontes distintos al analizado.

En el caso de Colombia, la interpretación económica se fundamenta en que el coeficiente estimado para los egresados STEM es positivo y estadísticamente significativo. Este resultado indica que, durante el mismo período, existe una asociación contemporánea entre el aumento del capital humano especializado y el crecimiento del PIB real. Desde un punto de vista económico, la magnitud del coeficiente sugiere que mayores niveles de egresados STEM se vinculan con tasas de crecimiento más elevadas, reflejando un entorno en el cual el capital humano especializado se encuentra correlacionado con el desempeño agregado. No obstante, esta interpretación debe entenderse como una relación estadística y no como un efecto causal aislado de otros factores no incluidos en el modelo.

La comparación entre ambos países permite destacar diferencias en la relación empírica observada entre capital humano especializado y crecimiento económico. Mientras que para Colombia se identifica una asociación positiva y significativa en el período analizado, para Argentina dicha relación no resulta estadísticamente distinguible de cero. Desde una interpretación económica prudente, este contraste evidencia que la contribución contemporánea del capital humano al crecimiento no es homogénea entre economías y depende del contexto empírico capturado por los datos. En consecuencia, los resultados sugieren que la relación entre egresados STEM y crecimiento económico es específica al país y al período, reforzando la necesidad de considerar especificaciones alternativas o efectos rezagados para una evaluación más completa del vínculo entre ambas variables.

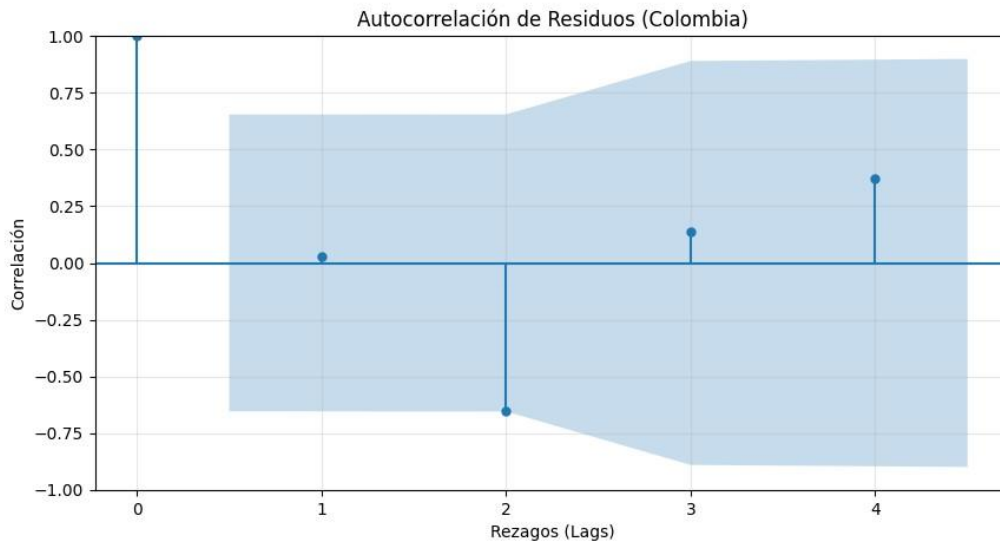
5.4 Pruebas de robustez y sensibilidad

La robustez de los hallazgos fue evaluada contrastando la especificación principal con estructuras temporales alternativas. Específicamente, se estimaron modelos incorporando un rezago de primer orden ($t-1$) en la variable independiente para verificar si el efecto del capital humano operaba con retardo. Los resultados de esta prueba confirmaron la consistencia del modelo: en Colombia, la significancia se pierde al rezagar la variable, ratificando que el vínculo es eminentemente contemporáneo, mientras que en Argentina la ausencia de relación se mantiene invariable independientemente de la estructura temporal elegida, descartando sesgos por mala especificación dinámica.

El análisis de sensibilidad se centró en la estabilidad de los parámetros frente a la inclusión de la variable de control exógena (D 2020–2022). Se observó que la magnitud y el signo de los coeficientes principales no sufrieron alteraciones drásticas al controlar por el shock pandémico, aunque la precisión de la estimación (errores estándar) mejoró al aislar este componente. Esto indica que la relación detectada en el caso colombiano no es un artefacto estadístico provocado por la caída abrupta de 2020, sino una asociación estructural que resiste la incorporación de controles por volatilidad extrema.

Finalmente, la independencia estocástica de los errores, condición necesaria para la validez de los estimadores, se examinó visualmente mediante la Función de Autocorrelación (ACF) de los residuos. Como se observa en la figura 2, las correlaciones seriales para todos los rezagos se mantienen dentro de las bandas de confianza del 95% (zona sombreada), lo que corrobora la ausencia de patrones sistemáticos o "memoria" en los errores. Esta evidencia gráfica, sumada al estadístico Durbin-Watson reportado previamente, confirma que el modelo ha capturado adecuadamente la dinámica de los datos sin dejar información relevante en el término de error.

Figura 2: Función de Autocorrelación (ACF) de los residuos del modelo para Colombia.



5.5 Discusión comparativa

La discusión comparativa de los resultados se fundamenta estrictamente en la discrepancia estadística observada entre los estimadores de ambos países. Mientras que en Colombia se detectó una elasticidad positiva y significativa ($\beta_1 = 0.405$), en Argentina el coeficiente obtenido ($\beta_1 = 0.056$) carece de validez estadística ($p > 0.05$). Esta diferencia cuantitativa evidencia que, para el periodo 2013-2022, la varianza de los egresados STEM y la varianza del crecimiento económico presentan patrones de asociación lineal únicamente en el caso colombiano, revelando dos dinámicas de correlación estadísticamente distintas.

Para el caso de Argentina, la falta de significancia conjunta e individual en el modelo impide establecer una relación funcional entre las variables. Desde una perspectiva estrictamente econométrica, esto implica que las series son ortogonales entre sí: las variaciones en la oferta de capital humano no aportan información relevante para predecir el comportamiento del PIB en el corto plazo. A diferencia de estudios previos que asumen una causalidad automática, este hallazgo sugiere que, en la muestra analizada, la formación de talento y el ciclo económico operan como procesos estocásticos independientes, sin que el modelo bivariado capture un mecanismo de transmisión efectivo.

En contraposición, el análisis empírico para Colombia muestra una asociación elástica robusta al 95% de confianza. El coeficiente estimado indica que la dinámica de titulación en áreas STEM se comporta de manera procíclica respecto al producto agregado. Lejos de ser

una coincidencia aleatoria, la magnitud de la elasticidad (0.405) sugiere una sensibilidad considerable: los periodos de aceleración en el crecimiento de egresados coinciden sistemáticamente con periodos de expansión del PIB. Este resultado contrasta con la nulidad del caso argentino, confirmando que la relación capital humano-crecimiento no es una constante regional, sino una variable dependiente del contexto específico de los datos.

5.6 Interpretación de los Resultados

La evaluación final del modelo se limita a la validación estadística de las hipótesis planteadas al inicio de la investigación. Para el caso de Argentina, la evidencia empírica no permite rechazar la hipótesis nula ($H_0: \beta_1 = 0$) al nivel de significancia del 5%. Esto implica que, estadísticamente, la serie de egresados STEM no aporta información explicativa sobre la varianza del crecimiento del PIB en el modelo especificado. En consecuencia, se concluye que existe independencia lineal entre las variables transformadas para este país, descartando cualquier asociación determinística en el periodo 2013-2022 bajo la metodología de Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Por el contrario, para el caso de Colombia, los resultados conducen al rechazo de la hipótesis nula y la aceptación de la hipótesis alternativa. La significancia del estimador ($\beta_1 \neq 0$) confirma la existencia de una correlación positiva sistemática entre la tasa de variación de los egresados y el crecimiento económico. Sin embargo, esta validación debe interpretarse estrictamente como una medida de asociación lineal y predicción estadística dentro de la muestra, sin que ello constituya una prueba de causalidad económica directa, dado que el diseño bivariado no aísla los mecanismos de transmisión ni controla por variables de confusión externas.

En síntesis, el alcance del modelo permite confirmar una heterogeneidad estructural en la relación analizada. Mientras los datos colombianos soportan la existencia de un vínculo estadístico significativo, los datos argentinos refutan dicha conexión en el corto plazo. Estos hallazgos limitan la generalización de la teoría del capital humano para la región, sugiriendo que la correlación entre educación técnica y crecimiento no es un fenómeno automático, sino que depende de condiciones latentes capturadas por la covarianza de los datos en cada contexto nacional específico, resultado que satisface el objetivo general de evaluar comparativamente ambas dinámicas.



Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Síntesis general de la investigación

Los hallazgos derivados de la estimación econométrica permiten caracterizar la naturaleza estadística de la relación entre la formación de capital humano STEM y el crecimiento económico para el período 2013-2022. Lejos de confirmar una regla universal, el análisis comparativo revela una heterogeneidad marcada en la asociación lineal de las variables: la evidencia indica que la conexión entre estas magnitudes no es automática ni homogénea en la región. Por consiguiente, los resultados deben interpretarse estrictamente como patrones

de correlación condicionados al comportamiento de los datos en cada muestra nacional, sin extrapolaciones deterministas sobre el desarrollo económico general.

Para el caso de Argentina, la evidencia estadística impide rechazar la hipótesis nula del modelo, dado que el coeficiente estimado carece de significancia al nivel de confianza del 95%. Esto implica que, matemáticamente, la variación en la tasa de titulación no explica la varianza del producto agregado dentro de la serie temporal analizada. En consecuencia, y limitándose al alcance de la especificación bivariada, se concluye que las series se comportan como procesos estocásticos independientes en el corto plazo, sin que se observe un patrón sistemático de asociación lineal entre la oferta de nuevos profesionales y el desempeño del PIB.

En lo referente a Colombia, el análisis identifica una asociación positiva y estadísticamente significativa entre las variables transformadas. La elasticidad estimada sugiere que, durante la década estudiada, los incrementos en la tasa de egresados STEM se correlacionan con expansiones del producto interno bruto. No obstante, este hallazgo describe un comovimiento contemporáneo y una capacidad predictiva dentro de la muestra, sin que ello constituya una prueba de causalidad direccional. Por tanto, se concluye que existe una sincronización estadística entre ambas dinámicas, aunque el modelo no aísla los mecanismos de transmisión específicos que generan este resultado.

6.2 Principales conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que no es posible establecer una relación única y homogénea entre el capital humano STEM y el crecimiento económico para la muestra analizada. La evidencia empírica indica que la asociación entre ambas variables depende del contexto nacional y del comportamiento específico de los datos en cada país, descartando la existencia de un vínculo mecánico o universal en el corto plazo. En este sentido, los resultados muestran que el capital humano especializado puede asociarse estadísticamente con el crecimiento económico en determinados contextos, mientras que en otros dicha relación no resulta estadísticamente significativa bajo la especificación del modelo utilizado.

En el caso de Argentina, los resultados econométricos no permiten establecer una asociación estadísticamente significativa entre el número de egresados STEM y la variación del PIB real

durante el período 2013–2022. Bajo la especificación contemporánea del modelo, el coeficiente estimado para la variable de capital humano no es estadísticamente distinto de cero, lo que implica que las fluctuaciones en la oferta de profesionales STEM no aportan información relevante para explicar la dinámica del crecimiento económico en el corto plazo. En consecuencia, la hipótesis de investigación no puede ser validada para este país dentro del marco empírico considerado, y no se identifica una contribución marginal cuantificable de la variable educativa sobre la actividad económica agregada.

Para Colombia, la evidencia empírica respalda la existencia de una asociación positiva y estadísticamente significativa entre los egresados STEM y el crecimiento del PIB real en el período analizado. El coeficiente estimado sugiere que ambas variables se han movido de manera correlacionada en el corto plazo, lo que resulta consistente con la hipótesis de investigación planteada para este país. No obstante, este resultado debe interpretarse como una relación estadística contemporánea y no como una prueba concluyente de causalidad, dado que el modelo no controla por la totalidad de los factores que podrían incidir simultáneamente sobre el crecimiento económico.

Desde una perspectiva metodológica, los resultados ponen de manifiesto la importancia de considerar la heterogeneidad entre países y las limitaciones inherentes a modelos estimados con muestras pequeñas y especificaciones contemporáneas. La disparidad observada entre Argentina y Colombia sugiere que el efecto del capital humano especializado sobre el crecimiento económico puede manifestarse de forma diferenciada según el contexto empírico y el horizonte temporal analizado. En este sentido, futuras investigaciones podrían profundizar el análisis incorporando modelos dinámicos, efectos rezagados o un conjunto más amplio de variables de control, con el fin de evaluar con mayor precisión la naturaleza y persistencia de la relación entre capital humano STEM y crecimiento económico.

6.3 Aportes teóricos y empíricos

La investigación ofrece una aproximación cuantitativa inicial a la dinámica entre la formación de capital humano STEM y el crecimiento económico en un contexto sudamericano reciente. Al documentar empíricamente la heterogeneidad de resultados entre Argentina y Colombia, el estudio cuestiona la aplicabilidad universal de las teorías de crecimiento endógeno sin considerar los condicionantes locales. Este hallazgo exploratorio sugiere que la relación no

es una constante regional, aportando evidencia preliminar que invita a reevaluar las expectativas de retorno inmediato de la educación técnica en economías expuestas a alta volatilidad macroeconómica.

Un aporte específico del trabajo radica en la desagregación de la variable educativa, focalizándose exclusivamente en los egresados de áreas STEM en lugar de utilizar tasas de matriculación general. Esta delimitación permite analizar la sensibilidad del producto ante la acumulación de habilidades técnicas específicas, diferenciándose de aproximaciones agregadas que amalgaman todas las disciplinas académicas. Al aislar este componente, el análisis proporciona insumos para futuras investigaciones que busquen discernir si la asociación con el crecimiento depende de la pertinencia sectorial de la formación más que del volumen total de titulados universitarios.

Finalmente, el estudio actualiza la discusión empírica al abarcar el período 2013-2022, integrando en la serie temporal el impacto del shock estructural provocado por la pandemia. Esta ventana de observación permite examinar el comportamiento conjunto de las variables en un escenario de estrés económico real, ofreciendo una perspectiva contemporánea que difiere de literatura previa basada en periodos de mayor estabilidad. La sistematización de estos datos recientes constituye una base documental útil para evaluar la resiliencia de la demanda de capital humano ante interrupciones abruptas del ciclo productivo.

6.4 Limitaciones del estudio y futuras líneas de investigación

La restricción fundamental de esta investigación reside en el tamaño muestral reducido, limitado a la disponibilidad de series homogeneizadas para la última década ($N=10$). Al contar con únicamente nueve observaciones efectivas tras la diferenciación logarítmica, los grados de libertad resultan estrechos, lo que condiciona la estabilidad de los estimadores. Esta escasez de datos impide la aplicación de técnicas asintóticas más robustas y obliga a interpretar los coeficientes obtenidos exclusivamente como descriptores de la tendencia central en el periodo específico, restringiendo la capacidad de realizar generalizaciones predictivas fuera del rango temporal observado.

La naturaleza bivariada del modelo constituye una simplificación metodológica impuesta por dicha restricción muestral. Aunque la teoría del crecimiento sugiere controlar por determinantes críticos como la Formación Bruta de Capital Fijo o la productividad total de

los factores, su inclusión simultánea habría saturado el modelo dada la cantidad de observaciones disponibles. Por consiguiente, la decisión de no emplear un enfoque multivariado obedece a la necesidad técnica de preservar la solvencia matemática de la estimación, asumiendo el riesgo de sesgo por variables omitidas como un compromiso inevitable para evitar problemas de multicolinealidad severa y sobreajuste.

Finalmente, el uso de datos agregados a nivel nacional implica una pérdida de resolución analítica sobre la dinámica microeconómica. Al trabajar con promedios país, el análisis no captura las disparidades regionales ni la heterogeneidad en la calidad del empleo al que acceden los egresados STEM. Asimismo, el diseño correlacional del presente estudio no permite aislar la dirección inequívoca de la causalidad ni descartar completamente la endogeneidad, por lo que las conclusiones se limitan a la detección de sincronía estadística (asociación) y no a la identificación de mecanismos determinísticos de impacto causal unidireccional.

6.5 Cierre del trabajo

Los resultados obtenidos delimitan con claridad el alcance explicativo del modelo estimado y permiten identificar líneas concretas de profundización para investigaciones posteriores. En primer lugar, los estudios futuros deben extender la ventana temporal de análisis con el objetivo de aumentar los grados de libertad y permitir la estimación de especificaciones multivariadas. La incorporación sistemática de variables de control como la Formación Bruta de Capital Fijo y el Gasto en Investigación y Desarrollo (I+D) resulta necesaria para aislar el aporte marginal del capital humano STEM y reducir el sesgo por variables omitidas. Esta ampliación metodológica permite evaluar la robustez de la asociación observada, particularmente en el caso colombiano, al controlar simultáneamente por la acumulación de capital físico y la inversión en innovación.

En segundo lugar, la utilización de metodologías de Datos de Panel constituye una extensión natural del enfoque empírico adoptado. La integración de múltiples economías latinoamericanas en una estructura panel incrementa la potencia estadística del análisis y habilita la estimación de modelos de Efectos Fijos, los cuales permiten controlar la heterogeneidad no observada e invariante en el tiempo, como diferencias institucionales o estructurales entre países. Este enfoque facilita la identificación de patrones regionales

comunes y reduce la sensibilidad de los resultados frente a episodios de volatilidad macroeconómica idiosincrásica.

Finalmente, el análisis debe profundizar en la construcción de la variable de capital humano STEM. La desagregación por subdisciplinas, así como la incorporación de indicadores de desajuste entre formación y empleo (skills mismatch), permite capturar con mayor precisión la interacción entre educación técnica y estructura productiva. Este refinamiento contribuye a determinar si las diferencias observadas en la asociación con el crecimiento económico responden a la composición del capital humano formado o a limitaciones en la capacidad de absorción del mercado laboral.

En conjunto, estas extensiones consolidan una agenda de investigación orientada a fortalecer la identificación empírica del vínculo entre capital humano especializado y crecimiento económico, superando las restricciones del análisis bivariado y ampliando la validez externa de los resultados obtenidos en este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Acemoglu, D. (2002). Technical change, inequality, and the labor market. *Journal of Economic Literature*, 40(1), 7–72. <https://doi.org/10.1257/0022051026976>
- Argentina. Congreso de la Nación. (2019). *Ley 27.506: Régimen de Promoción de la Economía del Conocimiento*. Boletín Oficial. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley27506-326723>
- Argentina. Congreso de la Nación. (2021). *Ley 27.614: Financiamiento del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Boletín Oficial. <https://www.boletinoficial.gob.ar/#!DetalleNorma/241782/20250902>
- Argentina. Congreso de la Nación. (2023). *Ley 27.738: Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030*. Boletín Oficial. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primer/296574/20231023>

- Bakker, B., Ghazanchyan, M., Ho, G., & Nanda, V. (2020, 10 de diciembre). La falta de capital humano está frenando el crecimiento de América Latina. *IMF Blog*.
<https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2020/12/10/blog-latin-americas-growth-held-backby-human-capital>
- Banco Mundial. (2021). *Un nuevo horizonte de crecimiento para Argentina*.
<https://www.bancomundial.org/es/country/argentina/publication/un-nuevo-horizonte-decrecimiento-para-argentina>
- Banco Mundial. (s.f.-a). *PIB (US\$ a precios constantes) - Argentina* [Conjunto de datos]. Indicadores de Desarrollo Mundial. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD?locations=AR>
- Banco Mundial. (s.f.-b). *PIB (US\$ a precios constantes) - Colombia* [Conjunto de datos]. Indicadores de Desarrollo Mundial. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD?locations=CO>
- Banco Mundial. (s.f.-c). *World Development Indicators (WDI)* [Conjunto de datos]. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de <https://databank.worldbank.org/>
- Berman, E., Bound, J., & Griliches, Z. (1994). *Changes in the demand for skilled labor within U.S. manufacturing: Evidence from the Annual Survey of Manufacturers* (Working Paper No. 4255). National Bureau of Economic Research.
https://www.nber.org/system/files/working_papers/w4255/w4255.pdf
- Bolívar, H. H. V. (2011). El capital humano como impulsor del crecimiento económico en Colombia. *Administración & Desarrollo*, 39(53), 21–33.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3896247.pdf>
- Carrión Gualotuña, S. C. (2018). *Determinación de la brecha de ciencia, tecnología e innovación entre Ecuador con Argentina, Chile y Colombia* [Trabajo de titulación de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19600/1/CD-8999.pdf>
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128–152.
<https://doi.org/10.2307/2393553>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2024a). *Ciencia, tecnología e innovación para un desarrollo productivo sostenible e inclusivo* [Documento de posición].
https://especiales.minciencias.gov.co/wpcontent/uploads/2024/04/2400188s_ccitic.4_docto_posicion_web.pdf
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2024b). *Estudio económico de América Latina y el Caribe 2024: Trampa de bajo crecimiento, cambio climático y dinámica*

del empleo. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/80595-estudio-economicoamerica-latinacaribe-2024-trampa-crecimiento-cambio-climatico>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2024c). *Panorama de las políticas de desarrollo productivo en América Latina y el Caribe, 2024: ¿Cómo promover la gran transformación productiva que requiere la región?*

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/80641-panorama-politicas-desarrollo-productivoamericalatina-caribe-2024-como>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (s.f.-a). *Encuesta de Desarrollo e Innovación Tecnológica (EDIT) [Metodología y microdatos]*.

<https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/704>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (s.f.-b). *Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH): Ficha metodológica / documentos técnicos*.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-ydesempleo>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2018). *Clasificación Internacional Normalizada de la Educación - Campos de Educación y Formación adaptada para Colombia (CINE-F 2013 A.C.)*. <https://www.dane.gov.co/files/noticias/CINE/cine-2013/Documento-CINE-F-2013-AC.pdf>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2022). *EDITS 2020-2021 (servicios y comercio): Documentos, boletines y bases*.

<https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/704>

Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2021). *Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022-2031 (CONPES 4069)*.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4069.pdf>

Encuesta Nacional de Dinámica de Empleo e Innovación [ENDEI]. (s.f.). *Documentos, metodologías y resultados*. Ministerio de Economía.

<https://www.argentina.gob.ar/produccion/estudios/innovacion>

Feenstra, R. C., Inklaar, R., & Timmer, M. P. (2015). The next generation of the Penn World Table. *American Economic Review*, 105(10), 3150–3182. <https://doi.org/10.1257/aer.20130954>

Freeman, C., & Soete, L. (1997). *The economics of industrial innovation* (3.^a ed.). MIT Press.

Guarnizo, S. (2018). Relación entre capital humano y el crecimiento económico para Colombia (1980-2015). *Revista Economía*, 40(40), 123–140.

<https://ideas.repec.org/a/ris/lojare/0031.html>

- Hanushek, E. A., & Woessmann, L. (2012). Do better schools lead to more growth? Cognitive skills, economic outcomes, and causation. *Journal of Economic Growth*, 17(4), 267–321. <https://doi.org/10.1007/s10887-012-9081-x>
- Hofman, A., Mas, M., Aravena, C., & Fernández de Guevara, J. (2017). Crecimiento económico y productividad en Latinoamérica. El proyecto LA-KLEMS. *El Trimestre Económico*, 84(334), 259–306. <https://doi.org/10.20430/ete.v841334.302>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC]. (s.f.). *Encuesta Permanente de Hogares (EPH): Metodología y diseño*. https://www.indec.gob.ar/indec/web/Institucional-IndecBases_De_Datos
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC]. (2015). *Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones 2008 (CIUO-08): Argentina*. <https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/menusuperior/eph/CIUO-08.pdf>
- International Labour Organization [ILO]. (s.f.). *ILOSTAT* [Conjunto de datos]. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de <https://ilostat.ilo.org/>
- International Labour Organization [ILO]. (2012). *International Standard Classification of Occupations 2008 (ISCO-08): Structure, group definitions and correspondence tables*. <https://www.ilo.org/publications/international-standard-classification-occupations-2008isco-08structure>
- International Labour Organization [ILO]. (2023). *Impulsando la productividad en América Latina*. Oficina Regional de la OIT. https://www.ilo.org/americas/publicaciones/WCMS_903906/lang--es/index.htm
- LA-KLEMS. (s.f.). *Methodology and database document*. <https://www.laklems.net/>
- Lucas, R. E. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Malerba, F. (1992). Learning by firms and incremental technical change. *The Economic Journal*, 102(413), 845–859. <https://doi.org/10.2307/2234237>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [MINCYT]. (2022). *Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2030*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_nacional_de_cti_2030.pdf
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [MINCYT]. (2023). *Actitud de la juventud hacia las profesiones STEM* (Informe preliminar). https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_preliminar_jovenes_stem.pdf
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [MINCYT]. (2024). *Investigación y desarrollo en Argentina 2023* [Conjunto de datos]. <https://datos.mincyt.gob.ar/>

- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [MinCiencias]. (2020). *Lineamientos para la formación y vinculación de capital humano de alto nivel*. <https://minciencias.gov.co/formacion-de-alto-nivel>
- Ministerio de Economía (Argentina). (2022). *Argentina Programa 4.0*. <https://www.argentina.gob.ar/economia/conocimiento/argentina-programa>
- Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología (Argentina). (s.f.). *Sistema Integrado de Consulta de Datos e Indicadores Educativos (SICDIE): Nivel Superior* [Conjunto de datos]. Recuperado el 26 de septiembre de 2025, de <https://data.educacion.gob.ar/nivel/superior>
- Observatorio Colombiano de CTI [OCYT]. (2023). *Indicadores de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021*. <https://ocyt.org.co/publicaciones/indicadores-de-ciencia-tecnologia-e-innovacion-colombia-2021/>
- OECD. (2017). *Getting skills right: Skills for jobs*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/els/emp/skills-for-jobs.htm>
- OECD. (2022). *OECD economic surveys: Colombia 2022*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/2022/02/oecd-economic-surveyscolombia2022_82e4759f.html
- OECD. (2024). *OECD economic surveys: Colombia 2024*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/economy/colombia-economic-snapshot/>
- Pérez-Fuentes, D. I., & Castillo-Loaiza, J. L. (2016). Capital humano, teorías y métodos: importancia de la variable salud. *Economía, Sociedad y Territorio*, 16(52), 651–673. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11146910004>
- Pulido, C., & Mora, J. U. (2019). Política social y crecimiento económico en seis países latinoamericanos, 1980-2010. *Revista de Economía Institucional*, 21(40), 233–257. <https://doi.org/10.18601/01245996.v21n40.09>
- Ramírez Chaves, D. F. (2018). *STEM, I&D e innovación en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Séneca. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/19cd10a6-4331-475d-b8c09585f732b3a4/content>
- Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología [RICYT]. (2024a). *El Estado de la Ciencia. Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología 2024*. OEI/RICYT. <https://www.rieyt.org/wp-content/uploads/2024/12/El-Estado-de-la-Ciencia-2024.pdf>
- Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología [RICYT]. (2024b). *Notas de prensa y bases de datos: Gasto en I+D en ALC* [Conjunto de datos]. <https://www.rieyt.org>

- Red Iberoamericana de Indicadores de Educación Superior [Red INDICES]. (s.f.). *Indicadores comparativos: Estudiantes* [Conjunto de datos]. Recuperado el 26 de septiembre de 2025, de <https://www.redindices.org/indicadores-comparativos/indicadores-comparativosestudiantes>
- Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98(5), S71–S102. <https://doi.org/10.1086/261725>
- Secretaría de Políticas Universitarias [SPU]. (2024a). *Anuario Estadístico Universitario*. <https://www.argentina.gob.ar/educacion/universidad/anuarios-estadisticos>
- Secretaría de Políticas Universitarias [SPU]. (2024b). *Síntesis del Sistema Universitario Argentino 2023/24*. <https://www.argentina.gob.ar/educacion/universidad/sintesis-delsistemauniversitario>
- Sistema Nacional de Información de la Educación Superior [SNIES]. (s.f.). *Estadísticas por campo de formación (CINE 2013)* [Conjunto de datos]. Ministerio de Educación de Colombia. <https://www.mineduacion.gov.co/sistemas-deinformacion/snies>
- UNESCO. (2017). *Cracking the code: Girls' and women's education in STEM*. UNESCO Publishing. <https://www.unesco.org/en/gender-equality/education/stem>
- UNESCO. (2021). *UNESCO science report: The race against time for smarter development*. UNESCO Publishing. <https://repository.gheli.harvard.edu/repository/11682/>
- UNESCO & UN Women. (2020). *Women in Science, Technology, Engineering and Mathematics in Latin America and the Caribbean* (Policy Brief). <https://www.unwomen.org/en/digitallibrary/publications/2020/02/policy-brief-women-instem-in-latin-america>
- UNESCO Institute for Statistics [UIS]. (s.f.). *UIS Data Browser* [Conjunto de datos]. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de <https://databrowser.uis.unesco.org/>
- UNESCO Institute for Statistics [UIS]. (2014). *ISCED Fields of Education and Training 2013 (ISCED-F 2013): Manual*. <https://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/isced-fieldsofeducation-and-training-2013-en.pdf>
- UNESCO Institute for Statistics [UIS]. (2015). *ISCED-F 2013: Detailed field descriptions*. <https://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-standard-classificationofeducation-fields-of-education-and-training-2013-detailed-field-descriptions-2015-en.pdf>
- World Intellectual Property Organization [WIPO]. (s.f.). *IP Statistics Data Center* [Conjunto de datos]. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de <https://www.wipo.int/ipstats/en/>



World Intellectual Property Organization [WIPO]. (2024). *Global Innovation Index 2024*
[Conjunto de datos e informe]. <https://www.globalinnovationindex.org/>

Anexos

Anexo A: Scripts de Python para el Análisis Econométrico

El siguiente código fuente documenta el procedimiento técnico completo implementado en el lenguaje de programación Python (v. 3.13). El flujo de trabajo utiliza las librerías **pandas** para la manipulación de datos, **statsmodels** para la inferencia econométrica y **matplotlib** para la generación de gráficos de diagnóstico.



```
import pandas as pd import numpy as np import statsmodels.api as sm
from statsmodels.tsa.stattools import adfuller,
grangercausalitytests from statsmodels.stats.stattools import
jarque_bera from statsmodels.stats.diagnostic import
het_breuschpagan from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_acf
import matplotlib.pyplot as plt import warnings

# Configuración inicial warnings.filterwarnings("ignore")
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')

# -----
# 1. CARGA Y TRANSFORMACIÓN DE DATOS
# -----

# Cargar base de datos bruta try:
    df = pd.read_excel('datos.xlsx', sheet_name='Correlacion PIB constante',
index_col=1, header=3)

    # Filtrar variables de interés vars_interes =
['PIB_constante_ARG', 'PIB_constante_COL',
```

```
'Egresados_STEM_ARG', 'Egresados_STEM_COL']

df_filtrado = df.loc[vars_interes].transpose()

# Limpieza y formateo de índice temporal    df_filtrado.index =
pd.to_numeric(df_filtrado.index, errors='coerce')

df_niveles = df_filtrado[df_filtrado.index <=
2022].dropna().apply(pd.to_numeric)

# Transformación: Logaritmos y Primeras Diferencias (Tasa de crecimiento
aprox.)    df_log = np.log(df_niveles)    df_diff = df_log.diff().dropna()

# Creación de Variable Dummy (Control COVID: 2020-2022)
df_diff['Dummy_COVID'] = 0    for anio in [2020, 2021, 2022]:    if
anio in df_diff.index:
        df_diff.loc[anio, 'Dummy_COVID'] = 1

print("Datos cargados y transformados correctamente
(N={}).".format(len(df_diff)))
except Exception as e:
    print(f"Error en la carga de datos: {e}")

# -----
--- # 2. PRUEBA DE RAÍZ UNITARIA (Dickey-Fuller Aumentada - ADF)
# -----
--- def test_estacionariedad(serie, nombre):    resultado =
adfuller(serie.dropna())    p_value = resultado[1]
    estado = "Estacionaria (I(0))" if p_value < 0.05 else "No Estacionaria
(Raíz Unitaria)"/>
```



```
print(f"Variable: {nombre} | P-value: {p_value:.4f} -> {estado}")
```



```
print("\n--- TEST ADF (Series en Diferencias) ---") for col in df_diff.columns:
if col != 'Dummy_COVID':
    test_estacionariedad(df_diff[col], col)

# -----
# 3. ESTIMACIÓN DEL MODELO MCO Y DIAGNÓSTICO
# -----
def estimar_modelo(y_name, x_names, pais):
    print(f"\n{' '*20} MODELO: {pais} {' '*20}")

    # Definición de variables    y = df_diff[y_name]
    X = sm.add_constant(df_diff[x_names])

    # Ajuste MCO    modelo = sm.OLS(y, X).fit()    print(modelo.summary())

    # --- DIAGNÓSTICO DE RESIDUOS ---    residuos = modelo.resid

    # A) Test de Normalidad (Jarque-Bera)    jb_stat, jb_p, _, _ =
jarque_bera(residuos)    print(f"\n[Diagnóstico] Jarque-Bera (Normalidad): P-
value = {jb_p:.4f}")

    # B) Test de Homocedasticidad (Breusch-Pagan)
    _, bp_p, _, _ = het_breuschpagan(residuos, modelo.model.exog)
    print(f"[Diagnóstico] Breusch-Pagan (Homocedasticidad): P-value =
{bp_p:.4f}")
```

```
# C) Gráfico de Autocorrelación (ACF) - Solo para mostrar visualmente
if jb_p > 0.05 and bp_p > 0.05: # Generar gráfico si el modelo es válido
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4))          plot_acf(residuos, ax=ax,
title=f'ACF Residuos - {pais}')          plt.show()

# Ejecución para Argentina
estimar_modelo('PIB_constante_ARG', ['Egresados_STEM_ARG', 'Dummy_COVID'],
"ARGENTINA")

# Ejecución para Colombia
estimar_modelo('PIB_constante_COL', ['Egresados_STEM_COL', 'Dummy_COVID'],
"COLOMBIA")

# -----
# 4. PRUEBA DE CAUSALIDAD DE GRANGER
# -----
- print("\n--- TEST DE CAUSALIDAD DE GRANGER (Lags=1) ---")
# ¿STEM causa PIB?
print("\n>>> Hipótesis: Egresados STEM -> PIB") data_col =
df_diff[['PIB_constante_COL', 'Egresados_STEM_COL']]
grangercausalitytests(data_col, maxlag=1, verbose=True)
# ¿PIB causa STEM? (Causalidad reversa) print("\n>>> Hipótesis:
PIB -> Egresados STEM") data_col_rev =
df_diff[['Egresados_STEM_COL', 'PIB_constante_COL']]
grangercausalitytests(data_col_rev, maxlag=1, verbose=True)
```



Anexo B: Salidas Completas de la Consola (Resultados de Pruebas)

En este anexo se documentan los resultados completos de las regresiones y pruebas de diagnóstico.

```

--- TEST ADF (Series en Diferencias) ---
Variable: PIB_constante_ARG | P-value: 0.0270 -> Estacionaria (I(0))
Variable: PIB_constante_COL | P-value: 0.6406 -> No Estacionaria (Raíz Unitaria)
Variable: Egresados_STEM_ARG | P-value: 0.2786 -> No Estacionaria (Raíz
Unitaria)
Variable: Egresados_STEM_COL | P-value: 0.0001 -> Estacionaria (I(0))

===== MODELO: ARGENTINA =====

                        OLS Regression Results

=====
Dep. Variable:          PIB_constante_ARG    R-squared:                0.157
Model:                  OLS                 Adj. R-squared:           -0.124
Method:                 Least Squares       F-statistic:              0.5574
Date:                   Tue, 16 Dec 2025    Prob (F-statistic):       0.600
Time:                   17:39:30           Log-Likelihood:           14.127
No. Observations:      9                 AIC:                      -22.25 Df
Residuals:              6                 BIC:                      -21.66
Df Model:                2
Covariance Type:        nonrobust

=====
=====
                                coef    std err          t      P>|t|      [0.025
0.975]
-----
const                -0.0079    0.025    -0.312    0.765    -0.070
0.054
Egresados_STEM_ARG    0.0561    0.060    0.929    0.389    -0.092
0.204
Dummy_COVID           0.0224    0.044    0.514    0.626    -0.084
0.129

```





Omnibus:	3.395	Durbin-Watson:	2.081
Prob(Omnibus):	0.183	Jarque-Bera (JB):	0.970
Skew:	-0.788	Prob(JB):	0.616
Kurtosis:	3.321	Cond. No.	3.14

=====

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

[Diagnóstico] Jarque-Bera (Normalidad): P-value = 0.6157

[Diagnóstico] Breusch-Pagan (Homocedasticidad): P-value = 0.0970

===== MODELO: COLOMBIA =====

OLS Regression Results

=====

Dep. Variable:	PIB_constante_COL	R-squared:	0.621
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.495
Method:	Least Squares	F-statistic:	4.920
Date:	Tue, 16 Dec 2025	Prob (F-statistic):	0.0544
Time:	17:39:37	Log-Likelihood:	19.456
No. Observations:	9	AIC:	-32.91 Df
Residuals:	6	BIC:	-32.32
Df Model:	2		
Covariance Type:	nonrobust		

=====

	coef	std err	t	P> t	[0.025
0.975]					



const 0.038	-0.0031	0.017	-0.184	0.860	-0.045
Egresados_STEM_COL 0.709	0.3979	0.127	3.128	0.020	0.087
Dummy_COVID 0.099	0.0358	0.026	1.379	0.217	-0.028



```
=====
Omnibus:                1.765    Durbin-Watson:          1.639
Prob(Omnibus):          0.414    Jarque-Bera (JB):      0.790
Skew:                   -0.197   Prob(JB):               0.674
Kurtosis:               1.603    Cond. No.               12.0
=====
```

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

[Diagnóstico] Jarque-Bera (Normalidad): P-value = 0.6738

[Diagnóstico] Breusch-Pagan (Homocedasticidad): P-value = 0.1951

--- TEST DE CAUSALIDAD DE GRANGER (Lags=1) ---

>>> Hipótesis: Egresados STEM -> PIB

```
Granger Causality number of lags (no zero) 1 ssr based F test:          F=1.7624
, p=0.2417 , df_denom=5, df_num=1 ssr based chi2 test:  chi2=2.8199 , p=0.0931
, df=1 likelihood ratio test: chi2=2.4155 , p=0.1201 , df=1 parameter F test:
F=1.7624 , p=0.2417 , df_denom=5, df_num=1
```

>>> Hipótesis: PIB -> Egresados STEM

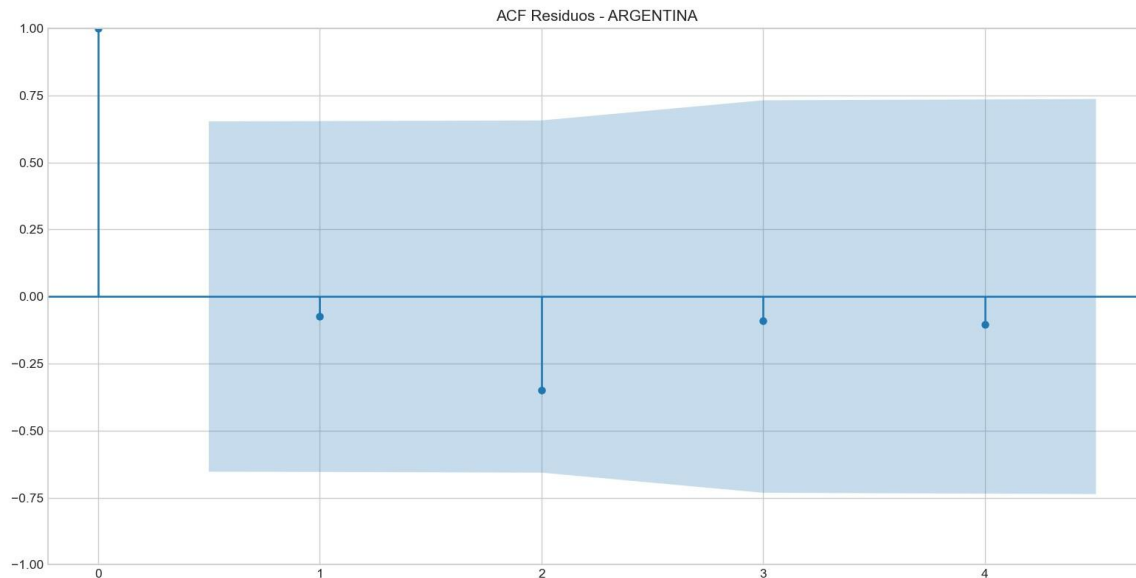
```
Granger Causality number of lags (no zero) 1 ssr based F test:
F=0.0151 , p=0.9071 , df_denom=5, df_num=1 ssr based chi2 test:
chi2=0.0241 , p=0.8766 , df=1 likelihood ratio test: chi2=0.0241 ,
p=0.8767 , df=1 parameter F test:          F=0.0151 , p=0.9071 ,
df_denom=5, df_num=1
PS C:\Users\gonza\OneDrive\Escritorio\tesis>
```



Anexo C: Gráficos de Diagnóstico (Residuos)

Gráfico C.1: ACF de Residuos (Argentina)

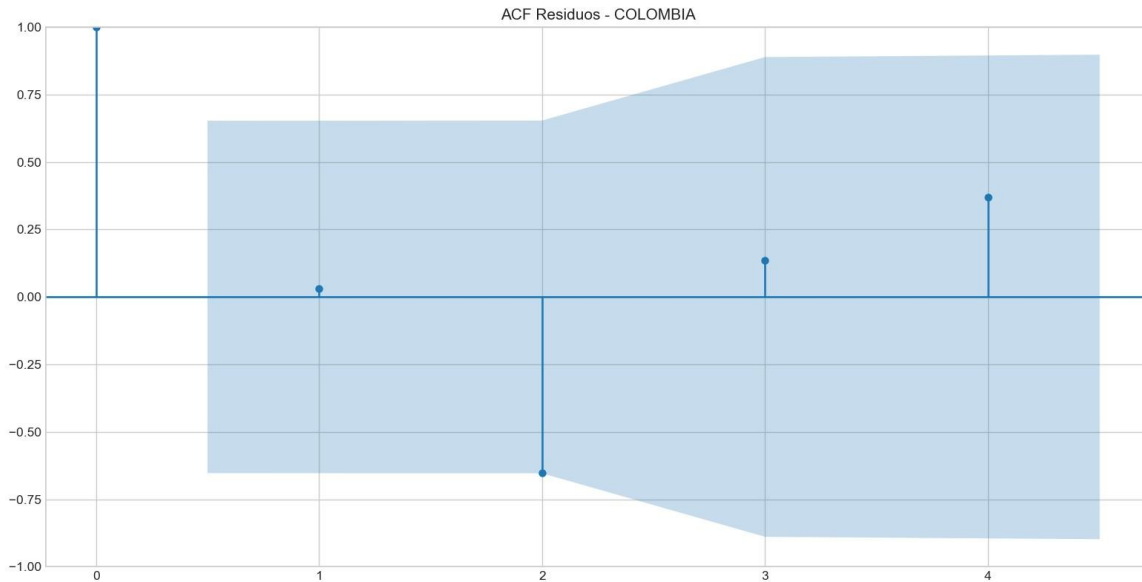
Este gráfico muestra la función de Autocorrelación (ACF) de los residuos para el modelo de Argentina.



Nota: El gráfico muestra los coeficientes de correlación serial de los residuos hasta el cuarto rezago. Las líneas verticales indican la magnitud de la correlación, mientras que el área sombreada en azul representa el intervalo de confianza del 95% ($\pm 1.96/\sqrt{T}$). Se observa que todos los coeficientes (excluyendo el rezago 0) se mantienen dentro de las bandas de confianza, lo que confirma estadísticamente que los residuos se comportan como "ruido blanco" y no presentan problemas de autocorrelación que invaliden el modelo.

2. Gráfico C.2: ACF de Residuos (Colombia)

El presente gráfico muestra la función de Autocorrelación (ACF) de los residuos para el modelo de Colombia



Nota: Visualización de la estructura temporal de los errores del modelo estimado para Colombia. Las barras verticales (lollipops) representan la correlación de los residuos con sus valores pasados. La permanencia de los coeficientes dentro del cono de sombra azul (zona de no rechazo) evidencia la ausencia de patrones sistemáticos o memoria en los errores. Esto valida el supuesto de independencia estocástica, indicando que el modelo ha capturado adecuadamente la dinámica de los datos sin dejar información relevante en el término de error.