



**Inversión ambiental y productividad total de los factores:
El caso de la industria manufacturera en Colombia 2011 – 2019**

Autor

Daniel Felipe Prieto Estrada

**Trabajo presentado como requisito para optar por el
título de Magister en Economía**

Director, Tutor

Mauricio Rodríguez Acosta

**Facultad de Economía
Maestría en Economía
Universidad del Rosario**

Bogotá - Colombia

2023

**Inversión ambiental y productividad total de los factores:
El caso de la industria manufacturera en Colombia 2011 – 2019¹**

Resumen

En este trabajo se busca analizar la relación entre inversión ambiental y Productividad Total de los Factores Verde (PTFV) para los establecimientos manufactureros de Colombia durante el periodo 2011 – 2019. En comparación con la Productividad Total de los Factores (PTF), la PTFV tiene en cuenta que durante el proceso productivo se generan bienes no deseables que afectan negativamente el medio ambiente (Rusiawan et al., 2015; Wang, Yang y Li, 2022). En primer lugar, se utiliza la metodología de análisis envolvente de datos (DEA por sus siglas en inglés) para calcular la PTFV y sus componentes: cambio en eficiencia y cambio tecnológico. En segundo lugar, los determinantes de la PTFV se analizan a través de un modelo dinámico de datos panel. En los resultados se encuentran diferencias estadísticamente significativas en la distribución de la PTFV de los establecimientos que llevaron a cabo inversiones ambientales en comparación con aquellos que no realizaron este tipo de inversiones. Asimismo, se obtiene que la relación entre inversión ambiental y PTFV es positiva y estadísticamente significativa, tanto en el corto como en el largo plazo.

¹ Agradezco a mi director de Tesis, Mauricio Rodríguez, por su motivación, orientación y aprendizaje en el desarrollo de esta investigación. También agradezco los comentarios y aportes de Andrés García Suaza y Ricardo Argüello. Agradezco al personal del DANE por facilitar el acceso a los datos y por la asesoría sobre el uso adecuado de los mismos. Las opiniones expresadas en este documento no son del DANE ni del personal del DANE. Todos los análisis con datos confidenciales se llevaron a cabo de acuerdo con las leyes colombianas de confidencialidad y en la Sala de Procesamiento Especializado Externo – SPEE de la entidad. Las opiniones y errores contenidos en este documento son únicamente mi responsabilidad.

1. Motivación

El sistema tradicional lineal de producción, que se compone de cuatro grandes procesos: (i) extracción de recursos naturales; (ii) producción de bienes y servicios; (iii) consumo y uso de productos; y (iv) generación de desechos, está siendo reemplazado por uno circular tanto en los países desarrollados como en desarrollo (Michellini et al., 2017; Padilla-Rivera, Russo-Garrido y Merveille, 2020). El sistema circular busca conservar los recursos naturales del planeta, disminuir los Gases de Efecto Invernadero – GEI y asegurar la sostenibilidad de los procesos productivos. En este caso, el sistema no termina en la generación y eliminación de desechos, sino que estos se reutilizan, reparan, renuevan o reciclan tantas veces como sea posible, para extender el ciclo de vida de los productos (Brennan et al. 2015; Comisión Europea 2015; Lieder y Rashid, 2016; Arroyo, 2018; Horbach y Rammer, 2020).

En el caso de Colombia, los últimos tres Planes Nacionales de Desarrollo han formulado estrategias y metas en materia de sostenibilidad ambiental. El Plan Nacional de Desarrollo “Prosperidad para Todos” (2010 – 2014) estableció que el país necesitaba garantizar un crecimiento económico de 6% sostenido y, sostenible social y ambientalmente. Para esto era necesario fomentar la innovación, la competitividad, la productividad y la dinamización de los sectores, que tienen un impacto mayor sobre el crecimiento económico y la generación del empleo (DNP, 2011).

A partir del Plan Nacional de Desarrollo “Todos por un Nuevo país” (2014 – 2018), el Gobierno de Colombia buscó implementar una estrategia transversal sobre todas las políticas públicas, para incentivar el crecimiento verde del país. Esta estrategia tenía como objetivos: “(i) avanzar hacia un crecimiento sostenible y bajo en carbono; (ii) proteger y asegurar el uso sostenible del capital natural y mejorar la calidad y gobernanza ambiental; y (iii) lograr un crecimiento resiliente y reducir la vulnerabilidad frente a los riesgos de desastres y al cambio climático” (DNP, 2015; DNP, 2018).

Finalmente, el Plan Nacional de Desarrollo “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad” (2018 – 2022), en su Pacto por la Sostenibilidad, implementa la estrategia nacional de economía circular para incentivar: el desarrollo de procesos productivos sostenibles en diferentes sectores económicos; el reciclaje; el reúso del agua; la eficiencia energética; la disminución de los GEI y de la deforestación (DNP, 2019).

Además de la relevancia desde el punto de vista de política pública, el camino hacia un sistema circular de producción se ve reflejado en las decisiones de las firmas, que buscan implementar métodos de producción más sostenibles. En particular, esto se puede manifestar por medio del redireccionamiento de la inversión hacia la inversión ambiental. Por lo cual, la pregunta que surge y se busca responder con esta tesis es si la inversión ambiental genera beneficios adicionales para las firmas manufactureras del país en términos de productividad, ya sea aumentando la eficiencia de los procesos productivos o introduciendo cambios tecnológicos (Porter y van der Linde, 1995; Nakamura, 2011; Horbach y Rammer, 2020).

Este trabajo busca contribuir de dos maneras. En primer lugar, estimando la PTFV de los establecimientos manufactureros de Colombia, la cual tiene en cuenta que durante el proceso de producción se generan bienes no deseables que afectan negativamente el medio ambiente, como las aguas residuales y los desechos industriales. Teniendo en cuenta lo anterior, la diferencia entre la PTF y la PTFV se genera por la cantidad producida de estos bienes no deseables: entre más alta sea la producción de bienes no deseables, ceteris paribus, la diferencia entre la PTF y PTFV es mayor (Rusiawan et al., 2015; Wang, Yang y Li, 2022). En segundo lugar, en este trabajo se analiza la relación que hay entre la inversión ambiental y el desempeño económico de los establecimientos manufactureros del país, lo cual es relevante para las políticas de sostenibilidad ambiental, no solo por su potencial ambiental sino también por el sustento económico.

En los resultados se encuentran diferencias estadísticamente significativas en la distribución de la PTFV de los establecimientos que llevaron a cabo inversiones ambientales en comparación con aquellos que no realizaron este tipo de inversiones. Los beneficios de los establecimientos manufactureros con inversión ambiental se reflejan en el componente de eficiencia, el cual crece dos veces más en estas unidades (0,58% en comparación con el crecimiento de 0,24% de los establecimientos que no realizaron inversiones ambientales). En contraste, el componente de cambio tecnológico disminuye menos en los establecimientos que no realizaron esfuerzos en materia de inversión ambiental. Por otro lado, se encuentra que hay una relación positiva y estadísticamente significativa entre inversión ambiental y la PTFV de los establecimientos manufactureros del país, tanto en el corto como en el largo plazo.

Este documento tiene siete secciones incluyendo esta introducción. En la segunda sección se presenta la revisión de literatura asociada con inversión ambiental, PTF y sus determinantes. En la tercera sección, se caracteriza el sector manufacturero en el contexto económico y ambiental de Colombia. En la cuarta sección, se expone la estrategia empírica que se utiliza para estimar la PTFV y analizar sus determinantes en el corto y largo plazo. En la quinta sección, se describen las fuentes de datos y el cálculo de los indicadores empleados en este trabajo. En la sexta sección, se analizan los resultados obtenidos. Por último, en la sección siete se presentan las conclusiones del trabajo respectivamente.

2. Revisión de literatura

2.1. Inversión ambiental y PTF

En la literatura económica se ha estudiado la relación entre inversión ambiental y productividad total de los factores (PTF) desde diferentes enfoques. En primer lugar, esta relación se ha analizado desde la teoría de la innovación la cual establece una relación positiva entre el desarrollo económico y los diferentes tipos de innovación que se dan en la economía (OCDE – EUROSTAT, 2006; Acemoglu, 2009). En esta literatura se consideran principalmente dos tipos de innovación: innovación de proceso e innovación de producto. La relación que hay entre inversión ambiental y cada uno de estos tipos de innovación se explican a continuación:

Innovación de proceso. Las inversiones ambientales mejoran la eficiencia de los procesos productivos porque estas buscan: reducir el consumo y desperdicio de materias primas, mejorar el aprovechamiento de los subproductos, disminuir el consumo de energía, sustituir las energías fósiles por renovables, reciclar o reutilizar los residuos, etc. Estas acciones contribuyen a la disminución de los costos de producción, lo cual impacta de manera positiva la PTF de las firmas. Sin embargo, la inversión y los costos iniciales de implementar actividades ambientales pueden llegar a ser bastante altos, por lo cual los beneficios se darían en el largo plazo (Porter y van der Linde, 1995; Hart y Ahuja, 1996; Nakamura, 2011; Soltmann, Stucki y Wörter, 2015; Horbach y Rammer, 2020).

Innovación de producto. Las inversiones ambientales también incentivan la elaboración o prestación de nuevos bienes o servicios amigables con el medio ambiente. Estos productos se caracterizan por ser fabricados con materias primas recicladas, así como por su

durabilidad, calidad y/o facilidad para ser reciclados, reutilizados o desechados. En este caso, la PTF de las firmas se ve impulsada por las ventajas competitivas de los nuevos productos (Porter y van der Linde, 1995; Horbach y Rammer, 2020).

En segundo lugar, la relación entre inversión ambiental y PTF se ha estudiado desde la literatura de responsabilidad social empresarial. Por un lado, las firmas se benefician del aumento de la demanda de productos eco-amigables, el cual se genera por la concientización ambiental de los consumidores (Brécard et al., 2009; Horbach y Rammer, 2020). Por otro lado, las inversiones ambientales están asociadas con una mayor valoración bursátil, mejoras en la reputación de las firmas y la posibilidad de acceder a mercados con alta conciencia ambiental (Nakamura, 2011; Ghisetti, 2018; Horbach y Rammer, 2018, Horbach y Rammer; 2020).

En tercer lugar, la PTF de las firmas se beneficia por el aumento de la productividad laboral que se genera durante la modernización del proceso productivo. Primero, por la posible sustitución de empleo por capital ambiental y segundo, por la contratación de trabajadores calificados y especializados en temas ambientales (Horbach y Rennings, 2013; Aldieri y Vinci, 2018; Van Roy, Vértesy, y Vivarelli, 2018; Horbach y Rammer; 2020).

2.2. Otros determinantes de la PTF

Si bien la inversión ambiental puede ayudar a explicar el comportamiento de la PTF, esta última está afectada por otras características como el capital social extranjero, el capital humano, el comercio exterior, la concentración del mercado y el uso de las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC).

El capital social extranjero impulsa la PTF de las firmas porque alivia las restricciones de liquides y endeudamiento de las firmas en su país de origen, y contribuye a la incorporación de activos intangibles, tecnologías y habilidades innovadoras en el proceso productivo. De tal forma, que las firmas con capital extranjero se caracterizan por ser más productivas e intensivas en capital, utilizar mano de obra de calificada, generar un nivel mayor de utilidades y estar inmersas en los mercados internacionales (Hanson, 2001; Arnold y Javorcik, 2005; Echavarría, Arbeláez y Rosales, 2006; Genthner y Kis-Katos, 2019; Tsamadias et al., 2019).

Asimismo, las habilidades y capacidades que tienen los trabajadores (capital humano) para aumentar su productividad, mejorar la eficiencia de las actividades que realizan dentro de las firmas y adoptar nuevas tecnologías o procesos de forma más rápida, tienen un efecto positivo sobre la productividad laboral de las firmas y, por tanto, de la PTF (Acemoglu, 2009; Conti, 2015; Tanaka, 2021).

Con relación al comercio exterior, las firmas pueden participar de dos formas: (i) importando bienes y servicios intermedios o bienes de capital; o (ii) exportando los bienes o servicios que producen. En la literatura económica, la dirección del efecto casual entre el comercio exterior y la PTF de las firmas no es clara. Por un lado, se encuentran los argumentos a favor de la autoselección, donde las firmas más productivas son las que pueden participar en los mercados internacionales, debido a los altos costos hundidos asociados con los procesos de negociación e inspección, el cumplimiento de normas y requisitos internacionales, entre otros. Desde este punto de vista, la PTF es quien tiene un efecto sobre la participación de las firmas en los mercados internacionales (Wagner, 2012; 2019).

Por otro lado, el comercio exterior afecta positivamente la PTF de las firmas a través de los procesos de aprendizaje e innovación que se adquieren al participar en los mercados internacionales (Wagner 2012; 2019). La participación en los mercados internacionales es beneficioso para las firmas porque incrementa el número de consumidores a los cuales se pueden ofrecer los bienes o servicios producidos; facilita la incorporación de bienes intermedios y de capital de mejor calidad o de mayor nivel tecnológico en los procesos de producción; fomenta la especialización en aquellas actividades donde se tienen fortalezas; y propicia la transferencia de conocimiento y procesos innovadores (Hallward-Driemeier, Iarossi y Sokoloff, 2002; Wagner, 2012; 2019; Di Cintio, Grassi y Petti, 2022).

En cuanto a la relación entre la concentración del mercado y la PTF de las firmas, existen dos puntos de vista en la literatura económica. Demsetz (1973), Peltzman (1977), Sidak y Teece (2009) y Teece (2011) argumentan que los altos niveles de concentración se generan por la destrucción de las firmas de baja productividad y por los esfuerzos en innovación que realizan las firmas de alta productividad, por lo cual hay una relación positiva entre la concentración del mercado y la PTF de las firmas (Sari, Khalifah, y Suyanto, 2016).

Por el contrario, Nickell, Nicolitsas y Dryden (1997) y Ahn (2002) afirman que los niveles altos de concentración desincentivan la inversión, los esfuerzos para mejorar la eficiencia de las firmas, la incorporación de nuevos procesos o productos, o la adaptación de nuevas tecnologías. Al mismo tiempo que las ganancias de las firmas terminan en las manos del personal administrativo (Sari, Khalifah, y Suyanto, 2016). En consecuencia, la relación entre el nivel de competencia del mercado y la PTF de las firmas es negativo.

Finalmente, el uso de las tecnologías de las TIC tiene un impacto directo y positivo sobre la PTF de las firmas, al introducir mejoras tecnológicas en todos los procesos y productos que se desarrollan durante la fabricación de bienes o la prestación de servicios. Asimismo, facilita la comunicación con otros actores claves del proceso productivo como proveedores, consumidores y competidores (Custodio, 2016).

En general, la PTF está relacionada con diferentes características de las firmas, y existe una amplia cantidad de trabajos que demuestran empíricamente los determinantes que se mencionaron en la sección 2.1. Por el contrario, no hay muchos trabajos que incluyen la inversión ambiental como determinante de la PTF de las firmas, debido a la baja disponibilidad de información. Sin embargo, las tendencias económicas en pro del medio ambiente hacen necesario analizar y cuantificar la relación que hay entre inversión ambiental y PTF, de tal forma que las firmas conozcan los beneficios económicos que se obtienen al ejecutar actividades asociadas con la prevención y protección del medio ambiente.

3. Contexto

El análisis que se realiza en este trabajo se enfoca en la industria manufacturera de Colombia, por lo cual en esta sección se pone en contexto al sector desde diferentes puntos de vista. A pesar del proceso de desindustrialización que inició a mediados de la década de los 70 del siglo XX (Echavarría y Villamizar, 2006), la industria manufacturera continúa siendo un sector importante en la economía colombiana, en términos de valor agregado, empleo, exportaciones e impacto ambiental. En las estadísticas oficiales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, se observa que la industria manufacturera fue el tercer sector económico más importante en la generación de valor agregado y empleo durante los último 10 años. Sin embargo, este sector ha venido perdiendo participación puesto

que su crecimiento ha sido menor que el de otros sectores económicos, como los de actividades financieras y de seguros, comercio y administración pública (Ver Anexo A).

Por el lado de las exportaciones, la industria manufacturera fue el segundo sector económico que más contribuyó en las ventas externas del país. Sin embargo, estas exportaciones se caracterizan por tener un bajo nivel de componente tecnológico, al concentrarse en los sectores de alimentos, bebidas y tabaco, y coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear. En los últimos 10 años, estas ventas externas también se caracterizaron por su bajo dinamismo, al crecer, en promedio, menos del 1% (Ver Anexo A).

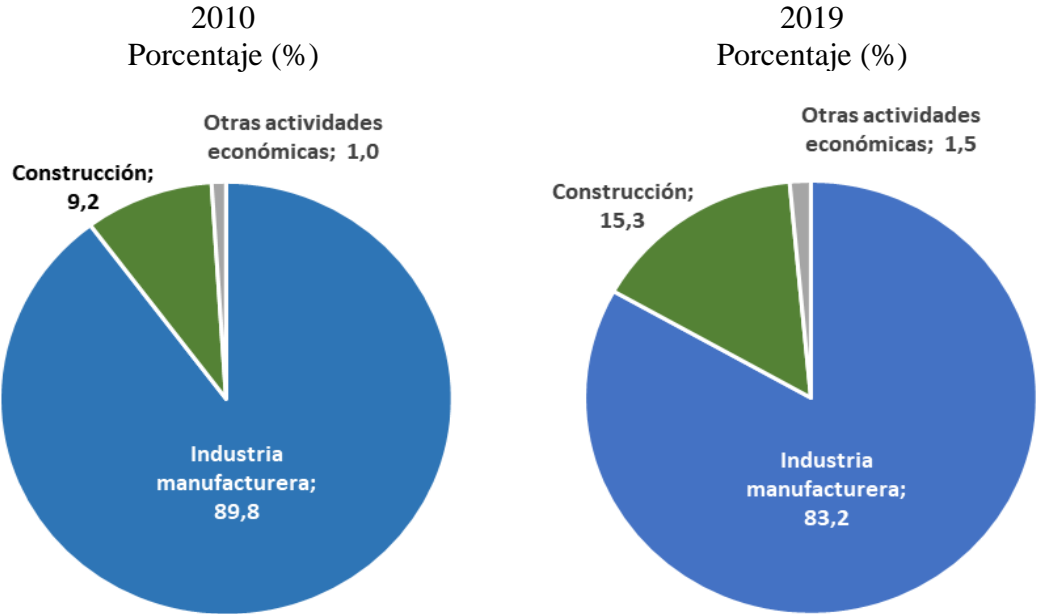
Dado el interés en entender la relación entre inversión ambiental y productividad de la industria manufacturera, a continuación, se caracteriza la industria manufacturera colombiana desde la perspectiva ambiental. Primero se presenta el impacto ambiental que tiene la industria manufacturera sobre los recursos naturales y energéticos del país. Después se describen las acciones y esfuerzos en materia ambiental que realizan los establecimientos manufactureros del país. Para este análisis se utilizan los indicadores ambientales de la Cuenta Satélite Ambiental (CSA) y de la Encuesta Ambiental Industrial (EAI) del DANE.

3.1. Impacto ambiental

La industria manufacturera consume una cantidad importante de recursos naturales y energéticos dentro de su proceso productivo. Por un lado, la industria manufacturera utilizó 2,4 millones de toneladas de productos del bosque (troncos de madera, leña, caucho, látex natural y otros productos forestales) en sus procesos de transformación en el año 2019, lo que representó un crecimiento de 11,2% con relación a 2010. En la Figura 1, se puede observar que la industria manufacturera consumió más del 80% del total del consumo intermedio de productos del bosque, tanto en el año 2010 como en el 2019.

Las actividades manufactureras de transformación de la madera (aserrado y cepillado de madera), fabricación de productos de madera y elaboración de papel, cartón y sus productos fueron las que utilizaron la mayor cantidad de productos del bosque (DANE, 2021a).

Figura 1. Participación del consumo intermedio de productos del bosque por actividad económica, 2010 y 2019



Fuente: DANE – Cuenta Satélite Ambiental.

Es importante mencionar que la fuente principal de productos del bosque ha cambiado desde finales del siglo pasado, pasando de los bosques naturales a las plantaciones forestales, especialmente de madera y pulpa de papel (ONFA, 2018). De acuerdo con el estudio MADS y ONFA (2015), este cambio ocurrió debido a que los productos extraídos de los bosques naturales se caracterizan por tener un suministro irregular, ser de calidad baja, presentar altos costos de extracción, y por las dificultades que se presentan en el trámite de permisos y autorizaciones para su aprovechamiento.

Por lo anterior, la industria manufacturera no es una de las causas principales de la deforestación en el territorio colombiano. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha encontrado que el acaparamiento de tierras, las actividades ganaderas, los cultivos ilícitos, la ampliación de la infraestructura de transporte y la frontera agrícola, la minería y tala ilegal son las principales causas de la deforestación en el país (MADS, 2022).

En relación con el consumo de productos energéticos, la industria manufacturera usó el equivalente a 1,1 millones de TJ en el año 2019, representando el 55,9% del total de productos energéticos utilizados en los procesos productivos del país. Sin embargo, el

consumo energético del sector manufacturero disminuyó en 33,7% entre 2010 y 2019, lo cual es coherente con la pérdida en la participación del valor agregado y del empleo en el sector.

Tabla 1. Distribución del consumo intermedio de productos energéticos por actividad económica, 2010 y 2019

Actividad económica	Porcentaje (%)	
	2010	2019
Industrias manufactureras	69,0	55,9
Suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje	20,3	29,0
Comercio, reparación de vehículos, transporte, almacenamiento y restaurantes	5,1	6,4
Administración pública, defensa, educación, salud humana y servicios sociales	2,5	4,6
Explotación de minas y canteras	2,1	1,8
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	0,4	0,9
Construcción	0,2	0,4
Actividades profesionales y servicios administrativos y de apoyo	0,1	0,3
Actividades financieras y de seguros	0,1	0,3
Información y comunicaciones	0,1	0,2
Otras actividades de servicios	0,0	0,2
Actividades inmobiliarias	0,0	0,1

Fuente: DANE – Cuenta Satélite Ambiental.

Los establecimientos manufactureros del país utilizaron una gran cantidad de productos energéticos primarios como carbón mineral, gas natural, petróleo y sus derivados para el desarrollo de su actividad. Estos combustibles representaron el 85,2% del total de productos energéticos consumidos por el sector manufacturero en el año 2019. Por otro lado, los biocombustibles como alcohol carburante, bagazo, biodiesel y leña representaron el 12,7% y la energía eléctrica solo el 2,1%. Asimismo, los sectores industriales de coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo, actividades de mezcla de combustibles y la elaboración de azúcar y panela fueron los que más productos energéticos consumieron durante su proceso productivo (DANE, 2021a).

El consumo de productos energéticos está relacionado con la generación de gases de efecto invernadero. En el año 2019, la industria manufacturera generó cerca de 36 millones de toneladas de CO₂ equivalente, que representaron el 45,3% del total de emisiones generadas por el sector productivo². Esto implica que las actividades manufactureras superaron en 30,4 puntos porcentuales a la segunda actividad que más contamina el aire, el suministro de

² Las emisiones son directas e indirectas, es decir, también incluyen las emisiones asociadas con el consumo de productos energéticos.

electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje. No obstante, las emisiones del sector manufacturero disminuyeron -3,5% entre 2010 y 2019, al pasar de 37 millones a 35 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

Tabla 2. Distribución de las emisiones generadas de gases de efecto invernadero por actividad económica, 2010 y 2019

Actividad económica	Porcentaje (%)	
	2010	2019
Industrias manufactureras	47,6	45,3
Suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje	19,8	14,9
Explotación de minas y canteras	14,7	13,9
Comercio, reparación de vehículos, transporte, almacenamiento y restaurantes	10,7	13,5
Administración pública, defensa, educación, salud humana y servicios sociales	5,5	8,8
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	0,8	1,6
Construcción	0,5	1,0
Actividades profesionales y servicios administrativos y de apoyo	0,2	0,5
Actividades financieras y de seguros	0,1	0,2
Información y comunicaciones	0,1	0,2
Otras actividades de servicios	0,0	0,1
Actividades inmobiliarias	0,0	0,1

Fuente: DANE – Cuenta Satélite Ambiental.

Así como en el consumo de productos energéticos, los sectores industriales de coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo, actividades de mezcla de combustibles y la elaboración de azúcar y panela fueron los que más emisiones de gases de efecto invernadero generaron durante el año 2019 (DANE, 2021a).

Si bien el sector manufacturero es el mayor consumidor de productos energéticos y generador de emisiones de gases de efecto invernadero, es el segundo más eficiente en el uso de productos energéticos, teniendo en cuenta que las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de energía consumida son las segundas más bajas entre todos los sectores productivos. La eficiencia energética de este sector solo es superada por la eficiencia de las actividades de suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje (DANE, 2021a).

Por el contrario, el consumo de agua por parte del sector manufacturero fue muy bajo en comparación con otras actividades económicas, como las de agricultura, ganadería, caza, silvicultura pesca, suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje. La industria manufacturera consumió solo el 0,2% del total de agua utilizada por el sector

productivo del país en el año 2019. Sin embargo, la cantidad de agua consumida por la industria manufacturera se incrementó en 15,4% entre 2010 y 2019, al pasar de 317 a 366 hectómetros cúbicos.

Tabla 3. Distribución del consumo intermedio de agua extraída por actividad económica, 2010 y 2019

Actividad económica	Porcentaje (%)	
	2010	2019
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	54,0	54,2
Suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje	45,0	45,1
Industrias manufactureras	0,3	0,2
Administración pública, defensa, educación, salud humana y servicios sociales	0,2	0,2
Comercio, reparación de vehículos, transporte, almacenamiento y restaurantes	0,1	0,1
Explotación de minas y canteras	0,3	0,1
Actividades financieras y de seguros	0,1	0,0
Actividades profesionales y servicios administrativos y de apoyo	0,0	0,0
Otras actividades de servicios	0,0	0,0
Información y comunicaciones	0,0	0,0
Actividades inmobiliarias	0,0	0,0
Construcción	0,0	0,0

Fuente: DANE – Cuenta Satélite Ambiental.

Las actividades industriales de fabricación de papel y sus productos, elaboración de azúcar y panela, fabricación de sustancias químicas básicas, procesamiento y conservación de carne y pescados, y el procesamiento y conservación de otros alimentos fueron las que utilizaron la mayor cantidad de agua en sus procesos de producción. Estas actividades consumieron el 59,5% del total de agua utilizada por la industria manufacturera (DANE, 2021a).

En cuanto al nivel de contaminación, el estudio CTA (2017) encontró altos niveles de contaminación en las aguas residuales de las actividades de elaboración de alimentos y bebidas, fabricación de vehículos y sus partes, fabricación de sustancias químicas básicas, fabricación de papel y sus productos, fabricación de productos textiles y confección de prendas de vestir, y en las industrias de los minerales no metálicos. Sin embargo, es importante mencionar que cerca del 80% de las aguas residuales generadas por los medianos y grandes establecimientos manufactureros del país reciben algún tipo de tratamiento (Tabla 4).

3.2. Acciones ambientales

En esta subsección, presentamos los esfuerzos realizados por los 1.504 establecimientos manufactureros más grandes del país, en materia de inversión, costos y gastos con fines de protección y conservación del medio ambiente. En primer lugar, los 1.504 establecimientos invirtieron, en promedio, \$215.723 millones de pesos al año para adquirir tierras, terrenos, maquinaria, equipo, construcciones o edificaciones con fines ambientales entre 2011 y 2019. Este valor representó cerca del 12% de la inversión total realizada. El 47,4% de la inversión ambiental se realizó para proteger el aire y el clima, 34,1% para gestionar los recursos hídricos y aguas residuales y el 18,5% restante para gestionar recursos minerales, energéticos y residuos, proteger el suelo, aguas subterráneas o superficiales, reducir el ruido y las vibraciones, o proteger la biodiversidad y los ecosistemas (DANE, 2021b).

Los sectores industriales donde se generaron las mayores inversiones en protección y conservación del ambiente entre 2011 y 2019 fueron: alimentos, bebidas y tabaco (31,3%), metalurgia y fabricación de productos metálicos (16,7%), industria de productos minerales no metálicos (14,4%), coquización, refinación del petróleo y combustible nuclear (11,3%) y fabricación de sustancias y productos químicos (10,3%). Asimismo, cerca del 50% de estas inversiones se llevaron a cabo en las regiones Oriental y Caribe (DANE, 2021b).

En el año 2019, la inversión ambiental aumentó 77,6% en comparación con el año 2018, lo cual se explica por la entrada en vigor de la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Ley 1715 del 2014. La primera les exige a los establecimientos manufactureros contar con mayores índices de calidad en los vertimientos de aguas residuales y la segunda regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional (DANE, 2021b).

Tabla 4. Otros indicadores ambientales de la industria manufacturera

Indicador	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Porcentaje de agua residual tratada por los establecimientos industriales con respecto al volumen de agua residual generada.	n.d.	78,5	79,3	82,6	84,5	81,9	n.d.	79,4	80,9
Residuos generados por la industria (miles de toneladas)	n.d.	10.985	9.903	12.997	11.488	11.129	12.181	13.202	13.157
Inversión en activos con fines de protección y conservación del ambiente									
Millones de pesos	228.719	228.174	217.981	152.485	195.223	166.655	n.d.	193.274	343.274
Participación de la inversión en activos fijos con fines de protección y conservación del ambiente en la inversión total de activos fijos	18,9	8,9	16,2	11,0	12,7	15,0	n.d.	8,5	8,5
Costos y gastos con fines de protección y conservación del ambiente									
Millones de pesos	193.071	230.825	229.649	205.567	177.237	171.719	n.d.	228.401	300.613
Participación de los costos y gastos con fines de protección y conservación del ambiente en el total de costos y gastos	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	n.d.	0,3	0,4
Personal ocupado dedicado a actividades de protección ambiental									
Personas	3.585	3.796	3.829	3.931	3.953	4.150	n.d.	4.243	4.420
Participación del personal ocupado dedicado a actividades de protección ambiental en la cantidad total de personas ocupadas	2,5	2,2	2,3	1,5	1,4	1,6	n.d.	1,6	1,7

Nota: Los datos de inversión, costos y gastos, y personal ocupado se calcularon con la información de 1.504 establecimientos que rindieron información todos los años a la Encuesta Ambiental Industrial – EAI (2011 – 2016 y 2018 – 2019).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Encuesta Anual Manufacturera y Encuesta Anual Ambiental del DANE.

En segundo lugar, entre 2011 y 2019, los 1.504 establecimientos pagaron, en promedio, \$217.135 millones de pesos al año por concepto de gastos en protección y conservación del medio ambiente, lo cual representó el 0,3% de los gastos totales. El 44,0% de estos gastos ambientales se realizaron para gestionar los recursos hídricos y aguas residuales, 32,4% para proteger el aire y el clima y el 23,6% restante para gestionar recursos minerales, energéticos y residuos, proteger el suelo, aguas subterráneas o superficiales, reducir el ruido y las vibraciones, o proteger la biodiversidad y los ecosistemas (DANE, 2021b).

Los sectores industriales donde se generaron los mayores gastos en protección y conservación del ambiente entre 2011 y 2019 fueron: alimentos, bebidas y tabaco (31,7%) y coquización, refinación del petróleo y combustible nuclear (27,6%). Adicionalmente, cerca del 66% de estos gastos se efectuaron en las regiones Oriental y Pacífica (DANE, 2021b).

Finalmente, el 1,8% del total de personas ocupadas en estos 1.504 establecimientos desarrollaron actividades de protección ambiental durante el periodo de análisis. En los sectores industriales de alimentos, bebidas y tabaco (32,4%) y coquización, refinación del petróleo y combustible nuclear (14,0%) se ocupó a la gran mayoría de las personas que

desarrollaron actividades ambientales. Mientras que en las regiones Central y Bogotá se ocupó al 46,6% del total de personas que llevaron a cabo actividades de protección ambiental (DANE, 2021b).

4. Metodología

4.1. Productividad total de los factores verde – PTFV

Con el fin de establecer la relación entre inversión ambiental y productividad, en esta sección se presenta la metodología para estimar la Productividad Total de los Factores (PTF) de los establecimientos manufactureros del país, la cual se mide por medio de los índices de productividad de Malmquist-Luenberger y el no proporcional de Luenberger. Estos índices reflejan el crecimiento de la PTF de una unidad económica. Con esta metodología, el cambio total de la PTF se puede descomponer en: (i) cambio de la eficiencia técnica (cambios en la distancia entre el punto observado de producción y la frontera de producción) y (ii) cambio tecnológico (movimientos de la frontera de producción) (Chung, Färe y Grosskopf. 1997; Chen et al., 2018; Song y Li, 2020; Xu y Deng, 2022).

Los índices de productividad se calculan con la metodología de análisis envolvente de datos (DEA por sus siglas en el inglés), la cual ha sido ampliamente utilizada en la literatura económica al ser una poderosa herramienta matemática que utiliza la programación lineal para calcular la distancia direccional de producción que se explica más adelante. Esta metodología tiene la ventaja de no necesitar información previa de la función de producción, como su forma o capacidad (Färe et al., 1986, 1993; Wang, Du y Zhang, 2022).

La metodología DEA se aplica usualmente sobre tecnologías que siguen los supuestos del modelo neoclásico tradicional, teniendo en cuenta la noción de que todos los insumos se deben minimizar mientras que la producción se debe maximizar. Sin embargo, la producción de algunos productos es no deseable como la de aquellos que tienen un impacto nocivo sobre el medio ambiente (gases de efecto invernadero, polución, aguas residuales, residuos o desechos, entre otros). En consecuencia, la metodología DEA también se ha desarrollado y aplicado sobre conjuntos de producción que incorporan la fabricación de bienes no deseables y buscan minimizar su producción. La PTF que se calcula bajo esta metodología se le denomina Productividad Total de los Factores Verde (PTFV) (Färe et al., 1986, 1993, 2005, 2006, 2007; Chen et al., 2018; Song y Li, 2020; Wang et al., 2022; Xu y Deng, 2022).

Considerando lo anterior y siguiendo a Färe et al. (2006), se tiene que los K establecimientos manufactureros del país transforman una cantidad no negativa de H insumos $x = (x_1, \dots, x_H) \in \mathbb{R}_+^H$ en I productos deseables $y = (y_1, \dots, y_I) \in \mathbb{R}_+^I$ y J productos no deseables $b = (b_1, \dots, b_J) \in \mathbb{R}_+^J$. Los insumos y los bienes deseables presentan disposición fuerte, es decir, que los establecimientos pueden disminuir la cantidad de insumos utilizados o la producción de bienes deseables sin incurrir en ningún costo.

Por el contrario, los productos no deseables presentan disposición débil, por lo cual, disminuir su producción es costoso. Estos costos están asociados con la imposición de multas, la utilización de insumos o recursos productivos para disminuir su producción, reducir proporcionalmente la producción de productos deseables, la inversión en maquinaria o equipo ambiental, entre otros (Färe et al., 2006).

Asimismo, el vector de producción (y, b) cumple con la propiedad de nulidad conjunta. Este supuesto implica que no es posible producir bienes deseables sin generar bienes no deseables: (i) si la producción de bienes no deseables es igual a cero ($b = 0$), entonces no hay producción de bienes deseables ($y = 0$), o similarmente, (ii) si se fabrican productos deseables ($y > 0$), entonces se deben generar productos no deseables ($b > 0$). Considerando lo anterior, el conjunto de producción $P(x)$ se puede expresar como:

$$P(x) = \{(y, b): x \text{ puede producir } (y, b)\} \quad x \in \mathbb{R}_+^H \quad (1)$$

Este conjunto también puede ser representado a través de una función de distancia radial direccional de producción de la siguiente manera (Färe et al., 2006):

$$\vec{D}_r(x, y, b; g) = \max\{\beta: ((x, y, b) + \beta g) \in P(x)\} \quad (2)$$

Donde $\vec{D}_r(x, y, b; g)$ es la distancia radial entre el vector observado (x, y, b) y la frontera eficiente de producción: entre más pequeña sea la distancia, el establecimiento está más cerca de la frontera eficiente de producción. La distancia también se puede calcular de manera no radial. Por un lado, la distancia radial se calcula entre el vector observado de producción y un vector sobre la frontera eficiente de producción, en el cual los I productos deseables y J productos no deseables cambian en la misma proporción. En el caso de la distancia no radial, los cambios de estos productos no necesariamente son proporcionales, la producción de unos

productos puede aumentar mientras la de otros quedarse constante o disminuir (Ruíz, 2000). La distancia direccional no radial se expresa como:

$$\vec{D}_{nr}(x, y, b; g) = \max\{w' \beta: ((x, y, b) + \text{diag}(\beta)g) \in P(x)\} \quad (3)$$

Donde w es el vector de pesos que permite cambiar el vector (y, b) de forma no proporcional. Por otro lado, $g = (g_x, g_y, g_b) \in \mathbb{R}_+^H * \mathbb{R}_+^I * \mathbb{R}_+^J$ y $g \neq 0$ es un vector direccional y β es el parámetro por maximizar. En la literatura económica, se utilizan habitualmente tres tipos de vectores direccionales (Wang et al., 2022):

- a. Prosperidad económica ($g_1 = (0, y, 0)$): Este vector direccional plantea un problema de optimización donde se busca maximizar la producción de bienes deseables, manteniendo constante la cantidad de insumos utilizados y la producción de bienes no deseables.
- b. Protección ambiental ($g_2 = (0, 0, -b)$): Este vector direccional plantea un problema de optimización donde se busca minimizar la producción de bienes no deseables, manteniendo constante la cantidad de insumos utilizados y la producción de bienes deseables.
- c. Prosperidad económica y protección ambiental ($g_3 = (0, y, -b)$): Este vector direccional es una combinación de los dos anteriores y, tiene como objetivo, simultáneamente, maximizar la producción de bienes deseables y minimizar la producción de bienes no deseables, manteniendo constante la cantidad de insumos utilizados.

La distancia radial direccional de producción es el insumo principal para el cálculo del índice de productividad de Malmquist-Luenberger, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$IPML^{t+1} = \left[\frac{1 + \vec{D}_r^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)}{1 + \vec{D}_r^t(x^t, y^t, b^t; g)} \frac{1 + \vec{D}_r^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)}{1 + \vec{D}_r^{t+1}(x^t, y^t, b^t; g)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

En este caso $IPML^{t+1}$ mide el crecimiento de la PTFV entre los periodos t y $t + 1$, así que la PTFV mejora cuando el índice es mayor a uno y disminuye cuando es menor a uno. Como se mencionó anteriormente, este indicador puede descomponerse en una medida de eficiencia:

$$IPMLCE^{t+1} = \frac{1 + \vec{D}_r^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)}{1 + \vec{D}_r^t(x^t, y^t, b^t; g)} \quad (5)$$

y en una medida de cambio tecnológico:

$$IPMLCT^{t+1} = \left[\frac{1 + \vec{D}_r^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)}{1 + \vec{D}_r^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)} \frac{1 + \vec{D}_r^t(x^t, y^t, b^t; g)}{1 + \vec{D}_r^{t+1}(x^t, y^t, b^t; g)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Por otro lado, la distancia no radial direccional de producción es el insumo principal para el cálculo del índice de productividad no proporcional de Luenberger, el cual se calcula como:

$$IPL^{t+1} = \frac{1}{2} [\vec{D}_{nr}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \vec{D}_{nr}^t(x^t, y^t, b^t; g)] \\ + \frac{1}{2} [\vec{D}_{nr}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \vec{D}_{nr}^{t+1}(x^t, y^t, b^t; g)] \quad (7)$$

El componente de eficiencia de este indicador se expresa como:

$$IPLCE^{t+1} = \vec{D}_{nr}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \vec{D}_{nr}^t(x^t, y^t, b^t; g) \quad (8)$$

y el componente de cambio técnico como:

$$IPLCT^{t+1} = \frac{1}{2} [\vec{D}_{nr}^t(x^t, y^t, b^t; g) - \vec{D}_{nr}^{t+1}(x^t, y^t, b^t; g)] \\ + \frac{1}{2} [\vec{D}_{nr}^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g) - \vec{D}_{nr}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g)] \quad (9)$$

4.2. Determinantes de la PTFV

Teniendo en cuenta la revisión de la literatura y la información disponible se realizó un ejercicio empírico para analizar los determinantes de la PTFV de los establecimientos manufactureros del país entre 2011 y 2019. Para esto, se utiliza el siguiente modelo dinámico de datos panel:

$$IPML_i^t = \lambda IPML_i^{t-1} + \beta LINVAM_i^{t-1} + \mathbf{x}_i^{t'} \boldsymbol{\delta} + \alpha_i + u_i^t \quad (10)$$

Donde $IPML_i^t$ es el crecimiento de la PTFV del establecimiento i en el año t , el cual se estima con la ecuación (4) y utilizando el vector direccional de prosperidad económica, $LINVAM_i^{t-1}$ es el logaritmo de la inversión ambiental en pesos del 2011 del establecimiento i en el año $t - 1$, $\mathbf{x}_i^{t'}$ representa los otros determinantes de la PTFV, α_i representa la heterogeneidad no observada del establecimiento i , y u_i^t es el término de error. En este modelo, la inversión ambiental se encuentra rezagada un periodo porque se considera que los beneficios en

productividad no se dan de manera inmediata. Por otra lado, se tienen en cuenta otros determinantes de la PTFV como: (i) el porcentaje de capital social extranjero en el año t (CSE_i^t), (ii) el porcentaje de personas ocupadas con educación técnica o profesional (PYT_i^t), (iii) el valor de las exportaciones como porcentaje de las ventas totales (EXP_i^t), (iv) el porcentaje de materias primas, materiales y empaques importados (IMP_i^t), (v) un indicador de concentración de mercado ($Herfindahl_i^t$), y (vi) una variable dicotómica que toma el valor de uno si el establecimiento utiliza el servicio de internet para el desarrollo de su actividad y 0 en el caso contrario (TIC_i^t).

El modelo anterior se estima a través del Método de Momentos Generalizados (GMM) sugerido por Arellano y Bond (1991, 1998), el cual permite incluir variables rezagadas entre los regresores, dado que controla los efectos heterogéneos no observados, el sesgo por variable omitida y la endogeneidad de las variables explicativas. Asimismo, este método se ajusta mejor en bases de datos tipos panel donde el número de individuos es mayor que el número de años, como ocurre en este caso (Roodman, 2009).

En esta metodología se deben realizar tres pruebas estadísticas para verificar la válides de los resultados. Con estas pruebas se espera, primero, encontrar una alta correlación de primer orden puesto que se incluye la variable dependiente rezagada entre los regresores del modelo; segundo, no encontrar evidencia estadística de autocorrelación de segundo orden porque esto indicaría problemas de especificación; y tercero, determinar que los instrumentos del modelo son exógenos a través de la prueba de Sargan-Hansen (Arellano y Bond 1988; Echavarría, Arbeláez y Rosales, 2006; Roodman, 2009).

5. Datos

Con el objetivo de calcular la PTFV y sus determinantes en la industria manufacturera de Colombia, se utilizaron cuatro fuentes de información del DANE: la Encuesta Anual Manufacturera - EAM, la Encuesta Ambiental Industrial – EAI, las matrices oferta-utilización del Sistema de Cuentas Nacionales y el Índice de Precios al Productor – IPP. A continuación, se describen estas fuentes de información y la metodología empleada en la construcción de cada uno de los indicadores.

5.1. Encuesta Anual Manufacturera – EAM

La Encuesta Anual Manufacturera – EAM captura información económica de todos los establecimientos manufactureros del país de acuerdo con la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas revisión 4 adaptada para Colombia (CIIU Rev. 4 A.C.), y que durante el año de referencia emplearon a 10 o más personas o cuyo valor de producción supere los \$500 millones de pesos o más en el año 2016³. A partir de la EAM se tomaron y calcularon los siguientes indicadores:

- a. **Producción deseable (y):** Este indicador corresponde al valor de la producción bruta en miles de pesos de cada establecimiento. El valor se deflacta con los índices de precios implícitos que se calculan con la información de las matrices de oferta-utilización de cuentas nacionales. En la EAM, el valor de la producción bruta incluye el valor de los productos manufacturados, los ingresos por subcontratación industrial, el valor de la energía eléctrica vendida, los ingresos causados por subvenciones, el valor de las existencias de los productos en proceso de fabricación al finalizar el año, y el valor generado por el alquiler de bienes producidos y la instalación, mantenimiento y reparación de productos fabricados; y se le resta el valor de los productos en proceso de fabricación al iniciar el año.
- b. **Trabajo (x_1):** El primer componente del vector de insumos es el trabajo o el número de personas ocupadas en el establecimiento. Este indicador incluye a los trabajadores(as) contratados(as) directamente por el establecimiento o a través de empresas especializadas, propietarios(as), socios(as) y familiares sin remuneración.
- c. **Capital (x_2):** El segundo componente del vector de insumos es el capital, el cual comprende el valor total, en miles de pesos, de la maquinaria y equipo que se utiliza exclusivamente para la manufactura de productos. Los valores en pesos corrientes, reportados en la EAM, se deflactan con el IPP para bienes de capital.

³ Este valor se actualiza anualmente con el índice de precios al productor (IPP). En el año 2016, se presentó un cambio en este valor, por lo cual hay un incremento significativo en este criterio entre el año 2015 y 2016.

- d. **Consumo de energía eléctrica (x_3):** El tercer componente del vector de insumos es el consumo de energía eléctrica en kilovatios (KWh) de cada uno de los establecimientos del país.
- e. **Consumo de materias primas, materiales y empaques (x_4):** El cuarto y último componente del vector de insumos es el valor en miles de pesos de las materias primas, materiales y empaques consumidas por el establecimiento durante el proceso de fabricación. Los valores en pesos corrientes, reportados en la EAM, se deflactan con los índices de precios calculados a partir de las matrices de oferta y utilización de cuentas nacionales.
- f. **Composición del capital social:** La composición del capital social se reporta a nivel de empresa y no de establecimiento, porque los aportes de los socios se realizan a este nivel. Este indicador mide el porcentaje del capital social que proviene de socios o inversiones extranjeras.
- g. **Personal ocupado técnico y profesional:** Con el objetivo de medir el papel que tiene el capital humano sobre la PTFV de los establecimientos manufactureros, se calcula el cociente entre el número de personas ocupadas en el proceso productivo que cuentan con un título técnico o profesional y el número total de personas ocupadas en el establecimiento.
- h. **Comercio exterior:** Se construyen dos indicadores de comercio exterior. Primero, el valor de las exportaciones como porcentaje de las ventas totales (flujos hacia el exterior), y segundo el porcentaje de materias primas, materiales y empaques que se compran en el extranjero como indicador de las importaciones de los establecimientos manufactureros del país.
- i. **Índice de Herfindahl:** A partir de la información de la EAM también se calcula el índice de Herfindahl, una medida de concentración de mercado, de la siguiente manera:

$$Herfindahl_i^t = \sum_{e=1}^E (s_{ej}^t)^2 \quad (11)$$

Donde $Herfindahl_i^t$ es el índice de Herfindahl del sector j en el año t , E es el número total de establecimientos que hay en el sector j y s_{ej}^t es la participación que tiene el

establecimiento e en el valor agregado del sector j en el año t . Entre más alto es el indicador, mayor es el nivel de concentración de mercado en el sector.

- j. Uso del servicio de internet:** Por último, del módulo de las tecnologías de la información y comunicaciones de la EAM, se construye una variable indicadora que es igual a 1 si el establecimiento realiza pagos por concepto de servicios de comunicaciones como teléfono, correo, fax, beeper, radio teléfono, celular o internet para el desarrollo de su actividad económica y 0 en el caso contrario.

5.2. Encuesta Ambiental Industrial – EAI

La Encuesta Ambiental Industrial – EAI es una encuesta por muestreo probabilístico, que proporciona información de las actividades asociadas con la protección del medio ambiente, la gestión de recursos y desechos sólidos, y el manejo del recurso hídrico, llevadas a cabo por los establecimientos manufactureros del país. Esta encuesta se ha realizado de manera continua desde el año 2011, con excepción del año 2017.

La muestra de la EAI se obtiene directamente de la EAM, lo cual permite el cruce de información entre las dos bases de datos. En el proceso de selección de la muestra, se establecen tres parámetros: (i) la ubicación geográfica; (ii) el sector económico; y (iii) el personal ocupado o valor de la producción bruta, que se definen desde la EAM. De acuerdo con esta estratificación, la EAI es representativa para 6 regiones del país⁴ y 9 sectores industriales⁵. Asimismo, es importante mencionar que los establecimientos más grandes del país rinden información todos los años, mientras que se selecciona una muestra aleatoria de

⁴ Las siete regiones son: (1) Caribe (Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira, Magdalena, Sucre y San Andrés); (2) Oriental (Boyacá, Cundinamarca, Meta, Norte de Santander, Santander y Antioquia); (3) Central (Caldas, Caquetá, Huila, Quindío, Risaralda y Tolima); (4) Pacífica (Cauca, Chocó, Nariño y Valle del Cauca); (5) Bogotá (Bogotá D.C.); y (6) Amazonia y Orinoquía (Arauca, Casanare, Putumayo, Amazonas, Guainía, Guaviare, Vaupés y Vichada).

⁵ Los sectores industriales son: (1) Alimentos, bebidas y tabaco; (2) Textiles, confección, calzado y pieles; (3) Industria de la madera y el corcho, fabricación de papel y actividades de impresión; (4) Coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo y combustible nuclear; (5) Fabricación de sustancias y productos químicos; (6) Fabricación de productos de caucho y de plástico; (7) Industrias de otros productos minerales no metálicos; (8) Metalurgia y fabricación de productos metálicos; y (9) Otras divisiones industriales.

los establecimientos medianos y pequeños. Los indicadores que se toman o calculan de esta fuente de información son los siguientes:

- a. Generación de residuos sólidos industriales (b_1):** El primer componente del vector de productos no deseables es el total de kilos de residuos sólidos industriales generados durante el año. En este indicador se incluyen los residuos orgánicos, plásticos, de papel y cartón, de caucho, textiles, de madera, de vidrio, metálicos, de escorias y cenizas, y mezclados, que se generan durante el proceso de producción industrial.
- b. Aguas residuales (b_2):** El segundo y último componente del vector de productos no deseables es el total de metros cúbicos de aguas residuales que genera el establecimiento. En este componente se incluye tanto las aguas residuales que reciben algún tipo de tratamiento como las no tratadas. Durante el tratamiento de las aguas residuales, los establecimientos buscan eliminar algunos contaminantes, como materias orgánicas o inorgánicas y otro tipo de sólidos.
- c. Inversión ambiental:** La inversión ambiental corresponde a los esfuerzos que hacen los establecimientos para incrementar los activos, que tienen como finalidad proteger el medio ambiente. Por un lado, las inversiones se pueden realizar para adquirir tierras, terrenos, maquinaria, equipo, construcciones o edificaciones. Por otro lado, estas inversiones buscan gestionar los recursos minerales y energéticos; proteger el aire y el clima; gestionar los recursos hídricos y aguas residuales; gestionar los residuos; proteger el suelo, aguas subterráneas y superficiales; reducir el ruido y las vibraciones; proteger la biodiversidad y los ecosistemas; o llevar a cabo proyectos de investigación y desarrollo ambiental (DANE, 2020). Los valores corrientes de la inversión ambiental, reportados en la EAI, se deflactan con el IPP para bienes de capital
- d. Costos y gastos ambientales:** Los costos y gastos se diferencian de las inversiones porque no aumentan el valor de los activos, son de corto plazo y generan una disminución del patrimonio del establecimiento. En este rubro se incluyen los costos operacionales por materiales y suministros, la adquisición de herramientas pequeñas, el mantenimiento e instalación de equipos y los servicios ambientales ofrecidos por terceros para medir, controlar y analizar. Al igual que las inversiones ambientales,

estos costos y gastos tienen como objetivo proteger el medio ambiente (DANE, 2020). Los valores corrientes de los costos y gastos ambientales, reportados en la EAI, se deflactan con los índices de precios implícitos calculados a partir de las matrices de oferta y utilización.

- e. **Personal ocupado dedicado a actividades ambientales:** Este indicador corresponde al personal ocupado promedio que el establecimiento contrata para el desarrollo de actividades de protección, conservación y recuperación ambiental.

5.3. Índices de precios

Con el objetivo de deflactar de manera adecuada los valores corrientes que se reportan en la EAM y EAI, se construyen diferentes índices de precios para el valor de la producción bruta, el consumo intermedio y los bienes de capital. El valor de la producción bruta se deflacta con los índices de precios que se obtienen al dividir el valor de la producción en pesos corrientes y el valor de la producción a precios constantes de las matrices oferta-utilización del Sistema de Cuentas Nacionales del país. Estos índices se construyen a nivel de división (2 dígitos) de la CIU Rev. 4 A.C, el cual es el mayor nivel de desagregación que presentan las matrices. Un proceso similar se realiza para el cálculo de los índices de precios del consumo intermedio (costos y gastos). Por otro lado, el valor corriente de los bienes de capital se deflacta con el IPP de bienes de capital.

6. Resultados

6.1. Productividad total de los factores verde – PTFV

En la tabla 5 se presentan las estadísticas descriptivas de las siete variables que se utilizan en el cálculo de la PTFV: producción bruta (producto deseable), desechos sólidos industriales, aguas residuales (productos no deseables), trabajo, capital, energía eléctrica y consumo de materias primas, materiales y empaques (insumos). Entre 2011 y 2019, 20.813 establecimientos manufactureros suministraron información a las encuestas del DANE, y cumplieron con el supuesto de nulidad conjunta, dado que reportaron valores mayores a 0 tanto en la variable de producción bruta, como en las de generación de desechos sólidos industriales y aguas residuales.

Todas las variables presentan una alta dispersión por la inclusión de diferentes sectores industriales y establecimientos pequeños, medianos y grandes. En promedio, los 20.813 establecimientos generaron una producción bruta de \$63.330 millones de pesos de 2011, 2.842 toneladas de desechos sólidos y 69.800 metros cúbicos de aguas residuales. Para esto utilizaron, en promedio, la fuerza de trabajo de 193 personas, \$24.406 millones de pesos de 2011 de maquinaria y equipo, 5.388.687 KWh de energía eléctrica y \$34.906 millones de pesos de 2011 en materias primas, materiales y empaques.

Tabla 5. Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el cálculo de la PTFV

Variable	Observaciones	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
Producción bruta (millones de pesos de 2011)	20.813	63.330	344.000	543,2	9	17.539.553
Residuos sólidos (kilos)	20.813	2.842.446	34.235.074	1.204,4	2	1.051.234.688
Aguas residuales (m ³)	20.813	69.800	672.690	963,7	1	20.251.720
Trabajo (personas)	20.813	193	292	151,3	1	4.552
Capital (millones de pesos de 2011)	20.813	24.406	228.809	937,5	0	14.073.134
Energía eléctrica (KWh)	20.813	5.388.687	35.715.499	662,8	1	1.587.559.808
Consumo de materias primas (millones de pesos de 2011)	20.813	34.906	239.841	687,1	0	12.616.887

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Encuesta Anual Manufacturera y Encuesta Anual Ambiental del DANE.

En la tabla 6 se presentan los resultados del crecimiento promedio de la PTFV para los establecimientos manufactureros del país entre 2011 y 2019, teniendo en cuenta los tres vectores direccionales que se definieron anteriormente.⁶ Durante este periodo, la PTFV de los establecimientos manufactureros disminuyó en promedio -0,1% con la distancia radial y -0,6% con la distancia no radial. Este comportamiento decreciente en la PTF de la industria manufacturera colombiana ya se ha documentado en otros trabajos empíricos, como los de Balat y Casas (2018), Becerra y Lemus (2021) y los cálculos del DANE (2021c).

En la desagregación del índice de productividad por componente, se encuentra que la eficiencia de los establecimientos manufactureros creció, en promedio, entre 0,03% (distancia radial y vector direccional de prosperidad económica y protección ambiental) y 0,6% (distancia no radial). En contraste, el componente tecnológico disminuyó entre -1,2% (distancia no radial) y -0,1% (distancia radial y vector direccional de prosperidad económica

⁶ Este agregado se calcula como un promedio simple.

y protección ambiental). Es importante mencionar que el componente tecnológico impulsó el crecimiento positivo de la PTFV en los años 2015 y 2016. En los resultados también se observa que los crecimientos positivos del componente de eficiencia siempre estuvieron acompañados de reducciones del componente tecnológico, y viceversa. En ningún año del periodo de análisis, los componentes de eficiencia y cambio tecnológico siguieron la misma tendencia.

Tabla 6. PTFV 2012 – 2019

Año	Distancia radial Prosperidad Económica			Distancia radial Protección ambiental		
	IPML	IPMLCE	IPMLCT	IPML	IPMLCE	IPMLCT
2012	0,995	1,043	0,954	0,998	1,035	0,964
2013	0,998	1,037	0,964	0,997	0,980	1,019
2014	0,998	0,985	1,014	0,997	0,990	1,008
2015	1,002	0,977	1,027	1,002	0,980	1,023
2016	1,001	0,986	1,017	1,000	1,022	0,978
2018	0,997	1,019	0,978	0,999	1,032	0,967
2019	0,999	0,982	1,019	0,999	1,006	0,994
Promedio	0,999	1,003	0,997	0,999	1,006	0,994
Año	Distancia radial Prosperidad Económica y protección ambiental			Distancia no radial Prosperidad Económica y protección ambiental		
	IPML	IPMLCE	IPMLCT	IPL	IPLCE	IPLCT
2012	0,997	1,016	0,981	-0,010	0,143	-0,154
2013	0,997	1,000	0,998	-0,011	-0,074	0,064
2014	0,998	0,995	1,003	-0,012	-0,082	0,071
2015	1,002	0,983	1,020	0,003	-0,109	0,113
2016	1,000	1,003	0,998	-0,001	0,139	-0,143
2018	0,998	1,019	0,979	-0,006	0,011	-0,019
2019	0,999	0,989	1,011	-0,005	0,050	-0,054
Promedio	0,999	1,000	0,999	-0,006	0,006	-0,012

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7 se muestran los resultados del crecimiento promedio de la PTFV, el cual se estima con la ecuación (4) y utilizando el vector direccional de prosperidad económica, de los establecimientos manufactureros del país por sectores industriales, regiones, tamaño por número de ocupados y según la realización o no de inversión ambiental. En primer lugar, la PTFV disminuyó en todos los sectores industriales, siendo los más afectados la fabricación de productos y sustancias químicas (-0,28%), textiles, confección, calzado y pieles (-0,23%); fabricación de productos de caucho y plástico (-0,18%) y otras divisiones industriales (-

0,18%). Mientras que la PTFV disminuyó solamente -0,04% en el sector de la metalurgia y fabricación de productos metálicos.

Por componentes del índice de productividad, se encuentra que, en todos los sectores industriales, con excepción de la fabricación de productos de caucho y plástico, hay un crecimiento promedio positivo del componente de eficiencia y una disminución del componente tecnológico. En el caso del sector de fabricación de productos de caucho y plástico, los dos componentes disminuyeron durante el periodo de análisis.

Tabla 7. PTFV, principales desagregaciones

Desagregación	Sin inversión ambiental			Con inversión ambiental			Total		
	IPML	IPMLCE	IPMLCT	IPML	IPMLCE	IPMLCT	IPML	IPMLCE	IPMLCT
Total	0.999	1.002	0.998	0.998	1.006	0.994	0.999	1.003	0.997
Actividad económica									
Alimentos, bebidas y tabaco	1.000	1.005	0.997	0.998	1.006	0.995	0.999	1.006	0.996
Textiles, confección, calzado y pieles	0.997	1.002	0.997	1.000	1.012	0.989	0.998	1.004	0.996
Industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición	0.998	1.003	0.997	1.003	1.012	0.993	0.999	1.005	0.996
Coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear	0.999	1.003	0.998	0.998	1.003	0.996	0.999	1.003	0.997
Fabricación de productos y sustancias químicas	1.000	1.003	0.998	0.985	0.997	0.987	0.997	1.002	0.995
Fabricación de productos de caucho y plástico	0.998	0.999	1.000	0.998	1.003	0.996	0.998	1.000	0.999
Industria de productos minerales no metálicos	1.000	1.005	0.998	0.999	1.003	0.996	0.999	1.004	0.997
Metalurgia y fabricación de productos metálicos	1.000	1.002	0.999	1.000	1.007	0.994	1.000	1.003	0.998
Otras divisiones industriales	0.999	1.000	0.999	0.997	1.006	0.994	0.998	1.001	0.998
Región									
Región Caribe	0.998	1.004	0.997	0.997	1.006	0.992	0.998	1.004	0.995
Región Oriental	1.000	1.002	0.999	0.998	1.004	0.995	0.999	1.003	0.998
Región Central	0.998	1.002	0.998	1.000	1.006	0.995	0.999	1.003	0.997
Región Pacífica	1.001	1.006	0.997	0.999	1.009	0.993	1.000	1.006	0.996
Región Bogotá	0.998	1.001	0.999	0.996	1.004	0.994	0.998	1.002	0.998
Región Amazonia y Orinoquía	0.997	1.001	0.995	1.000	1.013	0.995	0.998	1.005	0.995
Rango de personal ocupado									
De 1 a menos de 50 ocupados	0.999	1.005	0.996	0.996	1.009	0.990	0.999	1.005	0.995
De 50 a menos de 200 ocupados	0.999	1.001	1.000	0.997	1.002	0.996	0.998	1.001	0.999
De 200 ocupados o más	0.999	1.003	0.998	0.999	1.009	0.993	0.999	1.005	0.996

Fuente: Elaboración propia.

Los sectores industriales donde se presentó el mayor crecimiento de eficiencia fueron: alimentos, bebidas y tabaco (0,55%); industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición (0,47%); industria de productos minerales no metálicos (0,43%) y textiles, confección, calzado y pieles (0,36%). En tanto que los sectores industriales donde más disminuyó el componente tecnológico fueron: fabricación de productos y sustancias químicas (-0,46%); textiles, confección, calzado y pieles (-0,44%); alimentos, bebidas y tabaco (-0,39%); e industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición (-0,37%).

En segundo lugar, la PTFV presentó una variación positiva en la región Pacífica, donde creció en promedio 0,05% durante el periodo de análisis. En las demás regiones naturales del

país, la PTFV decreció, especialmente en Bogotá (-0,24%) y en las regiones Caribe (-0,23%) y Amazonia y Orinoquía (-0,21%). Al igual que en la desagregación por sector industrial, todas las regiones presentan variaciones positivas en el componente de eficiencia y negativas en el componente tecnológico. En las regiones Pacífica, Amazonia y Orinoquía, y Caribe se presentaron las variaciones más altas de eficiencia y, simultáneamente, las reducciones más importantes del componente tecnológico.

En tercer lugar, los establecimientos manufactureros medianos (de 50 a menos de 200 personas ocupadas) presentaron la caída más fuerte de PTFV, en promedio, este indicador disminuyó -0,16% durante el periodo de análisis. La PTFV de los establecimientos pequeños (de 1 a menos de 50 personas ocupadas) disminuyó -0,15% y la de los establecimientos grandes (de 200 o más personas ocupadas) decreció en -0,10%. En los tres casos (pequeños, medianos y grandes) se incrementó la eficiencia industrial, pero disminuyó el componente tecnológico.

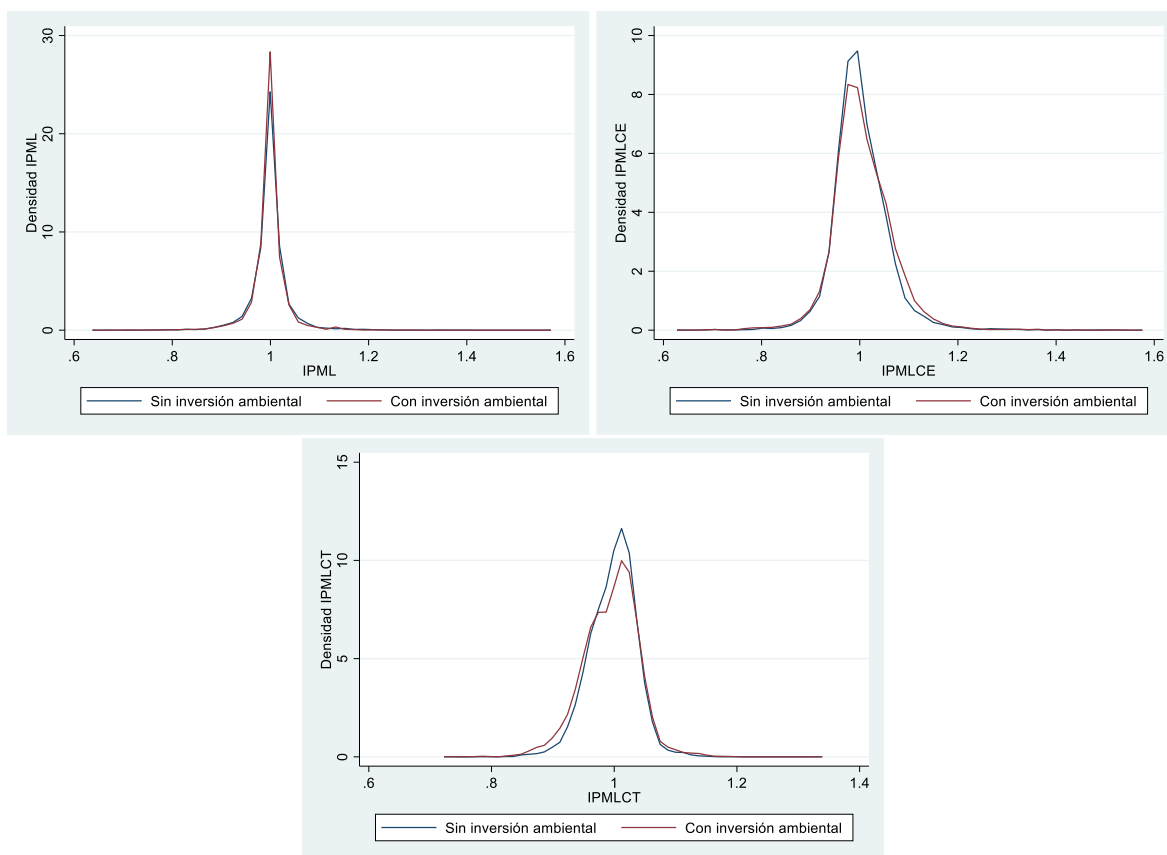
Finalmente, los resultados se analizan teniendo en cuenta la realización o no de inversiones ambientales. En general, la PTFV de los establecimientos manufactureros que llevaron a cabo inversión ambiental (-0,17%) decreció un poco más en comparación con los que no realizaron este tipo de inversión (-0,13%). Sin embargo, el componente de eficiencia creció dos veces más en los establecimientos manufactureros con inversión ambiental (0,58% en comparación con 0,24%). Con estos resultados se puede observar que la inversión ambiental de la industria manufacturera colombiana tiene beneficios sobre la eficiencia de los procesos productivos, pero no promueve el cambio tecnológico. Esto puede estar ocurriendo porque la inversión ambiental se encuentra en una etapa temprana, donde las firmas adquieren activos ambientales para cumplir con la normativa colombiana y disminuir los costos de producción a través del uso eficiente de los recursos naturales, hídricos y energéticos. Asimismo, esta etapa se caracteriza por tener altos costos hundidos asociados con la adopción e implementación de activos ambientales en los procesos productivos. En este aspecto es importante el papel del gobierno para fortalecer las capacidades de las empresas, proveer financiamiento, apoyar la difusión tecnológica e incentivar la investigación y desarrollo de tecnologías verdes (Rovira, Patiño y Schaper, 2017).

Este comportamiento es similar en todos los sectores industriales, regiones naturales y tamaños empresariales, con excepción de algunos casos. En los sectores de textiles, confección, calzado y pieles, industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición, y fabricación de productos de caucho y plástico; en las regiones Central y Amazonia y Orinoquía; y en los establecimientos de 200 o más personas ocupadas, la PTFV de los establecimientos manufactureros con inversión ambiental disminuyó menos o incluso presentó variaciones positivas entre 2011 y 2019. En los sectores de coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear, fabricación de productos y sustancias químicas, e industria de productos minerales no metálicos, el componente de eficiencia creció más en los establecimientos que no realizaron inversión ambiental.

La comparación de la PTFV entre establecimientos con y sin inversión ambiental también se presenta de forma gráfica en la figura 8, donde se muestran las distribuciones de la PTFV y sus dos componentes. Las distribuciones, tanto de los establecimientos con inversión ambiental como la de aquellos sin inversión ambiental, se concentran en el valor uno, lo cual indica que la productividad de los establecimientos manufactureros del país fue bastante estable en el tiempo y no presentó cambios significativos.

La distribución de la PTFV de los establecimientos sin inversión ambiental tiene una concentración más baja en la media y colas más pesadas, no obstante, no se visualiza una diferencia importante en comparación con la distribución de la PTFV de los establecimientos con inversión ambiental. Por otro lado, la distribución del componente de eficiencia de los establecimientos con inversión ambiental se concentra menos en la media y tiene la cola derecha más pesada, indicando que una proporción más alta de establecimientos con inversión ambiental presentaron crecimientos positivos en este componente. La distribución del componente tecnológico de los establecimientos con inversión ambiental también se concentra menos en la media, pero en este caso la cola izquierda es más pesada. Esto último indica que una proporción más alta de establecimientos con inversión ambiental presentaron variaciones negativas en el componente tecnológico.

Figura 2. Distribución de la PTFV y sus componentes según inversión ambiental de los establecimientos



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8, se encuentran dos análisis adicionales. El primero es el coeficiente de variación como medida de dispersión y el segundo es la prueba de Kolmogorov–Smirnov para probar si las distribuciones de los índices de productividad de los establecimientos con inversión ambiental son estadísticamente diferentes de las distribuciones de los establecimientos sin inversión ambiental. Por un lado, los coeficientes de variación son inferiores a 8%, lo cual refleja una baja dispersión de la PTFV y sus componentes. Los coeficientes más altos se encuentran en el componente de eficiencia tanto de los establecimientos con inversión ambiental como de aquellos que no realizan este tipo de inversión.

Tabla 8. PTFV, dispersión y diferencias en las distribuciones

Desagregación	Dispersión - Coeficiente de Variación						P-valor prueba de Kolmogorov-Smirnov		
	Sin inversión ambiental			Con inversión ambiental			Sin y con inversión ambiental		
	IPML	IPMLCE	IPMLCT	IPML	IPMLCE	IPMLCT	IPML	IPMLCE	IPMLCT
Total	4,04	5,71	3,85	3,57	6,14	4,53	0,00***	0,00***	0,00***
Actividad económica									
Alimentos, bebidas y tabaco	3,68	5,93	4,48	3,21	6,44	5,15	0,02**	0,08*	0,05*
Textiles, confección, calzado y pieles	3,75	5,42	3,73	3,85	6,97	5,47	0,36	0,01***	0,00***
Industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición	3,88	5,64	3,97	3,85	6,78	4,91	0,15	0,03**	0,07*
Coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear	3,66	5,63	3,72	3,25	4,98	3,72	0,15	0,58	0,30
Fabricación de productos y sustancias químicas	5,09	5,99	4,38	5,78	6,92	5,37	0,03**	0,51	0,08*
Fabricación de productos de caucho y plástico	3,77	5,07	3,02	2,61	4,10	3,18	0,23	0,17	0,33
Industria de productos minerales no metálicos	5,64	7,69	4,48	4,47	7,34	4,53	0,56	0,88	0,30
Metalurgia y fabricación de productos metálicos	4,40	5,81	3,78	2,90	4,80	3,85	0,51	0,09*	0,28
Otras divisiones industriales	4,09	5,30	3,45	3,94	6,19	3,88	0,12	0,01***	0,00*
Región									
Región Caribe	3,81	6,09	4,06	3,79	6,65	4,79	0,12	0,09*	0,05*
Región Oriental	4,27	5,89	3,93	3,64	5,67	4,38	0,02**	0,02**	0,02**
Región Central	3,86	5,61	3,96	3,52	6,09	4,58	0,46	0,00**	0,01***
Región Pacífica	3,85	5,67	3,85	3,08	6,36	5,12	0,00**	0,08*	0,00***
Región Bogotá	4,25	5,57	3,63	3,71	6,19	4,12	0,05*	0,02**	0,00***
Región Amazonia y Orinoquía	4,43	6,15	4,02	4,18	5,77	3,33	0,96	0,66	0,90
Rango de personal ocupado									
De 1 a menos de 50 ocupados	4,95	6,20	3,83	5,21	7,53	4,18	0,36	0,27	0,09*
De 50 a menos de 200 ocupados	3,79	5,44	3,58	3,79	5,82	3,92	0,02**	0,04**	0,00***
De 200 ocupados o más	3,16	5,55	4,33	2,91	6,05	5,05	0,40	0,00***	0,00***

Fuente: Elaboración propia. *** p < 0.01, ** p < 0.05, * p < 0.1.

Por otro lado, la hipótesis nula de la prueba de Kolmogorov–Smirnov (distribuciones estadísticamente iguales) se rechaza de manera significativa cuando se comparan las distribuciones de la PTFV y sus dos componentes, utilizando el total de establecimientos manufactureros. Los resultados no son tan claros cuando se desagregan por sector industrial, región y tamaño del establecimiento, pues en algunos casos no es posible rechazar la hipótesis nula de la prueba, por lo cual no se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de los establecimientos con y sin inversión ambiental. Esta prueba puede estar afectada por otros factores que no se capturan en la inversión ambiental manufacturera, por lo cual es necesario tener en cuenta los otros determinantes de la productividad.

6.2. Determinantes de la PTFV

En la tabla 9 se presentan las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en la estimación de los determinantes del crecimiento de la PTFV de los establecimientos manufactureros del país, con excepción de la PTFV y la inversión ambiental, las cuales se explicaron en las secciones anteriores. En primer lugar, el 15,5% del capital social de los establecimientos manufactureros del país fue de origen extranjero durante el periodo de análisis. Los mayores porcentajes de capital social extranjero se presentaron en las

actividades de coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear, y fabricación de productos y sustancias químicas; en las regiones Caribe y Oriental; y en los establecimientos de 200 o más personas ocupadas. En contraste, los porcentajes más bajos se encontraron en el sector de textiles, confección, calzado y pieles; en la región Amazonia y Orinoquía; y en los establecimientos que ocuparon entre 1 a menos de 50 personas.

En segundo lugar, el 17,1% del total del personal ocupado en estas unidades económicas alcanzó un nivel educativo técnico o profesional. Los mayores niveles de educación se detectaron en las actividades de coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear, y fabricación de productos y sustancias químicas; en las regiones Caribe y Pacífica; y en los establecimientos más grandes del país. Por el contrario, los menores niveles de capacitación se presentaron en el sector de textiles, confección, calzado y pieles; en la región central; y en los establecimientos que ocuparon entre 1 a menos de 50 personas.

En tercer lugar, el 9,5% de las ventas totales de los establecimientos manufactureros del país se realizó en el extranjero. Siendo los sectores de coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear, y textiles, confección, calzado y pieles, los que presentaron los porcentajes más altos en este indicador, al igual que en las regiones Caribe y Central, y en los establecimientos que ocuparon a 200 o más personas. Por otra parte, en los sectores de alimentos, bebidas y tabaco, y fabricación de productos de caucho y plástico, la región Oriental y los establecimientos más pequeños se presentaron los porcentajes más bajos.

En cuarto lugar, el 9,4% de las compras por concepto de materias primas, materiales y empaques se llevaron a cabo en el extranjero. Los sectores de coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear, y fabricación de productos de caucho y plástico, las regiones Caribe y Pacífica, y los establecimientos más grandes por número de personas ocupadas fueron los que más materias primas extranjeras consumieron durante el periodo de análisis. En contraste, el sector de fabricación de productos y sustancias químicas, la región Amazonía y Orinoquía y los establecimientos de menor tamaño consumieron una proporción más alta de materias primas de origen nacional.

En quinto lugar, se observa un cierto grado de concentración de mercado en la industria manufacturera colombiana. El mayor nivel de concentración se presentó en la fabricación de productos y sustancias químicas, donde más del 50% del valor agregado se llevó a cabo en

un solo establecimiento. Mientras que, en el sector de alimentos, bebidas y tabaco se observó el nivel más bajo de concentración. Por rango de personal ocupado, la concentración más alta se evidenció en los establecimientos más pequeños y no se observaron diferencias importantes cuando se realizó la desagregación por región.

Tabla 9. Estadísticas descriptivas de las variables modelo de determinantes de la PTFV

Variable (Porcentaje)	Observaciones	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
Porcentaje de capital social extranjero	21.541	15,5	33,9	218,7	0,0	100,0
Porcentaje de profesionales y técnicos en el empleo total	21.339	17,1	19,7	115,2	0,0	100,0
Porcentaje de las ventas al exterior (exportaciones)	21.448	9,5	20,2	212,5	0,0	100,0
Porcentaje de las compras del exterior (importaciones)	21.164	9,4	22,4	237,0	0,0	100,0
Índice de Herfindahl (porcentaje)	21.544	297,8	562,1	188,8	110,4	4.934,7
Uso del servicio de internet	21.544	99,2	9,2	9,3	0,0	100,0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Encuesta Anual Manufacturera y Encuesta Anual Ambiental del DANE.

Finalmente, el 99,2% de los establecimientos manufactureros del país realizó algún pago por concepto de servicios de comunicaciones para el desarrollo de sus actividades. En general, este porcentaje fue superior al 90% en todas las desagregaciones por sector, región y número de personas ocupadas. Sin embargo, se destacan los bajos porcentajes del sector de fabricación de productos y sustancias químicas (95,2%) y de la región Amazonía y Orinoquía (92,4%).

En la tabla 10, se muestran los resultados de la estimación de la ecuación (10). En todos los modelos se incluyen efectos fijos por actividad económica, región y tamaño, y se calculan errores estándar robustos. Asimismo, en las cuatro especificaciones se cumplen los criterios para asegurar la validez de los resultados: hay autocorrelación de primer orden, no hay evidencia estadística de autocorrelación de segundo orden y tampoco para rechazar la hipótesis nula de la prueba de Sargan-Hansen, la cual establece que las restricciones de sobre identificación son válidas. Por otro lado, los signos de los parámetros estimados son los esperados, exceptuando los del capital social extranjero que no son significativos.

Tabla 10. Determinantes PTFV

	1	2	3	4
Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
$IPML_i^{t-1}$	0,898*** (0,121)	0,642*** (0,058)	0,679*** (0,060)	0,660*** (0,051)
$LINVAM_i^{t-1}$	0,0007** (0,0003)	0,0004* (0,0002)	0,0005* (0,0003)	0,0004* (0,0002)
CSE_i^t		-0,006 (0,005)	-0,007 (0,005)	-0,007 (0,004)
PYT_i^t		0,013 (0,008)	0,010 (0,010)	0,0121* (0,007)
EXP_i^t		0,0002** (0,0001)		0,0002** (0,0001)
IMP_i^t			0,00009 (0,0001)	0,00005 (0,0001)
$Herfindahl_i^t$		0,000004 (0,000005)	0,000001 (0,000005)	0,000003 (0,000005)
TIC_i^t		0,254*** (0,043)	0,254*** (0,049)	0,256*** (0,045)
Observaciones	10.563	10.482	10.514	10.482
Establecimientos	3.304	3.282	3.290	3.282
Ho: No autocorrelación de orden 1	0,00***	0,00***	0,00***	0,00***
Ho: No autocorrelación de orden 2	0,69	0,82	0,86	0,84
Prueba de Sargan - Hansen.	0,24	0,75	0,88	0,83

Fuente: Elaboración propia. Errores estándar en paréntesis, *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$.

En general, se debe mencionar que al incluir variables rezagadas se pierden algunas observaciones y este problema se agudiza al no contar con la información del año 2017. Además, se encuentra que los coeficientes de las variables de capital social extranjero, el porcentaje de las importaciones de materias primas, materiales y empaques, y el índice de Herfindahl no son significativos en ninguno de los modelos. En el caso del capital social extranjero y el índice de Herfindahl, la pérdida de significancia puede ocurrir porque las variables se construyen a nivel de empresa y sector económico, respectivamente. Por otro lado, los beneficios de importar pueden estar afectados por las altas tasas arancelarias a las cuales se enfrentan los empresarios del país (Echavarría, Giraldo y Jaramillo, 2019).

En los 4 modelos se encuentra que la inversión ambiental se relaciona positiva y significativamente con el crecimiento de la PTFV de los establecimientos manufactureros

del país en el corto plazo. Sin embargo, la magnitud de la relación es baja, lo cual puede estar asociado con los bajos niveles de inversión ambiental, la cual representó solo el 12% de la inversión total entre 2011 y 2019. O también porque las inversiones se encuentran en una fase temprana, donde los establecimientos manufactureros se enfrentan a altos costos de adquisición, adecuación y mantenimiento de los activos ambientales. Esto ha ocurrido, por ejemplo, con los paneles solares, los cuales eran bastante costosos hace algunos años, pero ahora son más asequibles por el desarrollo de nuevas tecnologías y la utilización de nuevos insumos (Torres et al., 2018).

Los otros indicadores que se relacionan de forma positiva y significativa con la PTFV, en el corto plazo, son el porcentaje de técnicos y profesionales con los que cuenta el establecimiento, el porcentaje de las ventas que se realizan en el exterior, y el pago por servicios de comunicaciones. Esto es consistente con lo que se encontró en la revisión de literatura, los técnicos y profesionales tiene mayores capacidades para adaptar nuevas tecnologías y procesos. Asimismo, las relaciones con los mercados internacionales permiten aumentar el número de consumidores, y propiciar la transferencia de conocimiento y procesos innovadores. Finalmente, son evidentes los beneficios que tienen los servicios de comunicaciones en los procesos de producción de la industria manufacturera.

Otra ventaja de estimar un modelo de datos panel dinámico es que se pueden obtener los efectos tanto de corto como de largo plazo de las variables independientes. En la tabla 13, se muestran los coeficientes de largo plazo de aquellas variables que se relacionaron de manera significativa con la PTFV en el corto plazo. Los coeficientes se calculan de la siguiente manera:

$$\beta_{LP} = \frac{\beta_{CP}}{1 - \lambda} \quad (12)$$

Donde β_{LP} es el coeficiente de largo plazo, β_{CP} es el coeficiente de corto plazo (resultados de la tabla 12), y λ es el parámetro estimado del rezago de la variable dependiente ($IPML_i^{t-1}$). Es importante mencionar que la magnitud de todos los coeficientes es más alta debido a la forma en que se calculan. No obstante, en los modelos 1 y 2, se pierde la significancia del coeficiente de la inversión ambiental mientras que la significancia de las demás variables se mantiene. Estos resultados son consistentes con otros trabajos que plantean que la relación

entre la inversión ambiental y el desempeño económico de las firmas es más fuerte en el largo plazo, debido a los costos hundidos asociados con este tipo de inversiones (Porter y van der Linde, 1995; Hart y Ahuja, 1996; Nakamura, 2011; Soltmann, Stucki y Wörter, 2015; Horbach y Rammer, 2020; Wang et al., 2022).

El marco regulatorio ambiental también es un factor que incide sobre la PTFV de las firmas, sin embargo, no es claro el signo o sentido de la relación. En la literatura económica se pueden encontrar tres puntos de vista diferentes: (i) Las regulaciones ambientales aumentan los costos ambientales de las firmas y por tanto afectan negativamente su desempeño económico y PTFV (Wang et al., 2022);⁷ (ii) Las regulaciones ambientales promueven la innovación y PTFV porque los mayores costos ambientales se compensan con las ganancias que se obtienen en eficiencia y progreso tecnológico (Wang y Liu, 2015; Wang et al., 2022); y (iii) en el tercer punto de vista, los dos efectos anteriores coexisten, por lo cual la relación entre regulaciones ambientales y desempeño económico o PTFV de las firmas depende del efecto dominante (Wang et al., 2022). Wang et al., 2022 explican que el efecto (i) domina en el corto plazo y el (ii) en el largo plazo.

Considerando lo anterior, es importante que el gobierno nacional siga incentivando la realización de inversiones ambientales no solo por los efectos positivos que estas tienen sobre el medio ambiente, sino también por su relación positiva con el desempeño económico de las firmas. Lo interesante del caso de la industria manufacturera colombiana, es que la inversión ambiental y la PTFV se relacionan positiva y significativamente, tanto en el corto como en el largo plazo. Este resultado es clave si se tiene en cuenta que la PTF de la industria manufacturera colombiana ha estado disminuyendo durante las últimas décadas de acuerdo con los trabajos de Balat y Casas (2018), Becerra y Lemus (2021) y DANE (2021c).

Sin embargo, es necesario considerar tres aspectos. En primer lugar, los coeficientes de largo plazo de la inversión ambiental pierden significancia cuando no se incluyen regresores adicionales (modelo 1) y cuando no se incluye la variable asociada con la importación de materias primas. En consecuencia, el marco regulatorio e inversión ambiental deben fomentarse junto con el desarrollo y fortalecimiento de la vocación exportadora de las firmas, capacitación del personal ocupado y uso intensivo de las tecnologías de la información y de

⁷ Costos en los cuales deben incurrir las firmas para cumplir con la reglamentación ambiental.

las comunicaciones, para lograr un crecimiento significativo de la PTFV en el largo plazo. Como se mencionó anteriormente, la política ambiental debe estar acompañada por el fortalecimiento de las capacidades de las empresas, financiamiento, difusión tecnológica y estímulo de la investigación y desarrollo de tecnologías verdes (Rovira, Patiño y Schaper, 2017).

En segundo lugar, las políticas ambientales deben tener un enfoque diferencial según sector industrial, región geográfica y tamaño de la empresa, teniendo en cuenta que se presentan diferencias importantes en la distribución de la PTFV. Considerando además que los resultados de este documento se calcularon sobre los establecimientos manufactureros medianos y grandes del país, y se desconoce si estas relaciones se puedan mantener en la micro y pequeña empresa.

Finalmente, el gobierno nacional debe trabajar en el fortalecimiento de la institucionalidad ambiental para mejorar la implementación del marco regulatorio ambiental. Como se menciona en el informe *Estado de Derecho Ambiental: Primer informe global* del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), las políticas ambientales se han multiplicado por 38 desde 1972 en todo el mundo, sin embargo, los problemas ambientales continúan porque los gobiernos aún no tienen la capacidad de aplicar y dar cumplimiento pleno a la normativa ambiental.

Tabla 11. Coeficientes de largo plazo

	1	2	3	4
Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
$LINVAM_i^{t-1}$	0,006 (0,01)	0,001 (0,001)	0,002* (0,001)	0,001* (0,0007)
PYT_i^t				0,035* (0,02)
EXP_i^t		0,00068** (0,0003)		0,0006** (0,0002)
TIC_i^t		0,710*** (0,11)	0,791*** (0,16)	0,753*** (0,10)

Fuente: Elaboración propia. Los errores estándar de largo plazo se calculan con el método delta.

7. Conclusiones

En los planes de desarrollo de los últimos gobiernos se han establecido estrategias y metas de sostenibilidad ambiental, las cuales buscaron dinamizar el crecimiento económico del país, pero reduciendo el impacto ambiental de los procesos productivos. Asimismo, se encontró que el sector manufacturero es importante en la estructura económica de Colombia, por su contribución en la producción, el empleo, las exportaciones, pero sobre todo por su impacto ambiental. Este sector consume una parte importante de los recursos naturales y energéticos del país.

Considerando la importancia del sector manufacturero, los esfuerzos del gobierno nacional y la revisión de literatura económica, en este trabajo se inició con la pregunta ¿Cuál es la relación que tiene la inversión en prevención y protección ambiental sobre la productividad total de los factores en los establecimientos de la industria manufacturera en Colombia? Los análisis que se llevan a lo largo del documento permiten concluir que la inversión ambiental aceleró de forma significativa el crecimiento de la PTFV de los establecimientos manufactureros del país, tanto en el corto como en el largo plazo.

No obstante, la magnitud de la relación es baja, lo cual puede estar asociado con los bajos niveles de inversión ambiental, la cual representó solo el 12% de la inversión total entre 2011 y 2019. O también porque las inversiones se encuentran en una fase temprana, donde los establecimientos manufactureros se enfrentan a altos costos de adquisición, adecuación y mantenimiento de los activos ambientales. Esto ha ocurrido, por ejemplo, con los paneles solares, los cuales eran bastante costosos hace algunos años, pero ahora son más asequibles por el desarrollo de nuevas tecnologías y la utilización de nuevos insumos (Torres et al., 2018).

En el documento también se encuentra que la capacitación del personal ocupado, las ventas al extranjero y el uso de servicios de comunicación también tienen un efecto positivo y significativo sobre la PTFV en el corto y largo plazo, como ya se ha encontrado en otros documentos de investigación. Mientras que no hay evidencia estadísticamente significativa para establecer una relación entre la PTFV y el capital social extranjero, la importación de materias primas, materiales y empaques, y la concentración del mercado.

La línea de investigación de este trabajo se puede ampliar al analizar la relación entre inversión ambiental y PTFV en otros sectores económicos, especialmente, en los de suministro de energía y construcción, los cuales también consumen una parte importante de los recursos naturales y energéticos del país. Asimismo, por el tipo de información que se utilizó no hay una representación adecuada de los micro y pequeños establecimientos, los cuales contribuyen muy poco en la producción del sector, pero representan una buena parte del empleo.

8. Bibliografía

- Acemoglu, D. (2009). *Introduction to Modern Economic Growth*. Princeton: Princeton University Press.
- Ahn, S. (2002). Competition, innovation and productivity growth: a review of theory and evidence. OECD Economics Department Working Papers, No. 317, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/182144868160>
- Aldieri, L. y Vinci, C.P. (2018). Innovation effects on employment in high-tech and low-tech industries: Evidence from large international firms within the triad. *Eurasian Business Review*, 8, 229–243. <https://doi.org/10.1007/s40821-017-0081-9>
- Arellano, M. y Bond, S. (1991). Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *Review of Economic Studies* 58: 277–297. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Arellano, M. y Bond, S. (1998). *Dynamic panel data estimation using DPD98 for Gauss: A guide for users*. Mimeo
- Arnold, J.M. y Javorcik, B.S. (2005). Gifted kids or pushy parents? Foreign acquisitions and plant performance in Indonesia. World Bank Policy Research Working Paper 3597. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-3597>
- Arroyo, F. (2018). La economía circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo. *INNOVA Research Journal*: Vol. 3, No.12 pp. 78-98. DOI: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n12.2018.786>
- Asociación Nacional de Industriales - ANDI (2022). Encuesta de opinión industrial conjunta, varios años. <https://www.andi.com.co/Home/>
- Aza Custodio, C. (2017). Análisis de productividad y medición de la PTF por rama de actividad de la economía española (1995-2017). Relación con las TIC y otros determinantes. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales: Tesis doctoral. <http://hdl.handle.net/10486/677771>

- Balat, J. y Casas, C. (2018). Firm Productivity and Cities: The Case of Colombia. Banco de la República: Serie Borradores de Economía no 1032. <https://doi.org/10.32468/be.1032>
- Becerra, D.L. y Lemos, M.X. (2021). La productividad del sector manufacturero: caso Colombia 2005-2016. Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF, [S.l.], v.16, n.4, p. e527. ISSN 2448-6795. <https://doi.org/10.21919/remef.v16i4.527>
- Brécard, D., Boubaker, H., Sterenn, L., Perraudau, Y. y Salladarré, F. (2009). Determinants of demand for green products: An application to eco-label demand for fish in Europe. Ecological Economics, 69(1), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.017>
- Brennan, G., Tennant, M. y Blomsma, F. (2015). Business and production solutions: Closing the Loop in Kopnina, H. and Shoreman-Ouimet, E. (Eds). Sustainability: Key Issues. EarthScan, Routledge, 219-239. <https://doi.org/10.4324/9780203109496>
- Centro de Ciencia y Tecnología De Antioquia – CTA (2017). Informe de avance Misión Crecimiento Verde. Medellín: Misión de Crecimiento Verde. https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Agua/INFORME_DIAGNOSTICO_28_sep_2017.pdf
- Chen, C., Lan, Q., Gao, M., y Sun, Y. (2018). Green total factor productivity growth and its determinants in China's industrial economy. Sustainability, 10(4), 1052. <https://doi.org/10.3390/su10041052>
- Chung, Y.H., Färe, R., y Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. J. Environ. Manag, 51, 229–240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
- Comisión Europea. (2015). Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. Bruselas: Comisión Europea. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF
- Conti, M. y Sulis, G. (2016). Human capital, employment protection and growth in Europe. Journal of Comparative Economics, 44(2), 213-230. <https://doi.org/10.1016/j.jce.2015.01.007>

Demsetz, H. (1973). Industry structure, market rivalry and public policy. J Law Econ 16:1–9.
<https://www.jstor.org/stable/724822>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020). Manual de Diligenciamiento y Conceptos Encuesta Ambiental Industrial – EAI. DANE

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020a). Encuesta Anual Manufacturera – EAM, resultados 2019. DANE.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam/eam-historicos>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020b). Gran Encuesta Integrada de Hogares – GEIH, resultados 2019. DANE.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-y-desempleo/mercado-laboral-historicos>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2021a). Cuenta Satélite Ambiental – CSA, resultados 2019. DANE.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-satelite/cuenta-satelite-ambiental-csa>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2021b). Encuesta Ambiental Industrial – EAI, resultados 2019. DANE.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/encuesta-ambiental-industrial-eai/encuesta-ambiental-industrial-eai-historicos>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2021c). Productividad Total de los Factores (PTF), resultados 2020. DANE.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/productividad>

Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2011). Plan Nacional de Desarrollo 2010 – 2014: Prosperidad para Todos. DNP.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/pnd/resumen%20ejecutivo%20ultima%20version.pdf>

- Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2015). Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018: Todos por un Nuevo País. DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/pnd/pnd%202014-2018%20tomo%201%20internet.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2018). CONPES 3934, Política de Crecimiento Verde. DNP. <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Pol%C3%ADtica%20CONPES%203934/Resumen%20Pol%C3%ADtica%20de%20Crecimiento%20Verde%20-%20diagramaci%C3%B3n%20FINAL.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022: Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad. DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Resumen-PND2018-2022-final.pdf>
- Di Cintio, M., Grassi, E. y Petti, C. (2022). Import, Export and Trade Intermediaries: What Matters the Most?. *International Business Research*, 15(4), 1-18. <https://doi.org/10.5539/ibr.v15n4p18>
- Echavarría, J. y Villamizar, M. (2006). El proceso colombiano de desindustrialización. Banco de la República: Serie Borradores de Economía no 361. <https://doi.org/10.32468/be.361>
- Echavarría, J.J., Arbeláez, M.A., y Rosales, M.F. (2006). La productividad y sus determinantes: el caso de la industria colombiana. *Revista Desarrollo y sociedad*, (57), 77-122. <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.13043/dys.57.3>
- Echavarría, J.J., Giraldo, I. y Jaramillo, F. (2019). Protección y productividad en la industria colombiana, 1993-2011. Borradores de Economía; No. 1082. <https://doi.org/10.32468/be.1082>
- Färe, R., Grosskopf, S. y Pasurka C.A. (1986). Effects on relative efficiency in electric power generation due to environmental controls. *Resour Energy*; 8(2):167–84. [https://doi.org/10.1016/0165-0572\(86\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0165-0572(86)90016-2)
- Färe, R., Grosskopf, S. y Pasurka Jr, C.A. (2007). Environmental production functions and environmental directional distance functions. *Energy*, 32(7), 1055-1066. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.005>

- Färe, R., Grosskopf, S. y Weber, W.L. (2006). Shadow prices and pollution costs in US agriculture. *Ecological economics*, 56(1), 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.022>
- Färe, R., Grosskopf, S., Knox, C.A. y Yaisawarng, S. (1993). Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach. *The Review of Economics and Statistics*, 374–380. <https://doi.org/10.2307/2109448>
- Färe, R., Grosskopf, S., Noh, D.W. y Weber, W. (2005). Characteristics of a polluting technology: theory and practice. *Journal of Econometrics*, 126(2), 469-492. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2004.05.010>
- Genthner, R. y Kis-Katos, K. (2019). Foreign investment regulation and firm productivity: Granular evidence from Indonesia. CEGE Discussion Paper No. 345, University of Göttingen, Göttingen. <https://doi.org/10.1016/j.jce.2022.02.003>
- Ghisetti, C. (2018). On the economic returns of eco-innovation: Where do we stand? In Horbach y Reif (Eds.), *New developments in eco-innovation research* (pp. 55–79). Cham, Switzerland: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-93019-0_3
- Hallward-Driemeier, M., Iarossi, G. y Sokoloff, K.L. (2002). Exports and manufacturing productivity in East Asia: A comparative analysis with firm-level data. NBER Working Paper No. 8894. <https://doi.org/10.3386/w8894>
- Hanson, G. (2001). Should Countries Promote Foreign Direct Investment?. G-24 Discussion Paper, v.9. <https://core.ac.uk/download/pdf/7043195.pdf>
- Hart, S.L. y Ahuja, G. (1996). Does it pay to be green? An empirical examination of the relationship between emission reduction and firm performance. *Business strategy and the Environment*, 5(1), 30-37. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0836\(199603\)5:1<30::AID-BSE38>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0836(199603)5:1<30::AID-BSE38>3.0.CO;2-Q)
- Horbach, J. y Rammer, C. (2018). Energy transition in Germany and regional spill-overs: The diffusion of renewable energy in firms. *Energy Policy*, 121, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.042>

- Horbach, J. y Rammer, C. (2020). Circular economy innovations, growth and employment at the firmlevel. *Journal of Industrial Ecology*; 24:615–625. <https://doi.org/10.1111/jiec.12977>
- Horbach, J. y Rennings, K. (2013). Environmental innovation and employment dynamics in different technology fields—An analysis based on the German Community Innovation Survey 2009. *Journal of Cleaner Production*, 57, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.034>
- Lall, S. (2000). The Technological structure and performance of developing country manufactured exports, 1985-98. *Oxford development studies*, 28(3), 337-369. <https://doi.org/10.1080/713688318>
- Lieder, M. y Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of cleaner production*, 115, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Michelini, G., Moraes, R. N., Cunha, R. N., Costa, J. M., y Ometto, A. R. (2017). From linear to circular economy: PSS conducting the transition. *Procedia Cirp*, 64, 2-6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.012>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS (2022). Se reduce y se contiene la deforestación en Colombia durante los últimos cuatro años. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/se-reduce-y-se-contiene-la-deforestacion-en-colombia-durante-los-ultimos-cuatro-anos/#:~:text=julio%2015%2C%202022-,Se%20reduce%20y%20se%20contiene%20la%20deforestaci%C3%B3n,durante%20los%20%C3%BAltimos%20cuatro%20a%C3%B1os&text=En%20el%202021%20se%20deforestaron,comparaci%C3%B3n%20con%20el%20a%C3%B1o%202020.>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS y ONF Andina – ONFA (2015). Uso y legalidad de la madera en Colombia. Análisis parcial. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; ONF Andina. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Uso-y-Legalidad-de-la-Madera.pdf>

- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (2022). Informes de industria, varios años. <https://www.mincit.gov.co/estudios-economicos/estadisticas-e-informes/informes-de-industria>
- Nakamura, E. (2011). Does environmental investment really contribute to firm performance? An empirical analysis using Japanese firms. *Eurasian Business Review*, 1(2), 91-111. <https://doi.org/10.14208/BF03353800>
- Nickell, S., Nicolitsas, D. y Dryden, D. (1997). What makes firms perform well? *Eur Econ Rev* 41:783–796. [https://doi.org/10.1016/S0014-2921\(97\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0014-2921(97)00037-8)
- OECD, EUROSTAT. (2006). Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación. Grupo Tragsa. <https://doi.org/10.1787/9789264065659-es>
- ONF Andina - ONFA (2018). Diagnóstico sintético del sector forestal en Colombia: Principales características, barreras y oportunidades para su desarrollo. Bogotá, Colombia: ONFA. <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/forestal/Productos%20finales/Informe%201.%20Diagn%C3%B3stico%20de%20la%20situaci%C3%B3n%20actual%20y%20las%20barreras%20y%20oportunidades%20%E2%80%93%20Versi%C3%B3n%20final.pdf>
- Padilla-Rivera, A., Russo-Garrido, S., y Merveille, N. (2020). Addressing the social aspects of a circular economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 12(19), 7912. <https://doi.org/10.3390/su12197912>
- Peltzman, S. (1977). The gains and losses from industrial concentration. *J Law Econ* 20:229–263. <https://www.jstor.org/stable/725192>
- Porter, M. E., y van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. <https://www.jstor.org/stable/2138392>
- Roodman, D. (2009). How to do xtabond2: An introduction to difference and system GMM in Stata. *The stata journal*, 9(1), 86-136. <https://doi.org/10.1177/1536867X0900900106>
- Rovira, S., Patiño, J. A., y Schaper, M. (2017). Ecoinnovación y producción verde: una revisión sobre las políticas de América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Comisión

- Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
<https://hdl.handle.net/11362/40968>
- Rusiawan, W., Tjiptoherijanto, P., Suganda, E. y Darmajanti, L. (2015). Assessment of Green Total Factor Productivity Impact on Sustainable Indonesia Productivity Growth. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 493–501. <https://doi.org.ez.urosario.edu.co/10.1016/j.proenv.2015.07.059>
- Sari, D.W., Khalifah, N.A. y Suyanto, S. (2016). The spillover effects of foreign direct investment on the firms' productivity performances. *Journal of Productivity Analysis*, 46(2), 199-233. <https://doi.org/10.1007/s11123-016-0484-0>
- Sidak, J.G. y Teece, D.J. (2009). Dynamic competition in antitrust law. *J Comp Law Econ* 5:581–631. <https://doi.org/10.1093/joclec/nhp024>
- Soltmann, C., Stucki, T. y Wörter, M. (2015). The impact of environmentally friendly innovations on value added. *Environmental and Resource Economics*, 62(3), 457-479. <https://doi.org/10.1007/s10640-014-9824-6>
- Song, M. y Li, H. (2020). Total factor productivity and the factors of green industry in Shanxi Province, China. *Growth and Change*, 51(1), 488-504. <https://doi.org/10.1111/grow.12339>
- Sotelo, L. y Vallejo, L.E. (2021). La generación de empleo en el sector industrial en Colombia, 2010-2018. *Revista Finanzas y Política Económica*, 13(1), 115-142. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.v13.n1.2021.6>
- Tanaka, M. (2021). The role of human capital on the performance of manufacturing firms in Bangladesh. *Managerial and Decision Economics*, 42(1), 21-33. <https://doi.org/10.1002/mde.3210>
- Teece, D.J. (2011). Favoring dynamic over static competition. In: Manne GA and Wright, JD (eds.), *Competition policy and patent law under uncertainty: Regulating innovation*. Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974984.007>

- Torres, S., Jurado, F., Granados, D. y Lozano, A. (2018). Eficiencia en paneles solares. *Revista del diseño innovativo*, 2(2), 9-21. https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2_2.pdf
- Tsamadias, C., Mamatzakis, E., Pegkas, P. y Staikouras, C. (2019) Does R&D, human capital and FDI matter for TFP in OECD countries? *Economics of Innovation and New Technology* 28 (4), pp. 386-406. ISSN 1043-8599. <https://doi.org/10.1080/10438599.2018.1502394>
- UNEP (2019). *Environmental Rule of Law: First Global Report*. United Nations Environment Programme, Nairobi. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27279/Environmental_rule_of_law.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Van Roy, V., Vértesy, D. y Vivarelli, M. (2018). Technology and employment: Mass unemployment or job creation? Empirical evidence from European patenting firms. *Research Policy*, 47, 1762–1776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2018.06.008>
- Wagner, J. (2012). International trade and firm performance: a survey of empirical studies since 2006. *Review of World Economics*, 148(2), 235-267. <https://doi.org/10.1007/s10290-011-0116-8>
- Wagner, J. (2019). Effect of international activity on firm performance. *IZA World of Labor*. <https://doi.org/10.15185/izawol.47.v2>
- Wang, B. y Liu, G.T. (2015). Energy conservation and emission reduction and China's green economic growth—Based on a total factor productivity perspective. *China Ind. Econ*, 5, 57-69. https://caod.oriprobe.com/articles/44734794/Energy_Conservation_and_Emission_Reduction_and_Chi.htm
- Wang, D., Du, K. y Zhang, N. (2022). Measuring technical efficiency and total factor productivity change with undesirable outputs in Stata. *The Stata Journal*, 22(1), 103–124. <https://doi.org/10.1177/1536867X221083886>

Wang, S., Yang, C. y Li, Z. (2022). Green Total Factor Productivity Growth: Policy-Guided or Market-Driven? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17). <https://doi-org.ez.urosario.edu.co/10.3390/ijerph191710471>

Xu, Y. y Deng, H. (2022). Green total factor productivity in Chinese cities: Measurement and causal analysis within a new structural economics framework. *Journal of Innovation & Knowledge*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100235>

Anexo A

En esta sección, se caracteriza la industria manufacturera colombiana a partir de las diferentes estadísticas del Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. Los datos de valor agregado se toman de las Cuentas Nacionales, los de empleo de la Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH), y las exportaciones de las publicaciones y microdatos de comercio exterior.

A. Valor agregado

Entre 2010 y 2019, la industria manufacturera generó en promedio 96.610 miles de millones de pesos en valor agregado, aportando así el 12,3% del valor agregado total de acuerdo con los datos de las Cuentas Nacionales del DANE. Por tanto, la industria manufacturera se posicionó como la tercera actividad económica con mayor participación en el PIB, superando a otros sectores relevantes de la economía como: la explotación de minas y canteras; actividades profesionales y servicios administrativos; agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca; y las actividades financieras y de seguros (Tabla 12).

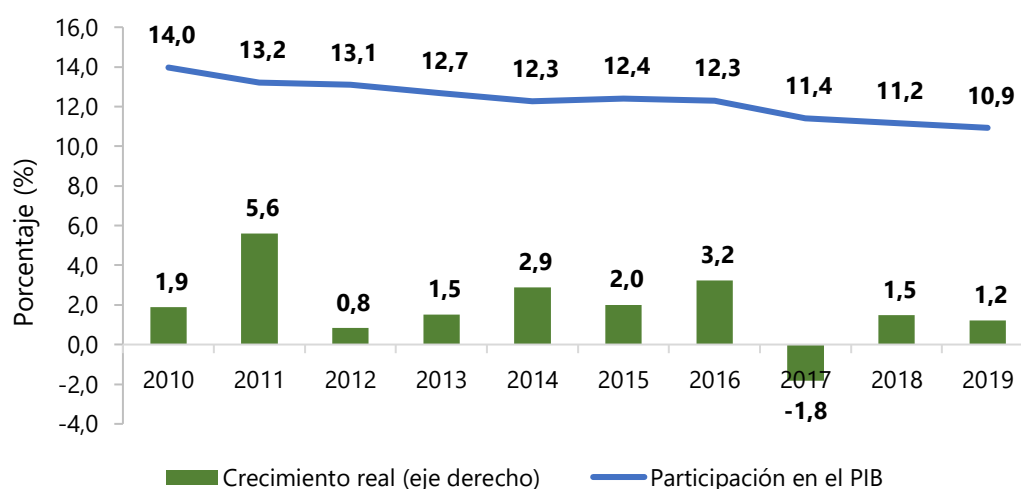
No obstante, la industria manufacturera presentó el crecimiento real promedio (1,9%) más bajo de todas las actividades económicas durante el periodo de análisis (Tabla 12), por lo cual, la participación del sector en el PIB disminuyó 3,1 puntos porcentuales, pasando de 14,0% en 2010 a 10,9% en 2019 (Figura 3). Los empresarios del sector manifestaron que los principales obstáculos para el crecimiento del sector fueron el comportamiento de la tasa de cambio, el costo de los insumos o materias primas, la falta de demanda, las estrategias agresivas de precios y comercialización, la infraestructura y los costos logísticos, el contrabando, la incertidumbre tributaria, el acceso al crédito y la contratación de mano de obra (ANDI, 2022).

Tabla 12. Participación promedio en el PIB y crecimiento real promedio del valor agregado por actividad económica, 2010 – 2019

Actividad económica	Porcentaje (%)	
	Participación promedio en el PIB	Crecimiento real promedio
Comercio, reparación de vehículos, transporte, almacenamiento y restaurantes	16,4	4,0
Administración pública, defensa, educación, salud humana y servicios sociales	13,7	5,0
Industrias manufactureras	12,3	1,9
Actividades inmobiliarias	8,7	3,3
Explotación de minas y canteras	7,7	2,5
Actividades profesionales y servicios administrativos y de apoyo	6,7	3,4
Construcción	6,6	3,4
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	6,0	3,2
Actividades financieras y de seguros	4,2	6,9
Suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje	3,2	2,3
Información y comunicaciones	3,0	4,8
Otras actividades de servicios	2,4	4,8
Producto Interno Bruto (PIB)		3,7

Fuente: DANE – Cuentas Nacionales.

Figura 3. Participación en el PIB y crecimiento real del valor agregado de la industria manufacturera, 2010 – 2019



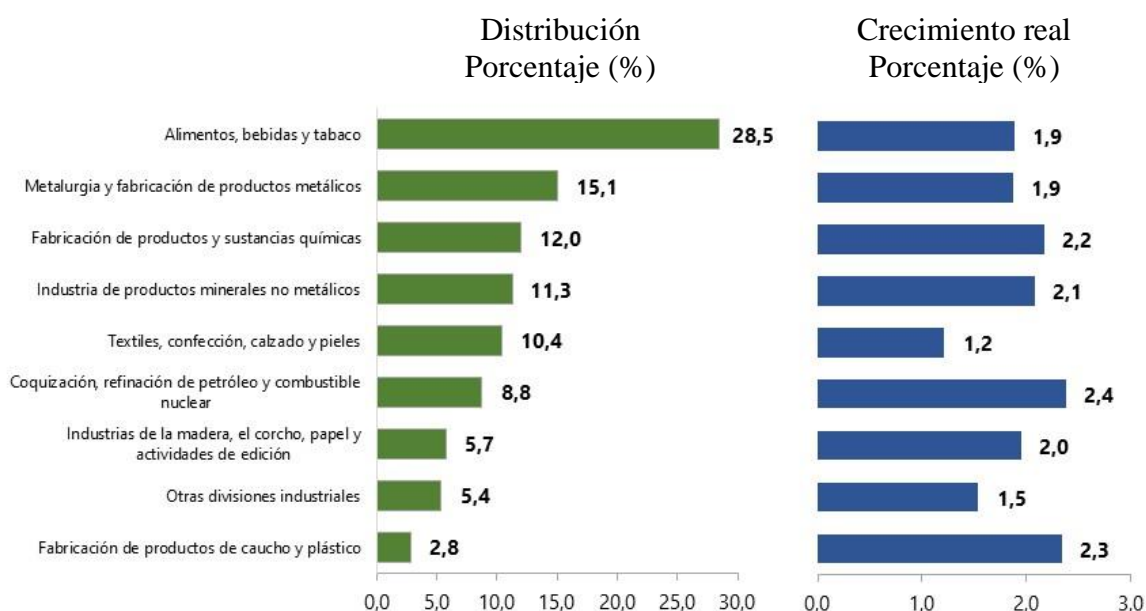
Fuente: DANE – Cuentas Nacionales.

La industria manufacturera se caracteriza porque comprende diversas actividades económicas, como la elaboración de alimentos y bebidas, la confección de prendas de vestir, la fabricación de sustancias químicas, la transformación de productos metálicos, entre otras más. Para fines de este trabajo, estas actividades se agrupan en 9 sectores industriales, siguiendo la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las Actividades

Económicas Revisión 4 Adaptada para Colombia – CIIU Rev. 4 A.C. a dos dígitos como se observa en la Figura 4.

En Colombia, la elaboración de alimentos, bebidas y tabaco representó más de una cuarta parte del valor agregado manufacturero total, en promedio, con el 28,5% entre 2010 y 2019. A este sector le siguen los de: fabricación de productos metalúrgicos y metálicos (15,1%); producción de productos y sustancias químicas (12,0%); industria de los minerales no metálicos (11,3%); fabricación y confección de textiles, prendas de vestir, calzado y pieles (10,4%); coquización, fabricación de productos de la refinación de petróleo y combustible nuclear (8,8%); industrias de transformación de la madera y el corcho junto con la elaboración de papel y las actividades de edición (5,7); las otras industrias manufactureras (5,4%); y finalmente la fabricación de productos de caucho y plástico (2,8%) (Figura 4).

Figura 4. Distribución y crecimiento real promedio del valor agregado manufacturero por grandes sectores industriales, 2010 – 2019



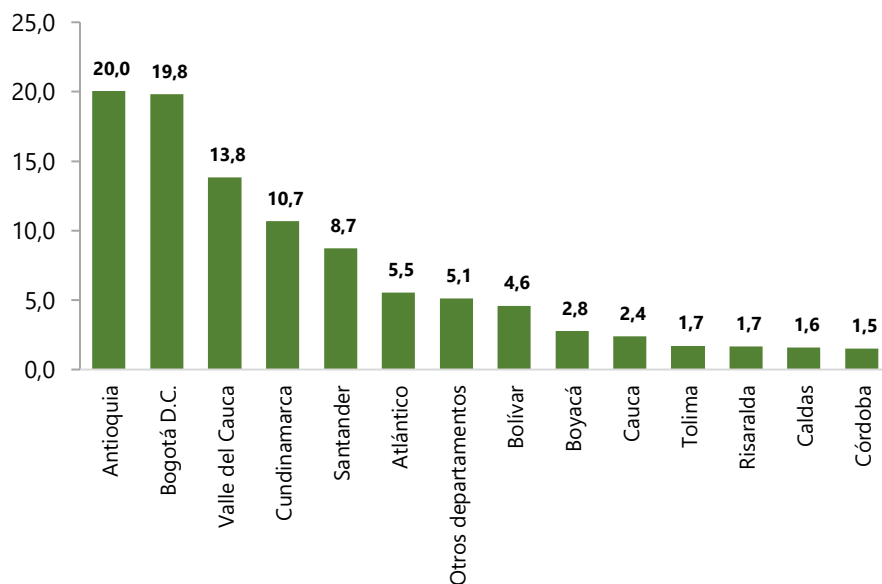
Fuente: DANE – Cuentas Nacionales.

En relación con el crecimiento real del valor agregado, los sectores industriales que presentaron una variación más alta que el promedio de toda la industria manufacturera (1,9%) fueron: coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear (2,4%), fabricación de productos de caucho y plástico (2,3%), fabricación de productos y sustancias químicas

(2,2%), industria de productos de minerales no metálicos (2,1%) e industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición (2,0%). La dinámica de la demanda interna y, en menor medida, de la demanda externa impulsaron el crecimiento de estos sectores industriales durante el periodo de análisis (para más información ver los informes sectoriales del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo).

El valor agregado manufacturero presentó un alto grado de concentración espacial en el territorio colombiano. Entre 2010 y 2019, 5 departamentos del país generaron el 73,2% del valor agregado manufacturero. Antioquia contribuyó con el 20,0%, donde se destacan las industrias de alimentos, bebidas y tabaco; textiles, confección, calzado y pieles; y la fabricación de sustancias y productos químicos (DANE, 2020a).

Figura 5. Distribución del valor agregado manufacturero por departamentos, 2010 – 2019



Fuente: DANE – Cuentas Nacionales.

En Bogotá D.C. y Valle del Cauca, las actividades más frecuentes fueron la elaboración de alimentos, bebidas y tabaco; y la fabricación de sustancias y productos químicos. En Cundinamarca, las más representativas fueron las actividades de alimentos, bebidas y tabaco; la fabricación de sustancias y productos químicos; y las industrias de productos minerales no metálicos, dentro de las cuales se destacan las cementeras. Por último, en Santander las se

destacan los sectores de elaboración de alimentos, bebidas y tabaco; y la coquización de petróleo y combustible (DANE, 2020a).

B. Empleo

La industria manufacturera también fue la tercera actividad económica que más personas ocupó entre 2010 y 2019, con aproximadamente 2,5 millones de puestos de trabajo, de acuerdo con las cifras de la Gran Encuesta Integrada de Hogares – GEIH del DANE. Este sector aportó el 12,0% de todos los empleos del territorio nacional, solo siendo superado por los sectores de comercio, reparación de vehículos, transporte, almacenamientos y restaurantes (32,9%), y agricultura, ganadería, caza silvicultura y pesca (17,3%) (Tabla 13). No obstante, entre 2010 y 2019, el número de personas ocupadas en el sector manufacturero creció solamente 0,5%, por lo cual fue la segunda actividad con la dinámica más baja en términos de empleo.

Tabla 13. Participación y crecimiento promedio del empleo por actividad económica, 2010 – 2019

Actividad económica	Porcentaje (%)	
	Participación promedio en el empleo	Crecimiento promedio
Comercio, reparación de vehículos, transporte, almacenamiento y restaurantes	32,9	2,5
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	17,3	0,6
Industrias manufactureras	12,0	0,5
Administración pública, defensa, educación, salud humana y servicios sociales	11,2	2,6
Otras actividades de servicios	8,6	3,1
Construcción	6,2	4,9
Actividades profesionales y servicios administrativos y de apoyo	5,4	5,3
Información y comunicaciones	2,0	2,8
Actividades financieras y de seguros	1,3	4,1
Actividades inmobiliarias	1,3	1,7
Explotación de minas y canteras	1,0	1,9
Suministro de electricidad, gas, distribución de agua y reciclaje	0,8	6,5
Total		2,2

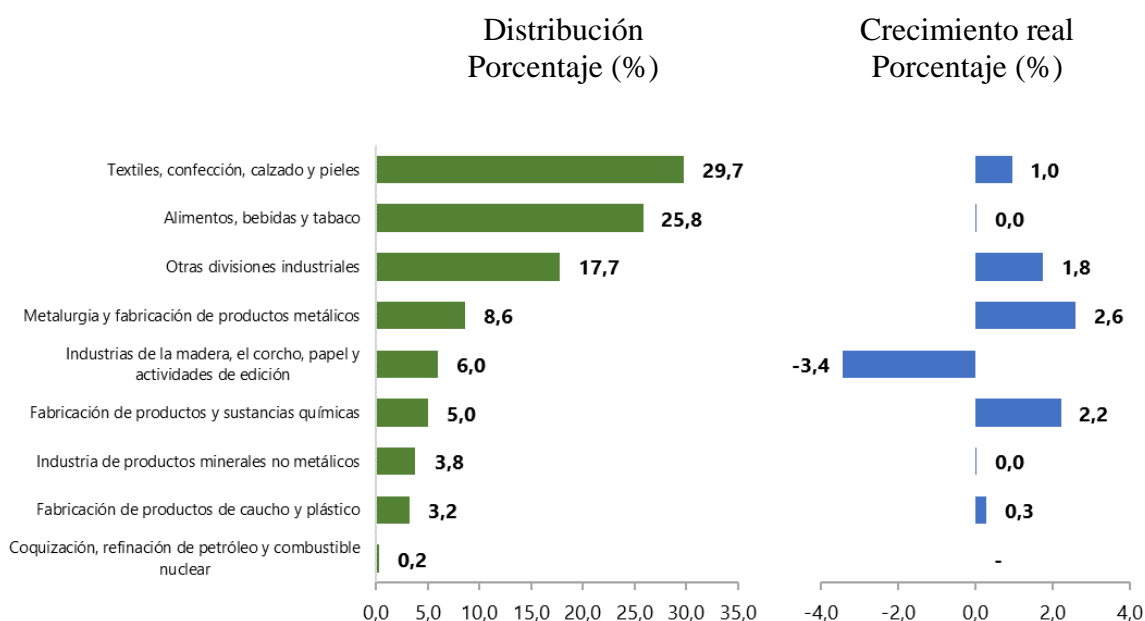
Fuente: DANE – GEIH.

Por grandes sectores manufactureros, las industrias textiles, confección, calzado y pieles ocuparon al 29,7% de todas las personas empleadas en el sector manufacturero. Seguidas por las industrias alimentos, bebidas y tabaco que emplearon (25,8%) y las otras divisiones industriales (17,7%). Por el contrario, los sectores de coquización, refinación de petróleo y

combustible nuclear (0,2%), fabricación de productos de caucho (3,2%) y la producción de minerales no metálicos (3,8%) fueron los que menos personas ocuparon (DANE, 2020b).

En relación con la tasa de crecimiento, las actividades de la metalurgia y fabricación de productos metálicos presentaron la variación positiva más alta en cuanto a puestos de trabajo (2,6%), seguidas por las actividades de fabricación de productos y sustancias químicas (2,2%). En contraste, los empleos de las industrias de la madera, el corcho, papel y actividades de edición cayeron 3,4% entre 2010 y 2019 (ver Figura 6).

Figura 6. Distribución y crecimiento promedio del empleo manufacturero por grandes sectores industriales, 2010 – 2019



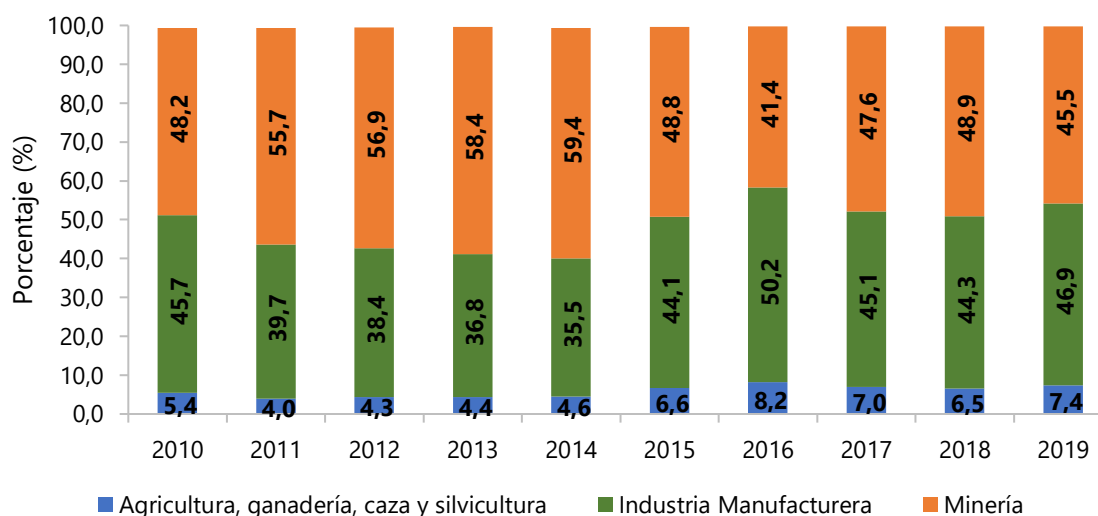
Fuente: DANE – GEIH.

C. Exportaciones

Entre 2010 y 2019, las exportaciones de Colombia crecieron en promedio 2,0%, este crecimiento se debió principalmente a la dinámica de las ventas externas del sector minero (4,0%) y de la agricultura, ganadería, casa y pesca (3,6%), de acuerdo con los datos del DANE. Sin embargo, y a pesar del bajo crecimiento de las exportaciones manufactureras (0,9%), este sector fue el segundo más importante en la canasta exportadora del país durante el periodo de análisis.

El sector de la industria manufacturera contribuyó, en promedio, con el 42,6% de las exportaciones del país entre 2010 y 2019. Esta participación alcanzó el valor más bajo en 2014 (35,5%) y el valor más alto en 2016 (50,0%), estas variaciones se explican principalmente por las fluctuaciones del precio del petróleo que impactan directamente el valor y participación de las exportaciones del sector minero (Figura 7).

Figura 7. Distribución de las exportaciones totales por actividad económica, 2010 - 2019



Nota: Exportaciones totales según Clasificación Industrial Internacional Uniforme Revisión 4 adaptada para Colombia – CIIU Rev. 4 A.C.

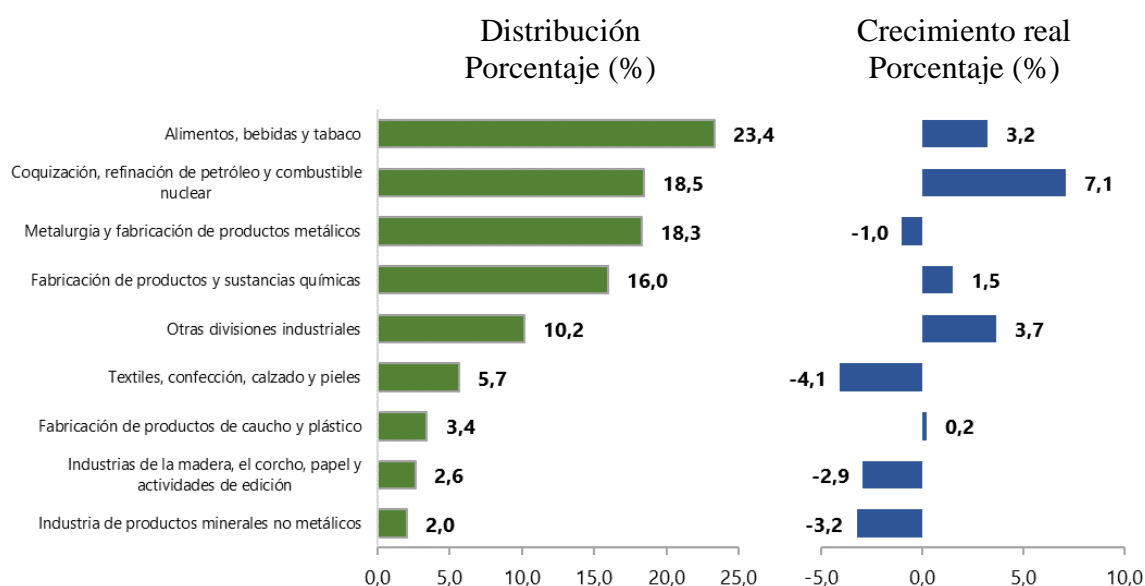
Fuente: DANE – Exportaciones.

Al analizar las exportaciones por grupos manufactureros (Figura 8), se observa que el 60,1% de las exportaciones manufactureras del país estuvieron asociadas con las industrias de alimentos, bebidas y tabaco (23,4%); coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear (18,5%); y, metalurgia y fabricación de productos metálicos (18,3%). Estas exportaciones se caracterizaron por tener un bajo nivel de contenido tecnológico. Con base en la metodología de Lall (2000) y los datos del DANE, se encuentra que el 49,0% de las exportaciones manufactureras fueron de productos basados en recursos naturales, 12,4% de productos de nivel tecnológico bajo, 24,1% de productos de nivel tecnológico medio,

mientras que solo el 4,2% de las exportaciones fueron de productos de nivel tecnológico alto⁸.

En relación con la tasa de crecimiento, el sector de coquización, refinación de petróleo y combustible nuclear fue el sector que presentó el mayor dinamismo en cuanto al valor de las exportaciones (7,1%), debido a las fluctuaciones de los precios internacionales de los derivados del petróleo, la dinámica de la demanda externa y la reapertura de Reficar (Sotelo y Vallejo, 2021). En contraste, las industrias de textiles, confección, calzado y pieles fueron las que presentaron la caída más alta en el valor de las exportaciones con -4,1%.

Figura 8. Distribución y crecimiento de las exportaciones manufactureras por grandes sectores industriales, 2010 – 2019



Nota: Exportaciones totales según Clasificación Industrial Internacional Uniforme Revisión 4 adaptada para Colombia – CIIU Rev. 4 A.C.

Fuente: DANE – Exportaciones.

Adicionalmente, se encuentra que el mercado de los Estados Unidos fue el principal destino de las exportaciones manufactureras de Colombia entre 2010 y 2019, seguido por los

⁸ El 10,3% de las exportaciones manufactureras faltantes quedaron dentro de la categoría “productos sin clasificación” de la metodología Lall (2000).

mercados latinoamericanos de Ecuador, Perú, Brasil, Venezuela y México. A estos seis mercados llegó el 54,5% del total de exportaciones manufactureras del país.