



WATER SECURITY & SUSTAINABLE DEVELOPMENT HUB

COLOMBIA COLLABORATORY

Volumen N°1

Mario Alejandro Pérez Rincón
Editor

**Aportes de la naturaleza
a la generación de valor
económico: análisis
crítico de la caña de
azúcar en Colombia
(1960 – 2022)**

Universidad del Valle
Programa Editorial
Facultad de Ingeniería – Instituto CINARA

Título: Aportes de la naturaleza a la generación de valor económico:
análisis crítico de la caña de azúcar en Colombia (1960–2022).

Editor: **Mario Alejandro Pérez-Rincón**

Autores: **Mario Alejandro Pérez-Rincón, Daniel Andrés Mosquera, Isabella
Puente Prado, Katherine Mosquera Viquez, Yinneth Andrea Molina Macías**

ISBN-PDF: 978-958-507-353-1

Primera Edición

© **UNIVERSIDAD DEL VALLE**

© **AUTORES**

Diseño y diagramación: **Laura María Betancourt Hernández**

Citarse como: Pérez-Rincón, M., Mosquera, D. A., Puente-Prado, I., Mosquera-Viquez, K.,
Molina-Macías, Y. A. (2025). Aportes de la naturaleza a la generación de valor económico:
análisis crítico de la caña de azúcar en Colombia (1960–2022), Vol. 1., Universidad del
Valle - Instituto CINARA, Cali, Colombia.

*Agradecimientos a: “Water Security and Sustainable Development Hub” funded by the UK
Research and Innovation’s Global Challenges Research Fund (GCRF) [grant number: ES/
S008179/1].*



Este libro ha sido financiado con recursos internacionales, es de libre acceso y puede ser reproducido citando la fuente.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad ni de los financiadores, ni genera responsabilidad frente a terceros.

Cali, Colombia, agosto de 2025

Aportes de la naturaleza a la generación de valor económico: análisis crítico de la caña de azúcar en Colombia (1960–2022)

Mario Alejandro Pérez-Rincón (Editor)
Daniel Andrés Mosquera
Isabella Puente Prado
Katherine Mosquera Víquez
Yinneth Andrea Molina Macías



Tabla de contenido

Resumen	05
Introducción	06
Capítulo 1: Bases conceptuales y teóricas de la relación economía y ambiente	10
1.1 Economía y Recursos Naturales	12
1.2 Economía Ecológica	16
1.2.1 Bases conceptuales de la EE	16
Capítulo 2. Estado del arte sobre el papel de la naturaleza en la función de producción	21
Capítulo 3. Cuenca alta del Río Cauca y monocultivo de la caña de azúcar: contextualización biofísica y socio-económica	25
Localización y características biofísicas y sociales del territorio	25
El cultivo de caña de azúcar en la CARC	26
Dimensión económica del monocultivo cañero	29
Capítulo 4. Metodología y estimación econométrica del modelo	34
4.1 Determinación del modelo econométrico	34
4.2 Resultados: análisis y discusión	37
4.3 Discusión de resultados	41
4.4 Conclusiones	43
Anexos	45
Referencias	48

Lista de Figuras

Figura 1. El límite de producción en el siglo XVIII	11
Figura 2. Modelo de producción ricardiano con un solo bien	12
Figura 3. Objetivo General y preocupaciones específicas de la Economía Ecológica	13
Figura 4. Cosmovisión de la Economía Neoclásica como sistema cerrado y cosmovisión de la Economía Ecológica como sistema abierto	17
Figura 5. Organización del sistema social y económico en el Sistema Natural según la sustentabilidad débil y fuerte	17
Figura 6. El proceso económico y la función de producción entendidos como un sistema abierto	18
Figura 7. Metabolismo social y flujo de materiales para la caña de azúcar	19
Figura 8. Flujo y Calidad del agua en el Río Cauca	20
Figura 9. Participación (%) de la producción del monocultivo de la caña de azúcar. Departamentos de la CARC, 2022	26

Figura 10. Evolución del área sembrada en caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, 1960 – 2022	28
Figura 11. Evolución del área sembrada (ha) de los principales productos agrícolas en el Valle del Cauca, 1989 – 2022	28
Figura 12. Área cosechada (ha) de caña de azúcar. CARC, 1980 – 2022	28
Figura 13. Participación (%) del valor agregado de la fase agrícola de la caña de azúcar en el valor agregado total por ramas de actividad económica, 2012 – 2021pr	29
Figura 14. Producción de caña de azúcar (miles de toneladas). Cuenca Alta del Río Cauca, 1980 – 2022	30
Figura 15. Rendimiento (ton/ha) de la caña de azúcar. CARC, 1960 – 2022	30
Figura 16. Número de personal de campo* (miles) en el sector de la caña de azúcar en la CARC, 1960 – 2022	34
Figura 17. Número de trabajadores por cada 100 hectáreas sembradas de caña de azúcar en la CARC, 1960 - 2022	34
Figura 18. Número de trabajadores por cada 100 hectáreas sembradas de caña de azúcar en la CARC, 1960 - 2022	32
Figura 19. Matriz de correlación	37
Lista de Tablas	
Tabla 1. Funciones de producción según escuela económica	15
Tabla 2 Hectáreas sembradas (ha) de cultivos agrícolas en la CARC, 2022	26
Tabla 3. Resumen del comportamiento de área sembrada, cosechada, producción y trabajadores. Sector de la caña de azúcar, 1960 – 2022	33
Tabla 4. Insumos y Coeficientes Energéticos utilizados para estimar el input energético de la caña de azúcar en la CARC	36
Tabla 5. Estadísticas descriptivas de las variables relevantes del modelo	36
Tabla 6. Coeficientes de los recursos naturales	38
Tabla 7. Resultados de los coeficientes según los modelos mejor ajustados	39
Lista de Mapas	
Mapa 1. Municipios pertenecientes a la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC)	25
Mapa 2. Cultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC)	27



Resumen

[6]

El presente estudio tiene como objetivo analizar la contribución de la naturaleza a la generación de valor económico en el monocultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), Colombia, durante el periodo 1960-2022. A partir de un enfoque basado en la Economía Ecológica (EE), se busca comprender cómo los recursos y bienes naturales, tradicionalmente poco considerados en los modelos económicos ortodoxos, son factores esenciales para la producción y la generación de valor económico, realidad que resulta más evidente cuando se trata del sector agrícola.

El trabajo parte de la crítica a la visión neoclásica de la economía, que percibe los recursos naturales como perfectamente sustituibles por recursos creados por la sociedad tales como el capital físico y el progreso tecnológico, y se adentra en la importancia de los flujos materiales y energéticos para el proceso económico. El estudio recupera una discusión teórica importante, aunque un poco olvidada, sobre este tema y que fue abordada en 1987 en un número especial (27) del *Journal Ecological Economics*. Los recursos naturales incluidos acá fueron agua, tierra, fertilizantes y energía, los cuales se estimaron a partir de los indicadores biofísicos de sustentabilidad de la EE. Utilizando herramientas de medición econométricas, a partir de la función de producción, el estudio estima las elasticidades de los recursos sociales y naturales, mostrando que estos últimos, aunque con diferencias entre sí, contribuyen a la generación de valor económico en el monocultivo de caña de azúcar.

En forma específica, los recursos que más se destacan como generadores de valor económico en la caña de azúcar fueron el

agua, la tierra y los materiales que corresponden a los fertilizantes. La energía tuvo muchos problemas de multicolinealidad y por ello mismo arrojó signo negativo, contrario a lo esperado. El capital por su parte, también fue un factor que contribuyó a la generación de valor, pero menos intensamente que la naturaleza. La importancia de los bienes ambientales para la generación de valor económico nos advierte igualmente sobre los efectos negativos de su uso intensivo; esto contribuye a generar desequilibrios ecológicos y socioeconómicos, lo que pone en evidencia la necesidad de un enfoque más sostenible y responsable en las políticas agrícolas y ambientales.

Finalmente, el trabajo concluye con un llamado a repensar el desarrollo económico bajo una perspectiva que reconozca los límites biofísicos del planeta y de los territorios, e incita a incorporar explícitamente los servicios y bienes ambientales en las decisiones de política para garantizar una dinámica económica que no comprometa la capacidad de los ecosistemas para sostener la vida y a la sociedad dentro de ella.

Este libro aborda la parte principal de la investigación correspondiente a estimar la "Aportes de la naturaleza a la generación de valor económico: análisis crítico de la caña de azúcar en Colombia (1960–2022)", y se constituye como el Volumen No. 1 de este trabajo. El estudio también incluyó la "Caracterización de la Cuenca Alta del Río Cauca y del cultivo de la Caña de Azúcar en Colombia: historia y generalidades", que conforma el Volumen No. 2 de esta pesquisa. Igualmente hace parte de esta investigación el análisis de las "Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica del cultivo de caña de azúcar en la CARC, Colombia (1960–2022)" que aparece como Volumen No. 3.



Introducción

Reconocer el papel de la Naturaleza en la generación de valor económico es, en la actualidad, un tema poco discutido en términos académicos. Si bien la base material y ecosistémica es la base central que posibilita toda actividad humana, su reconocimiento en la teoría económica tradicional es bajo: aunque históricamente se ha intentado incluir los Recursos Naturales (RRNN) en la economía desde diferentes perspectivas y teorías, esta inclusión se ha realizado de forma marginal. Bajo este panorama, el trabajo suscrito se presenta como un medio para rescatar y reconocer la importancia de los RRNN en la generación de valor económico en la actividad agrícola y, específicamente, en el caso del monocultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC) en Colombia. A partir del marco teórico y la base conceptual de la Economía Ecológica (EE), se busca ilustrar la complejidad del proceso productivo agrícola incorporando los flujos naturales en perspectiva material y biofísica más allá del análisis monetario y resaltar el papel imprescindible que cumple la Naturaleza en la generación de valor económico. Esto es facilitado porque la EE desafía el paradigma tradicional al concebir al sistema económico como un sistema abierto a la entrada de energía y materiales y a la salida de residuos. Así, tanto el flujo de entrada como la tasa de asimilación de los residuos están determinados por las capacidades de los ecosistemas y de la biosfera en general, haciendo necesario incluir los límites biofísicos en el análisis económico. Se señala en términos macro que no es posible crecer al infinito en un planeta que es finito. A partir de ello se busca evaluar la función de producción considerando no sólo los factores económicos tradicionales sino también los RRNN.

Hasta el pensamiento clásico, la teoría del crecimiento económico

trabajó con tres factores de producción: capital (K), trabajo (L) y Tierra (T) que incorporaba los RRNN. Sin embargo, desde hace más de 100 años, con la aparición del pensamiento neoclásico a finales del siglo XIX, la dinámica económica quedó dependiendo teóricamente de solo los dos primeros factores, desconociendo el papel de la Naturaleza en la economía. El análisis de la teoría económica neoclásica supone que todos los factores de producción son completamente sustituibles entre sí. Una disminución del capital natural es perfectamente reemplazable por más inversiones en capital creado por la sociedad. Sin embargo, esta corriente ha sido criticada desde enfoques más heterodoxos, al argumentar que la actividad económica no puede existir sin un flujo permanente de recursos naturales y servicios ecosistémicos, expresados ellos en materia y energía que llegan al proceso económico y salen del mismo convertidos en bienes y servicios y en contaminación y residuos. Ello implica además que, estos RRNN son de carácter finito como también es limitada la capacidad de asimilación de la contaminación. Esto significa que es imposible un crecimiento económico sostenido e indefinido en un planeta y en unos ecosistemas que tienen límites. Ergo, la teoría económica ha olvidado y relegado el papel de los RRNN y de los servicios ambientales en sus metodologías y procesos de medición.

[8]

Con base en la clásica función de producción, la economía puede crecer al infinito incluso sin cambio técnico, siempre y cuando la inversión neta crezca al mismo ritmo que la población. La perspectiva es más optimista si se incluye el progreso técnico. Con la aparición de la crisis del petróleo y el informe de los *"Límites al Crecimiento"* (Meadows et al, 1972), se publicaron contribuciones neoclásicas que extendían el modelo de crecimiento tradicional para integrar un nuevo input agregado, los RRNN (Solow, 1974 y Stiglitz, 1974), utilizando la llamada función Cobb-Douglas, a la cual se le puede incluir, además, el cambio técnico (A):

$$Y_t = K_t^\alpha L_t^\beta R_t^\gamma e^{\rho t}; \text{ donde } \alpha + \beta + \gamma = 1$$

De esta manera se plantea que los RRNN (capital natural) son perfectamente sustituibles por K (capital creado por el ser humano) y, por tanto, la producción puede ser infinita, pues la sustituibilidad lo permite. Así, la estrategia es aumentar lo suficientemente K para contrarrestar la pérdida y sacrificios de RRNN. Ahora, incluyendo el desarrollo tecnológico con los mismos inputs, una variación en p (tasa de cambio técnico) permite una producción exponencialmente creciente. En este escenario, L (trabajo) también puede ser sustituido. Así, para la economía neoclásica, el agotamiento de los RRNN no representa ningún problema para la posibilidad de un consumo y producción sostenible, e incluso de un crecimiento exponencial de ambos, siempre que supongamos un grado suficientemente elevado de sustituibilidad de RRNN por K , y siempre que confiemos en que seguirá habiendo progreso técnico (Martínez-Alier y Roca, 2018, p. 377).

Este principio de "perfecta sustituibilidad" de factores de producción también es retomado en el análisis agrícola, con una serie de implicaciones técnico-económicas. La agricultura industrial, que se basa igualmente en un modelo de desarrollo soportado en el supuesto de la infinitud de los RRNN y de la perfecta sustitución entre factores de producción, conduce a la creencia de que no hay límites al crecimiento. A pesar de que algunos de los autores clásicos (Ricardo y Malthus), se preocuparon por las consecuencias de la limitación del recurso Tierra (la ley de los rendimientos decrecientes), que llevaría a una situación de estancamiento económico, tales preocupaciones se dejaron de lado durante largo tiempo por el significativo aumento de la producción agropecuaria producto de la Revolución Verde (RV).

La agricultura industrial retoma al pie de la letra este paradigma analítico: la estrategia de desarrollo del sector agrícola consiste en aumentar de manera creciente K , asociando esta variable a los abonos artificiales, plaguicidas, maquinaria y equipo, desarrollo de semillas y especies más productivas, sistemas de riego, etc., que permitan "sustituir" o "controlar" la variabilidad del recurso natural (tierra, agua, energía y semillas) y el trabajo por el capital. Estos cambios asociados a la RV y a la post-revolución genética han tenido como propósito el aumento de la productividad por hectárea de tierra y por unidad de trabajo utilizada, pretendiendo con ello artificialmente intentar eludir las restricciones naturales al crecimiento o lo que los autores clásicos llamaron "los rendimientos decrecientes" de la agricultura.

Además, esta visión mecánica y parcializada de las relaciones entre productividad y RRNN se extiende al enfoque técnico dominante en la agronomía, conocido como sustitución de insumos o "ley del mínimo". De acuerdo con este dogma, en un momento determinado hay un solo factor que limita el incremento del rendimiento y ese factor puede ser superado mediante un insumo externo apropiado. Una vez que se ha superado la barrera del primer factor limitante, los rendimientos pueden volver a elevarse hasta que otro factor se vuelva limitante. Ese factor requiere entonces de otro insumo externo y así sucesivamente, perpetuando el procedimiento que alivia síntomas en lugar de atender las causas reales del desbalance ecológico (Rosset, 1997). Este planteamiento es conocido también como la *"falacia de la sustitución sin fin"*.

La conceptualización relacionada con la perfecta sustitución entre factores de producción y la inexistencia de límites al crecimiento, tiene importantes efectos ecológicos y sociales que queremos destacar:

- i) **En términos materiales, los insumos usados para aumentar la producción están basados siempre en el uso de RRNN.** Por ejemplo, buena parte de los fertilizantes y plaguicidas son resultado del desarrollo de la química de los hidrocarburos: para aumentar la productividad energética de la agricultura se recurre a intensificar el uso de inputs energéticos externos asociados a la explotación y conversión de recursos naturales no renovables (fósiles en particular), lo cual expande los impactos ambientales a otras escalas y a otros vectores ecológicos.

ii) **La agricultura industrial también es intensiva en el uso de los principales recursos naturales agrícolas:** tierra, agua y energía. La RV aumenta el uso de la capacidad productiva de la tierra en términos intensivos y extensivos. En términos intensivos, a través de los agroquímicos, intenta extraer toda la capacidad productiva de la tierra para el crecimiento de la producción agropecuaria. A nivel extensivo, requiere continuamente expandir la frontera agrícola para aumentar sus volúmenes de producción y conquistar nuevos mercados nacionales e internacionales. En el uso del agua, los monocultivos industriales son usuarios intensivos de recurso hídrico, tanto para sus actividades agrícolas como para sus procesos de transformación. Por ello, son grandes acaparadores de agua y generadores de importantes impactos ambientales sobre el recurso. Esto los lleva a ser promotores intensivos de conflictos ambientales. Y, en términos energéticos, la agricultura industrial requiere cantidades importantes y crecientes de energía para poder producir la maquinaria, equipo e insumos y ponerlos a operar en el desarrollo de la actividad agrícola en sus distintas fases metabólicas.

iii) **El uso intensivo de RRNN y de capital lleva implícita la afectación de la función asimiladora de la biósfera y de sus servicios de soporte y regulación de la vida.** Cuando se trata de seleccionar una técnica de producción agropecuaria que sea sostenible, no sólo interesa la cantidad total de energía y materiales utilizados, sino además la utilización de sustancias que generan residuos contaminantes, la contaminación del agua y la conservación y coevolución de la biodiversidad tanto agrícola como en general de las especies. Es decir, interesa saber cómo el proceso productivo utilizado afecta a las otras funciones de la biósfera y mirar si éstas son capaces de soportar los impactos ambientales en el tiempo. La RV lleva aparejados importantes impactos ecológicos en buena parte de los vectores ambientales: suelo, aire, agua y biodiversidad. Los mecanismos que explican este proceso incluyen la degradación de las tierras mediante la erosión del suelo, la disminución de materia orgánica y la biodiversidad asociada a ella, la salinización, el agotamiento de las aguas del subsuelo, la deforestación y la desertificación; así como la aparición de plagas por el monocultivo, la uniformidad genética, y la resistencia a los plaguicidas desarrollada por insectos, hierbas y enfermedades de los cultivos (Altieri, 1995; Rosset, 1997).

En ese sentido, los monocultivos juegan un papel trascendental cuando se trata de la utilización de los recursos y de sus impactos ambientales. Las grandes extensiones de tierra, grandes cantidades de agua para su riego, uso a gran escala de fertilizantes y demás, llevan a la conformación de nuevas plagas, desplazamiento de fauna, deterioro del suelo, contaminación del agua, significativas emisiones de CO₂ a la atmósfera, etc. Siendo así, con el propósito de devolver a la naturaleza su importancia en el análisis económico, esta investigación toma como

caso de estudio el monocultivo de la caña de azúcar en la CARC.

Para el caso colombiano, este monocultivo abarca cinco departamentos del occidente del país (Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda y Caldas), con un área sembrada de aproximadamente 265 mil hectáreas a 2022 y con una producción que alcanzó para ese año 23 millones de toneladas. Las características físico-climáticas de esta zona le permiten ser una de las mejores regiones del mundo para su producción después de Brasil (8,32 millones de hectáreas y 724,4 millones de toneladas producidas), India (4,8 millones de hectáreas y 439,4 millones de ton), Tailandia (1,8 millones de hectáreas y 92,1 millones de ton), China (1,2 millones de hectáreas y 103,4 millones de ton), Pakistán (1,2 millones de hectáreas y 87,98 millones de ton) y México (848 mil ha y 55,3 millones de ton).

Complementando la idea anterior, el rendimiento productivo de la caña en Colombia fue el más alto del mundo, alcanzando 92,4 ton/ha en 2022¹. Por lo tanto, el monocultivo en el país ha tenido un crecimiento constante tanto en extensión como en producción desde sus inicios a finales del siglo XIX con un gran empuje desde 1960. En este historial ha acaparado grandes volúmenes de RRNN como tierra y agua, utilizando además elevadas cantidades de agroquímicos. Es claro señalar la relación entre monocultivos de este tipo y el deterioro de los ecosistemas que los soportan. Estos generan desplazamiento de fauna, degradación de tierras mediante la erosión y salinización del suelo, disminución de materia orgánica, afectación de la biodiversidad, agotamiento de las aguas del subsuelo, deforestación y desertización. También, aparición de plagas, uniformidad genética y resistencia de las hierbas y enfermedades a los plaguicidas (Altieri, 1995; Rosset, 1997).

En términos de uso del recurso hídrico, el monocultivo de la caña es usuario intensivo de agua tanto para sus actividades agrícolas como para sus procesos de transformación. Esta situación lo convierte en gran acaparador de agua y generador de importantes impactos ambientales que pueden desembocar en la creación de nuevos conflictos ambientales o en la agudización de los ya existentes. Respecto a los recursos energéticos, el monocultivo arrastra una importante huella de carbono, ya que, para producir y operar la maquinaria, equipo e insumos agrícolas en sus distintas fases metabólicas, se requieren cantidades crecientes de energía, la mayor parte de ella fósil.

Siendo así, el objetivo del presente trabajo es conocer las contribuciones de la naturaleza a la generación de valor económico en la función de producción del monocultivo de la caña de azúcar en la CARC entre 1960 y 2022. Partiendo de la base teórica y conceptual de la Economía Ecológica y haciendo uso de herramientas económicas, se estimarán las elasticidades para cada factor de producción incluyendo los RRNN.

En esencia, este trabajo evidencia que el valor económico no surge de manera autónoma ni en un vacío, sino que está arraigado a una

[9]

1. Mayor detalle de las características del monocultivo de la caña de azúcar puede verse en el Volumen No. 2 "Caracterización de la Cuenca Alta del Río Cauca y del cultivo de la Caña de Azúcar en Colombia: historia y generalidades"

base biofísica y natural que posibilita el desarrollo de las actividades productivas. Para ello tomamos como estudio de caso la agricultura, en particular la caña de azúcar en la CARC. En esta zona geográfica la Naturaleza brinda condiciones óptimas como suelos fértiles, clima adecuado o corrientes de aire que, aunque no son analizadas en este trabajo, se reconoce que son factores que hacen del proceso de producción de caña de azúcar colombiana, uno de los más rentables del mundo. De esta manera, esta investigación considera que RRNN como el agua, la tierra o la energía no sólo son recursos que permiten la producción material, sino que en sí mismos son generadores de valor económico. Asimismo, desde la EE se resalta la necesidad de incluir estos factores, en tanto sea posible, en el análisis económico.

Después de esta introducción, el presente documento está dividido en 5 secciones. En el **Capítulo 1**, se discuten las bases conceptuales y teóricas de la relación entre economía y recursos naturales. El **Capítulo 2** expone el estado del arte de la producción académica (artículos, investigaciones y estudios) realizada en este campo de trabajo. El **Capítulo 3** por su parte, contextualiza tanto el cultivo de la caña como la CARC donde se siembra, en términos socio-económicos y ambientales. Por su parte, el corazón central de este trabajo aparece en el Capítulo 4. Aquí, mediante estimaciones econométricas, se presentan los resultados en cuanto a la contribución de los diferentes factores de producción, incluyendo la naturaleza, en la generación

de valor económico en el cultivo de caña de azúcar. Finalmente se presentan las conclusiones y reflexiones finales del trabajo.

Este texto que corresponde al **Informe Final de Investigación (Vol. 1)**, se complementa con dos libros adicionales que abordan aspectos clave de este proyecto. El titulado "*Caracterización de la Cuenca Alta del Río Cauca y del monocultivo de caña de azúcar (Volumen No. 2)*", ofrece un análisis detallado de la región en la que se desarrolla el cultivo, describiendo las características geográficas, socioeconómicas y ambientales que influyen en la producción de caña. Este documento proporciona un contexto esencial para comprender las dinámicas territoriales y productivas en la Cuenca Alta y del monocultivo de caña de azúcar en el valle geográfico del Río Cauca (VGRC). Por su parte, el documento "*Huellas Hídricas, Ecológica y de Carbono del cultivo de caña de azúcar en la CARC, Colombia (1960-2022)*" (**Volumen No. 3**), profundiza en los impactos ambientales derivados de esta actividad agrícola. Este informe examina las presiones ambientales asociadas al monocultivo, y permite evaluar los efectos ecológicos a nivel regional (CARC), contribuyendo al análisis de la sustentabilidad de la producción de caña en la región. Ambos documentos adicionales enriquecen la investigación principal, proporcionando una visión más completa sobre los desafíos ambientales y la gestión de recursos naturales en la CARC asociados al monocultivo de caña de azúcar.



Capítulo 1: Bases conceptuales y teóricas de la relación economía y ambiente

En forma tradicional, el desarrollo conceptual y práctico de las actividades económicas en la sociedad ha tenido como propósito central y de política el crecimiento económico. Este enfoque ha sido criticado por no considerar los límites de la naturaleza y la degradación ambiental, planteándose la necesidad de cambiar de paradigma. En buena medida, la visión del crecimiento económico como el “bien” que cura todos los “males” está amparada en la Curva Ambiental de Kuznets que considera que a partir de cierto umbral de ingreso per cápita el crecimiento económico genera un “círculo virtuoso de la sustentabilidad”, debido a que entre más recursos económicos se generen, habrá una mejor financiación para el cuidado ambiental. Sin embargo, otras escuelas económicas, como por ejemplo la Economía Ecológica (EE), reflexionan de forma diferente en cuanto a los límites al crecimiento económico, y al papel de la naturaleza tanto en los procesos productivos como de consumo (Pérez-Rincón, 2018).

Ampliando la perspectiva, Pearce y Turner (1995) consideran que la degradación ambiental no es un atributo exclusivo del capitalismo industrial o de la visión teórica del crecimiento económico, según lo plantea la literatura ecológica. Existen casos de contaminación y degradación ambiental que no discrimina el sistema económico, ideología política y nivel de calidad de vida. Tanto países con altos índices de desarrollo industrial y económico, como aquellos con peores índices de pobreza, enfrentan importantes niveles de deterioro ambiental. “La pobreza, que impide a los pobres tener los medios para actuar en su propio interés a largo plazo, genera presiones ecológicas (como la sobreexplotación de los pastos, la erosión y eventual desertización) que llevan a la degradación de los recursos y a mayores presiones sobre la población” (p. 29). Sin embargo, también los pobres contribuyen a conservar el ambiente porque este les provee los medios de vida del que ellos dependen originando lo que se llama el “ambientalismo de los pobres” (Martínez-Alier, 2013). Igualmente, la riqueza que demanda altos niveles de consumo para mantener sus elevados niveles

de vida intensifica y amplía las fronteras extractivas y la demanda de RRNN, siendo un factor central que explica el deterioro ambiental en todos los niveles.

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) ya lo señalaba al decir que: “en los últimos sesenta años, con el fin de satisfacer unas demandas crecientes de alimentos, agua dulce, madera y combustibles, los seres humanos hemos transformado los sistemas naturales más rápidamente que en ningún otro período de nuestra existencia, deteriorando al menos dos terceras partes de los servicios que los ecosistemas proporcionan a la humanidad a escala global”. De esta realidad, ha surgido el concepto de “cambio ambiental global” (Vitousek, 1994), para evidenciar los efectos planetarios de esta búsqueda de mayores niveles de vida de la población a nivel mundial, señalando a las acciones humanas como el principal motor del cambio. Esta situación se ha traducido en dos conceptos similares que quieren mostrar que estamos inmersos en una nueva era geológica en la cual los seres humanos estaríamos sobrepasando los umbrales de seguridad de varios parámetros ambientales claves para el correcto funcionamiento de la ecosfera: el antropoceno (Rockström et al., 2009) y el capitaloceno (Steffen et al., 2011), para ubicarlo mejor en el contexto de las dinámicas de acumulación de capital del capitalismo.

Diferentes investigaciones han aportado evidencias inequívocas de que estamos sobrepasando los límites de la capacidad del planeta Tierra, afectando de forma profunda buena parte de los procesos de funcionamiento global de la ecosfera, debilitando la capacidad de soporte y de resiliencia del planeta (Figura 1). Dos trabajos se destacan: el de Rockström et al. (2009), y el de Steffen et al. (2011). Estos parten de proponer un marco analítico basado en “límites planetarios”, que se definen como el espacio operativo seguro para la humanidad con respecto al sistema terrestre. El espacio seguro se asocia al funcionamiento de los subsistemas o procesos biofísicos del planeta. Los autores identifican nueve procesos básicos para definir los límites planetarios, donde de

estos ya se están sobrepasando tres: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad (terrestre y marina), y la interferencia con el ciclo del nitrógeno (Rockstrom et al, 2009). Además, una reciente investigación de este mismo grupo encontró que ya el límite de agua fresca, en particular el agua verde (la que transita a través de la vegetación y el suelo), también había sido trasgredido (Wang-Erlandsson et al., 2022).

La relación entre los alcances de estos límites planetarios y el crecimiento económico, se evidencian con fuerza en las últimas siete décadas en lo que se ha llamado la “Gran Aceleración”. Los mayores cambios de origen humano sobre el Sistema Tierra se originan desde 1950 asociados al excepcional aumento de las actividades humanas y de su población sucedido a partir de esa misma época y reflejada en varios aspectos: Producto Interno Bruto (PIB) mundial, Consumo mundial de agua, Población mundial y urbana, Uso mundial de energía primaria, Producción mundial de papel, Consumo mundial de fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio), Número global de vehículos a motor, Número de llegadas internacionales por año, Capturas de peces marinos

en toneladas, Producción mundial de camarones mediante acuicultura, y otros aspectos similares. Ello tiene su reflejo en el crecimiento de diferentes variables ambientales que evidencian su deterioro: Incrementos en la Temperatura promedio en la Tierra, en la Concentración atmosférica de CO₂, N₂O y CH₄, en el flujo de nitrógeno inducido por el ser humano en los márgenes costeros, en la acidificación de los océanos. Como también, Pérdida de bosques tropicales, Aumento del descenso en la abundancia de especies terrestres, etc. (Aguado, 2017; Steffen et al., 2015; McNeill & Engelke, 2016). Sin embargo, esta literatura no profundiza en los motores sociales específicos, y supone que la humanidad es un impulsor homogéneo desconociendo las persistentes desigualdades sociales y las enormes diferencias en las presiones ambientales a nivel internacional y regional y en diferentes grupos de la sociedad (Pichler et al., 2017, pp. 32-33).

Todas estas preocupaciones despertaron en algunos economistas el interés por defender la naturaleza frente a los daños causados por las prácticas asociadas al crecimiento económico. “Lawrence Goulder,

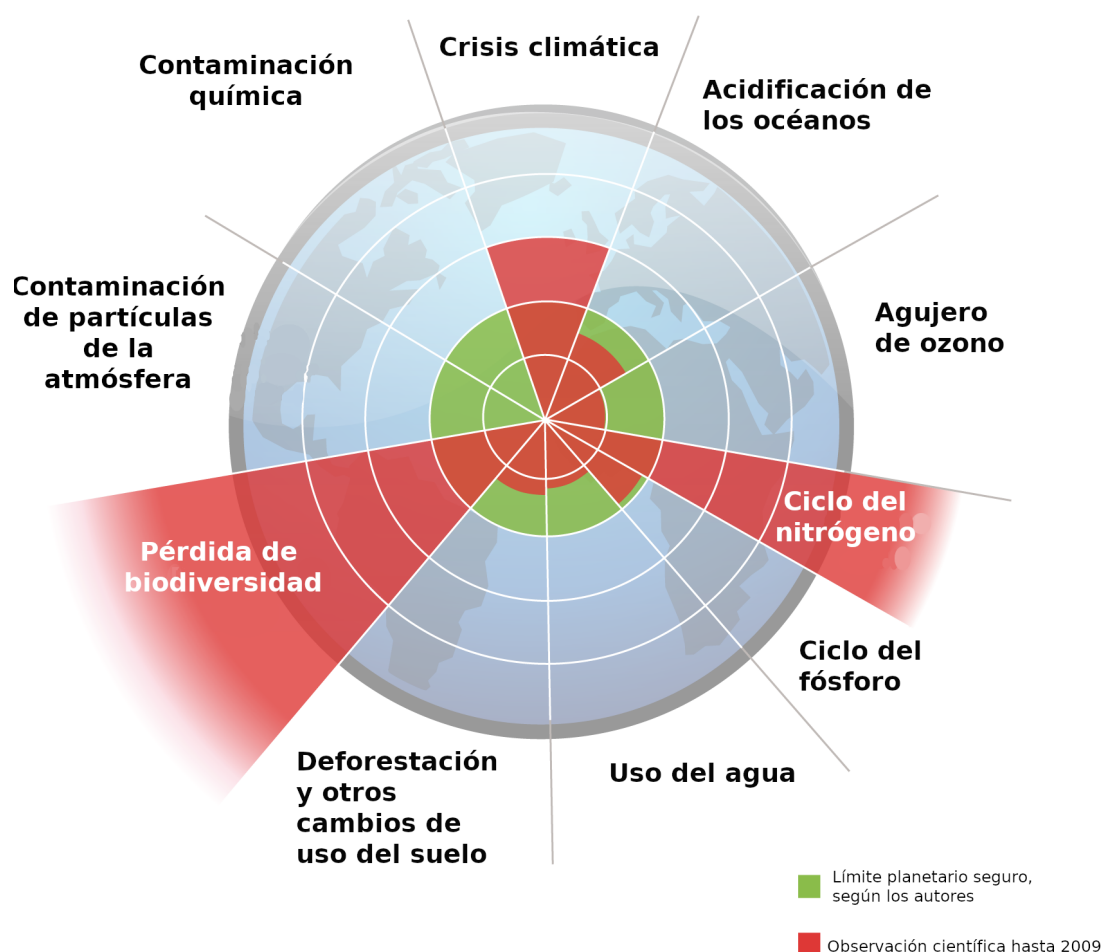


Figura 1. Límites planetarios

Fuente: Johan Rockström, Stockholm Resilience Centre et al, 2009

profesor de economía ambiental y de los recursos de la Universidad de Stanford, explica: 'En el pasado, muchos grupos de apoyo creían que la economía trataba de cómo obtener ganancias o maximizar ingresos. Muchos economistas se están dando cuenta de que la disciplina ofrece un marco de asignación de recursos donde éstos no sólo son el capital y el trabajo, sino también los recursos naturales' (Vascellaro, 2005 citado por (Mankiw, 2012, p. 37)).

Esta sección presenta tanto un análisis bibliométrico, como también una revisión detallada de literatura que reúne los aporte teóricos y conceptuales en torno a las relaciones Economía y Recursos Naturales, haciendo énfasis en la Economía Ecológica. La develación teórica tendrá por objetivo soportar los fundamentos conceptuales que permiten entender el papel de la naturaleza en los procesos de producción, resaltando sus aportes en la generación de valor económico. Ello permitirá entender la función de producción desde una perspectiva más amplia que incluya no solo el capital y el trabajo sino también los RRNN.

1.1 Economía y Recursos Naturales

Durante siglos, las actividades económicas de la sociedad se centraron en la agricultura, donde los factores de producción clave eran la mano de obra, la fuerza animal y la tierra. El aporte de los fisiócratas, liderado por François Quesnay en 1750, fue fundamental para comprender el papel predominante de la naturaleza en este contexto. "En claro contraste con el pensamiento mercantilista dominante -que otorgaba al oro un lugar privilegiado-, Quesnay creía que la tierra representaba la fuente de todo valor" (Mazzucato, 2019, p. 49). Según esta escuela de pensamiento, los excedentes de las actividades económicas deben ser dirigidos al sostenimiento del medio natural y del recurso humano como un sinónimo de respeto por la naturaleza, para así preservar la sustentabilidad del sistema económico (Pérez-Rincón, 2018). Passet (1996), en este mismo tono, lo expresaría como: "los hombres cuya existencia depende básicamente de la agricultura son sabedores de la necesidad de respetar el orden cósmico" (p. 76).

Mazzucato (2019) describe que, para Quesnay, la naturaleza nutre a los humanos al proporcionar materias primas para la creación de nuevos bienes: el grano de las pequeñas semillas para la comida, la madera de los árboles y los minerales de la tierra para la construcción de viviendas, embarcaciones y maquinaria. A diferencia de los seres humanos, que no pueden crear valor, sino que solo son capaces de transformarlo, la agricultura, la cría de animales, la pesca, la caza y la minería canalizan la abundancia de la naturaleza hacia la sociedad. Quesnay consideraba este tipo de actividades como productivas. Sin embargo, otros sectores de la economía, como los hogares, el gobierno, los servicios y la industria, son etiquetados como improductivos.

Esta misma clasificación (Figura 2), condujo a una separación de clases en las que los granjeros y otras ocupaciones relacionadas con

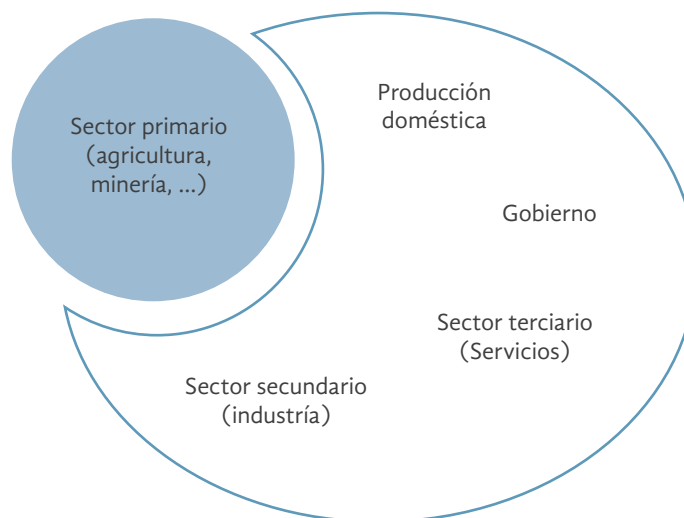


Figura 2. El límite de producción en el siglo XVIII
Fuente: Mazzucato, 2019

el trabajo de la tierra y el agua, eran la única clase productiva; le seguían los fabricantes y artesanos quienes realizaban el proceso de manufactura -Quesnay seguía considerando que no agregaban valor a la economía, sino que se trataba de un proceso de circulación del valor existente-; por último, estaban los terratenientes, nobles y clérigos, quienes poseían la tierra y no daban nada a cambio (Quesnay, 1758; Mazzucato, 2019).

En lo que podría denominarse una era preindustrial, la economía se sustentaba en gran medida en la agricultura y la extracción de materias primas de la tierra. En este contexto, el crecimiento económico estaba directamente ligado a la capacidad productiva de la tierra, cuya oferta era estática o fija. Por lo tanto, los aumentos en la producción se veían limitados por la disponibilidad de nuevas tierras cultivables o la explotación de áreas menos propicias para la agricultura. Esta situación provocó una transformación significativa en el pensamiento económico, que culminó años después en el establecimiento de la teoría económica clásica, gracias a las contribuciones de Adam Smith, David Ricardo, Thomas Malthus, John Stuart Mill y Karl Marx² quienes, a diferencia de los fisiócratas, postulaban que "la riqueza se generaba a través del trabajo humano y no exclusivamente mediante la tierra cultivable o la agricultura" (Pacheco-Flórez y Melo-Poveda, 2015, p. 112). Pero para quienes, además, el poder del mercado estimula tanto el crecimiento económico como la innovación, aunque por otro lado eran pesimistas respecto a las perspectivas de crecimiento infinito a largo plazo" (Pearce y Turner, 1995, p. 32).

Frente a la limitación del factor tierra y su consiguiente generación de rendimientos decrecientes, los economistas clásicos, comenzando por Adam Smith, enfatizaban que la especialización del trabajo era

2. Aunque este último no puede entenderse como economista clásico.

la principal fuente de productividad. Según Mazzucato (2019, p. 57), "una simple reorganización del trabajo sin maquinaria, en la que cada trabajador se especializaba y desarrollaba habilidades en un área específica, le permitió sostener su argumento". Este análisis fue profundizado por economistas posteriores como David Ricardo y Thomas Malthus, quienes, a partir de sus descubrimientos sobre salarios, renta (de tierra y trabajo, sin considerar el capital como un factor valioso), y productividad agrícola, concibieron a la economía como una máquina de crecimiento, aunque con limitaciones impuestas por la naturaleza.

Adam Smith, además, sentó las bases del liberalismo económico que promulgó la maximización de beneficios constituida por principios éticos egoístas, donde además el sistema económico actúa de manera independiente de la naturaleza. Para Gómez-Baggethun et al., (2010), esto representa un primer 'rompimiento epistemológico' entre naturaleza y economía.

Para Thomas Malthus (1766-1834), la restricción impuesta por la naturaleza al crecimiento económico se manifestaba en la oferta limitada de tierra agrícola de buena calidad, lo que resultaba en rendimientos decrecientes en la producción agrícola. En este contexto, el crecimiento de la producción de alimentos ocurría en términos aritméticos debido a la escasez absoluta causada por la cantidad fija de tierra disponible. Contrario al crecimiento de la población que se producía en términos geométricos. Esto implicaba una reducción en la oferta de alimentos per cápita (Malthus, 1798).

Por otro lado, David Ricardo (1772-1823), centraba su análisis en el que el crecimiento económico desaparecerá en el largo plazo debido a la escasez de recursos naturales y, en contraposición a Malthus, para Ricardo los rendimientos decrecientes se originaban por los cambios en la calidad de la tierra y no por el límite de escasez absoluta, que haría que la población movilizara su mano de obra hacia tierras más productivas.

En la Figura 3, se ilustra cómo desde el punto de vista ricardiano, la producción en el largo plazo tiende a un estado estacionario (Estado Estacionario 1) como resultado de la interacción de los factores de producción (capital, tierra y trabajo), población y salarios. El modelo asume que "toda la economía funciona como una enorme granja en la que se realiza un cultivo mediante la aplicación de dosis homogéneas de capital y trabajo a una superficie de tierra dada de calidad variable (...). El crecimiento de la población fuerza el descenso de los salarios hasta el nivel de subsistencia. Los beneficios se reducen a lo largo del tiempo hasta que la inversión y el crecimiento económico cesan en el estado estacionario" en Pearce y Turner (1995, p. 34).

Bajo rendimientos decrecientes, la producción total se mantiene fija cuando no hay progreso o innovación técnica (PT 1). En cambio, con los procesos de innovación entre los que se encuentran: abonos artificiales, riegos, drenajes, etc.; la curva de producción total se desplazaría de forma ascendente (PT 2), aumentando el output por unidad de input e impidiendo llegar rápidamente al estado estacionario (Estado estacionario 2).

A diferencia de Malthus y Ricardo, John Stuart Mill (1806-1873) agrega el progreso técnico o innovación a sus análisis de crecimiento económico como una actividad deseable para alcanzar el estado estacionario en el cual la sociedad cuente con los requerimientos de materiales necesarios para luchar por la educación, la estética y otros objetivos como el cuidado ambiental, las artes, y otros aspectos superiores de la vida, sin requerir de más crecimiento económico. Es decir, estos tres autores incorporan los límites de la naturaleza dentro de sus aportes, sin embargo, J. Stuart Mill, concedía a la innovación un carácter normativo dentro de los procesos productivos que permite contrarrestar otro tipo de problemas de la sociedad en el largo plazo.

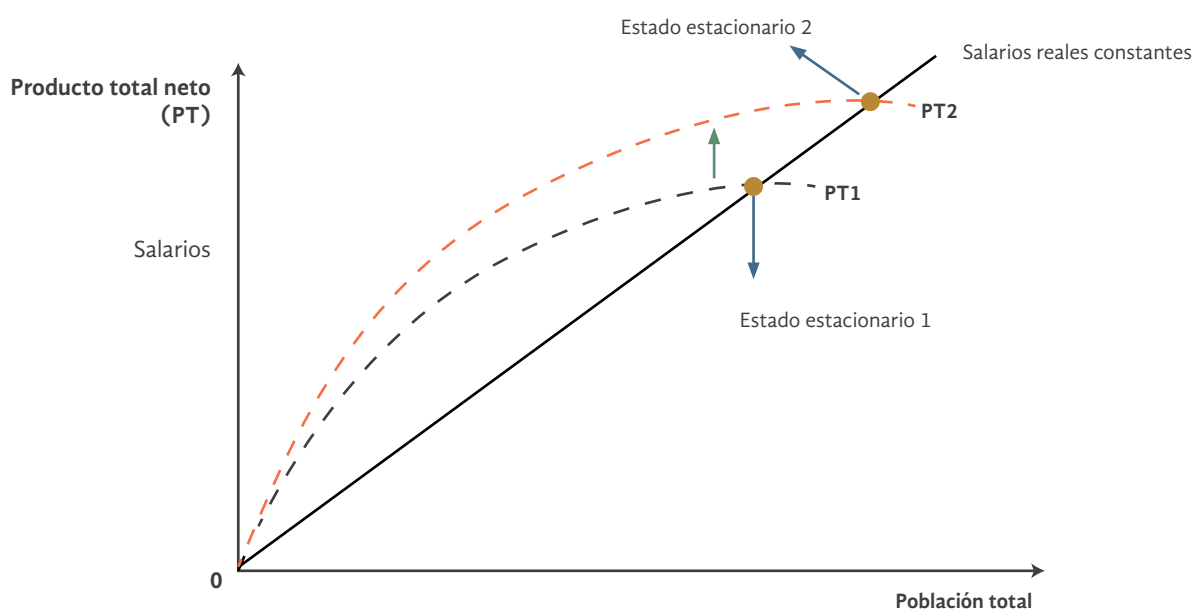


Figura 3. Modelo de producción ricardiano con un solo bien
Fuente: elaboración propia con base en Pearce y Turner (1995)

Por su parte Karl Marx (1818-1883), le reconoce gran importancia a la naturaleza, siendo además el primero en utilizar desde las ciencias sociales el concepto de metabolismo social para referirse a la relación seres humanos-naturaleza (Pérez-Rincón, 2018). “El metabolismo constituye la base sobre la que se sustenta la compleja red de interacciones necesarias para la vida y sobre la que se hace posible el crecimiento” sustenta John Bellamy Foster en su clásico libro sobre “*La Ecología de Marx*” (Foster, 2004, p. 251). Para él, el progreso técnico -definido como avance material y tecnológico- se obtiene a partir de la explotación de la naturaleza, es decir, “la naturaleza estaba ahí para ser humanizada por medio de la ciencia para que su valor inherente pudiera ser convertido en valor de uso” (Pearce y Turner, 1995).

Marx, además, consideraba que un sistema productivo capaz de reproducirse era la base viable de una sociedad y de los procesos de producción. Con ello, afirmaba que “los sistemas naturales suponen un límite a la reproducción, a la consistencia económica y a las políticas de la sociedad” (Pearce y Turner, 1995). Esta visión marxista cataloga de no sustentable al sistema económico capitalista puesto que no cumple con la condición de reproducción dado el deterioro ambiental y la carga contaminante generada por la fabricación de nuevas tecnologías y la expansión de las fronteras extractivas. Para sustentar este argumento Marx utiliza el concepto de “*fractura metabólica*”, que denota el extrañamiento material que se da en este modelo de producción entre los seres humanos y la tierra, violando las condiciones de sustentabilidad impuestas por la naturaleza (Foster, 2004, p. 252). La búsqueda de mayores ganancias por parte de los empresarios dentro del sistema capitalista promueve el aumento de la productividad a través de nuevas tecnologías que reemplazan mano de obra y a través de reformas legales que potencialicen la privatización de la naturaleza. Esto permitirá identificar nuevos sectores de acumulación de capital donde las actividades extractivas se vuelven un objetivo ampliando las fronteras de extracción y acaparando recursos bajo lo que se ha denominado *acumulación por desposesión*, saqueando y expulsando a los sectores sociales que tradicionalmente han usado estos recursos (Harvey, 2003). Todo ello conlleva una externalización de las externalidades ambientales generando mayor contaminación y ampliando la demanda de RRNN, haciendo que la base ecosistémica se vea crecientemente deteriorada en todas las escalas. Ahí aparece la segunda contradicción del capitalismo expresada en costos de producción crecientes asociados a contaminación, agotamiento de recursos naturales, incremento de costos de salud, menor productividad de los obreros y mayores conflictos ambientales que en conjunto disminuyen la tasa de ganancias (O'Connor, 2001).

Sintetizando se puede decir, entonces, que la naturaleza (N) para la escuela clásica:

1. Es importante por su valor de uso.
2. Es un factor limitante del crecimiento económico al infinito
3. Tanto el trabajo, capital y los recursos naturales son fuentes de valor y de riqueza.

De manera que la función de producción que reúne el pensamiento de la escuela clásica se representa asociando la cantidad de producto como función de capital (K), trabajo (L) y Naturaleza (N), así:

$$Y=f(K,L,N)$$

En forma paralela, a partir del siglo XVII, Europa enfrentó transformaciones sociales caracterizadas por decisiones de tipo institucional frente a las actividades productivas. Inglaterra instaure, entre 1750 y 1860, una serie de leyes parlamentarias conocidas como *Enclosure Acts*, dando paso al ‘cercamiento de los campos abiertos’ (*open fields*) y la sustitución de las granjas familiares a pequeña escala por explotaciones “capitalistas” a gran escala (Allen, 2004). Estos, como lo expresa McElroy (2012), fueron algunos de los factores que condujeron a la Revolución Agrícola.

McElroy (2012) también expone que, hasta mediados del siglo XVII aproximadamente, la agricultura se basaba en grandes campos agrícolas abiertos utilizados por la población que habitaba esos territorios, la cual tenía derechos de acceso y tendía a dividirse en franjas estrechas para el cultivo; en cuanto a los páramos, considerados como áreas improductivas, la población rural los utilizaba para pastar animales, cosechar pasto, pescar, recolectar leña o beneficiarse de otra manera. Las Leyes de Cerramiento Británicas eliminaron los derechos de la población local a las tierras rurales que a menudo habían utilizado durante generaciones. Ocasionalmente que estas tierras explotadas por pequeños propietarios y trabajadas por campesinos sin tierras, se vendieran o abandonaran, puesto que los mismos no tenían los recursos suficientes para afrontar los costos asociados al cercamiento. En algunas ocasiones, como retribución a los desplazados, les ofrecían tierras alternativas de menor extensión y calidad, a veces sin acceso a agua o madera; mientras que otros se vieron en la obligación de trabajar como agricultores arrendatarios para los grandes terratenientes o emigrar a la ciudad.

En cuanto a las tierras, el cercado posibilitó incrementar el tamaño de las explotaciones agrarias que había hasta la época, convirtiéndolas en grandes territorios de propiedad privada e individual, transformándose con el paso del tiempo en granjas como empresas agrarias modernas (Garnacho, 2018). Los terratenientes, con mejor capacidad para invertir e introducir nuevas técnicas de cultivo y prácticas agrícolas como la rotación de cultivos, permitieron aumentar considerablemente la productividad por trabajador y por hectárea. Pues, aunque el número de agricultores disminuía con respecto a la población activa, los cambios tecnológicos e institucionales aumentaron los rendimientos agrarios (Deane, 1977).

Screpanti y Zamagni (1997) destacan que, a principios del siglo XIX, en medio de estas profundas transformaciones y una notable inestabilidad económica, social y política, surgieron los principales aportes de la teoría neoclásica. Durante este periodo, la sociedad transitó de depender de los recursos naturales de la tierra a convertirse en una sociedad industrial,

donde la maquinaria desplazó el papel del suelo, convirtiéndose en la nueva tecnología catalizadora del crecimiento económico.

Con los planteamientos de autores como William Stanley Jevons, Carl Menger, Leon Walras, Francis Ysidro Edgeworth, Alfred Marshall y Vilfredo Pareto, la economía neoclásica, centrada en el estudio de la utilidad, el equilibrio y el mercado, dio origen a teorías como la elección del consumidor y la producción. En este enfoque, ya no se consideraban las limitaciones físicas impuestas por la productividad de la tierra, debido a la eficiencia de las máquinas que facilitaron el proceso de producción y, con ello, aumentaron la dinámica económica con los recursos disponibles (Pacheco-Flórez y Melo-Poveda, 2015, p. 113). De este modo, se da una ‘ruptura epistemológica total’ entre naturaleza y economía donde la función de producción (Y) queda dependiente de solo factores humanos: capital (K) y trabajo (L), tal y como se representa en la siguiente ecuación:

$$Y=f(K,L)$$

Si bien se comentará con mayor claridad y profundidad sobre la función de producción en la sección de metodología, es pertinente en este punto desarrollar brevemente algunos planteamientos que surgieron bajo el análisis de Robert Solow (1956). Modificando algunos supuestos del modelo Harrod-Domar, Solow consideró que “la producción se lleva a cabo con ayuda de dos factores de producción, capital y trabajo y que esta se caracteriza por tener retornos constantes a escala por lo cual la función de producción es homogénea de grado uno. Esto equivale a suponer que no hay escasez de recursos como la tierra, ya que si esta restricción aparece se conduciría a retornos decrecientes a escala

en el trabajo y el capital por lo que el modelo tendría un sentido más Ricardiano, es decir existiría limitaciones a la producción impuestas por la disponibilidad de tierra” (Solow, 1956, p. 67).

El planteamiento de Solow ha sido un punto de referencia para los investigadores del crecimiento económico, quienes han empleado su modelo en diversos análisis, incorporando y modificando supuestos. Sin embargo, uno de sus soportes centrales es la no existencia de escasez de recursos naturales. En respuesta a este planteamiento aparecen autores que investigan el papel de los recursos naturales en la generación de valor económico y de externalidades (Coase, 1960; Mishan, 1971; Naredo, 1987)³. La crítica central a esta postura proviene del cuerpo general de la Economía Ecológica (EE) que señala que la economía corresponde a un sistema abierto el cual es soportado por una base material y ecosistémica y al que entran recursos materiales y energéticos, pero también salen desperdicios y energía degradada. En esa perspectiva, la EE rescata el papel de la naturaleza en la generación de valor, pero examina igualmente las presiones o impactos ambientales inherentes al proceso económico dada la influencia de las leyes de la termodinámica. De tal manera, la función de producción de la economía ecológica, como veremos con detalle más adelante, rescata el papel de los diferentes RRNN que entran como insumos a la actividad productiva, analizando de la misma manera los impactos o presiones ambientales.

En síntesis, a lo largo de esta historia contada, la función de producción ha tenido cambios en su formulación, interpretación y supuestos considerados en relación con el papel de los diferentes factores de producción. En la siguiente tabla, se presenta una síntesis de estos desde las diferentes escuelas de pensamiento económico.

Escuela económica	Función de producción	Variables
Fisiócratas	$Y=f(L,N)$	Y: Cantidades producidas L: Mano de obra N: tierra y animales
Clásicos	$Y=f(L,K,N)$	Y: Cantidades producidas L: Mano de obra K: Capital físico N: Naturaleza (tierra)
Neoclásicos	$Y=f(L,K,A)$	Y: Cantidades producidas L: Mano de obra K: Capital físico A: Cambio técnico
Economía Ecológica	$Y=f(L,K,N)$	Y: Cantidades producidas L: Mano de obra K: Capital físico N: Naturaleza: función abastecedora = insumos naturales productivos (tierra, agua, energía, materiales y diferentes servicios ecosistémicos); función asimiladora (servicios de soporte, regulación y asimilación ambiental)

Tabla 1. Funciones de producción según escuela económica

Fuente: elaboración propia

[16]

3. El primer acercamiento a este análisis lo realizó Pigou en 1920.

1.2 Economía Ecológica

“La Economía Ecológica estudia el metabolismo social y por tanto contabiliza los flujos de energía y los ciclos materiales en la economía humana, analiza las discrepancias entre el tiempo económico y el tiempo biogeoquímico, y estudia también la coevolución de las especies (y de las variedades agrícolas) con los seres humanos. *El objeto básico de estudio es la (in)sustentabilidad ecológica de la economía, sin recurrir a un solo tipo de valor expresado en un único numerario*” (Martínez Alier y Roca-Jusmet, 2013, p. 21).

“Como un campo de estudio transdisciplinar para la gestión de la sostenibilidad, con una riqueza teórica y práctica, la Economía Ecológica es relevante para los desafíos a los que nos enfrenta la actual crisis socioecológica, con el fin de entender y actuar frente a esta compleja situación, ya que la Economía Ecológica, como las demás ciencias socioambientales (...), busca un cambio de paradigma científico desde miradas que institucionalizan la separación y la unidimensionalidad hacia miradas que crean nuevas instituciones para la integración y la multidimensionalidad” (Azamar et al., 2021, p. 11).

La Economía Ecológica (EE), entendida como una transdisciplina que estudia la gestión de la sustentabilidad, surge institucionalmente en 1987 como respuesta a la aparición de los grandes problemas ambientales del mundo actual que no podían ser abordados adecuadamente por las ciencias naturales o exactas tradicionales y por las mismas ciencias sociales (Pérez-Rincón, 2024). Dado que afrontar los problemas ambientales pasa por entender la interacción de dos sistemas complejos: el sistema social y el sistema ecológico que lo sustenta (Daly y Farley, 2011), la EE se presenta como un medio para estudiar las relaciones entre la economía, la sociedad y el ambiente. A diferencia de la economía ambiental, que se origina dentro del mismo marco teórico de la economía ortodoxa, la EE se desarrolla no como una disciplina o un área de la economía, sino como una interdisciplina o transdisciplina que articula diferentes tipos de conocimiento, saberes y especialidades académicas y no-académicas (Pérez-Rincón, 2024). Esta misma realidad sirve para la aparición de diferentes ciencias interdisciplinares que estudian las relaciones sociedad-naturaleza desde otras perspectivas, como lo analiza Joan Martínez Alier y José Carlos Silva-Macher en su capítulo “Las Ciencias Socioambientales” del libro *Economía Ecológica Latinoamericana*:

“La Economía Ecológica no es una subdisciplina de la economía como se asume algunas veces, sino un campo de estudio interdisciplinario que cuenta con una revista científica muy reconocida, *Ecological Economics*, fundada en 1989, junto con la Sociedad Internacional de Economía Ecológica (*International Society for Ecological Economics*, ISEE), que actualmente reúne a un conjunto de sociedades de economía ecológica regionales, entre ellas las de

América Latina. Sus palabras clave son la sustentabilidad “fuerte” y “débil”, el pluralismo de valores, la relevancia de la termodinámica para la economía (la economía no es circular, sino entrópica), y la evaluación multicriterial participativa. (...) Por ejemplo, la economía se podría enseñar tratando a la economía neoclásica como un periodo más de la historia económica —uno en el que la ciencia económica se construyó al margen de las relaciones con la naturaleza— sin que guíe la estructura de lo que sería un curso de introducción a esta materia (...)” (Martínez-Alier y Silva-Macher, 2022, pp. 38-40).

1.2.1 Bases conceptuales de la EE

En el centro del pensamiento de la EE subyacen varias perspectivas académicas, como la visión termodinámica de la economía, introducida por Nicholas Georgescu-Roegen en su libro *La ley de la entropía y el proceso económico* (1971). Aquí, el matemático-economista realiza una crítica biofísica a la economía neoclásica al afirmar que “el proceso económico consiste esencialmente en un cambio cualitativo de energía y materia dictado por las leyes de la termodinámica” (Pérez-Rincón, 2024, p. 72). Igualmente, otras influencias de la EE tienen origen en las ciencias básicas. Desde la *biología*, por ejemplo, se resalta la introducción del término *biofísica*, por el biólogo matemático Alfred Lotka (1880-1949), y de la *Ecología Humana* por H.T. Odum (1924-2002). Desde la *geología* se encuentran las Curvas de Hubbert (1903-1989) que predecían la disponibilidad futura de combustibles fósiles e inició el debate sobre el pico o cénit del petróleo (Melgar-Melgar y Hall, 2020). En general, estas aportaciones cimentaron las críticas al crecimiento económico desde un enfoque material, además de abonar al debate de la ‘incrustación biofísica de la economía’.

Por su parte, en la primera publicación de la revista *Ecological Economics*, Robert Costanza afirmó que esta transdisciplina se encarga de abordar “las relaciones entre los ecosistemas y los sistemas económicos en el sentido más extenso” (Costanza, 1989). Esta definición es ensanchada tiempo después por el autor, al decir que la EE “*implica una visión amplia, ecológica, interdisciplinaria y holística para poder entender y gestionar nuestro planeta con sensatez ante los crecientes problemas interdependientes del medio ambiente, la población y el desarrollo económico*” (Costanza, 1991, p. 2). De esta manera, la interdisciplinariedad es una piedra angular de la EE, pues permite considerar otras aristas para abordar problemáticas socioecológicas desde abordajes biológicos, físicos, químicos, económicos, políticos, sociales, culturales y éticos (Lizarazo, 2018). En esencia, desde la EE esta amplitud metodológica y conceptual se aborda bajo el marco de la *complejidad*.

Como se puede observar en la Figura 4, un objetivo central de la EE es el estudio de la sustentabilidad de la economía, dado el enfrentamiento permanente entre la expansión económica y la integridad del sistema biofísico.

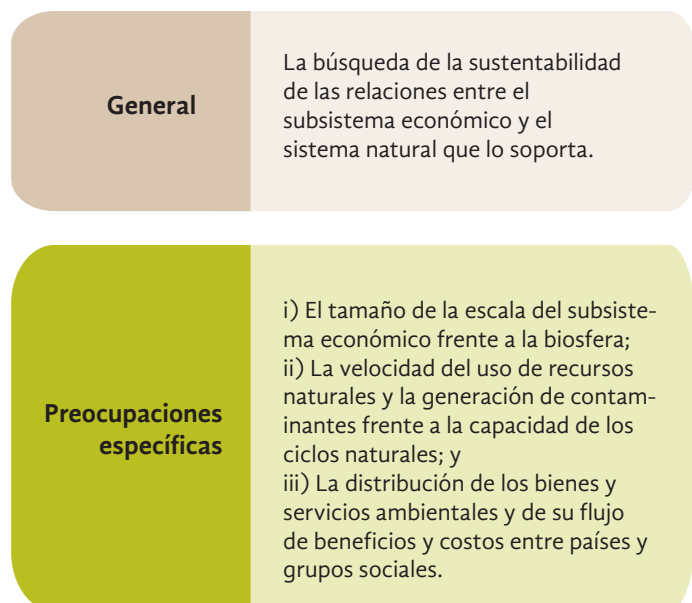


Figura 4. Objetivo General y preocupaciones específicas de la Economía Ecológica
 Fuente: Elaboración propia. Tomado de Pérez-Rincón (2024)

[18]

Las dos primeras preocupaciones específicas abordan la capacidad de soporte de los ecosistemas respecto al nivel y velocidad de la dinámica económica, y se relacionan directamente con el concepto de sustentabilidad. Se busca, por sobre todas las cosas, que el tamaño de la economía no sobrepase las capacidades de la biósfera (Pérez-Rincón, 2018). El tercer objetivo, por su parte, se relaciona con el concepto de Justicia Ambiental (Schlosberg, 2007; Urkidi y Walter, 2011) en términos de equidad intrageneracional (distribución justa de bienes, servicios, RRNN y costos ambientales en la misma generación, entre países y grupos de personas) como de equidad intergeneracional (distribución justa de recursos entre varias generaciones humanas) (Pérez-Rincón, 2018).

Frente al paradigma hegemónico de la economía, la EE suele contrastar su propia visión respecto a la teoría economía neoclásica. De aquí encuentra que, contrario a la visión ortodoxa, la economía no funciona como un sistema cerrado, sino que es un sistema abierto a la entrada de energía y materiales y a la salida de desechos (Figura 5). Como lo expresa Martínez Alier & Roca-Jusmet (2018, pp.17 - 18):

“La Economía Ecológica (...) mira a la economía como un subsistema de un sistema mucho más grande, finito y global que es la biósfera o la Tierra. El planeta Tierra es un sistema abierto a la entrada de energía solar pero básicamente cerrado en la entrada de materiales. Por su lado, el subsistema económico está abierto a la entrada de energía y materiales y produce dos tipos de residuos: calor disipado o energía degradada y residuos materiales que van a la biósfera. Una parte menor de los desperdicios pueden ser reciclados por la actividad humana; otra parte se recicla en forma natural. Pero, si la escala de la economía es muy grande y su velocidad de uso y generación de contaminación es muy rápida (crecimiento económico y del consumo), los ciclos naturales no pueden producir más recursos o asimilar más residuos. Una sociedad no puede mantenerse y subsistir a largo plazo reproduciendo solo los bienes de capital y la fuerza de trabajo. Requiere también mantener un flujo de recursos y de servicios que son producidos por la naturaleza, y para ello debe mantener en ciertas condiciones los ecosistemas que los generan. Así, un objetivo central de la EE es el estudio de la sustentabilidad de la economía, dado el enfrentamiento permanente entre la expansión económica y la integridad del sistema biofísico. Esto lleva a decir que la EE es la ciencia de la gestión de la sustentabilidad”.

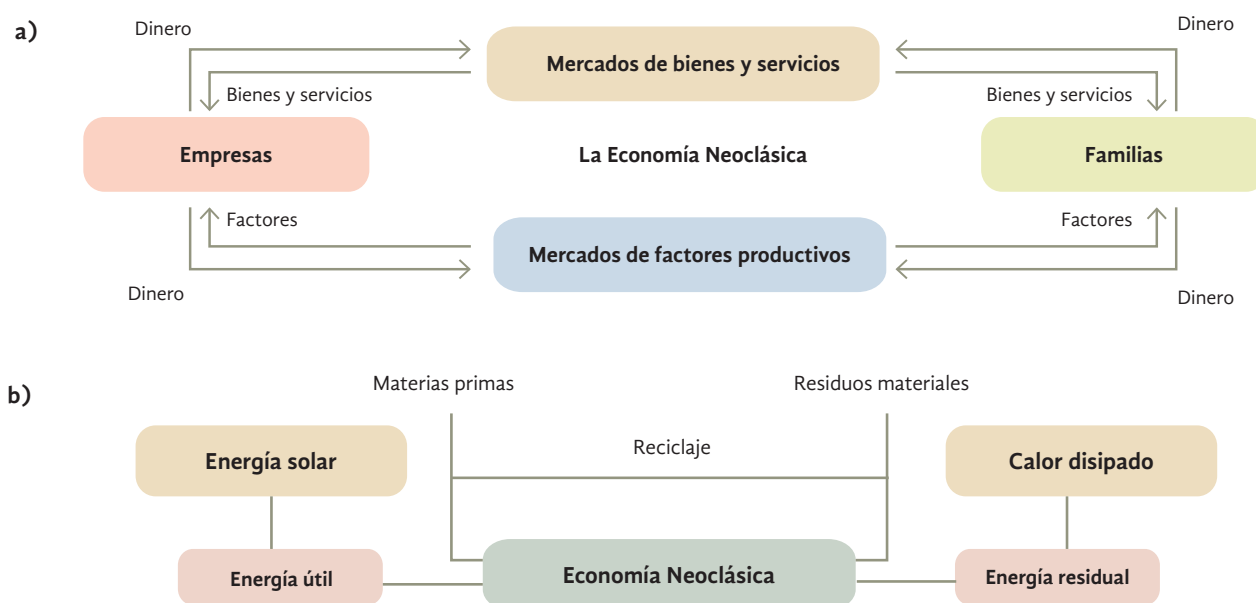


Figura 5. Cosmovisión de la Economía Neoclásica como sistema cerrado (a) y de la Economía Ecológica como sistema abierto (b)
 Fuente: elaboración propia. Adaptado de Martínez-Alier (1998)

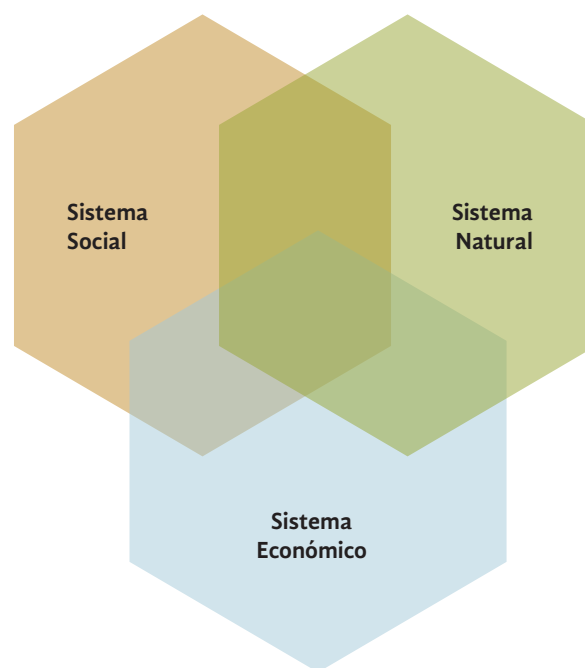
Otros autores como Common y Stagl, en el libro *Introducción a la Economía Ecológica* señalan que la EE es “el estudio de las distintas interacciones entre sistemas económicos y sistemas ecológicos” (Common y Stagl, 2008, p. 1). Bajo estas retóricas, los subsistemas humanos son entendidos como parte de un sistema mayor: la biósfera. Así, los elementos de la esfera económica, incrustada a su vez dentro del sistema social, pertenecen a la biósfera y se rigen por sus leyes.

Las diferencias conceptuales y ontológicas entre la EE y la economía tradicional se ilustran a través de la *Sustentabilidad Fuerte* y la *Sustentabilidad Débil* (Figura 6). Por una parte, la sustentabilidad débil, que corresponde al marco de la economía ortodoxa, adopta una visión reduccionista al considerar los sistemas económico, social y natural como autónomos, pudiendo ser tratados de manera independiente. Esto ignora los límites impuestos por la capacidad del sistema ambiental. En esta perspectiva, plantea que la sustentabilidad se logra en el área donde estos tres sistemas se interceptan, siendo zonas de contradicción y conflicto las que están fuera de esa intersección. Además, propone que para que un proceso sea sostenible, el capital físico de la sociedad debe mantenerse o aumentar a lo largo del tiempo. De este modo, el agotamiento de los recursos naturales no sería un problema, ya que puede ser compensado con mayor acumulación de capital fabricado por los humanos (Solow, 1974; Stiglitz, 1974). “La plataforma de solución según la sustentabilidad débil está relacionada con el crecimiento económico que proveerá los recursos necesarios para disminuir la pobreza, financiar soluciones tecnológicas guiadas por el principio de eco-eficiencia y mejorar el financiamiento del estado y la capacidad de las instituciones vinculadas al sector ambiental para promover la conservación” (Pérez-Rincón et al., 2010, p. 39).

Por otro lado, la sustentabilidad fuerte sostiene que “*el universo en general, y el cosmos económico y social en particular, nunca han sido ni serán, sistemas separados del sistema natural, hay que concebirllos integradamente*” (Pérez-Rincón et al., 2010; p. 42). Además, contiene dos características básicas: amplitud y complejidad (Guhl, 2008). La primera, hace referencia a que existe una naturaleza jerárquica en una sola dirección, donde el sistema natural (que es el más grande) contiene al sistema social y al económico (los más pequeños), pero que no depende de ellos, y en contravía, los sistemas sociales y naturales están incrustados dentro del sistema natural, y no podrían existir sin él, dado que es su soporte. Así, los elementos de la esfera económica pertenecen a la biósfera y se rigen por sus leyes. Contrario, “todos los elementos de la biósfera no son de orden económico y no están sometidos a sus regulaciones” (Passet, 1975, en Pérez et al., 2024). La segunda, hace referencia a que los problemas ambientales son de carácter complejo. Siendo así, las relaciones entre los sistemas socioeconómico y ecológico “no pueden ser abordadas desde el reduccionismo que busca comprender la totalidad de algo mediante el estudio de sus partes.

La complejidad en la ciencia recupera la incertidumbre, la incapacidad de lograr la certeza, de formular una ley eterna, de concebir un

a) Cosmovisión de la sustentabilidad débil



b) Cosmovisión de la sustentabilidad fuerte

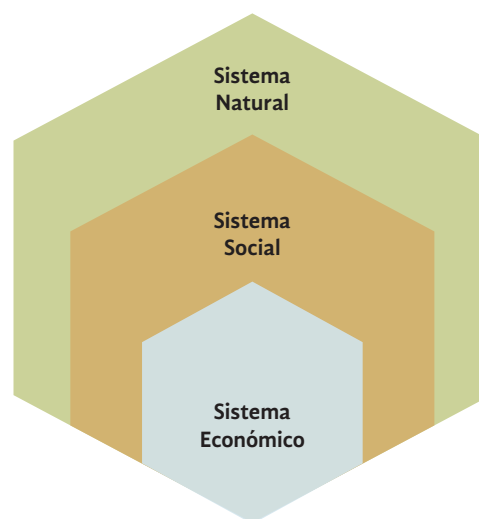


Figura 6. Organización del sistema social y económico en el Sistema Natural según la sustentabilidad débil y fuerte
Fuente: elaboración propia con base en Pérez-Rincón et al. (2010)

orden absoluto” (Pérez-Rincón et al., 2024, p. 105).

Adicionalmente, esta cosmovisión se fundamenta en otros dos puntos de vista: el “escepticismo tecnológico” y el “principio de precaución” (Pérez-Rincón et al., 2010). Estos postulados defienden la idea de que la tecnología es incapaz de evitar las restricciones fundamentales en términos de escasez de energía y materiales, de modo que el crecimiento económico material deberá detenerse aplicando el principio precautorio.

Bajo este orden de ideas, la EE —soportada por la cosmovisión de la sustentabilidad fuerte— se fundamenta en una visión materialista del mundo. Así, busca integrar los límites biofísicos y la capacidad de carga del planeta al análisis económico. Esto implica adoptar

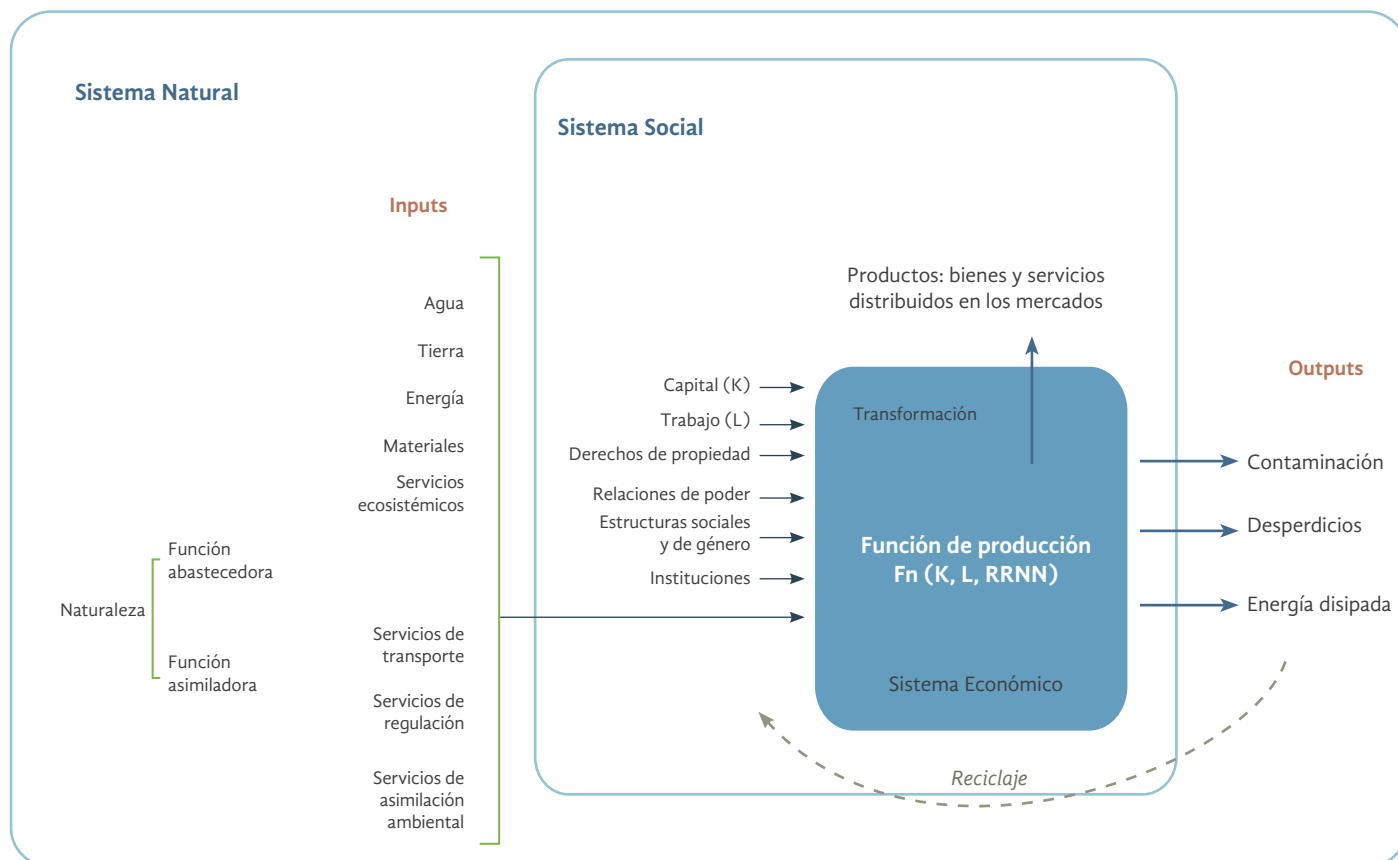


Figura 7. El proceso económico y la función de producción entendidos como un sistema abierto

Fuente: elaboración propia

[20]

metodologías interdisciplinarias que permitan abordar las complejidades y la no-linealidad de los problemas relacionados con la gestión de los RRNN. En esta perspectiva, y recuperando la Teoría General de Sistemas (TGS) propuesta por Ludwig Von Bertalanffy en 1976, el proceso económico y dentro de ello, la función de producción, son concebidos como un sistema abierto con entradas de materia y energía, procesos de elaboración socio-económico-material internos y salida de residuos (Figura 7).

La imagen puede entenderse de la siguiente manera: a través de las entradas se reciben los insumos o elementos a transformarse en el sistema socio-económico, provenientes del sistema natural y social; los procesos se entienden como las actividades socio-económicas expresadas en el trabajo humano que permiten transformar dichos elementos; y las salidas son: bienes, servicios y residuos que se producen como resultado de los procesos de transformación. Aunque los primeros tarde que temprano serán residuos. Finalmente, por procesos de reciclaje imperfecto y por las leyes de la termodinámica, una parte menor del mecanismo se puede retroalimentar para volver a iniciar su ciclo (Osorio, 2008). Al plantear el sistema económico como un sistema abierto, éste se compone de *entradas de capital (K), trabajo (L), derechos de propiedad, relaciones de poder, estructuras sociales y de género, institucionalidad y Recursos Naturales (RRNN)* que son introducidas para desarrollar el proceso, que en este caso es la *función de producción económica*. Este proceso genera

salidas, es decir, contaminación, residuos y energía disipada, las cuales, algunas se pueden medir en términos de *Huella Hídrica Gris, Huella de Carbono, Huella Ecológica* y otras huellas.

Considerar la economía como un subsistema de la biosfera y del sistema social, abierto a la entrada de recursos materiales y energéticos y a la salida de residuos, ofrece nuevas perspectivas para comprender la función de producción, que también depende de diversos insumos naturales. Tomando lo expresado por León et al. (2020):

“Para satisfacer las diversas necesidades y deseos materiales de los seres humanos organizados en sociedad, se requiere que el sistema económico produzca y circule los respectivos satisfactores para que sean consumidos por la población, procesos económicos que dependen de la extracción y transformación de recursos naturales biológicos, minerales y energéticos. Una vez transformados los recursos extraídos de la naturaleza en bienes económicos, estos son consumidos, acumulados en stocks físicos, reciclados o convertidos en residuos que retornan al medio ambiente natural” (p. 9).

Un proceso similar y aún más complejo se da en la producción agrícola, el cual es extensivo a la caña de azúcar. Los insumos naturales a considerar serían muchos y variados: los insumos biológicos como el microbioma o microbiota (hongos, bacterias, actinomicetos y protozoos), los fertilizantes naturales y artificiales, los insectos, la

radiación solar, el agua, los minerales básicos (nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), etc.) y los complementarios (manganeso, zinc, hierro, cobre, boro, molibdeno, etc.), el trabajo humano, la densidad energética requerida para poner en marcha el proceso productivo, etc. Y si a esto se agregan los servicios ecosistémicos incluyendo por ejemplo las condiciones hidroclimatológicas correspondientes a la zona de estudio y las externas (por ejemplo, el papel de la Amazonía en ser factor determinante de las condiciones del clima e hídricas en el Valle Geográfico del Río Cauca), la cuantificación de los RRNN se convierte en una labor compleja e imposible. Ello obliga a seleccionar solo algunos de los recursos, en este caso los más directamente implicados en el cultivo de caña de azúcar: tierra (extensión o superficie de tierra sembrada), agua (requerimientos de agua para la producción), materiales (fertilizantes como nitrógeno, fósforo y potasio) y energía (requerimientos calóricos).

En forma específica, el proceso productivo de la caña de azúcar como sistema abierto se presenta en la Figura 8. En este, el sistema natural (abiótico y biótico) y el sistema social le otorgan al subsistema económico el capital, la mano de obra, el agua, la tierra, los fertilizantes, las semillas y la energía. Estos son transformados por el sistema económico/productivo⁴ en caña de azúcar, azúcar, etanol, bagazo, melazas, y otros subproductos que salen para ser consumidos por la sociedad. Luego, este

proceso de transformación genera salidas que van a la atmósfera, al suelo o al agua como calor disipado, desperdicios y contaminantes. Estos los expresamos en nuestro trabajo como indicadores de presión ambiental (Huella Hídrica Gris, Huella de Carbono y Huella Ecológica)⁵.

La complejidad de los tres sistemas integrados (economía, sociedad y ambiente) involucra sus propios subsistemas. Así la tierra, por ejemplo, como factor productivo es también un bien natural que forma su propio ecosistema con elementos físico-químicos y biológicos que son inobservables a simple vista y se integran con otros elementos como el agua, la biodiversidad a través de la microbiota y el aire en relación con sus características hidroclimatológicas que también son un ecosistema abierto. En este sentido, tratar de incluir en los análisis lineales como este que hacemos acá a través de una simple ecuación de dependencia, el papel de la naturaleza en el proceso económico agrícola resulta bastante limitante. De ello somos conscientes. También, hay conciencia que este intento puede resultar una contradicción con el marco conceptual de la Economía Ecológica basado en el pensamiento complejo. Sin embargo, creemos que, a pesar de ello, resulta valioso evidenciar el papel de la naturaleza en la función de producción para contribuir al debate establecido hace tiempo entre Georgescu-Roegen, respaldado por Herman Daly, frente a Solow y Stiglitz y que fue objeto de un número especial de la revista de economía ecológica (Daly and Stiglitz en *Ecological Economics*, 1997).

[21]

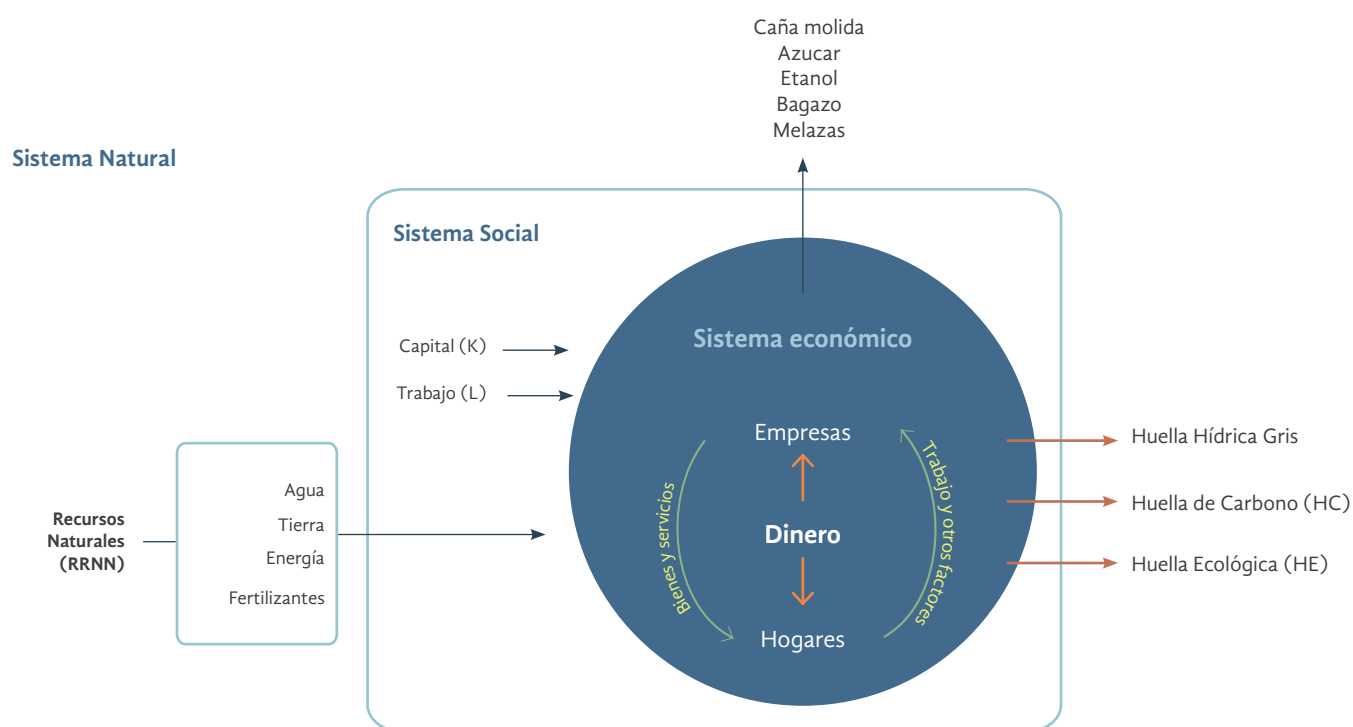


Figura 8. Metabolismo social y flujo de materiales para la caña de azúcar
Fuente: elaboración propia

4. Se establece un sistema económico simple en el que el flujo de ingreso se da únicamente por parte de las empresas y los hogares, en este escenario se supone no hay gobierno ni comercio exterior para simplificar el análisis.

5. Ver texto Vol. No. 3: "Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica del Cultivo de Caña de Azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, Colombia (1960-2022)".



Estado del arte sobre el papel de la naturaleza en

Capítulo 2: la función de producción

[22]

El presente estado del arte tiene como objetivo revisar las principales contribuciones teóricas y empíricas que han abordado la interacción entre los recursos naturales y las actividades productivas. Para ello, se realizaron búsquedas en las bases de datos Scopus y Google Scholar, utilizando términos como “función de producción”, “naturaleza” y “recursos naturales”. Esto arrojó un total de 64 artículos, de los cuales solo 32 presentaban un enfoque relacionado con esta investigación que esta orientada específicamente al sector agrícola. Para afinar los resultados, se añadió el término “agricultura” en la búsqueda, seleccionando así aquellos estudios que abordaban metodologías y conclusiones relativas a la contribución de los recursos naturales en la producción agrícola, siendo al final 21 artículos.

Este capítulo se estructura partiendo del debate entre Georgescu-Roegen y Herman Daly, representando a la Economía Ecológica (EE) frente a Robert Solow y Joseph Stiglitz en representación de la Economía Tradicional de corte ortodoxo sobre el rol de la naturaleza en la creación de valor a partir de la función de producción. Este debate fue publicado como un número especial a la memoria de Georgescu-Roegen en el volumen 22 número 3 en *Ecological Economics Journal* (1997), el cual inicia con el texto titulado “*Answering Georgescu-Roegen*” escrito por Herman Daly. Este intercambio teórico es clave como punto de partida para orientar las discusiones al respecto. Posteriormente, se describen de manera sintética los modelos propuestos para integrar a la Naturaleza en la función de producción, entre ellos el modelo bioeconómico y otras metodologías utilizadas para la cuantificación de los recursos naturales en estas funciones en la agricultura.

Debate Georgescu-Roegen/Daly vs. Solow/Stiglitz

Tras haber revisado las bases conceptuales que diferencian a la economía tradicional de la economía ecológica, es crucial adentrarnos ahora en un debate que ilustra en forma específica estas divergencias teóricas. Mientras la economía tradicional tiende a subestimar los

límites biofísicos del planeta, confiando en la capacidad infinita del progreso tecnológico para superar los desafíos de la escasez y de los límites, la economía ecológica enfatiza la imposibilidad de separar los procesos económicos de las leyes de la naturaleza. Esta tensión se manifiesta con claridad en la confrontación entre dos enfoques opuestos frente al papel de la naturaleza en la función de producción: el optimismo tecnológico de Robert Solow y Joseph Stiglitz, y la postura biofísica de Nicholas Georgescu-Roegen y Herman Daly.

El debate sobre la sustentabilidad y el uso de los recursos naturales ha estado marcado por dos grandes corrientes de pensamiento: por un lado, la visión neoclásica defendida por Robert Solow y Joseph Stiglitz, y por otro, la perspectiva biofísica impulsada por Nicholas Georgescu-Roegen y Herman Daly. Estas dos posturas difieren profundamente en su concepción del papel de los recursos naturales en los procesos económicos y en la posibilidad de que la tecnología compense su escasez.

Solow y Stiglitz, representantes del enfoque neoclásico, sostienen que la economía es flexible y capaz de adaptarse a las limitaciones impuestas por la escasez de recursos naturales.

Argumentan que, gracias al progreso tecnológico, es posible sustituir los recursos naturales por capital hecho por el ser humano. Para ellos, la innovación tecnológica puede aumentar la eficiencia de los procesos productivos, reduciendo el uso de recursos y mitigando los efectos del agotamiento. De hecho, Solow afirmó que “el mundo puede arreglárselas sin recursos naturales”, una declaración que refleja su confianza en la capacidad del capital tecnológico para suplir cualquier carencia material (Solow, 1974).

En contraposición, Georgescu-Roegen y Daly critican la noción de sustitución ilimitada que proponen los economistas neoclásicos. Su postura enfatiza que la economía está intrínsecamente ligada a las leyes biofísicas y, por lo tanto, existen límites materiales fundamentales al uso de los recursos. La propuesta de Daly, influenciada por los

trabajos de Georgescu-Roegen, introduce la distinción entre "stocks" y "flujos". Mientras que los stocks, como el trabajo y el capital, son los agentes transformadores, los flujos (recursos naturales) son finitos y esenciales para la producción. Por lo tanto, sostienen que no es posible compensar la reducción de estos flujos con más capital, como sugiere el modelo neoclásico (Daly, 1997).

Un punto crítico de la discusión radica en el papel de la tecnología. Solow y Stiglitz ven el avance tecnológico como una fuerza salvadora capaz de resolver los problemas de insustentabilidad ambiental del crecimiento económico mediante la mejora de la eficiencia. Esta se expresa en las posibilidades de sustitución perfecta entre el capital natural (N) y el capital creado por el ser humano (K), haciendo que la producción pueda ser infinita pues la sustituibilidad lo permite. De tal manera, la estrategia es aumentar lo suficientemente K para contrarrestar la pérdida de R (*Recursos Naturales*). Si se incluye el desarrollo tecnológico, con los mismos inputs una variación en p (tasa de cambio técnico) permite una producción exponencialmente creciente. Siendo así, en la economía neoclásica, el agotamiento de los RRNN no representa ningún problema para la posibilidad de un consumo sostenible, e incluso de un crecimiento exponencial del consumo, siempre que supongamos un grado suficientemente elevado de sustituibilidad de R y K, y siempre que confiemos en que seguirá habiendo progreso técnico (Martínez-Alier y Roca, 2018, p. 377).

Por su parte, Herman Daly (en Answering Georgescu-Roegen en *Ecological Economics*, 1997) representando a Georgescu-Roegen, señala que la proposición neoclásica de que se pueda producir sin restricciones ambientales al infinito, a condición de que la inversión en maquinaria y desarrollo tecnológico sea lo suficientemente grande, es un absurdo puesto que la maquinaria es hecha con materiales y energía y asimismo procesa materiales y necesita energía. Además, toda reposición de maquinaria requiere nuevamente de materia y energía para operar. Ello hace evidente que el reemplazo de R por K tenga sus límites. Es más, la propia solución de acumular cada vez más capital para compensar la pérdida de R crea más problemas porque este hecho demandará más R. O como lo señala Georgescu-Roegen (1971, p. 76), "la posibilidad de sustituir al infinito R por el factor capital, debe basarse en una visión muy errónea del proceso económico en su conjunto para no percatarse de que no hay factores materiales fuera de los R. Sostener, además, que "el mundo se las puede arreglar sin R", es ignorar de plano la diferencia entre el mundo real y el Jardín del Edén".

Paralelamente, desde la EE, se hace referencia a la *paradoja de Jevons* para demostrar que las mejoras tecnológicas, lejos de reducir el uso de recursos, a menudo llevan a un aumento en su consumo. Según esta paradoja, un aumento en la eficiencia de un recurso (como la energía) tiende a incrementar su demanda, ya que los usuarios suelen

aprovechar la mayor eficiencia para consumir más, no menos. Esto lo vemos reflejado en fenómenos como la proliferación de automóviles más eficientes, pero con mayor uso de combustible debido al aumento del kilometraje recorrido y a la disminución del número de pasajeros por vehículo (Giampietro, 1994).

De esta manera, las dos corrientes presentan visiones divergentes sobre el concepto de sustentabilidad. Solow y Stiglitz apoyan la idea de la "sustentabilidad débil", que permite la sustitución entre el capital natural y el hecho por el ser humano, siempre que el capital total se mantenga constante. En este modelo, mientras los avances tecnológicos permitan mantener la producción y el bienestar, la economía puede seguir creciendo sin límites. En cambio, Georgescu-Roegen y Daly defienden la "sustentabilidad fuerte", que considera que algunos recursos naturales son insustituibles y que su agotamiento compromete el futuro de la humanidad. Esta visión resalta la necesidad de respetar los límites biofísicos del planeta para lograr un desarrollo verdaderamente sustentable (Pearce et al., 1990).

Por lo tanto, mientras los optimistas tecnológicos como Solow y Stiglitz confían en que el ingenio humano puede superar las limitaciones naturales, Georgescu-Roegen y Daly advierten que la economía no puede desvincularse de las leyes de la naturaleza. La visión material, la dependencia de los recursos naturales y los límites biofísicos del planeta son realidades insuperables que deben estar en el centro de cualquier discusión sobre sustentabilidad.

Modelo bioeconómico y otros métodos de cuantificación aplicada a la función de producción en la agricultura⁶

Las preocupaciones sobre la viabilidad de una economía basada en el crecimiento infinito y sus implicaciones para la biósfera han sido objeto de estudio de autores como el economista y matemático Nicholas Georgescu-Roegen (1971), junto con los economistas William Nordhaus (1992) y René Passet (1996). Sus enfoques multidisciplinarios se inscriben principalmente en el marco de la bioeconomía, un campo que hoy en día se reconoce como economía ecológica. En particular, Georgescu-Roegen rompe con el paradigma tradicional al proponer un modelo bioeconómico que desafía la lógica de los procesos productivos lineales, sugiriendo su transformación en procesos circulares para reducir el impacto sobre los recursos naturales.

$$Q_0(t) = F_i [R(t), I(t), M(t), Q(t), W(t)] : S_i [L(t), K(t), Tr(t)]$$

Donde, Q_0 será la producción en función de unos Stocks (S_i) y unos Flujos (F_i). Estos flujos representan RRNN (R) como la lluvia, la energía solar, el suelo, etc.; insumos (I) como materiales que provienen de otros procesos de producción -para el caso de la agricultura, pueden ser los agroquímicos-; insumos necesarios para mantener el capital intacto (M)

6. La búsqueda bibliométrica arrojó que, haciendo uso de las palabras clave: "función de producción", "recursos naturales" y "agricultura", hay solo 32 artículos en total que relacionan estos temas donde China, Estados Unidos y Alemania son los tres principales países con mayor número de publicaciones. De estos países, China es el de mayor participación con 14 artículos, le sigue Estados Unidos con 6 y Alemania con 3.

como lubricantes para tractores, etc.; producto desperdiciado (W)⁷ que inevitablemente debe sufrir un proceso de transformación para su reincorporación en la función de producción. Además, de incluir el flujo del producto (Q) que es el resultado deseado del proceso que también se autogenera. Por el lado de los Stocks (S_i), se debe considerar el capital físico (K), mano de obra (L) y tierra ricardiana (Tr)⁸.

Por otra lado, Randall y Castle (1985) exponen que la tierra es un concepto central tanto en las ciencias técnicas como en áreas relacionadas con la ingeniería, geología, agricultura y derecho, así como en las ciencias sociales. Aunque la teoría económica tradicional trata la tierra como un factor de producción más, existe un debate persistente sobre si este enfoque es válido, ya que muchos consideran que la tierra tiene un papel especial en la economía. La teoría clásica de la renta económica de Ricardo sigue siendo relevante y se aplica en campos como la economía agraria, de los recursos naturales, urbana y regional, donde el concepto de tierra, actualizado a los tiempos presentes en términos más amplios como ambiente, juega un rol fundamental.

Griliches (1963), utiliza las funciones Cobb-Douglas, “trascendental” y CES (*Constant Elasticity Substitution*, por sus siglas en Inglés), para estimar la contribución de la tierra y los fertilizantes en la producción agrícola de los Estados Unidos. Sus resultados más importantes radican en un llamado a “experimentar con funciones de producción que permitan la no homogeneidad”. El caso de indivisibilidades de importancia práctica no puede ser manejado por la forma de Cobb-Douglas y sus parientes cercanos. La mayor disponibilidad de tiempo de ordenador debería hacer posible la adaptación de funciones de producción no lineales en los parámetros sustancialmente más complicados” (p. 428). En la misma línea de Griliches, Cornia (1985), Kawagoe (1985), Echevarria (1998), Sánchez Álzate (2011) y Mundlak et al., (2012), son consistentes en concluir en algunos limitantes al momento de la estimación utilizando la función Cobb-Douglas. Una observación adicional en todos estos estudios tiene que ver con la omisión de recursos naturales como el requerimiento de agua y energía.

Nordhaus (1992), por su parte, bajo el supuesto de una economía autárquica y tomando como recursos naturales la extensión de tierra, algunos minerales y fertilizantes, concluye que, con una oferta fija de tierra, una dotación de otros recursos naturales escasa y una producción en continuo crecimiento pueden generar un nivel de contaminación y de destrucción del medioambiente que ponga fin al proceso de crecimiento.

Luego, Yang et al. (2004) retoman la discusión sobre la naturaleza en las actividades agrícolas con su publicación “*Farm production and resources sustainability in Northwest China*” (“Producción agrícola y sustentabilidad de los recursos en el noroeste de China”) publicada en la revista *Frontiers of Earth Science*. Ahí, los autores analizaron la producción agrícola y la sustentabilidad de los recursos en el noroeste de China entre 1978 y 1999. Durante este período, la producción

agrícola aumentó entre cuatro y cinco veces, impulsada principalmente por el uso de insumos tecnológicos como fertilizantes y maquinaria. El riego representó el 10-20% del crecimiento en algunas regiones, donde su expansión mejoró significativamente la productividad. En las áreas irrigadas, la productividad fue más de 10 veces superior a la de las zonas de secano. Sin embargo, a finales de los años 90, una disminución en la productividad total de los factores, causada por la caída en los precios de los granos y la sequía generalizada, resultó en una fuerte reducción de la producción agrícola. Un modelo espacial fue desarrollado para predecir la oferta y demanda de agua en el área, integrando los procesos hidrológicos y económicos.

Luego, la investigación de Hosseini et al. (2008) es la única que trabaja con una función de producción de carácter *bioeconómico*, y así la nombra, aunque sus estimaciones se realizaron utilizando la función de producción Cobb-Douglas (C-D) con un modelo de efectos aleatorios (REM, por sus siglas en Inglés) para medir los efectos o contribuciones que tiene la conservación del suelo sobre la calidad del trigo en Irán. Este estudio utiliza como variable dependiente el rendimiento productivo del trigo, y como variables independientes: la profundidad del suelo, la pendiente del terreno, la humedad del suelo, el nitrógeno, el fósforo y el potasio. De todos estos recursos naturales, los que mayor aporte tuvieron al rendimiento fueron la profundidad, la humedad y la utilización de fertilizantes. Una de las limitaciones que se encuentran en este estudio tiene que ver con la no inclusión de algunas variables relevantes en cuanto a la producción como trabajo, maquinaria y capital que deben ser consideradas en el análisis de la función de producción.

Fuglie (2011), en su estudio sobre la productividad agrícola (en general) en el África Sub – Sahariana, hace uso de la misma metodología para la estimación de la función de producción (C-D), incorporando como variables independientes: trabajo, área cosechada, stocks de animales, maquinaria y fertilizantes, separando además el análisis entre tierras con alta pluviosidad y terrenos con regadío. La única variable no significativa del modelo fue el trabajo, y el recurso natural con mayor contribución a la productividad (variable dependiente) fue el área cosechada. Además, aquellos terrenos con alta pluviosidad presentaron un mejor rendimiento con respecto a aquellos que requieren de irrigación.

Un cambio de metodología para la estimación de las eficiencias técnicas o rendimientos productivos y su relación con el uso de los recursos naturales es presentado por Pourzand y Bakhshoodeh (2013), quienes a partir del uso de la Frontera Estocástica de Producción (FEP) lograron mostrar que aquellas regiones de Fars (Irán) que usan grandes cantidades de pesticidas, fertilizantes químicos y sobre/extracción de aguas subterráneas para la producción de maíz tienen una menor eficiencia técnica en comparación con aquellas que explotan en menor

[24]

7. Este factor también es considerado como flujo bioenergético (Quiroga y Menendez, 2023).

8. “Nótese que a diferencia de una función Cobb Douglas, se incluye la Tierra ricardiana sin resolver el simplismo marginalista” (Quiroga, 2023, p. 6).

medida los recursos naturales. En la misma línea metodológica, Elhag (2017) para los cultivos vitivinícolas, cítricos y aceite de oliva en la zona de Iraklio, Creta (Grecia), sugiere que cuando los agricultores utilizan solo agua de riego para sus cultivos, no logran optimizar su eficiencia al máximo. Sin embargo, cuando combinan el uso de agua de riego con fertilizantes, la eficiencia en el uso del agua mejora significativamente. En términos prácticos, esto se debe a que esta combinación mejora la absorción de nutrientes al transportarlos de manera eficiente hacia las raíces y optimiza las condiciones del suelo, lo que potencia el metabolismo de la planta e incrementa el uso eficiente de los recursos, así como el rendimiento del cultivo. En términos de contribución a la eficiencia productiva, los fertilizantes aportaron un 0,89%, mientras que el agua contribuyó con un 0,10%.

Por otro lado, Marshall (2015) destaca que la participación de los factores productivos en la renta/producción nacional varía de un país a otro y a lo largo del tiempo, lo que sugiere que la popular función de producción agregada Cobb-Douglas (C-D) puede no reflejar la dinámica de la participación de los factores y menos aún de los recursos naturales. De esta manera, sugieren que la estimación de la función de producción que captura mejor las participaciones de los inputs, incluyendo los RRNN debe ser realizada bajo el modelo de la función CES con una elasticidad de sustitución de 0,8 dando a entender que los recursos naturales son importantes y no pueden ser fácilmente reemplazados por otros factores sin una pérdida significativa en la eficiencia de la producción. Una elasticidad de sustitución de 1 implicaría una sustitución perfecta (los factores pueden reemplazarse fácilmente), mientras que un valor menor a 1, como 0,8, indica que es relativamente difícil reemplazar un factor por otro.

Estudios posteriores como los de Choudhary et al., (2017) y Osti et al., (2017) haciendo uso de la función C-D, coinciden en que para los cultivos de menta y arroz en India y Nepal respectivamente, los recursos naturales que influyeron significativamente en su producción fueron los fertilizantes y el recurso agua (regadío). Por su parte, en la investigación realizada por Dombi (2018), se estiman la sequía y la maquinaria como los factores más relevantes en la agricultura húngara. Además, **destaca que las investigaciones sobre el metabolismo socioeconómico siguen escaseando** de modo que las contribuciones académicas han dejado de lado la utilización creciente e insostenible de los recursos naturales como foco de estudio.

Ahora, Bai et al., (2022) y Wang (2024), entendiendo que los recursos naturales son la base material para la supervivencia y el desarrollo humano, y que además han resultado en su sobreutilización y subvaloración, proponen estratégicamente la creación de un sistema científico de contabilidad del capital natural de los recursos terrestres para comprender en tiempo real la cantidad y el valor de dichos recursos, así como también la promoción del uso de componentes orgánicos y la importancia de la rotación de cultivos como una oportunidad de optimizar la utilización de la biodiversidad.

Finalmente, el estudio más reciente Mukhamedieva et al., (2024), para el sector agregado agrícola en Uzbekistán, desde un enfoque totalmente innovador entendiendo las complejidades del sector en cuanto a la óptima asignación de recursos, la sustentabilidad ambiental y la productividad, aplican técnicas de computación cuántica explorando el algoritmo *Eigensolver Cuántico Variacional* (VQE, por sus siglas en Inglés). Determinan que este tipo de enfoque demuestra una mayor eficiencia computacional en comparación con los métodos clásicos con la función Cobb-Douglas. Sus resultados arrojan que los fertilizantes y el agua tienen una mayor contribución en la producción agrícola. El modelo, probado con datos reales, permite la asignación óptima de recursos como tierra, agua, y mano de obra, y es adaptable a diversas condiciones. Además, destaca el potencial de la computación cuántica para abordar problemas *complejos* en la agricultura, sugiriendo que futuras investigaciones deberían integrar más factores y explorar algoritmos híbridos que combinen enfoques cuánticos y clásicos.

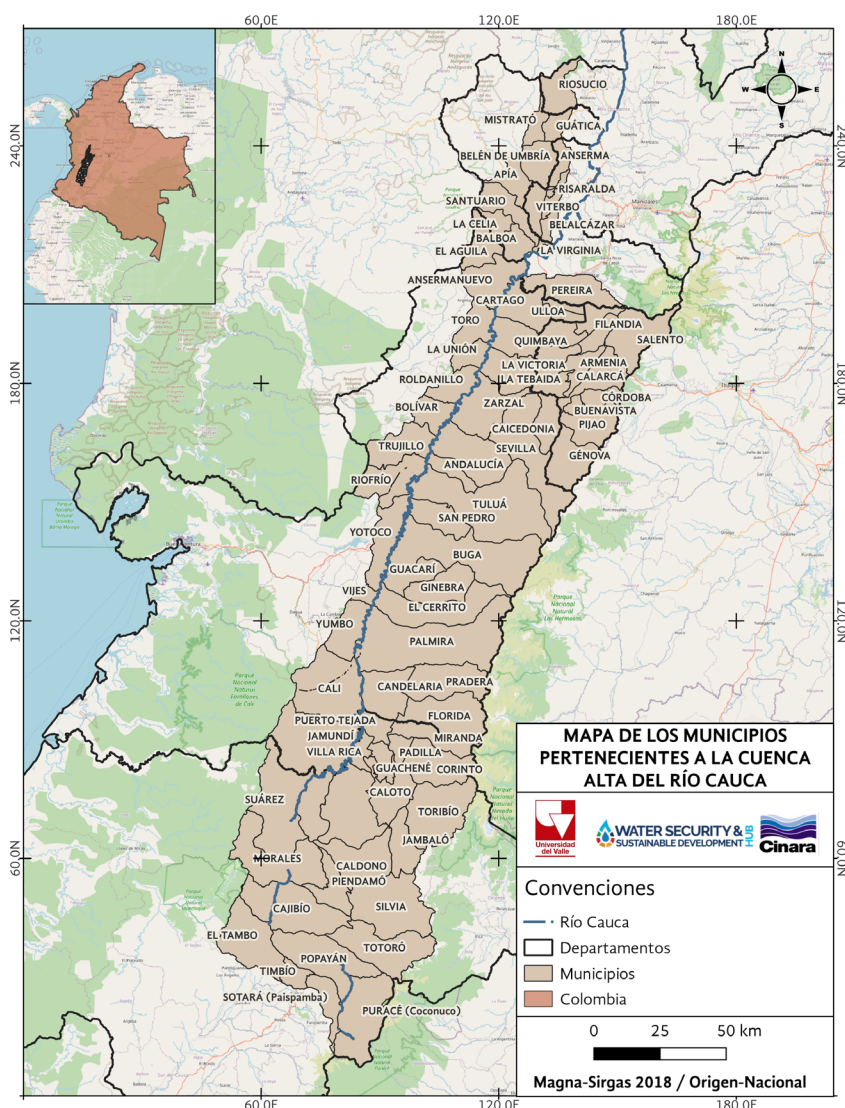
Los resultados obtenidos hasta este momento en el análisis bibliográfico presentan, además de una escasa literatura, una riqueza metodológica acompañada de coincidencias en los resultados en cuanto a la importancia que tienen los fertilizantes y el agua como recursos naturales en las estimaciones de la función de producción para el sector agrícola. Es notorio, además, que no se encuentran estudios para Colombia ni tampoco para el sector agrícola de la caña de azúcar en ningún país. De esta manera, es pertinente indagar en otras plataformas que se encuentran fuera del panorama de la base de datos de Scopus, lo cual no se abordó en esta investigación.

A manera de conclusión de este capítulo, una primera reflexión es la escasez que Dombi (2018) expresó en sus estudios frente al análisis del metabolismo socioeconómico. Por otro lado, no se hallan estudios a nivel mundial que muestren este análisis para la caña de azúcar. Existen limitantes en la estimación a través de Cobb-Douglas por la razón de que es una función lineal y los procesos productivos tienen un flujo más complejo entre inputs y outputs que resulta en desechos y que no son cuantificados por esta función. Es decir, la naturaleza ofrece los recursos naturales, la capacidad de soporte y muchos servicios ecosistémicos para la producción y transformación en el proceso agrícola (factores de producción), pero luego son devueltos a la biósfera en forma de contaminantes, calor disipado, etc.

A pesar de reconocer las limitaciones de la función de producción Cobb-Douglas, dadas sus facilidades relativas para la estimación econométrica, se hará uso de la misma sacrificando la complejidad de los sistemas agrícolas. Esta estimación se presenta más adelante en la que se incluyen los siguientes factores de producción: capital, trabajo y RRNN. Estos últimos, corresponden a tierra, fertilizantes, agua y energía. Esta investigación trata de llenar un vacío en la literatura de este tipo de análisis que involucre uno de los monocultivos más relevantes para Colombia, la caña de azúcar.

Cuenca alta del Río Cauca y monocultivo de la caña de azúcar: contextualización

Capítulo 3: biofísica y socio-económica



Municipios pertenecientes a la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC)
Fuente: elaboración propia con base en Hub Collaborative (2023) y el Marco Geostadístico Nacional (MGN) del DANE (2023).

Localización y características biofísicas y sociales del territorio⁹

En la Gran Cuenca del Río Magdalena, la principal Cuenca de Colombia, está contenida la Cuenca del Río Cauca (CRC) la cual puede clasificarse para facilitar su comprensión y gestión, en dos subcuencas: la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC) que ocupa el 53,2% de su extensión y la Cuenca Media y Baja, que ocupa el 46,8% restante. La CARC, objeto de la presente investigación, se encuentra entre las coordenadas geográficas 4.559.788 y 4.735.714 m longitud Este y 1.790.591 y 2.173.438 m latitud Norte en el occidente de Colombia, entre el Páramo de Sotará en el departamento del Cauca y el municipio de La Virginia en el departamento de Risaralda; con una longitud de 512 km y una superficie de 2.180.940 ha. Respecto a su composición geográfica, la extensión de la CARC atraviesa 83 municipios de cinco departamentos: Valle del Cauca, Cauca, Quindío, Risaralda y Caldas (Mapa 1).

Según el DANE (2024), la CARC cuenta con 6.107.802 habitantes para el año 2023, con una tasa de crecimiento poblacional anual promedio de 0,8%. La mayor proporción de habitantes de la CARC se concentra en los departamentos del Valle del Cauca (67,7%) y Cauca (16,7%), con tasas de crecimiento anuales promedio de 0,7

9. Más detalle sobre estos aspectos se pueden observar en el documento Vol. No. 2 "Caracterización de la Cuenca Alta del Río Cauca y del monocultivo de la caña de azúcar".

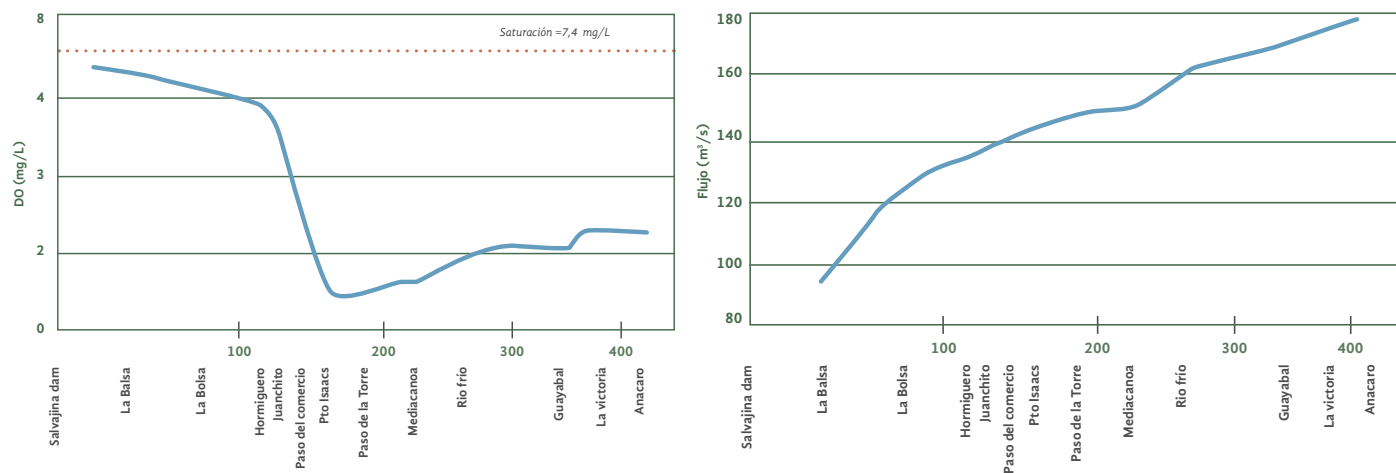


Figura 9. Calidad del agua y flujo hídrico en el Río Cauca
Fuente: Galvis-Castaño (2019)

y 1,2% respectivamente entre 2018 y 2023. Mientras que los departamentos que presentan menor proporción de habitantes dentro de la CARC son los departamentos de Quindío (9,1%), Risaralda (5,4%) y Caldas (1,1%).

El recurso hídrico más relevante para esta cuenca es el Río Cauca. Utilizado para la pesca, recreación, generación de energía, extracción de materia reverberada, consumo humano y riego en la agricultura; pero, además, como “cuerpo de agua receptor de residuos sólidos y vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas, lo que está contribuyendo al deterioro de la calidad del agua” (Galvis-Castaño, 2019). Esta realidad se evidencia por ejemplo en la disminución del Oxígeno Disuelto (OD^{10}) en el tramo Salvajina – Anacaro (al norte del Departamento del Valle a pesar de que la cantidad de agua crece a lo largo del río (Figura 9). Además de la materia orgánica (medida en términos de DBO_5), el río tiene asociados otros tipos de contaminantes con riesgo agudo (coliformes y turbidez) y crónico (color, fenoles, metales pesados, pesticidas y contaminantes emergentes) (Galvis-Castaño, 2019).

El Río Cauca ha perdido en los últimos 60 años la mayor parte de la capacidad de auto-potabilización. Por ejemplo, según Muñoz (2012, en Galvis-Castaño, 2019)

la pérdida de superficie de los humedales se redujo en un 90% entre 1950 y 1986. Además, siguiendo a Figueroa-Casas (2012, en Galvis-Castaño, 2019), la laguna de Sonso –el humedal más importante– se redujo en un 63,1% entre 1989 y 2009.

Con respecto a los usos del suelo, el 61,7% del área total de la CARC corresponde a la actividad agropecuaria y forestal (1,3 millones de hectáreas), seguida por las zonas naturales que abarcan el 36,4% del área con más de 793.000 ha. Particularmente, el cultivo de caña de azúcar es una de las principales actividades agrícolas en la CARC y juega un papel significativo en la economía regional y nacional, ocupando, como se observa en la Tabla 2, el 40,9% del total de hectáreas de cultivos sembrados en la CARC. Esto corresponde a 242.957 hectáreas para el año 2017, seguido del café con 165.027 hectáreas, ocupando el 27,8% del territorio total agrícola sembrado en la CARC (véase *Dimensión Económica del Monocultivo de Caña de Azúcar*).

El cultivo de caña de azúcar en la CARC

En Colombia, la caña de azúcar se cultiva principalmente en el Valle Geográfico del Río Cauca (Mapa 2) que hace parte de la CARC debido a las condiciones geográficas y ambientales que tiene esta región. Por ello, esta zona

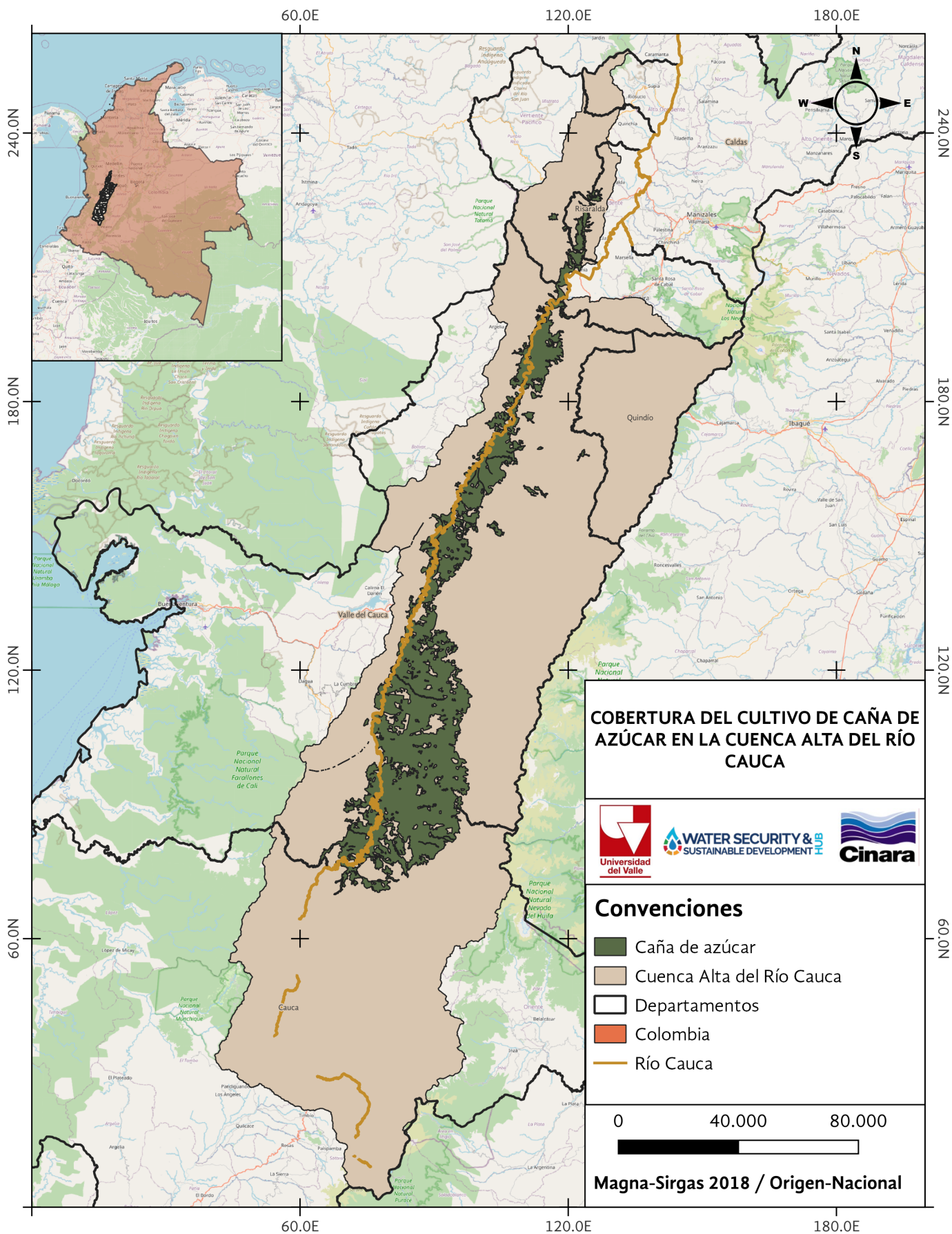
es considerada como una de las siete mejores regiones del mundo para su producción después de Brasil (724,4 millones de toneladas producidas), India (439,4 millones), China (103,4 millones), Tailandia (92,1 millones), Pakistán (87,98 millones) y México (55,3 millones). Hasta el 2022 la producción de caña de azúcar en Colombia fue de 23,0 millones de toneladas, con un rendimiento productivo de 92,4 ton/h. Su temperatura varía entre 23,8°C y 30°C con una oscilación de 11°C, la condición de lluvia es de aproximadamente 1.000 mm en dos épocas del año. La productividad promedio está en 125 t/ha, con 11% de rendimiento en azúcar (ASOCAÑA, 2022). El monocultivo de la caña de azúcar se encuentra en una mayor

[27]

Tipo de Cultivo	Ha sembradas (2017)	% en el total
Caña	242,957	40,9%
Café	165,027	27,8%
Plátano	54,192	9,1%
Otros	132,011	22,2%
Total	594,187	100%

Tabla 2. Hectáreas de cultivos agrícolas sembrados en la CARC (2017)
Fuente: HUB (2023)

10. Este factor asociado a la calidad del agua mide la distribución de oxígeno en el agua determinando a la vida acuática. En Colombia, el Decreto Presidencial 1594/84 establece que la calidad del recurso hídrico permisible para la preservación de fauna y flora es un OD entre 4,0 - 5,0mg/L.



Mapa 2. Cultivo de caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC).
Fuente:HUB (2023)

proporción en el departamento del Valle del Cauca (con presencia en 30 municipios que representan el 61%), seguido de Cauca con 8 municipios (17%), Risaralda y Caldas con 5 municipios cada uno (10%), por último, Quindío con 1 municipio (2%) (Figura 10).

Su extensión en hectáreas sembradas dentro de la CARC ha tenido una tasa de crecimiento anual promedio de 2,3% desde 1960 y hasta 2022. Es decir, 3.207 nuevas hectáreas por año (Figura 11).

Su crecimiento ha sido considerablemente significativo pues se ha multiplicado por 4,3 veces: en 1960 había 61.900 ha, llegando a 2022 a una extensión de 265.138 ha. En este periodo hay tres hitos que dinamizan la expansión de la caña: i) el bloqueo económico de EEUU a Cuba después de la Revolución Cubana (1959), que redistribuye buena parte de la cuota correspondiente a este país hacia Colombia a través del SUGAR ACT (1965) (Delgadillo Vargas (2014); ii) la apertura económica de 1990 que sustituye en mediano plazo la siembra de cultivos temporales (soya, maíz, algodón, sorgo) por caña de azúcar; y, iii) la política nacional de combinar el uso de gasolina con etanol para el consumo vehicular en 2005, beneficia al cultivo de caña al potenciar la producción de un derivado adicional para el mercado automovilístico.

Además, según Delgadillo Vargas (2014), hay otros dos elementos que en la década del sesenta impulsan al cultivo: i) Colombia entra al Pacto Mundial del Azúcar a través de la Ley 4a de 1961; ii) Este pacto multilateral entre productores de azúcar y consumidores, permite establecer políticas nacionales de producción, almacenamiento y exportación de azúcar en 1965, generando buenas expectativas entre los ingenios azucareros.

Comparando su evolución con otros cultivos de la región (permanentes y transitorios) como café, algodón, cacao, arroz, entre otros en el Valle del Cauca (Figura 12), se puede observar la diferencial dinámica entre estos y

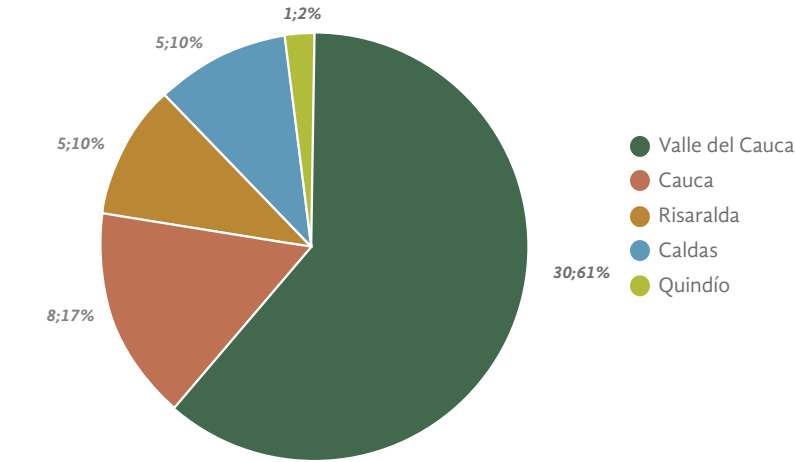


Figura 10 Participación (%) de la producción del monocultivo de la caña de azúcar. Departamentos de la CARC, 2022
Fuente: elaboración propia con base en UPRA (2023)

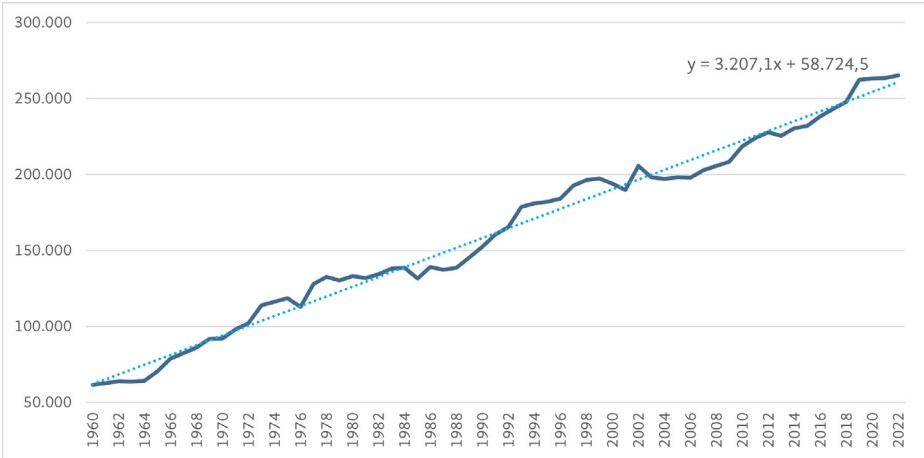


Figura 11. Evolución del área sembrada en caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, 1960 – 2022¹¹
Fuente: elaboración propia. Hasta 1979 con base en Buenaventura (1986), hasta 2003 con base en Perafán, (2012); hasta 2006 con base en Vásquez et al. (2013) y hasta 2022 con datos de la UPRA (2023).

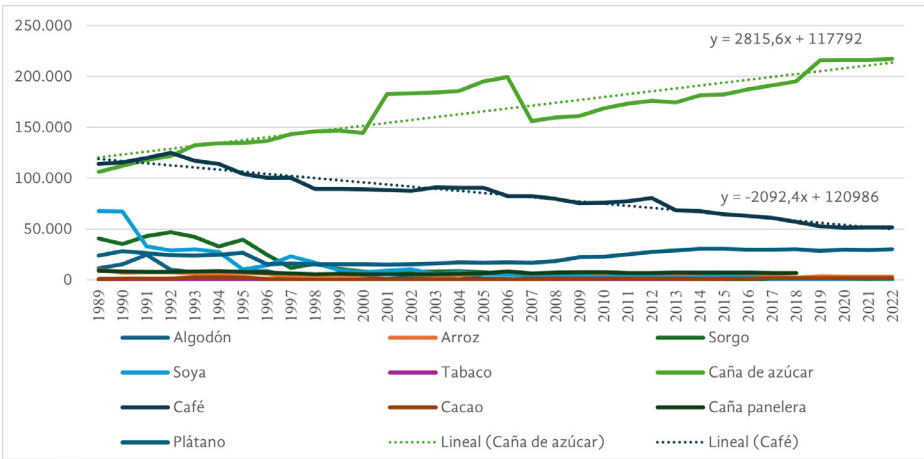


Figura 12. Evolución del área sembrada (ha) de los principales productos agrícolas en el Valle del Cauca, 1989 – 2022
Fuente: elaboración propia. Hasta 2003 con base en Perafán, (2012); hasta 2006 con base en Vásquez et al. (2013); hasta 2022 con datos de la UPRA (2023)

11. La base de datos de la información sobre la caña se observa en el Anexo 1.

la caña de azúcar entre 1989 y 2022. Mientras que la caña tiene una dinámica creciente y relativamente continúa ocupando cada vez mayor extensión de tierra, los otros cultivos, a diferencia del platano, disminuyen continuamente en el tiempo. El café por ejemplo tuvo una caída promedio de 2.092 hectáreas al año. Igualmente se observa la cuasi desaparición de otros cultivos como soya, sorgo, tabaco, arroz y algodón en la parte plana del departamento.

La brecha entre la superficie sembrada de caña de azúcar y el resto de los cultivos se profundiza a partir de 1992, década en la que se implementa la política de apertura comercial. Tanto las decisiones de política como algunos otros factores relacionados con altos costos de mano de obra, disminución en el consumo, baja en los precios internacionales y plagas (la broca y la roya) hicieron del café un producto menos competitivo en el mercado, disminuyendo su extensión agrícola en el departamento del Valle del Cauca (Perafán Cabrera, 2012). Mientras que en 1992 existían 124.994 hectáreas sembradas de café, a finales de la década esta área se redujo a 88.991 ha (es decir, una pérdida de 36.003 ha). Aunque café y caña no son cultivos que compitan por territorio, dado que el primero se cultiva en zonas de ladera y a alturas superiores a 1300 msnm, mientras la caña lo hace en zona plana y a alturas de alrededor de 1000 msnm, la liberación de capital desde un cultivo hacia el otro si pudo suceder, aumentando las inversiones en caña de azúcar dada su mayor rentabilidad.

El área cosechada de caña medida por hectáreas (ha) en la CARC también presenta un comportamiento creciente durante 1960 – 2022, con una tasa de crecimiento promedio anual del 2,96%.

A partir de los noventa hay un cambio en el comportamiento del sector en cuanto a la extensión de tierra cosechada disparándose la misma impulsada por la apertura económica de ese año.

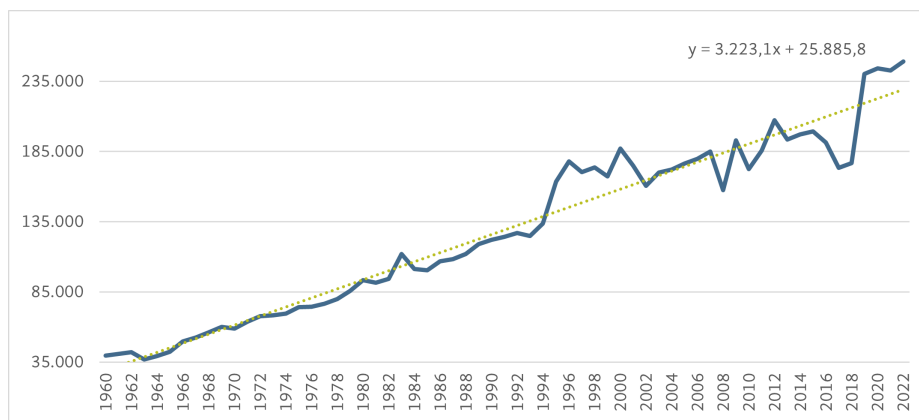


Figura 13. Área cosechada (ha) de caña de azúcar. CARC, 1980 – 2022¹²

Fuente: elaboración propia. Hasta 2003 con base en Perafán, (2012); hasta 2006 con base en Vásquez et al. (2013); hasta 2022 con datos de la UPRA (2023)

Dimensión económica del monocultivo cañero¹³

Según Procaña (2000), entre los subproductos más significativos obtenidos de la caña de azúcar se encuentran:

a. Melaza: Es un líquido viscoso y oscuro que resulta de la cristalización del azúcar de caña. La melaza es una fuente valiosa de carbohidratos y minerales como hierro y calcio. Se utiliza en la fabricación de alimentos para animales, así como en la producción de ron, cerveza, y algunos tipos de pan y dulces.

b. Biomasa: Además del bagazo, otros residuos de la caña de azúcar, como las hojas y puntas, también se utilizan como biomasa para la generación de energía renovable o como abono en el mismo cultivo.

c. Cachaza: Es el residuo líquido que resulta del proceso de destilación de la caña de azúcar para producir etanol. La cachaza se utiliza como fertilizante orgánico en la agricultura debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes.

d. Vinaza: Es un líquido rico en nutrientes que se obtiene durante la fermentación de la caña de azúcar para producir etanol. La vinaza se utiliza como fertilizante en los campos de caña de azúcar y otros cultivos. Igualmente es un poderoso factor

contaminante. Pero, además, los procesos de incorporación de valor agregado en la industria de la caña de azúcar son diversos y estratégicos. Por ejemplo, la industria sucroquímica aprovecha la melaza como materia prima clave para la producción de una amplia gama de productos, incluyendo alcohol, licores, ácido cítrico, levaduras, gas carbónico, acetatos, carbonato de calcio y fertilizantes agrícolas.

e. Bagazo de caña: Es la fibra que queda después de extraer el jugo de la caña de azúcar. El bagazo se utiliza ampliamente como biomasa para generar energía en las plantas de producción de azúcar, proporcionando electricidad y vapor para el proceso industrial. También se emplea como materia prima para la producción de papel y productos de celulosa.

La actividad agrícola o fase productiva de la caña de azúcar contribuye, en promedio, con el 2,1% al valor agregado de la actividad agrícola nacional (que incluye agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca) entre 2012 – 2021 (Figura 14)¹⁴. La tendencia de su participación muestra un cambio significativo antes y después de 2017. Antes de este año, la participación del sector iba en aumento, pasando del 1,8% en 2012 al 3,3% en 2017. En este mismo período, la participación en el

12. Ver Anexos para la base de datos.

13. Mayor detalle se aprecia en el Documento Vol. No. 2 de Caracterización.

14. La Cuenta Satélite del DANE para la agroindustria de la Caña de Azúcar en Colombia tiene registro solo a partir del 2012 en adelante.

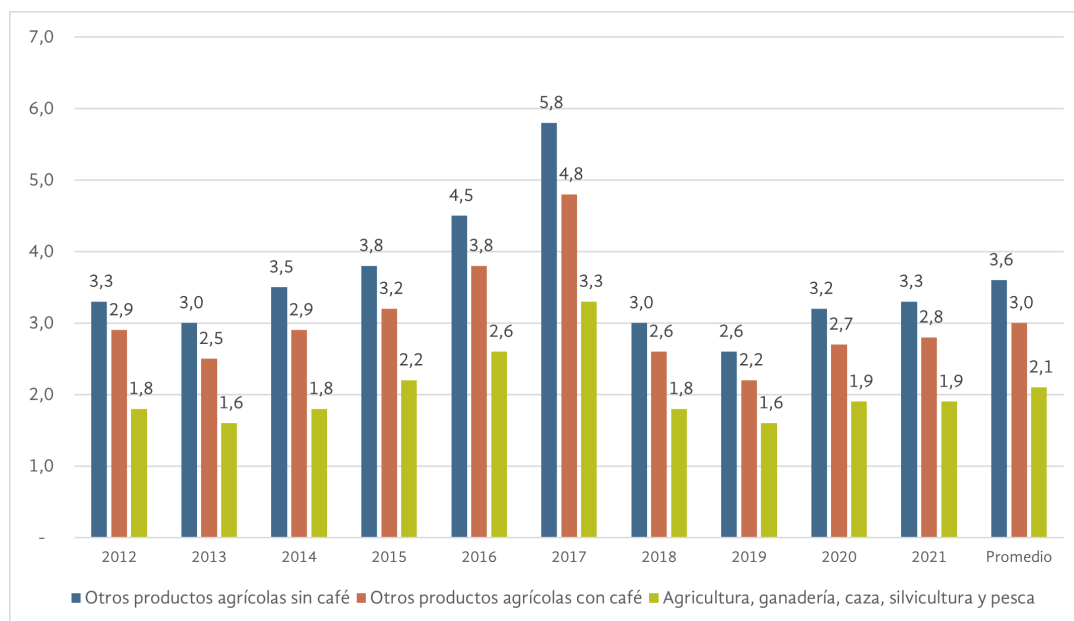


Figura 14. Participación (%) del valor agregado de la fase agrícola de la caña de azúcar en el valor agregado total por ramas de actividad económica, 2012 – 2021pr

Fuente: cálculos propios con base en DANE – Cuentas Satélites de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (2017, 2021) pr: provisional

valor agregado de otros productos agrícolas, excluyendo el café, creció desde 3,3% hasta el 5,8%, e incluyendo el café, de 2,9 a 4,8% en ese mismo periodo. Sin embargo, después de 2017, la situación cambió drásticamente, cayendo la participación de la caña de azúcar en todos los subsectores hasta 2021. De 3,3 a 2,1% en todo el sector agropecuario; de 5,8 a 3,6% al considerar otros productos agrícolas sin café y de 4,8 a 3% con café.

Ahora, con base en la información recopilada de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (ASOCAÑA) en sus informes anuales y anexos estadísticos, como también en los documentos del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) y complementados con datos de la UPRA, la producción de caña de azúcar se multiplicó por 8,5 veces en todo el periodo al pasar de 3'487.440 ton en 1960 a 29.569.367 ton en 2022. Ello significó una tasa de crecimiento promedio anual del 3,04% (Figura 15).

Las más significativas fluctuaciones de

la producción de caña se reflejan después del año 2000. A inicios del siglo XXI la economía nacional enfrentó una fuerte crisis financiera y fiscal que afectó las diferentes actividades productivas del país. “La crisis resultó en una caída del PIB de - 4,9% en 1999 y en una inflación del 92,6% ese mismo año” (Chiodo y Owyang, 2002 en Pérez-Reyna, 2017). En los años posteriores, la economía

siguió enfrentando problemas como la Crisis Financiera Internacional del 2008, caída en los precios del petróleo en 2014, la pandemia del COVID19 en el año 2020, entre otras que afectó el desempeño de la actividad económica en general y de la caña en particular en Colombia.

A partir de la información obtenida de la producción y áreas cosechadas de la caña de azúcar, se obtiene el comportamiento del

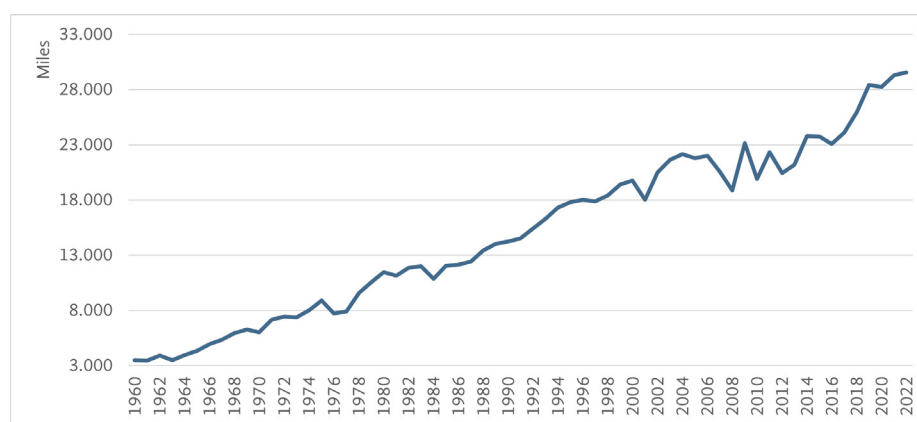


Figura 15. Producción de caña de azúcar (miles de toneladas). Cuenca Alta del Río Cauca, 1980 – 2022¹⁵

Fuente: elaboración propia. Hasta 1979 la serie se construye con base en Buenaventura (1986); hasta el 2006 con datos del Anexo Estadístico el Informe Anual de Asocaña 2013 – 2014 y del Informe Anual Asocaña, 2004; a partir del 2007, con datos de la UPRA, 2024

15. Hasta 1985, la información corresponde a una muestra de 11 Ingenios, que representaban el 96% del total del azúcar producido. A partir de 1986, la muestra incluye los 13 ingenios del Valle geográfico del río Cauca, que producen el 99,7% del total de azúcar del país. Ver Anexos para la Base de Datos.

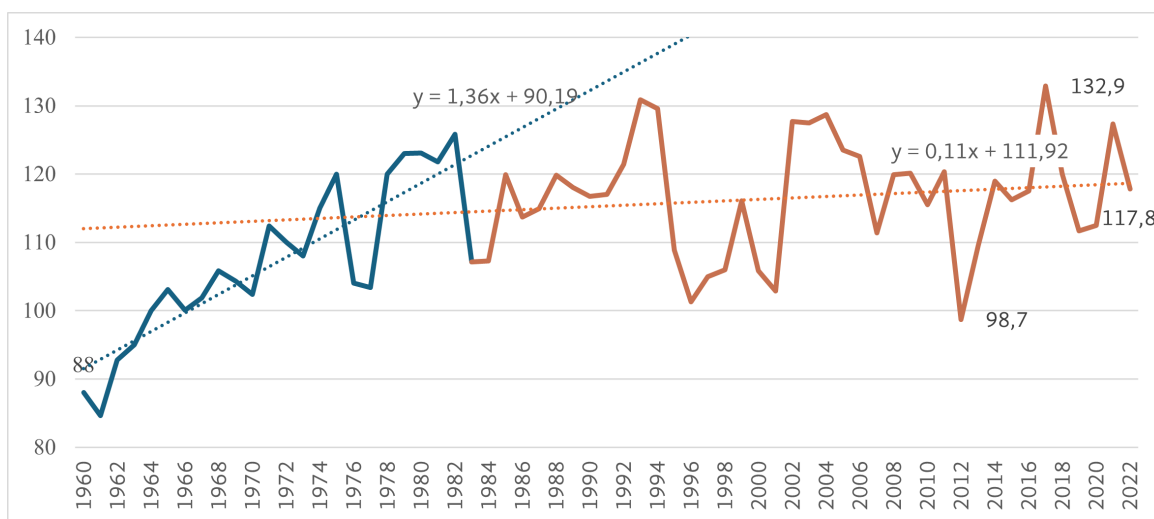


Figura 16. Rendimiento (ton/ha) de la caña de azúcar. CARC, 1960 – 2022

Fuente: elaboración propia. Hasta el 2006 la serie se construye con datos del Anexo Estadístico el Informe Anual de Asocaña 2013 – 2014 y del Informe Anual Asocaña, 2004; a partir del 2007, con datos de la UPRA (2023)

[32]

rendimiento productivo (ton/ha) (Figura 16). La Tabla 3 muestra que el crecimiento a lo largo del periodo analizado fue en total de 5%, lo que equivalió a 0,08% promedio anual. Igualmente, se observan dos dinámicas diferenciadas: la primera, con una tendencia creciente entre 1960 y 1982 que va de 85 a 124 ton/ha, lo que significó una tasa de crecimiento promedio anual de 2,1%. Sin embargo, en forma posterior, la dinámica de la productividad decae desde ese año y hasta 2022 al pasar de 124 a 118 ton/ha. Ello arroja una tasa de crecimiento negativa promedio anual de -0,12%. Por su parte, el periodo con mayor rendimiento productivo fue durante el 2018 con 147 ton/ha, alcanzando una de las productividades más altas del mundo¹⁶.

Aunque se desconoce la causa específica de la pérdida de la dinámica de la productividad de la caña, esta puede estar relacionada con dos factores: el primero asociado a los efectos en el uso de fertilizantes, abonos e insumos químicos en general, incluyendo maquinaria y riego, sobre la capacidad productiva de la tierra. Es decir, es el resultado de un proceso entrópico que sobrecarga la capacidad del

suelo para producir biomasa y lo contamina por su excesiva manipulación e intervención, disminuyendo su nivel de producción. Esto obviamente es la expresión de los llamados “rendimientos decrecientes”, que también tiene su contrapartida en un incremento en los costos de producción totales y por hectárea que desconocemos. Un segundo factor puede estar asociado al cambio climático.

Por su parte, la dinámica laboral del sector cañero en esta región de Colombia

ha crecido bajo escenarios laborales complejos, los cuales son importante analizar puesto que el número de trabajadores es una de las variables más importantes como factor de producción de la caña de azúcar. Sin embargo, en este texto solo abordaremos el comportamiento agregado de esta variable. Mayor detalle sobre la misma puede verse en el Documento Vol. No. 2 de Caracterización que acompaña este escrito.

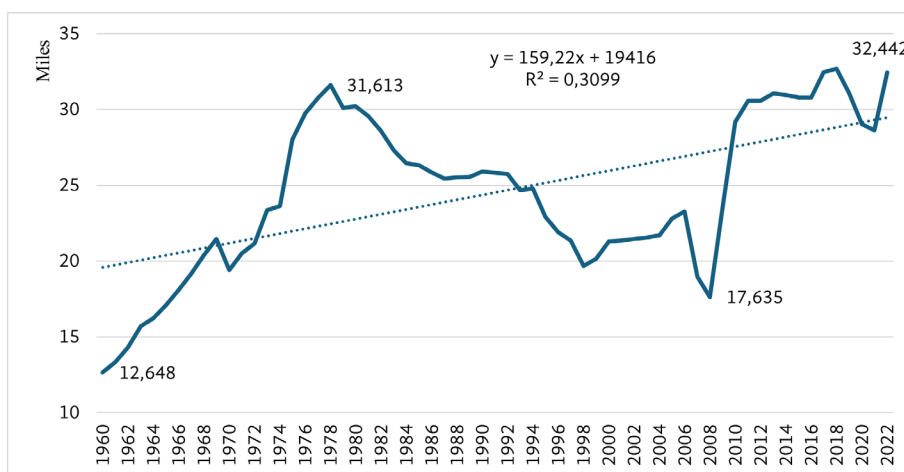


Figura 17. Total número de personal de campo* (miles) en el sector de la caña de azúcar en la CARC, 1960 – 2022

Fuente: elaboración propia con base en Buenaventura (1986); Vásquez et al., (2013) y DANE (2024)

*Corte, alce, transporte y labores de cultivo

16. Se anota igualmente, que el incremento en la productividad de la caña de azúcar también está relacionado con la disminución del tiempo de cosecha que ha pasado de entre 15-16 meses a 12-13 meses (ver Documento Vol. No. 2).

La investigación sobre el número de trabajadores en el sector de la caña de azúcar en la fase de cultivo en Colombia ha sido un tema complejo de determinar debido a la falta de información existente, a la tercerización laboral y a la falta de colaboración del gremio para proveer estos datos. Sin embargo, con la ayuda de algunos informes técnicos, investigaciones y datos a nivel del sector agrícola nacional se estimó el número de trabajadores en el periodo de análisis. En este sentido, la Figura 17 muestra la serie de tiempo construida que identifica la evolución del número de trabajadores desde 1960 y hasta 2022. En el siguiente capítulo se especifica el mecanismo de estimación de esta variable.

De manera general, a lo largo del periodo se muestra una tendencia creciente en el número de trabajadores en labores de campo en el monocultivo de caña de azúcar al pasar de 12.648 en 1960 a 32.442 en 2022. Es decir, la contratación laboral, directa o indirecta, se multiplicó por 2,6 veces para un crecimiento promedio anual de 1,51%. Sin embargo, a pesar de la significativa dinámica esta es baja si se compara con el comportamiento de las otras variables: 2,34 y 2,96% son las tasas de las áreas sembradas y cosechadas, y 3,04% para la producción total (ver Tabla 3). Además de esto, la dinámica laboral tiene tres ciclos marcadamente diferenciados: un ciclo ascendente 1960-1978 donde el número de trabajadores pasa de 12.648 a 31.613 personas; un ciclo descendente desde este último año y hasta 2008 donde disminuye el número total de trabajadores del campo hasta 17.635. Y a partir de allí, de nuevo un ciclo ascendente hasta 32.442 en 2022 que lleva al sector al mayor volumen de trabajadores de campo contratado.

El ciclo descendente está asociado a los procesos de alta mecanización y optimización de las actividades de campo que buscan tanto aumentar la productividad laboral como contrarrestar las huelgas y los procesos de sindicalización de estos trabajadores. Los ciclos ascendentes se explican por el incremento de las otras cuatro variables: área sembrada, área cosechada, aumento en la producción y

en la productividad de la caña de azúcar. Las cuatro impulsan la demanda de trabajadores del campo. Igualmente, esto puede tener también relación con la lucha sindical y social que busca formalizar el trabajo del campo contra la tercerización laboral, tal como fue el gran paro en el año 2008 durante 56 días en 9 ingenios azucareros que buscó terminar con las Cooperativas de Trabajo Asociado que prestaban servicio a los ingenios azucareros en el corte de caña (Pérez et al., 2011). Paradójicamente, después de esta huelga en 2008, el enganche de mano de obra en el campo se incrementó, mostrando lo señalado arriba en torno a la dinámica de las variables reales del sector, pero también asociado al contexto del TLC con EEUU que promovió acabar con la tercerización laboral.

Finalmente, cuando se construye la serie de intensidad laboral por cada 100 hectáreas (Figura 18), se observa un descenso importante a lo largo del periodo al pasar de 20,5 trabajadores a 12,2 entre 1960 y 2022, lo que significa una reducción del 40% de los requerimientos de mano de obra por hectárea sembrada. Ello significó un aumento en la intensidad laboral

por cada 100 ha sembradas que significa igualmente un incremento en la productividad del trabajo. Esto alcanzó un descenso promedio anual de 0,82% (Tabla 3). Este descenso en la cantidad necesaria de trabajadores por superficie cultivada se acentúa sobre todo a partir de 1977, el pico más alto con 26,4 trabajadores por ha. Esta realidad muestra que la caña de azúcar es un cultivo intensivo en capital y poco intensivo en mano de obra, lo que lo hace comparativamente, ser una fuente de empleo rural poco dinámica para la región.

A partir de este panorama general del entorno económico, social y ambiental del sector de la caña de azúcar en la CARC, se continua con el análisis econométrico en el que se involucran las variables de producción, área sembrada y cosechada, trabajo y otras variables de carácter ambiental asociadas a los insumos naturales requeridos para el cultivo de caña con el fin de estimar las diferentes elasticidades de cada factor de producción del modelo. Otras dimensiones como la territorial, ambiental e institucional pueden ser consultadas en el Documento Vol. No. 2 de Caracterización.

[33]

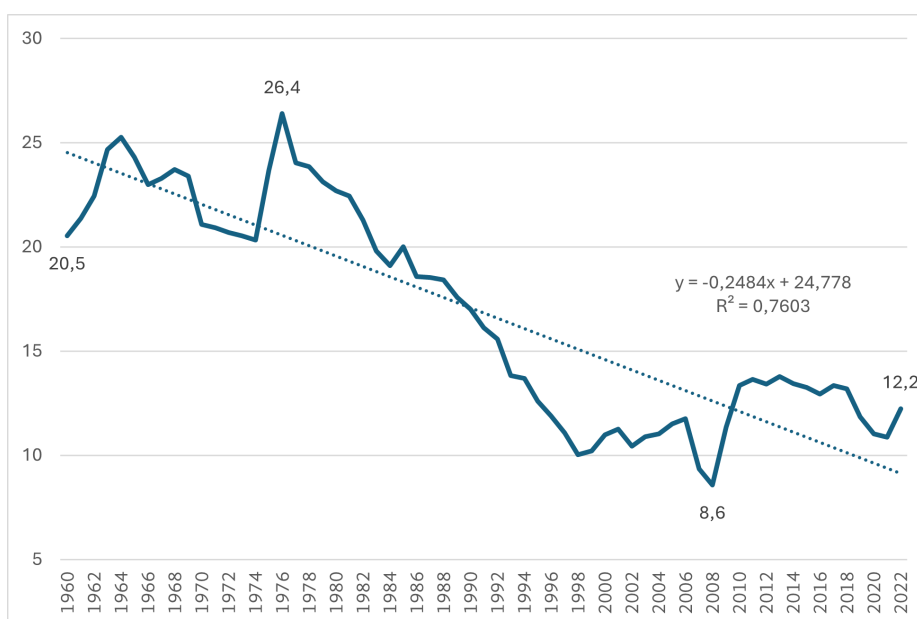


Figura 18. Número de trabajadores por cada 100 hectáreas sembradas de caña de azúcar en la CARC, 1960 - 2022
Fuente: : elaboración propia

Variable agregada	Absolutos		Crecimiento Absoluto	Crecimiento Total%	Se multiplicó por (veces)	Crecimiento Promedio Anual (tasa geométrica)%
	1960	2022	1960-2022	1960-2022	1960-2022	1960-2022
Hectáreas sembradas (miles de ha)	61,6	265,1	203,5	330%	4,3	2,34%
Hectáreas cosechadas (miles de ha)	39,6	249,0	209,4	528%	6,3	2,96%
Producción de caña (millones de ton)	3,5	23,0	19,5	560%	6,6	3,04%
Productividad de la caña (ton/ha)	88,0	92,4	4,4	5%	1,05	0,08%
No. De trabajadores (miles)	12,6	32,4	19,8	156%	2,57	1,51%
Trabajadores por 100 ha	20,5	12,2	- 8,3	-40%	0,59	-0,82%

Tabla 3. Resumen del comportamiento de área sembrada, cosechada, producción y trabajadores. Sector de la caña de azúcar, 1960 – 2022

Fuente: : elaboración propia



Metodología y estimación

Capítulo 4: econométrica del modelo

4.1 Determinación del modelo econométrico

En los capítulos anteriores se ha examinado la evolución de las variables más relevantes alrededor de la caña de azúcar desde las perspectivas de la producción (hectáreas sembradas y cosechadas, toneladas producidas y número de trabajadores) y las características físico-climáticas requeridas para el cultivo. También se han discutido algunos de los métodos utilizados en otros estudios para estimar la función de producción incluyendo variables de la naturaleza. A continuación, se presenta el corazón de este documento: el análisis y la estimación econométrica de la contribución que tienen los diferentes factores de producción incluyendo la naturaleza en la generación de valor económico del cultivo de la caña de azúcar, a partir de la función Cobb-Douglas. En este modelo se toma como variable explicada la producción en toneladas (Y_t) y como variables explicativas: el Capital K_t , el Trabajo (L_t) y los Recursos Naturales (RN) tal y como se presenta en la ecuación [1]:

$$[1] \quad Y_t = A_{t-1} K_{t-1}^\alpha L_{t-1}^\beta R_{t-1}^\gamma e^{\rho t}; \text{ donde } \alpha + \beta + \gamma = 1$$

A continuación, explicamos cada una de las variables:

Productividad total de los factores o tecnología (A):

Este factor, también conocido como progreso tecnológico o nivel de eficiencia, es un parámetro que capta el nivel general de tecnología o eficiencia en la producción. Un mayor valor de A indica que la producción -en este caso agrícola- está utilizando de manera más eficiente sus factores productivos, lo que permite producir más con la misma cantidad de insumos. Su cálculo tiene múltiples perspectivas de análisis, sin embargo, este documento no refiere su estimación.

Capital (K)

La estimación del acervo de capital en maquinaria y equipo se realizó siguiendo un procedimiento similar al de Harberger (1972). Se estima la relación capital-producto de equilibrio representada en la ecuación [2] donde $\bar{i}$ es la participación promedio de la inversión en el producto, δ es la tasa de depreciación del capital y ρ es la tasa de crecimiento promedio anual de la producción de caña de azúcar entre 1960 y 2022.

$$[2] \quad \kappa = \frac{\bar{i}}{\rho + \delta}$$

$$[3] \quad K_0 = \kappa Y_0$$

Una vez obtenido κ , se multiplica por el valor del producto del año inicial como se presenta en la ecuación [3] para calcular el acervo de capital inicial. Posteriormente se utiliza la fórmula del inventario perpetuo [4] para construir la serie del acervo en maquinaria y equipo.

$$[4] \quad K_t = (1 - \delta) K_{t-1} + I_t$$

Un aspecto importante que se tiene en cuenta en este proceso es lo que se describe en el Capítulo 3 y en el Documento Vol. No. 2, sobre el tiempo de 360 días (1 año) que se requiere para obtener la producción de caña de azúcar. En este sentido, en la ecuación [4], la variable de la inversión cambia por I_{t-1} , dando a entender que la producción actual o la conformación del capital actual se ve reflejado por la inversión del periodo anterior¹⁷.

17. Para el cálculo de la tasa de depreciación del capital, la EAM (Encuesta Anual Manufacturera) presenta el valor en libros de los activos fijos total y desagregados de los ingenios azucareros por: Maquinaria y Equipos, Edificaciones, Transporte, Equipos de Oficina y Equipos de Informática. Se asume una depreciación lineal del 10% para maquinaria y equipos, del 2,22% para edificaciones, 10% para transporte, 10% para equipos de oficina y el 20% para equipos TIC.

18. También fue relevante en este cálculo las tasas de crecimiento del capital agropecuario calculadas por Sánchez (1996) y por el DANE (2024).

Trabajo (L)

La construcción de la serie de tiempo del Trabajo (L) en el cultivo fue la serie más compleja de elaborar dados los vacíos de información que hay al respecto. Creemos que esta es una de las principales limitaciones de esta investigación. Se partió del documento de Buenaventura (1986) que mostraba el número de trabajadores totales en el sector cañero en: campo, fábrica y administrativos desde 1960 y hasta 1985, con algunos periodos sin estimar (1961 – 1969; 1971 – 1974; 1977 – 1978). Para completar estos años, y ajustarlos solo a los trabajadores del campo, se tomó el estudio de Sánchez (1996) que muestra el total de trabajadores del sector agropecuario del país y se ajustó a la participación que tiene el sector de la caña de azúcar en el total agropecuario. Con ello, se estimaron los demás periodos alcanzando la serie hasta 1994. Luego, gracias al estudio de Vásquez et al., (2013) se obtiene el empleo de la fase agrícola de cultivo desde 1995 hasta 2006. Finalmente, con la información suministrada por el DANE a partir de la Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH) en el componente de Ocupados por Rama de Actividad clasificada con el Código CIIU 0124 Sección A Rev. 4¹⁹ se completa la serie desde 2007 hasta 2022.

Recursos naturales (RRNN)

Los RRNN utilizados como inputs en esta función de producción, de acuerdo con el proceso de metabolismo social descrito en el Capítulo 1, fueron: Tierra (Tr), Agua (W), Energía (E) y Materiales, que en este caso fueron Fertilizantes (Mat). Los principales fertilizantes utilizados para esta estimación fueron: Nitrógeno (N), Potasio (K) y Fósforo (P). Los Materiales (Mat), entonces, son considerados como la suma del total de kilogramos usados al año de estos componentes (N, K y P) en el cultivo. De manera que la Ecuación 1, transformada a Ecuación 3, tomará la siguiente especificación como **Ecuación 5**:

$$[5] \quad Y_t = A_{t-1} K_{t-1}^\alpha L_{t-1}^\beta (Tr * W * E * Mat)_{t-1}^\gamma e^{\rho t}$$

Para la variable Agua (W), se tomaron las Huellas Hídricas Azul (HHA) y Verde (HHV)²⁰. La Huella Hídrica (HH) es un indicador de apropiación del agua dulce por parte de los seres humanos que mide el volumen total de agua en m³ consumido por una actividad económica o una unidad específica de estudio, que puede ser un individuo, un cultivo en un área geográficamente definida que no solo contempla

el uso directo por parte de un consumidor, sino que también puede incluir el uso indirecto del agua (Hoekstra et al., 2011). En nuestro caso, la decisión de incluir solo estas dos huellas como agua consumida por el cultivo -Azul, agua que proviene de recursos hídricos subterráneos o superficiales; y Verde, agua de precipitaciones (lluvia o nieve) que queda almacenada en la tierra y alimenta los cultivos en la zona de las raíces, y se evapora, transpira o incorpora las plantas- (Arévalo, 2012), y no incluir la Huella Hídrica Gris (HHG) que mide la contaminación, está asociada a que solo queremos cuantificar los *inputs* o insumos incluidos en la función de producción como parte de los requerimientos de agua del cultivo. La HHG no entra como parte de la función de producción de la caña, sino que sale como residuo y contaminación. Se resalta de todas maneras, que medir el consumo total y *exacto* de agua en el cultivo de caña es difícil, por lo cual la HH se toma como *proxy* de ello. Los datos se expresan en Mm³ de agua²¹.

La variable **Energía (E)**, medida en Megajoules (MJ)²², desde la visión de Economía Ecológica, es vista como el motor fundamental de todas las actividades en los sistemas naturales y humanos. Todos los procesos económicos, desde la extracción de recursos hasta la producción y el consumo de bienes y servicios, requieren de energía. Su cuantificación necesita una cuidadosa selección de las variables que se incorporarán como insumos energéticos, así como la elección de los índices o factores de conversión adecuados para transformar estos insumos en unidades energéticas. En esta investigación, se utiliza parcialmente la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esto significa que se cuantifica únicamente la energía utilizada en la fase del proceso productivo de cultivo, específicamente en la fertilización, el control de plagas, el número de trabajadores, el combustible y la maquinaria (Tabla 4), sin considerar los outputs o impactos ambientales de este proceso ni la energía empleada en la construcción de la maquinaria. Esta decisión se debe a que las variables explicativas de la función de producción se consideran como inputs, y no como *outputs*²³.

Los coeficientes energéticos utilizados para el cálculo de la variable Energía, presentados en la tabla 4, son el resultado de la revisión de artículos o documentos técnicos de investigación en los que el objetivo fue obtener el input energético para la producción agrícola en diversos países. Algunos de ellos enfocados en la caña de azúcar, como los de Hassan et al., (2022), Karimi et al., (2008) y Rosenschein y Hall (1991).

[36]

19. Este código hace referencia específicamente a las actividades agrícolas de la caña de azúcar. Es decir, no toma en cuenta el proceso industrial o manufacturero.

20. El proceso metodológico y resultados para el cálculo de estas Huellas Hídricas se presenta en el **volumen N° 3** que aborda el tema de las presiones ambientales del cultivo de la caña de azúcar.

21. 1 Mm³ = 1x10⁶ m³

22. MJ = 10⁶Julios.

23. Se resalta de todas maneras, que parte de la energía es cuantificada dos veces, una como materiales y otra como energía.

Inputs	Unidad	Coficiente Energético (MJ/Unidad)	Fuente
N (Urea)	kg	80	(Manzanares, 1997)
P (P2O5)	kg	12,4	(Mohammadi et al., 2008; Zareishahamat et al., 2013; Hassan Dahab et al., 2022)
K (K2O)	kg	6,7	(Mittal y Dhawan, 1989; Hassan Dahab et al., 2022)
Herbicidas	L	238,3	(Zahedi et al., 2015)
Mano de Obra	Día/persona	18	(Lewis, 1984; Rosenschein y Hall, 1991)
Diesel	L	56,3	(Singh et al., 1988; Mittal y Dhawan, 1989; Hassan Dahab et al., 2022)
Maquinaria	hr	62,7	(Mittal y Dhawan, 1989; Mohammadi et al., 2008; Karimi et al., 2008; Zareishahamat et al., 2013; Zahedi et al., 2015; Hassan Dahab et al., 2022)

Tabla 4. Insumos y Coficientes Energéticos utilizados para estimar el input energético de la caña de azúcar en la CARC.
 Fuente: : elaboración propia

Los coeficientes energéticos utilizados para el cálculo de la variable Energía, presentados en la tabla anterior, son el resultado de la revisión de artículos o documentos técnicos de investigación en los que el objetivo fue obtener el input energético para la producción agrícola en diversos países. Algunos de ellos enfocados en la caña de azúcar, como los de Hassan et al., (2022), Karimi et al., (2008) y Rosenschein y Hall (1991).

Con base en lo anterior, el modelo construido se compone principalmente de 7 variables las que se presentan en la Tabla 5. La base de datos conformada con estas variables aparece en términos biofísicos, excepto el Capital, debido a que su estimación requirió de su conversión a unidades monetarias (millones de pesos colombianos

constantes de 2015) (ver Anexo 1). Para la construcción de la base de datos, se consultaron fuentes de información secundarias oficiales como el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la Unidad de Planeación Rural Agropecuaria (UPRA), los Informes Anuales de Asocaña, la Base de datos de Cenicaña. Igualmente, artículos o documentos de trabajo como el desarrollado por Carlos Buenaventura Osorio (1986) que muestra un análisis económico y técnico alrededor de la caña de azúcar, revelando el número de trabajadores de la fase agrícola, la producción total, las áreas sembradas y cosechadas, la producción de azúcar, la fisiología de la caña, etc., para el periodo 1960-1985.

[37]

Variable	Unidad de medida	Media	Desviación estándar	Mediana	Mínimo	Máximo
Producción	ton	14.702.288	6.963.221	14.511.907	3.455.656	25.036.168
Área Sembrada	ha	161	59	160	62	265
Rendimiento	ton/ha	113	12	114	85	142
Capital	Millones de pesos Col (Constantes de 2015)	115	36	134	40	154
Trabajo	#	25	5	25	13	33
Energía	GJ	6	2	6	2	10
Materiales:	kg	32	13	32	9	62
Nitrógeno	kg	16	7	15	4	30
Fósforo	kg	2	749	2	502	3
Potasio	kg	15	6	15	4	29
Agua:	Mm3	2	909	2	553	4
HH Azul	Mm3	710	419	625	57	2
HH Verde	Mm3	1	704	1	331	3

Tabla 5. Estadísticas descriptivas de las variables relevantes del modelo
 Fuente: : elaboración propia

Una vez se obtiene la base de datos estructurada, la especificación del modelo econométrico ajustado (Ecuación 3), la desagregación de la variable Recursos Naturales (RN) en Energía (E), Agua (W) Tierra (Tr) y Materiales (Mat), todas las variables se transforman a logaritmo natural. Siendo así, la ecuación 5 se convierte en la ecuación 6, quedando reescrita de la siguiente manera:

$$[6] \quad y_t = \alpha_0 + \beta_k k_{t-1} + \beta_l l_{t-1} + \beta_{tr} tr_{t-1} + \beta_w w_{t-1} + \beta_e e_{t-1} + \beta_m mat_{t-1} + \rho_{t-1}$$

Donde α_0 será la constante de eficiencia técnica a la Solow (In A_{t-1} ; la expresión en minúscula para cada variable será la representación logarítmica de la variable en valor absoluto; ρ_{t-1} , la estructura de errores y el subíndice t-1, hace referencia al rezago de la variable en un periodo. Esto dado que el tiempo estimado para la producción final de caña después de ser sembrada es de 360 días o un año²⁴. Además, se espera que todos los parámetros estimados sean positivos.

Con las variables estacionarizadas se procede a estimar varios modelos haciendo uso de la función *auto.arima* bajo los parámetros de búsqueda escalonada sin utilizar aproximaciones.

Se combinan las regresoras de modo que se realiza el modelo con el propósito de indagar la consistencia de las variables y decidir, bajo el Criterio de Información AKAIKE (AIC)²⁵ cual modelo explica mejor el comportamiento de la variable explicada (Y_t). Para el proceso de estimación se utiliza la función *auto.arima* bajo los parámetros de estacionalidad y aproximación que permiten precisar las estimaciones.

Para examinar la consistencia de los parámetros, se estimaron 17 modelos (ver Anexo 2), comenzando con el modelo ingenuo (modelo 1), que analiza exclusivamente el comportamiento de las variables de control (capital y trabajo). El modelo 2 incluye únicamente las variables relacionadas con los Recursos Naturales (RRNN) en la función de producción. A partir del modelo 3 y hasta el último modelo (17), se incorporan progresivamente las variables de RRNN, agregándolas una por una. Por su parte, el modelo 7 es el único que integra todas las variables.

Se incluyó, además, una variable dicotómica (d_{08}) para el año 2008, debido a que fue un año clave en la dinámica de la producción de caña de azúcar, afectada por el paro de corteros que redujo significativamente las toneladas. Esta variable toma el valor de 1 para el año 2008 y 0 para los demás años. Se ofrece un mayor detalle sobre este evento en el Volumen N° 2. La relevancia de esta variable en el modelo se evidencia en su significancia en la mayoría de los modelos donde fue incorporada.

4.2 Resultados: análisis y discusión

Examinando los diferentes modelos, se observa un alto grado de correlación entre las variables explicativas de los mismos (Figura 19), en particular los factores asociados a la naturaleza. Ello implica un grave problema de multicolinealidad severa en las estimaciones, afectando la consistencia de los parámetros lo cual no permite una interpretación adecuada de los coeficientes. Uno de los procedimientos para enfrentar esta situación, es eliminar aquellas variables con alta correlación²⁶. Para ello se realizó un proceso iterativo de prueba y error que permitió la selección de los modelos con menor varianza en los parámetros.

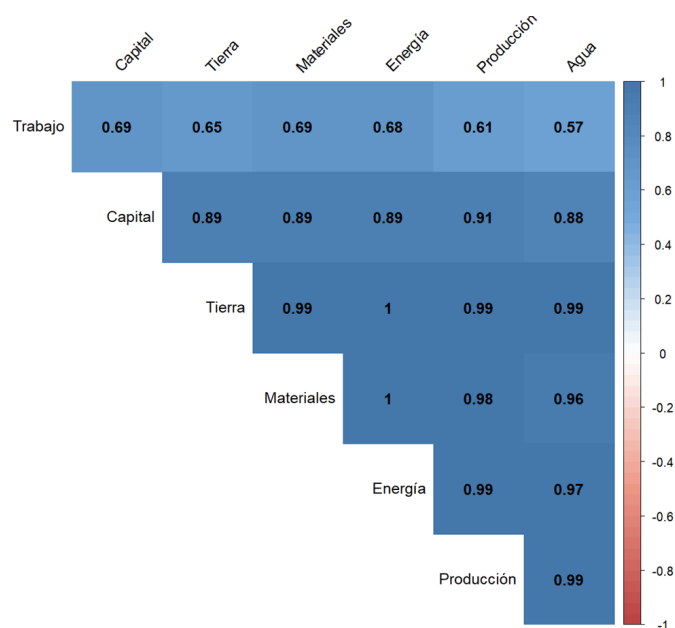


Figura 19. Matriz de correlación

Fuente: : elaboración propia

Nota: El coeficiente de correlación de Pearson indica que entre más cercano este a 1 existe mayor correlación entre una variable y la otra. Así, por ejemplo, los recursos naturales tienen más alta correlación en promedio que los recursos de la sociedad, resaltando la energía y el agua.

La presentación de estos resultados se realizó en 3 etapas. En la primera, nos enfocamos en analizar los coeficientes de las variables de la naturaleza utilizadas en las correlaciones de todos los modelos corridos. Esto con el propósito de tener una primera imagen del peso de los RRNN en cada uno de los modelos analizados. En la segunda parte, se seleccionaron los modelos que según el criterio Akaike, presentan el mejor ajuste de los parámetros; finalmente, seleccionamos y analizamos los dos modelos que más se ajustaron econométrica y conceptualmente a conocer la contribución de la Naturaleza a la generación de valor económico en la producción del monocultivo de la caña de azúcar.

24. Más detalle sobre el ciclo productivo de la caña de azúcar se puede apreciar en el Volumen N° 2 de Caracterización.

25. El Criterio de Información Akaike (AIC) es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico utilizado cuando se requiere comparar distintos modelos con diferente número de regresores. La regla de decisión de este criterio radica en escoger, en valor absoluto, el mayor AIC.

26. Se realizaron además estimaciones haciendo uso de la metodología de Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en Inglés); sin embargo, los resultados fueron mucho más confusos dada la no significancia de variables relevantes como el trabajo, la tierra y el agua.

Etapla 1. Un análisis general de los coeficientes asociados a los factores de producción con origen en la naturaleza

Utilizando un esquema de colores tipo semáforo, la Tabla 6 presenta los coeficientes asociados a las variables relacionadas con los recursos naturales, según su magnitud y su contribución a la producción. Los valores resaltados en verde representan una contribución positiva, mientras que los valores en amarillo indican coeficientes con signo negativo. En términos de significancia estadística, los coeficientes se clasifican de la siguiente manera: tres asteriscos (***) indican significancia al 1%, dos asteriscos (**) al 5%, y un asterisco (*) al 10% (es decir, marginalmente significativo para el modelo). La tabla incluye 15 modelos en los cuales las variables de los recursos naturales se introducen progresivamente, primero de manera individual y luego en combinación, hasta alcanzar los modelos que integran las cuatro variables principales. La principal diferencia entre los modelos 1 y 5 radica en que el primero no considera las variables Trabajo y Capital, mientras que el modelo 5 las incluye.

En este sentido, los coeficientes asociados a la variable **Agua** no son significativos en la mayoría de los modelos, ya que no presentan asteriscos que indiquen significancia estadística. Además, en varios casos, tienen un signo negativo, lo cual no es consistente con lo esperado. Los únicos modelos en los que el Agua presenta un resultado positivo y significativo son aquellos donde se combinan con las variables Energía y Materiales (modelos 3 y 10). Estos resultados sugieren que el Agua es el recurso natural con mayor inestabilidad desde el punto de vista econométrico, probablemente debido a la severa multicolinealidad que afecta su estimación. Además, su elasticidad en los modelos 3 y 10 no es tan elevada como los otros factores de producción naturales en los otros modelos, alcanzando 0,18 y 0,33% respectivamente. Esto significa que un 1% adicional de agua, manteniendo los otros factores constantes, incrementa la producción en un múltiplo por debajo de la unidad, mostrando baja contribución a la dinámica productiva.

Por su parte los coeficientes asociados a la variable Energía presentan un comportamiento heterogéneo entre los modelos. En varios de ellos, los valores son negativos y altamente significativos, como en los Modelos 1, 5 y 6, donde los coeficientes son -8.378, -6.037 y -7.909, respectivamente, el primero y el tercero con 1% de significancia y el segundo con 5%. Esto indica un impacto adverso considerable en estos casos, contrario a lo esperado. Por otro lado, los coeficientes positivos y significativos se observan en los Modelos 3 (0.880), 12 (0.750) y 14 (2.145), en combinación con otras variables como Agua y Tierra, sugiriendo que en contextos específicos, la Energía puede tener un efecto favorable. El último modelo (14), cuando actúa sin Agua ni Tierra, muestra una elasticidad elevada y altamente productiva: 1% adicional de energía incrementa la producción total en 2,1%, manteniendo los otros factores constantes. En general, la Energía parece ser una variable con resultados extremos, tanto positivos como negativos, lo cual podría deberse a la interacción con otras variables

Modelo	Agua	Energía	Tierra	Materiales
1	- 0,11	-8,378***	4,937***	4,498***
2	- 0,07	0,31	1,002***	
3	0,179***	0,880***		
4	-0,369***			
5	- 0,03	-6,037**	3,577***	3,448**
6		-7,909***	4,506***	4,338***
7			0,983***	0,227**
8				0,376***
9	-0,157*		1,418***	
10	0,333***			0,636***
11	- 0,05		1,097***	0,18
12		0,750***		
13		0,411**	0,814***	
14		2,145***		-0,868***
15			1,218***	

Tabla 6. Coeficientes de los recursos naturales
Fuente: : Fuente: elaboración propia
Nota: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01

o a problemas de multicolinealidad, lo cual sugiere su no inclusión en los modelos finales a seleccionar. Su contribución es, por tanto, altamente dependiente del modelo específico.

La variable Tierra es la que mejores resultados presenta, siempre es significativa al 1%. Sus coeficientes son consistentemente positivos y significativos en la mayoría de los modelos en los que aparece. Por ejemplo, en los Modelos 1, 5 y 6, los coeficientes son 4.937, 3.577 y 4.506, respectivamente, todos al 1% de significancia. Esto refleja una contribución sustancial y estable de la Tierra a la producción. Incluso en modelos más complejos que incluyen múltiples variables, como el Modelo 9 (1.418) y el Modelo 15 (1.218), la Tierra sigue mostrando un impacto positivo y significativo. Estos resultados sugieren que el factor **Tierra es un recurso natural clave en los modelos analizados**, con una contribución predecible y positiva, lo que indica su relevancia económica y estadística.

Por último, la variable Materiales presenta un comportamiento predominantemente positivo y significativo en la mayoría de los modelos. Los coeficientes más altos se encuentran en los Modelos 1 (4.498) y 6 (4.338), ambos al 1% de significancia, lo que sugiere una contribución sólida y positiva. Sin embargo, hay excepciones, como en el Modelo 14, donde el coeficiente es negativo (-0.868, al 1%), indicando un impacto adverso inesperado. Este caso podría deberse a interacciones específicas con otras variables en el modelo o a problemas como multicolinealidad. Así, Materiales demuestra ser otra variable importante, con impactos mayoritariamente positivos en los modelos, pero con alguna inestabilidad en contextos específicos.

A manera de conclusión general del análisis de esta primera etapa, la evaluación de las cuatro variables muestra diferencias significativas en su contribución a la producción. La Tierra y los Materiales son los más consistentes, destacándose por su estabilidad y relevancia, con coeficientes mayoritariamente positivos y significativos en la mayoría de los modelos. En particular, la Tierra se posiciona como la variable más consistente, mostrando un impacto positivo y predecible en todos los contextos evaluados. Por su parte, los Materiales también presentan una contribución sólida, aunque en el Modelo 15 se observa un valor negativo inesperado, posiblemente explicado por interacciones específicas.

En contraste, el Agua es la variable más inestable y menos consistente. En la mayoría de los modelos no alcanza significancia estadística, y en varios casos tiene un signo negativo, contrario a lo esperado. Solo en los Modelos 3 y 10, en combinación con la Energía y los Materiales, muestra resultados positivos y significativos. Esta inestabilidad parece asociada a problemas de multicolinealidad severa, lo que dificulta su estimación.

Por último, la Energía presenta un comportamiento polarizado. En algunos modelos, como el 7 y el 8, muestra coeficientes negativos y significativos, indicando un impacto adverso. Sin embargo, en los Modelos 3 y 13 su contribución es positiva y significativa, destacando la dependencia de su efecto en el contexto y en la interacción con otras variables.

De esta manera, mientras que la Tierra y los Materiales tienen un papel clave en la función de producción, el Agua y la Energía presentan mayor variabilidad en su impacto. Esto subraya la importancia de considerar cuidadosamente las interacciones entre variables y problemas metodológicos, como la multicolinealidad, para lograr interpretaciones más precisas y robustas.

Etapa II. Selección de los modelos con mejor Akaike

La Tabla 7 presenta los coeficientes obtenidos en los modelos que mejor ajustan según el criterio Akaike (7, 16, 8 y 11). El modelo 7 recoge la regresión con todas las variables sociales (K y L) y las incluidas en la ecuación [1 y 6]. Se observa acá que todos los parámetros, a excepción del Agua (W), fueron significativos, aunque con signos contrarios a los esperados para las variables Trabajo (L) y Energía (E). Este resultado surge debido a la multicolinealidad. Sin embargo, aunque los parámetros son inestables, se evidencia una contribución muy importante de la Tierra (Tr) y los Materiales (Mat), alcanzando elasticidades de 4,9 y 4,5% respectivamente. Esto indica una elevada contribución de la naturaleza en estos dos factores de producción, a la generación de valor económico. El capital (K) por su parte, presenta el signo esperado, aunque su contribución a la generación de valor es baja con una elasticidad de 0,32%. Igualmente aparece con signo contrario la contribución del trabajo a la generación de valor, lo cual resulta contra intuitivo.

	Modelo 7	Modelo 16	Modelo 8	Modelo 11
Intercepto	63,121***	58,775***	-3,535***	-7,322***
Trabajo	-0,368***	-0,394***	-0,386***	-0,296***
Capital	0,316***	0,306***	0,362***	0,353***
Agua	-0,105			0,333***
Energía	-8,378***	-7,909***		
Tierra	4,937***	4,506***	0,983***	
Materiales	4,498***	4,338***	0,227**	0,636***
d08	-0,182***	-0,171***	-0,175***	-0,098
AIC	170	170,9	166,4	150,9
*p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01				

Tabla 7. Resultados de los coeficientes según los modelos mejor ajustados

Fuente: : elaboración propia

El Modelo 16, que en su componente ambiental excluye al agua, pero incluye la energía, la tierra y los materiales, es el que tiene más alto Akaike (170,9), señalando que es el de mejor ajuste en sus coeficientes. Sin embargo, resulta contraintuitivo por dos aspectos: a) no incluye el agua como factor de producción siendo esta un insumo esencial para cualquier tipo de cultivo, mucho más para la caña que es usuaria intensiva del recurso. Y b) La energía presenta el signo contrario al esperado. Aunque, al igual que en el Modelo 7, las otras dos variables ambientales (Tierra y Materiales) tienen también elevadas elasticidades que muestran su importancia como contribuidoras a la generación de valor económico. Así, la primera alcanza 4,5% y la segunda 4,3%, señalando que, una adición de un 1% en cualquiera de los dos factores, incrementa la producción en un múltiplo por encima de 4 puntos. Con referencia a las variables sociales de este modelo, las mismas muestran baja elasticidad comparativa para el Capital, aunque con signo esperado de 0,36%, y con signo negativo y contra intuitivo para el Trabajo. Estas contradicciones y deficiencias econométricas hacen que este Modelo, a pesar de tener alto Akaike, no resulte adecuado para la interpretación de los diferentes factores de producción.

Sin embargo, en un análisis más detallado de los dos modelos (7 y 16), se resalta el importante papel que juegan los RRNN, en este caso la Tierra y los Materiales, como generadores significativos de valor económico en la caña de azúcar en Colombia. Las elasticidades de ambos factores en ambos modelos superan los 4 puntos porcentuales, muy por encima del factor capital que no llega al 1%.

Dada la importancia mostrada por los Materiales y la Tierra, en el tercer modelo seleccionado (el 8), se incluyen solo estas dos variables

ambientales, excluyendo el Agua y la Energía. Este Modelo tiene el tercer mejor Akaike (166,4) y además reduce el grado de multicolinealidad dado que excluye las variables de más alta correlación. Por su parte, las variables Capital, Tierra y Materiales no pierden su significancia ni cambian de signo, lo que es un buen síntoma desde el punto de vista econométrico dado que indica consistencia en los parámetros. Sin embargo, la variable Trabajo sigue siendo negativa.

Dentro de los 18 modelos que se estimaron en los que se incluyó el agua como factor de producción, el que mejor criterio de información Akaike obtuvo fue el Modelo 11. Este modelo además de no incluir la Tierra como factor de producción por su alta correlación, arrojó un coeficiente de elasticidad positivo para el agua, el capital y los materiales de 0,33, 0,35 y 0,64 respectivamente, aunque el trabajo (L) se mantiene con el signo contrario.

El signo negativo de la variable trabajo en los cuatro modelos es contrario a lo esperado. Creemos que está relacionado con las dificultades de información para la construcción de esta serie.

Dadas las características econométricas e interpretativas adecuadas del Modelo 8 y la inclusión del agua en el modelo 11, los seleccionamos como los de mayor potencial para explicar la generación de valor económico en el monocultivo de caña de azúcar en la CARC.

Etapas III. Selección de los dos modelos que recogen mejor la contribución de la naturaleza

Con base a lo anterior, la Etapa III de análisis de los resultados consiste en interpretar los coeficientes de los modelos finalmente seleccionados representados de la siguiente manera:

Modelos seleccionados

(Modelo 8)

$$y_t = -3,53 + 0,36k_{t-1} - 0,39l_{t-1} + 0,98tr_{t-1} + 0,23mat_{t-1} - 0,18d_{08} + p_{t-1}$$

(Modelo 11)

$$y_t = -7,32 + 0,35k_{t-1} - 0,30l_{t-1} + 0,33w_{t-1} + 0,64mat_{t-1} - 0,10d_{08} + p_{t-1}$$

Interpretación de coeficientes y comparación entre los dos modelos seleccionados:

Variables sociales:

- **Constante de eficiencia técnica a la Solow ($\alpha = \ln A_{t-1}$):** en ambos modelos, este parámetro es negativo capturando el nivel base de la producción cuando los demás factores están en cero. Es decir, este parámetro representa el efecto de factores externos y la tecnología de base en el contexto de Solow²⁸ antes de considerar otros factores productivos (capital, trabajo y recursos naturales). Su signo negativo es un resultado contraintuitivo con la teoría, pues se espera que exista una relación positiva o que sea cercano a cero. Sin embargo, esta

lógica teórica está fundamentada en un escenario simplista de solo factores de producción como el capital y el trabajo. En este sentido, los resultados presentados por ambos modelos reiteran la importancia que tienen los recursos naturales para la producción de caña de azúcar, los cuales por obvias razones son esenciales para la actividad agrícola, sin los cuales no puede existir producción.

- **Capital (k_{t-1}):** el signo positivo en ambos escenarios de análisis muestra una elasticidad positiva para el capital como variable explicativa de la producción, donde un incremento del 1% en la inversión de capital físico (infraestructura, transporte, TIC, etc.) aumenta la producción en un 0,36 y 0,35% respectivamente, manteniendo constantes los demás factores. Además, no existe diferencia relevante del parámetro que acompaña esta variable en ambos modelos, corroborando la contribución positiva y moderada del capital a la producción de caña de azúcar.

- **Trabajo (l_{t-1}):** en ambos modelos este coeficiente presenta un signo negativo indicando un resultado contraintuitivo frente a la teoría, pues se espera que un aumento en la cantidad de trabajo genere siempre un incremento en la producción. Al ser un parámetro significativo estadísticamente, un aumento del 1% en la mano de obra disminuye la producción de caña de azúcar en 0,39 y 0,30% respectivamente. Esto podría sugerir la sobreutilización o ineficiencia en el uso del recurso laboral en el proceso productivo, lo cual puede estar relacionado con el uso intensivo del capital (maquinaria, equipo, sistematización, riego, etc.) que desplaza crecientemente mano de obra, haciendo su uso ineficiente. Buena parte de estos resultados pueden deberse también a la poca información disponible sobre esta variable y a la necesidad de construir la serie con muchos supuestos. Además, cuando se comparan ambos modelos aparece una diferencia significativa en el valor que toman los parámetros de esta variable: 0,39 Vs. 0,30%, siendo menor en el Modelo 11 que incluye el Agua como factor productivo. Esta diferencia podría implicar que la inclusión del agua reduce el efecto negativo de la improductividad del trabajo, haciendo aparentemente más optimo el uso de este factor en el tiempo.

Variables ambientales

- **Tierra (tr_{t-1}):** esta variable, incluida únicamente en el modelo 8, es la que mayor elasticidad presenta frente a la producción y con el signo positivo esperado. Así, cuando las hectáreas sembradas aumentan en un 1%, se genera un incremento en la producción de caña de azúcar en casi la misma unidad, 0,98%, manteniendo los demás factores constantes. Es decir, se muestra que la tierra es un factor esencial y casi proporcional al aumento de la producción, lo cual tiene un alto sentido en el contexto agrícola. Asimismo, es

[41]

28. El coeficiente de Solow refleja el impacto de la tecnología y otros elementos no medidos directamente (como el conocimiento o la eficiencia organizativa) sobre la producción, independientemente de la cantidad de capital o trabajo. Un valor negativo sugiere que, sin los aportes específicos de los factores de producción, la economía no alcanzaría un nivel suficiente de producción, resaltando así la dependencia de insumos adicionales y mejoras tecnológicas para su crecimiento.

necesario señalar que es una variable de la que dependen muchas de las otras variables ambientales: la huella hídrica, el consumo de energía y la cantidad de materiales utilizados, están relacionados con la cantidad de hectáreas sembradas. La exclusión de esta variable en el Modelo 11 indica que el mismo se orienta a enfatizar en el factor agua como recurso diferenciador, el cual de todas maneras, como ya anotamos, depende de la cantidad de hectáreas sembradas.

- **Agua (w_{t-1}):** en el Modelo 11, el agua tiene un coeficiente positivo y significativo, destacándose como un factor importante en la producción de caña de azúcar. Así, un incremento del 1% en la cantidad de agua, aumenta la producción en promedio en 0,33%, manteniendo los demás factores constantes. Analizando los Modelos 8 y 11, se observan que ambos son complementarios para rescatar el papel de la naturaleza en la generación de valor económico. Dada la alta correlación entre la Tierra y el Agua, estimada está a través de la Huella Hídrica que depende de las hectáreas sembradas, incluir ambas variables en un mismo modelo genera multicolinealidad. Por ello se requiere utilizar dos modelos que incluyan en forma independiente cada uno de estos dos factores de producción. En el Modelo 8, la Tierra contribuye de manera importante a la generación de valor y en el 11 este papel lo juega el agua.

- **Materiales (mat_{t-1}):** en ambos modelos los materiales que corresponden a los fertilizantes [Nitrógeno (N), Potasio (K) y Fósforo (P)], contribuyen de forma importante al aumento del producto. Sin embargo, hay diferencias significativas en las elasticidades para cada uno de ellos. Mientras que para el Modelo 8 la elasticidad de los fertilizantes alcanza un nivel de 0,23%; en el Modelo 11, que usa agua, esta se eleva a 0,64%. Esto sugiere que los fertilizantes se vuelven más relevantes cuando se incluye el agua como factor de producción. Esto va en la misma dirección de lo estipulado por Elhag (2017) al determinar que la eficiencia en el uso del agua mejora significativamente cuando está acompañada del uso de fertilizantes. Al igual que este autor, la contribución del agua es menor a la que presenta los fertilizantes en el proceso productivo (0,1% y 0,9% respectivamente).

- **Coficiente de la variable dicotómica del año 2008 (d_{08}):** en ambos modelos, esta variable se comportó significativa y negativamente. Indicando que, en promedio, la producción cayó debido a las crisis y eventos desfavorables relacionados con los fenómenos naturales del Niño y el paro de corteros de caña de ese año.

En conclusión, los resultados resaltan la importancia crítica de los recursos naturales en la generación de valor económico en la producción de caña de azúcar. La evidencia sugiere que la Tierra y los Materiales tienen un papel esencial, con elasticidades altas en ambos modelos en su contribución a la producción. Esto subraya una de las premisas

fundamentales de la Economía Ecológica, que reconoce la interdependencia entre la actividad económica y los ecosistemas naturales. En este caso, un incremento en el uso de la Tierra y los Materiales refleja cómo la naturaleza contribuye de manera significativa a la actividad productiva, lo que subraya la necesidad de políticas que promuevan el uso controlado de estos recursos. La alta elasticidad de estos factores destaca el hecho de que el crecimiento económico en este sector no puede desvincularse de la capacidad y del estado de los ecosistemas naturales.

Por otro lado, la baja elasticidad del capital, que no supera el 1%, y el signo negativo para el trabajo, son resultados que llaman la atención desde la Economía Ecológica, dado que muestran las tensiones en un modelo productivo intensivo en recursos naturales. La economía ecológica enfatiza que, aunque el capital y el trabajo son fundamentales, la dependencia de los recursos naturales debe ser gestionada con mayor cuidado, ya que la explotación intensiva de estos recursos sin una adecuada consideración de los límites ecológicos puede llevar a desequilibrios en el sistema económico y ambiental.

Así, el contraste entre los modelos 8 y 11 refleja la complejidad inherente al análisis de los recursos naturales en los sistemas productivos. El agua, al ser un recurso esencial para el cultivo de caña de azúcar, tiene una elasticidad positiva significativa en el Modelo 11, mientras que la Tierra tiene un papel crucial en el Modelo 8. La Economía Ecológica destaca la relevancia de entender cómo estos recursos naturales, que están profundamente interrelacionados, pueden influir de manera distinta en la producción dependiendo de su inclusión en los modelos. Esto refuerza la necesidad de considerar los vínculos entre los factores productivos naturales y sociales, promoviendo un modelo económico que valore de manera integral el capital natural para lograr una producción sostenible.

4.3 Discusión de resultados

De acuerdo con la revisión teórica y con los resultados obtenidos, quisiéramos comenzar esta discusión a partir de los postulados sobre sustentabilidad presente en el debate entre Georgescu-Roegen/Daly vs Solow/Stiglitz, la cual resalta dos visiones opuestas sobre el papel de los recursos naturales en la producción económica. Mientras que Solow y Stiglitz confían en la capacidad del progreso tecnológico para sustituir los recursos naturales con capital hecho por los seres humanos, Georgescu-Roegen y Daly enfatizan la importancia de los límites biofísicos, señalando que la economía está atada a las leyes de la naturaleza y que algunos recursos son insustituibles. Esta última visión encuentra eco en los resultados de los modelos econométricos estimados, donde los factores naturales, analizados anteriormente en las etapas I y II, demuestran ser determinantes en la producción de caña de azúcar, sugiriendo una *sustentabilidad* fuerte en la que la eficiencia tecnológica no puede reemplazar ni en el corto plazo ni indefinidamente estos recursos esenciales²⁹.

[42]

29. En este punto, creemos importante anotar que nuestro análisis comprende un periodo de 63 años, siendo superior al estudio realizado por Robert Solow en 1957 con 50 datos aproximadamente, desmitificando el proceso de sustituibilidad entre capital físico y capital natural, dado que las elasticidades de los recursos naturales superan a los factores sociales (capital y trabajo).

En particular, los resultados de la modelación econométrica refuerzan la idea de que el agua juega un papel fundamental en el rendimiento agrícola, destacándose en el Modelo 11 como un recurso indispensable en escenarios de riego controlado. Aunque la teoría neoclásica sugiere que el capital y la tecnología podrían compensar la escasez de recursos naturales, la multicolinealidad observada en los modelos, especialmente entre el agua y los otros factores de producción, ponen en duda la posibilidad de sustituir completamente este recurso y obviamente la tierra en este tipo de producción intensiva. Así, el Modelo 8, al sacar el recurso hídrico del análisis, sería un modelo sesgado dadas las características propias del cultivo de la caña de azúcar, el cual es agua-intensivo (Pérez et al., 2011 y Documento Vol. N° 2). Además, el impacto negativo del trabajo en ambos modelos, aunque inesperado, sugiere problemas de eficiencia que no pueden resolverse únicamente con aumentos de capital, alineándose así con las limitaciones señaladas por Georgescu-Roegen y Daly.

Estos hallazgos sugieren que el enfoque neoclásico, con su confianza en la sustituibilidad y en la innovación tecnológica, es insuficiente para abordar los desafíos de un cultivo dependiente de los recursos naturales como la caña de azúcar, y en general todo proceso económico. De hecho, la mayor elasticidad encontrada en los factores naturales respecto a los factores sociales del capital y el trabajo soportan la hipótesis material de la economía ecológica: detrás de toda actividad económica hay una base material que se refleja en fondos, stocks y flujos biofísicos que evidencian la *insostituibilidad* de los recursos naturales en la producción. Tal y como lo expresó Marshall (2015) explicando que una elasticidad de sustitución de 1 implicaría una sustitución perfecta (los factores pueden reemplazarse fácilmente), mientras que un valor menor a 1, como 0,98 y 0,33 en los casos de los factores Tierra y Agua respectivamente, indica que es imposible reemplazarlos por capital físico.

De esta manera, el reconocimiento de la ley de la entropía en la producción económica es esencial para entender los límites biofísicos dentro de los cuales debe operar el sistema económico. Aunque este estudio no utiliza un modelo bioeconómico en los términos que describe Georgescu-Roegen, queda claro que el uso y/o acaparamiento de los recursos naturales no pueden ser reemplazados únicamente con inversión en capital o tecnología. Como sugiere Herman Daly (1997), el crecimiento ilimitado en un sistema finito es insostenible, y depender del capital y la tecnología sin reconocer los límites físicos de los recursos naturales solo posterga una crisis inevitable.

Existe un fuerte contraste entre el marco conceptual y la metodología aquí utilizados: si bien por un lado el marco teórico de la Economía Ecológica se fundamenta en una visión de sistemas complejos, donde las interacciones no lineales juegan un papel central en la comprensión

de los procesos ecológicos y económicos, por el otro tenemos una metodología aplicada a partir de la econometría. Ésta última presenta una *limitación* intrínseca: su enfoque lineal. La linealidad de los modelos econométricos tiende a simplificar las relaciones entre las variables, y dado que desde la Economía Ecológica se entiende a la Naturaleza y a sus interrelaciones con el sistema socioeconómico de forma compleja, es altamente factible que esta metodología no permita captar adecuadamente esa complejidad de los sistemas naturales. Sin embargo, esta contradicción entre el marco teórico y el método aplicado, reafirmó en este caso los postulados de la Economía Ecológica.

Este tema ha sido ampliamente discutido por autores como Griliches (1963) y Marshall (2015), quienes ya advertían sobre las limitaciones inherentes al uso de funciones de producción tradicionales, como la Cobb-Douglas, que no capturan adecuadamente la complejidad, no-homogeneidad y no-linealidad de los recursos naturales. Nuestros resultados respaldan este enfoque, sugiriendo que los modelos que no consideren la complementariedad entre recursos naturales y otros factores productivos subestiman los riesgos asociados a la sobreexplotación de estos recursos. Nordhaus (1992) argumenta que ignorar la oferta limitada de recursos como la Tierra y el Agua puede llevar a niveles insostenibles de contaminación y degradación ambiental, lo cual tendría serias implicaciones para la sostenibilidad de la producción agrícola en el largo plazo (más detalles sobre este tema se aprecian en el Volumen No. 3 sobre presiones ambientales).

Además, el proceso de escoger modelos con la menor perturbación de la varianza en los parámetros dado el alto grado de correlación entre las variables para mitigar la multicolinealidad presenta un desafío desde la Economía Ecológica. Específicamente en el caso de la variable Agua, por ejemplo, la cual juega un papel preponderante en la agroindustria cañera, no puede ser eliminada del análisis de la producción agrícola. Sin embargo, es justo por su importancia en el modelo, que altera todas las demás variables y que imposibilita su integración con los factores como la Tierra y los Materiales en conjunto. En este punto, podemos criticar los procesos econométricos sobre la base de que no se puede sacrificar la realidad de las actividades económicas y ambientales por aspectos de simpleza estadística.

En esta misma línea, Elhag (2017) y Mukhamedieva et al. (2024) destacan que, en procesos agrícolas, el uso del agua y los fertilizantes, o la energía vinculada al trabajo, la eliminación de estas variables puede simplificar el análisis, pero ignora la *interdependencia metabólica* de los sistemas. De hecho, el rechazo de Georgescu-Roegen al uso de la función Cobb-Douglas se justifica al considerar que estos modelos tienden a invertir la jerarquía de los sistemas naturales sobre los sistemas social y económico, un punto que es crucial para la Economía Ecológica.

Así, nuestros resultados confirman la relevancia de los recursos naturales —Tierra, Agua y Materiales (fertilizantes)— como factores fundamentales en la generación de valor económico. Este hallazgo coincide con estudios previos como los de Randall y Castle (1985) y Hosseini et al. (2008), quienes subrayan que la tierra y otros recursos naturales desempeñan un papel central en la productividad agrícola, a menudo superando la contribución de los factores tradicionalmente considerados, como el trabajo y el capital. Fuglie (2011) también destaca que, en tierras con alta pluviosidad, el recurso agua es crucial para lograr mayores rendimientos agrícolas, lo que es consistente con nuestros resultados, que muestran que los factores naturales no solo sostienen, sino que impulsan la producción de manera significativa.

A manera de conclusión general, desde el enfoque de la Economía Ecológica, resulta crucial el reconocimiento profundo del valor inherente de la naturaleza, no solo como un recurso pasivo, sino como un elemento activo y esencial en los procesos productivos. La naturaleza desempeña un rol irremplazable en la sustentabilidad de cualquier actividad económica, ya que provee no solo los recursos materiales, sino también los servicios ecosistémicos fundamentales que sostienen la vida y las bases mismas de nuestras economías. Así, su conservación debe ser concebida como una prioridad, no solo por razones éticas, sino también por su impacto directo en el bienestar social y económico a corto y largo plazo. Esto demanda políticas que integren el cuidado ambiental y la preservación de la biodiversidad, con un enfoque en la equidad intergeneracional y la resiliencia ecológica. Solo de esta forma, podemos asegurar que los sistemas económicos operen dentro de los límites planetarios y respondan a los desafíos de sustentabilidad que enfrentamos, salvaguardando así el equilibrio vital entre naturaleza y sociedad.

4.4 Conclusiones³⁰

La investigación resalta la importancia fundamental de la naturaleza como una base insustituible para la generación de valor económico en actividades agrícolas, con énfasis en el monocultivo de la caña de azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), Colombia. Contrario a la perspectiva tradicional de la economía neoclásica, que minimiza el papel de los recursos naturales al considerarlos como factores fácilmente sustituibles, este trabajo enfatiza que recursos naturales como el agua, la tierra, la energía y los materiales (o fertilizantes) no solo facilitan los procesos productivos, sino que son en sí mismos generadores de valor económico. Este enfoque es consistente con los postulados de la Economía Ecológica, que reconoce la naturaleza como un sistema biofísico abierto y limitado, cuyo uso excesivo puede comprometer la sostenibilidad futura.

El análisis econométrico, basado en una función de producción Cobb-Douglas *adaptada*, permitió estimar las elasticidades de los recursos naturales, mostrando que su contribución a la producción es significativa, aunque heterogénea. Por ejemplo, mientras la tierra y los materiales presentan impactos positivos y consistentes en la producción, el agua y la energía exhiben patrones más variables, evidenciando posibles tensiones entre su disponibilidad y la intensidad de su uso. A pesar de estas limitaciones, la metodología elegida subraya la necesidad de avanzar hacia modelos econométricos más integrales, capaces de captar la complejidad inherente a los sistemas agrícolas y su interacción con los ecosistemas naturales.

Desde una perspectiva regional, la CARC y más específicamente el Valle Geográfico del Río Cauca se destaca como una de las zonas más rentables del mundo para la producción de caña de azúcar, gracias a factores como suelos fértiles, clima favorable y disponibilidad hídrica (ver Volumen N° 2). Sin embargo, esta ventaja comparativa viene acompañada de desafíos significativos. La intensificación del monocultivo ha generado impactos ambientales importantes, como la degradación del suelo, la contaminación de recursos hídricos y la pérdida de biodiversidad. Estos efectos reflejan la necesidad de implementar políticas públicas que equilibren la rentabilidad económica con la sostenibilidad ambiental, asegurando así que los beneficios económicos no comprometan el bienestar de las generaciones futuras.

La investigación como un todo también llama la atención sobre los límites biofísicos del planeta y la necesidad urgente de respetarlos en la planificación económica. Los modelos de desarrollo actuales, que dependen de un crecimiento económico continuo, son incompatibles con un mundo de recursos finitos. En este contexto, la Economía Ecológica ofrece un marco analítico crítico para integrar los servicios ecosistémicos y las contribuciones biofísicas en la toma de decisiones económicas. Este enfoque no solo es relevante para entender el caso del monocultivo de la caña de azúcar, sino también para abordar las implicaciones globales de la crisis ambiental y climática (ver Volumen No. 3).

Por lo tanto, la investigación concluye con un llamado a repensar las políticas públicas y las prácticas agrícolas desde una perspectiva de sustentabilidad. Incorporar explícitamente las contribuciones de la naturaleza al valor económico es un paso necesario para construir un modelo de desarrollo más justo y equitativo con la naturaleza y la sociedad en general, que reconozca y respete las limitaciones biofísicas del planeta. Este enfoque no solo beneficiará a los sistemas productivos, sino que garantizará la resiliencia de los ecosistemas y el bienestar humano en el largo plazo. Aunque el estudio se centró en el sector agrícola,

[44]

30. Estas conclusiones abordan el trabajo central de esta investigación el cual corresponde a estimar la contribución de la naturaleza a la generación de valor económico. Sin embargo, también los otros dos Documentos: el Vol. N° 2: Caracterización de la cuenca alta del río Cauca y del monocultivo de caña de azúcar (1960-2022) y el Vol. N° 3. Huellas Hídrica, de Carbono y Ecológica del Cultivo de Caña de Azúcar en la Cuenca Alta del Río Cauca, Colombia (1960-2022).

sus hallazgos son aplicables a otros sectores, como el industrial y de servicios, sugiriendo que los resultados de esta investigación podrían extrapolarse a una gama más amplia de actividades económicas.

Además, el trabajo de Marshall (2015) ofrece una importante reflexión sobre las limitaciones de la función de producción Cobb-Douglas en la captura de la dinámica de participación de los factores productivos, particularmente en lo que respecta a los recursos naturales. Marshall señala que la elasticidad de sustitución entre factores no es perfecta, como lo sugieren los modelos tradicionales, sino que los recursos naturales tienen una elasticidad de sustitución inferior a 1, lo que significa que no son fácilmente reemplazables sin una

pérdida significativa en la eficiencia de la producción. Esta visión es respaldada por estudios recientes de Bai et al. (2022) y Wang (2024), quienes proponen la creación de sistemas de contabilidad del capital natural para monitorizar el estado de los recursos naturales en tiempo real y fomentar su uso sostenible, como la rotación de cultivos y el uso de componentes orgánicos. Estos enfoques proporcionan una oportunidad para optimizar el uso de la biodiversidad y reducir los impactos negativos del monocultivo. Nuestros resultados corroboran con absoluta claridad el planteamiento de estos autores y la importancia teórica y empírica de la Economía Ecológica.



Anexos

Anexo 1. Descripción de las variables en serie, 1960 – 2022

Fuente: elaboración propia

kTon: Kilotoneladas

Mm3: Millones de metros cúbicos (1Mm3 = 1x10e6 m3)

PJ: Petajulios (1 PJ = 1x10e15)

[46]

Año	Producción (kTon)	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Nitrógeno (kg)	Fósforo (kg)	Potasio (kg)	Número de trabajadores (miles)	Trabajadores /100ha	Acervo de Capital (Miles de millones de pesos)	Agua (Mm3)	Fertilizantes (kTon)	Energía (PJ)	Huella Hídrica Verde (Mm3)	Huella Hídrica Azul (Mm3)
1960	3	62	40	88,0	4,5	0,5	4,2	12,6	20,5	39,7	594,5	9,3	1,9	412,2	182,2
1961	3	63	41	84,6	3,5	0,5	4,1	13,4	21,4	41,1	612,7	9,0	1,9	343,9	268,8
1962	4	64	42	92,8	3,9	0,6	4,6	14,3	22,4	42,5	630,3	10,1	2,1	390,5	239,8
1963	4	64	37	95,0	3,5	0,6	4,7	15,7	24,7	43,1	552,6	10,3	2,1	331,0	221,6
1964	4	64	39	100,0	3,9	0,6	5,0	16,2	25,3	44,0	590,4	11,0	2,2	363,7	226,7
1965	4	70	42	103,1	4,4	0,7	5,7	17,1	24,3	45,1	633,5	12,4	2,4	386,1	247,4
1966	5	79	50	100,1	5,0	0,7	6,2	18,1	23,0	47,1	743,8	13,5	2,6	475,8	268,0
1967	5	82	53	101,9	5,4	0,8	6,6	19,2	23,3	49,5	787,8	14,3	2,8	482,2	305,6
1968	6	86	56	105,8	5,9	0,9	7,1	20,4	23,7	52,7	841,6	15,5	3,0	583,8	257,8
1969	6	92	60	104,3	6,3	0,9	7,5	21,5	23,4	57,0	901,4	16,3	3,1	549,1	352,3
1970	6	92	59	102,4	6,0	0,9	7,4	19,4	21,1	62,6	881,1	16,1	3,1	575,7	305,4
1971	7	98	64	112,4	7,2	1,0	8,6	20,5	20,9	66,6	955,1	18,8	3,5	897,7	57,4
1972	7	102	68	110,0	7,4	1,1	8,8	21,2	20,7	71,1	1.015,9	19,2	3,6	613,2	402,7
1973	7	114	68	108,0	7,4	1,2	9,6	23,3	20,5	76,1	1.022,6	21,0	3,9	719,2	303,4
1974	8	116	70	115,0	8,0	1,3	10,5	23,6	20,3	81,9	1.044,6	22,8	4,1	803,3	241,2
1975	9	118	74	120,0	8,9	1,4	11,1	28,0	23,7	88,2	1.110,8	24,3	4,3	976,0	134,8
1976	8	113	74	104,0	7,7	1,1	9,2	29,7	26,4	94,3	1.114,2	20,0	3,9	511,5	602,7
1977	8	128	76	103,4	7,9	1,3	10,4	30,7	24,0	100,5	1.147,0	22,6	4,3	555,1	591,9
1978	10	133	80	120,0	9,6	1,5	12,5	31,6	23,8	107,1	1.197,0	27,2	4,9	690,8	506,2
1979	11	130	86	123,0	10,5	1,5	12,5	30,1	23,1	111,6	1.286,0	27,3	4,8	794,8	491,2

1980	11	133	93	123,1	11,5	1,6	12,8	30,2	22,7	118,8	1.398,4	28,0	4,9	659,3	739,1
1981	11	132	92	121,8	11,2	1,5	12,6	29,6	22,4	125,9	1.374,1	27,4	4,9	1.027,4	346,7
1982	12	134	94	125,8	11,8	1,6	13,2	28,6	21,3	130,8	1.412,8	28,8	5,0	950,3	462,5
1983	12	138	112	107,1	12,0	1,4	11,6	27,3	19,8	134,6	1.679,3	25,2	4,7	773,8	905,5
1984	11	139	101	107,3	10,9	1,4	11,6	26,4	19,1	136,8	1.517,0	25,4	4,8	1.278,4	238,6
1985	12	132	100	119,9	12,0	1,5	12,3	26,3	20,0	137,3	1.505,1	26,9	4,8	763,9	741,3
1986	12	139	107	113,7	12,1	1,5	12,4	25,8	18,6	139,3	1.600,3	27,0	4,9	975,2	625,1
1987	12	137	108	114,9	12,4	1,5	12,4	25,4	18,5	142,2	1.624,5	26,9	4,9	852,3	772,2
1988	13	139	112	119,8	13,4	1,6	13,0	25,5	18,4	146,0	1.678,8	28,3	5,0	1.295,1	383,8
1989	14	145	119	118,0	14,0	1,6	13,4	25,5	17,6	149,9	1.785,5	29,3	5,2	988,1	797,4
1990	14	152	122	116,7	14,2	1,7	13,9	25,9	17,0	154,0	1.830,8	30,4	5,4	1.014,6	816,2
1991	15	160	124	117,0	14,5	1,8	14,7	25,8	16,1	151,6	1.860,5	32,0	5,7	872,2	988,3
1992	15	165	127	121,4	15,4	1,9	15,7	25,7	15,6	149,0	1.903,5	34,2	6,0	618,2	1.285,3
1993	16	179	125	130,9	16,3	2,2	18,3	24,7	13,8	146,5	1.869,9	39,9	6,8	528,8	1.341,1
1994	17	181	134	129,5	17,3	2,2	18,4	24,8	13,7	144,3	2.005,1	40,0	6,8	1.453,0	552,1
1995	18	182	164	108,9	17,8	1,9	15,5	22,9	12,6	142,4	2.454,6	33,8	6,2	1.182,1	1.272,5
1996	18	184	178	101,3	18,0	1,8	14,6	21,9	11,9	140,2	2.669,3	31,8	6,1	1.641,6	1.027,7
1997	18	193	170	105,0	17,9	1,9	15,9	21,3	11,1	138,7	2.552,6	34,6	6,5	1.380,2	1.172,4
1998	18	196	174	105,9	18,4	2,0	16,3	19,7	10,0	137,6	2.604,2	35,5	6,6	1.590,4	1.013,8
1999	19	197	167	116,1	19,4	2,2	17,9	20,1	10,2	136,4	2.507,1	39,1	7,0	1.817,4	689,7
2000	20	194	187	106,5	19,9	1,9	16,1	21,3	11,0	136,1	2.804,3	35,0	6,5	1.667,7	1.136,6
2001	18	190	175	103,5	18,1	1,9	15,3	21,3	11,2	136,4	2.624,9	33,3	6,3	1.067,3	1.557,6
2002	21	206	161	127,7	20,5	2,5	20,5	21,4	10,4	136,1	2.408,6	44,8	7,6	1.002,3	1.406,3
2003	22	198	170	127,5	21,7	2,4	19,8	21,6	10,9	135,1	2.549,3	43,1	7,3	1.354,5	1.194,8
2004	22	197	172	128,7	22,2	2,4	19,9	21,7	11,0	133,3	2.583,4	43,3	7,3	1.234,9	1.348,5
2005	22	198	176	123,5	21,8	2,3	19,2	22,8	11,5	133,2	2.645,9	41,8	7,2	1.420,5	1.225,4
2006	22	198	180	122,6	22,0	2,3	19,0	23,3	11,8	133,0	2.694,1	41,4	7,2	1.551,7	1.142,4
2007	21	203	185	114,1	21,1	2,1	17,7	19,0	9,3	132,8	2.773,3	38,6	7,0	2.031,1	742,2
2008	19	206	157	122,0	19,2	2,3	19,3	17,6	8,6	132,3	2.361,9	42,1	7,3	2.020,0	341,9
2009	24	208	193	122,4	23,6	2,4	19,6	23,6	11,3	133,1	2.892,2	42,7	7,5	1.677,2	1.215,0
2010	20	218	172	117,6	20,3	2,4	20,1	29,2	13,4	133,6	2.585,8	43,8	7,7	2.257,0	328,8
2011	23	224	186	122,5	22,7	2,6	21,5	30,6	13,7	134,1	2.783,1	46,8	8,1	2.390,3	392,8
2012	21	228	207	100,5	20,8	2,2	17,9	30,6	13,4	134,1	3.108,0	39,1	7,4	1.970,1	1.137,9
2013	22	226	193	111,5	21,6	2,4	19,7	31,1	13,8	134,4	2.901,6	42,9	7,7	1.789,0	1.112,5
2014	24	230	197	123,2	24,3	2,7	22,2	30,9	13,4	134,6	2.959,0	48,4	8,3	1.875,3	1.083,7
2015	24	232	199	122,3	24,4	2,7	22,1	30,8	13,3	135,2	2.990,7	48,1	8,3	1.476,3	1.514,5
2016	23	238	191	122,5	23,4	2,7	22,6	30,8	12,9	135,8	2.869,3	49,4	8,6	1.911,2	958,0
2017	24	243	173	140,7	24,4	3,3	26,9	32,4	13,3	136,5	2.599,0	58,7	9,5	2.147,1	451,9
2018	25	248	177	141,8	25,0	3,5	28,5	32,7	13,2	136,3	2.648,9	62,2	10,0	1.915,7	733,2
2019	23	262	240	97,2	23,3	2,9	24,3	31,1	11,9	136,3	3.602,4	53,0	9,3	2.606,2	996,2
2020	24	263	244	96,5	23,6	2,9	23,8	29,0	11,0	136,3	3.663,3	52,0	9,3	2.219,6	1.443,7
2021	23	263	243	94,2	22,9	3,0	24,9	28,6	10,9	136,2	3.640,7	54,3	9,5	3.169,2	471,5
2022	23	265	249	92,4	23,0	3,0	24,7	32,4	12,2	136,2	3.733,5	53,8	9,5	3.341,7	391,8

Anexo 2. Resultados de las estimaciones con

Producción como variable dependiente

Fuente: elaboración propia

Variable Dependiente: Producción									
Modelo	Intercepto	Trabajo	Capital	Agua	Energía	Tierra	Materiales	d08	AIC
-1		0,025	0,633***						129,2
		-0,143	-0,059						
-2	50,300**			-0,033	-6,037**	3,577***	3,448**		146,1
	-23.046			-0,177	-2.856	-1,35	-1.513		
-3	-3,446***	0,131	1,023***			1,218***		-0,065	151,2
	-0,702	-0,141	-0,312			-0,04		-0,055	
-4	-3.061	-0,314***	0,661***	-0,369***				-0,127***	139,0
	-7.419	-0,083	-0,149	-0,12				-0,047	
-5	-14,034***	-0,280***	0,498***		0,750***			-0,125***	156,2
	-2.501	-0,098	-0,067		-0,137			-0,047	
-6		-0,280***	0,384***				0,376***	-0,123**	149,1
		-0,057	-0,05				-0,081	-0,05	
-7	63,121***	-0,368***	0,316***	-0,105	-8,378***	4,937***	4,498***	-0,182***	170,0
	-22.477	-0,054	-0,054	-0,101	-2.841	-1.319	-1,47	-0,046	
-8	-3,535***	-0,386***	0,362***			0,983***	0,227**	-0,175***	166,4
	-0,807	-0,061	-0,061			-0,108	-0,091	-0,046	
-9	-2,482**	-0,372***	0,315***	-0,157*		1,418***		-0,197***	164,7
	-0,965	-0,055	-0,055	-0,081		-0,113		-0,046	
-10	-6,759***	-0,275***	0,334***		0,411**	0,814***		-0,177***	165,7
	-1.735	-0,074	-0,09		-0,177	-0,183		-0,047	
-11	-7,322***	-0,296***	0,353***	0,333***			0,636***	-0,098	150,9
	-1.122	-0,07	-0,088	-0,056			-0,066	-0,064	
-12	-13,080***	-0,397***	0,308***	0,179***	0,880***			-0,121**	160,4
	-1.033	-0,058	-0,062	-0,057	-0,08			-0,06	
-13	-20,545***	-0,381***	0,331***		2,145***		-0,868***	-0,174***	162,7
	-1,75	-0,058	-0,063		-0,252		-0,217	-0,048	
-14	-5,536**	-0,376***	0,328***	-0,067	0,306	1,002***		-0,183***	164,1
	-2.641	-0,058	-0,061	-0,107	-0,247	-0,355		-0,047	
-15	-3,216***	-0,264***	0,357***	-0,054		1,097***	0,183	-0,180***	164,7
	-1.032	-0,056	-0,041	-0,105		-0,246	-0,125	-0,047	
-16	58,775***	-0,394***	0,306***		-7,909***	4,506***	4,338***	-0,171***	170,9
	-22,21	-0,062	-0,065		-2.823	-1.257	-1.473	-0,045	
-17	-20,203***			0,011	2,094***		-0,833**	-0,173***	160,7
	-3.559			-0,101	-0,529		-0,387	-0,049	
*p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01									

Referencias

- Allen, R. C. (2004).** Revolución en los campos: La reinterpretación de la revolución agrícola inglesa. Prensas Universitarias de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/88364/files/BOOK-2020-030.pdf>
- Altieri, M. (1995).** *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. Boulder, CO: Westview Press.
- Angus, I., 2016.** *Facing the Anthropocene: Fossil Capitalism and the Crisis of the Earth System*. New York: NYU Press; Moore, J.W. (ed.), 2016. Anthropocene or Capitalocene? Nature, history and the crisis of capitalism. Oakland, PM Press.
- Asocaña (2022).** Un dulce sabor que transforma. Informe anual 2021 - 2022. Obtenido de <https://asocana.org/documentos/672022-B663EF18-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,-FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5.pdf>
- Asocaña. (2004).** Informe Anual Asocaña. Obtenido de <https://www.asocana.org/modules/documentos/2/234.aspx>
- Asocaña. (2013).** Anexo Estadístico - Informe Anual Asocaña. Obtenido de <https://www.asocana.org/modules/documentos/2/234.aspx>
- Azamar, A., Silva-Macher, J.-C., & Zuberman, F. (2021).** *Economía ecológica Latinoamericana* (CLACSO). Siglo XXI.
- Bai, A. T., Pandey, V., Reddy, M. S. P., Pandey, R., Nadaf, H. A., & Kancharlapalli, S. J. (2022).** Importance of diverse soil microbial community in crop rotation for sustainable agriculture. En *Microbial Resource Technologies for Sustainable Development* (pp. 113-145). Scopus. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90590-9.00013-4>
- Bertalanffy, L. V. (1968).** *General System Theory; Foundations, Development, Applications*. New York: George Braziller.
- Buenaventura, C. E. (1986).** El cultivo de la caña de azúcar. Técnicaña.
- CENICAÑA. (2017).** Informe anual 2016 – Cenicaña. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. <https://www.cenicana.org/informe-anual-2016/>
- CENICAÑA. (2018).** Informe anual 2017 – Cenicaña. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. <https://www.cenicana.org/informe-anual-2017/>
- Choudhary, H., Singh, V., Badal, P. S., & Osti, R. (2017).** Comparative analysis of resource use efficiency in menthol- mint cultivation on different farm size groups in India. *Medicinal Plants*, 9(1), 63-67. Scopus. <https://doi.org/10.5958/0975-6892.2017.00009.0>
- Coase, R. H. (1960).** The Problem of Social Cost. 3, 1-44.
- Common, M. S., & Stagl, S. (2008). *Introducción a la economía ecológica* (1.a ed.). Editorial Reverte.
- Cornia, G. A. (1985).** Farm size, land yields and the agricultural production function: An analysis for fifteen developing countries. *World Development*, 13(4), 513–534. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(85\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0305-750X(85)90054-3)
- Costanza, R. (1989).** What is ecological economics? *Ecological Economics*, 1(1), 1-7. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(89\)90020-7](https://doi.org/10.1016/0921-8009(89)90020-7)
- Costanza, R. (1991).** Ecological economics: A research agenda. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2(2), 335-357. [https://doi.org/10.1016/S0954-349X\(05\)80007-4](https://doi.org/10.1016/S0954-349X(05)80007-4)
- Daly, H., & Farley, J. (2011).** *Ecological Economics: Principles and Applications*.
- Daly, H., & Stiglitz, J. (1997).** Answering Georgescu-Roegen (Vol. 22). *Ecological Economics*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/journal/ecological-economics/vol/22/issue/3>
- DANE. (2017).** Cuenta Satélite De La Agroindustria De La Caña De Azúcar (CSACA) [Dataset].
- DANE. (2021).** Cuenta Satélite De La Agroindustria De La Caña De Azúcar (CSACA) [Dataset].
- DANE. (2023).** Consulta del Marco Geoestadístico Nacional(MGN) MGN2023. Obtenido de Geoportal: <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/territorio/mgn-marco-geoestadistico-nacional/>
- DANE. (2024).** Acervo de Capital Neto por actividad económica - 1990-2022p. Obtenido de Cuentas nacionales: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/productividad>
- DANE. (2024).** Censo Nacional de Población y Vivienda. Obtenido de Demografía y Población: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

- DANE. (2024).** Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH). Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/segun-sexo>
- Deane, P. (1977).** *La Primera Revolucion Industrial.*
- Delgadillo Vargas, O. L. (2014).** La caña de azúcar en la historia ambiental del valle geográfico del río Cauca (1864-2010). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.15735>
- Dombi, M. (2018).** Modeling the material stock of manufactured capital with production function. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.015>
- Echevarria, C. (1998).** A Three-Factor Agricultural Production Function: The Case of Canada. *International Economic Journal*, 12, 63-75. <https://doi.org/10.1080/10168739800000029>
- Elhag, M. (2017).** Efficiency concept under stochastic consideration of water value in irrigated agriculture land in Crete, Greece. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17, ws2017019. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.019>
- Foster, J. B. (2004).** La ecología de Marx: Materialismo y naturaleza. Editorial El Viejo Topo. <https://rzsudcalifa.org/wp-content/uploads/2011/11/bellamy-foster-john-la-ecologic3ada-de-marx.pdf>
- Fuglie, K. (2011).** Agricultural productivity in sub-Saharan Africa. *The Food and Financial Crises in Sub-Saharan Africa: Origins, Impacts and Policy Implications*, 122-153.
- Galvis-Castaño, A. (2019).** Integrated Pollution Prevention and Control for the Municipal Water Cycle in a River Basin Context. Validation of the Three-Step Strategic Approach.
- Garnacho, J. (2018).** La Revolución Industrial: ¿por qué primero en Inglaterra? <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/34102>
- Georgescu-Roegen, N. (1971).** *The Entropy Law and the Economic Process.* Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674281653>
- Giampietro, M. (1994).** Sustainability and technological development in agriculture: A critical appraisal of genetic engineering. *BioScience*, 44(10), 677-689. <https://doi.org/10.2307/1312511>
- Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2010).** The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69(6), 1209-1218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>
- Griliches, Z. (1963).** Estimates of the Aggregate Agricultural Production Function from Cross-Sectional Data. *Journal of Farm Economics*, 45(2), 419-428. <https://doi.org/10.2307/1235997>
- Griliches, Z. (1964).** Research Expenditures, Education, and the Aggregate Agricultural Production Function. *The American Economic Review*, 54(6), 961-974.
- Guhl, E. (2008):** *La huella humana y la sostenibilidad.* En imprenta Universidad Nacional.
- Harberger, A. (1972).** On measuring the social opportunity cost of public funds. Palgrave Macmillan UK, 94-122.
- Harvey, D. (2003).** *The New Imperialism.* Oxford University Press. https://aklatangbayan.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/03/david_harvey_-_new_imperialism.pdf
- Hoekstra, A. Y. (2011).** *The water footprint assessment manual: Setting the global standard.* Routledge.
- Hassan Dahab, M., Kheiry, A. N. O., & Abdalla, O. A. (2022).** Energy Use Efficiency of Sugar Cane Production in the Central Clay Plain of Kenana Area. *Journal of Energy Research and Reviews*, 18-25. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2022/v10i130245>
- Hosseini, S. S., Ghorbani, M., & Ghahremanzadeh, M. (2008).** Determination of soil conservation effects on shadow price of soil quality in dry-farmed wheat in Iran (a case study). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(3), 458-462. Scopus. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.458.462>
- HUB Collaborative. (2023 - A publicar).** Documento de Caracterización de la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), Colombia. Santiago de Cali: Universidad del Valle e Instituto Cinara.
- Karimi, M., Pour, A., Tabatabaeefer, A., & Borghei, A. (2008).** Energy Analysis of Sugarcane Production in Plant Farms A Case Study in Debel Khazai Agro-industry in Iran. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, 4(2), 165-171.
- Kawagoe, T., Hayami, Y., & Ruttan, V. W. (1985).** The intercountry agricultural production function and productivity differences among countries. *Journal of Development Economics*, 19(1-2), 113-132. [https://doi.org/10.1016/0304-3878\(85\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0304-3878(85)90041-0)
- León, M., Lewinsohn, J. L., & Sánchez, J. (2020).** Balanza comercial física e intercambio, uso y eficiencia de materiales en América Latina y el Caribe. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/37cae9e0-ee65-47ae-9e6d-c04011196ceb/content>
- Lewis, G. (1984).** Some aspects of the production of ethanol from sugar cane residues in Zimbabwe. *Sol. Energy; (United Kingdom)*, 33:3/4. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5913991>
- Lizarazo, J. (2018).** Economía Ecológica y la construcción epistemológica de una ciencia revolucionaria para la sostenibilidad y la transformación del mundo. *Gestión y Ambiente*, 21, 13-34. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1supl.72122>
- Malthus, T. R. (1798).** *Primer ensayo sobre la población.* Altaya. Obtenido de <https://museo-etnografico.com/pdf/puntodefuga/171128malthus.pdf>
- Mankiw, N. G. (2012).** *Principios de economía.* Cengage Learning.
- Manzanares, P. (1997). *Introduction to energy balance of biomass production; Introduccion al calculo del balance energetico de la produccion de Biomasa.* <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/615560>
- Marshall, K. G. (2015).** Economic structure and factor payments. *Applied Economics*, 47(14), 1460-1480. Scopus. <https://doi.org/10.1080/00036846.2014.997924>

- Martínez-Alier, J. (2002).** *The environmentalism of the poor. A study of Ecological Conflicts and Valuation*, Edward Elgar, Cheltenham, Reino Unido.
- Martínez Alier, J., & Roca-Jusmet, J. (2013).** *Economía Ecológica Y Política Ambiental* (3a edición).
- Martínez-Alier, J. Roca-Jusmet, J. (2018).** *Economía Ecológica y Política Ambiental*, FCE, Méx.
- Martínez-Alier, J. (with Roca, J., & Sánchez, J.). (1998).** *Curso De Economía Ecológica* (Primera Edición), PNUMA.
- Martínez-Alier, J., & Silva, J. C. (2022).** Las Ciencias Socioambientales. En: A. Azamar, J.-C. Silva-Macher, & F. Zuberman, *Economía Ecológica Latinoamericana* (pp. 35-62). CLACSO. Siglo XXI. <https://www.clacso.org/wp-content/uploads/2023/04/Economia-ecologica.pdf>
- Mazzucato, M. (2019).** *El valor de las cosas: Quién produce y quién gana en la economía global*. TAURUS.
- McElroy, W. (2012, marzo 8).** The Enclosure Acts and the Industrial Revolution. <https://www.fff.org/explore-freedom/article/enclosure-acts-industrial-revolution/>
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972).** *The limits to growth*. New York: Universe Books.
- Melgar-Melgar, R. E., & Hall, C. A. S. (2020).** Why ecological economics needs to return to its roots: The biophysical foundation of socio-economic systems. *Ecological Economics*, 169, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106567>
- Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005.** Un Informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio., pp. 1-43. Obtenido de: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019).** Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA [Dataset]. <https://www.datos.gov.co/d/2pnw-mmge>
- Mishan, E. J. (1971).** Evaluation of Life and Limb: A Theoretical Approach. *Journal of Political Economy*, 79(4), 687-705. <https://doi.org/10.1086/259784>
- Mittal, J. P., & Dhawan, K. C. (1989).** Energy parameters for raising crops under various irrigation treatments in Indian agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 25(1), 11-25. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90060-1](https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90060-1)
- Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahin, S., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2008).** Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil province. *Energy Conversion and Management*, 49(12), 3566-3570. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.07.003>
- Mukhamedieva, D. T., Safarova, L. U., & Kudratov, A. T. (2024).** Modeling the rational use of natural resources and innovative quantum technologies in agribusiness. 539. Scopus. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453901013>
- Mundlak, Y., Butzer, R., & Larson, D. F. (2012).** Heterogeneous technology and panel data: The case of the agricultural production function. *Journal of Development Economics*, 99(1), 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2011.11.003>
- Naredo, J. M. (1987).** La economía en evolucion: Historia y perspectivas de las categorias basicas del pensamiento economico. Siglo XXI.
- Nordhaus, W. D. (1992).** Lethal Model 2: The Limits to Growth Revisited. *Brookings Papers on Economic Activity*, 23(2), 1-60.
- O'Connor, J. R. (2001).** Causas naturales: Ensayos de marxismo ecológico. Siglo XXI. <https://letrasindomitas.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/11/98211200-ensayos-de-marxismo-ecologico-o-connor.pdf>
- Osoorio, J. C. (2008).** Introducción al pensamiento sistémico. En Programa Editorial Universidad del Valle (1° edición). Programa Editorial Universidad del Valle. <https://doi.org/10.25100/peu.88>
- Osti, R., Rizwan, M., Assefa, A. K., Zhou, D., & Bhattarai, D. (2017).** Analysis of resource-use efficiency in monsoon and spring rice production in Nepal. *Pakistan Journal of Nutrition*, 16(5), 314-321. Scopus. <https://doi.org/10.3923/pjn.2017.314.321>
- Pacheco-Flórez, M. P., & Melo-Poveda, Y. E. (2015).** Recursos naturales y energía. Antecedentes históricos y su papel en la evolución de la sociedad y la teoría económica. *Energética*, 0(45), 107-115.
- Passet, R. (1996).** Principios de bioeconomía: Vol. V (Economía y Naturaleza). Fundación Argentaria.
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1995).** Economía de los recursos naturales y del medio ambiente. CELESTE EDICIONES.
- Perafán Cabrera, A. (2012).** Valle del Cauca: un estudio en torno a su sociedad y medio ambiente. Cali, Colombia: Programa Editorial - Universidad del Valle.
- Pérez-Rincón, M., Rojas, J., & Ordóñez, C. (2010).** DESARROLLO SOSTENIBLE: Principios, aplicaciones y lineamientos de política para Colombia. Universidad del Valle.
- Pérez, M. A., Peña, M. R., & Álvarez, P. (2011).** *Agro-industria cañera y uso del agua: análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia*. *Ambiente & Sociedad*, XIV(2), 153-178.
- Pérez-Rincón, M. (2018).** La Justicia Ambiental como línea estratégica de la Economía Ecológica: ¿cómo evidenciar las injusticias ambientales? *Gestión y Ambiente*, 21(1supl), Article 1supl. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1supl.75742>
- Pérez, M. A. (2018).** Prólogo. En G. D'Alisa, F. Demaria, & G. Kallis, *Decrecimiento: Vocabulario para una nueva era*. Edición ampliada latinoamericana (págs. 13-31). Cali, Valle del Cauca: Icaria Editorial, Barcelona y Programa Editorial Universidad del Valle, Cali - Colombia.
- Perez-Reyna, D. (2017).** Historia del Banco de la República: Crisis de 1999. Capítulo 10. *Historia del Banco de la República. Crisis de 1999*. Pág.: 437-463.
- Pérez-Rincón, M. A. (2024).** Economía ecológica para América Latina y el Caribe: Bases conceptuales y perspectivas de política pública para la sostenibilidad. En CEPAL, Recursos

naturales y desarrollo sostenible: Propuestas teóricas en el contexto de América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/5b79b785-873f-4f5f-9b9b-7711b038dc90>

Pichler, M., Schaffartzik, A., Haberl, H. and Görg, C. (2017). Drivers of society-nature relations in the Anthropocene and their implications for sustainability.

Pourzand, F., & Bakhshoodeh, M. (2013). Technical efficiency and agricultural sustainability—technology gap of maize producers in Fars province of Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 16, 671-688. <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9501-x>

Procaña. (2000). Subproductos y derivados de la caña de azúcar. Obtenido de <https://procana.org/site/subproductos-y-derivados-de-la-cana/>

Quesnay, F. (1758). El “TableauÉconomique”. En El “TableauÉconomique” y otros escritos fisiocráticos (pp. 13-15). Porcupine Press, Incorporated.

Quiroga Canaviri, J., & Menendez Gamiz, C. R. (2023). Desde la Bioeconomía de Georgescu-Roegen hasta la Bioeconomía andeanamazónica. C3-BIOECONOMY: Circular and Sustainable Bioeconomy, 25-54. <https://doi.org/10.21071/c3b.vi4.16211>

Randall, A., & Castle, E. N. (1985). Land resources and land markets. *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, 2, 571-620.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S. I., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>

Rosenschein, A. D., & Hall, D. O. (1991). Energy analysis of ethanol production from sugarcane in Zimbabwe. *Biomass and Bioenergy*, 1(4), 241-246. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(91\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0961-9534(91)90009-2)

Rosset, P. (1997). La crisis de la agricultura convencional, la sustitución de insumos y el enfoque agroecológico. *Agroecología y Desarrollo* No. 11-12. Santiago de Chile.

Sánchez Torres, F., Rodríguez, J. I., & Núñez Méndez, J. (1996). Evolución y determinantes de la productividad en Colombia: un análisis global y sectorial. *Archivos de Economía*. Departamento Nacional de Planeación. Unidad de Análisis Macroeconómico.

Sánchez Álzate, M. (2011). ¿Condicionan Los Recursos Naturales El Crecimiento Económico? 14(29), 117-128. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11407/1034>.

Schlosberg, D. (2007). *Defining Environmental Justice: Theories, Movements, and Nature*. Oxford University Press UK.

Screpanti, E., & Zamagni, S. (1997). *Panorama de historia del pensamiento económico* (1º). Ariel.

Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., & McNeill, J. (2011). *The*

Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), p. 842-867.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Folke, C. (2015a). *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. *Science*, 347(6223), 1259855.

Singh, S., Mittal, J. P., Singh, M. P., & Bakhshi, R. (1988). Energy-use patterns under various farming systems in Punjab. *Applied Energy*, 30(4), 261-268. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(88\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0306-2619(88)90013-X)

Solow, R. (1974). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies*, 41(5), 29-45.

Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>

Stiglitz, J. (1974). Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths12. *The Review of Economic Studies*, 41(5), 123-137. <https://doi.org/10.2307/2296377>

Unidad de Planeación Rural Agropecuaria [UPRA]. (7 de Julio de 2023). Evaluaciones Agropecuarias Municipales 2019 - 2022. Recuperado el 5 de Marzo de 2024, de Estadísticas Agropecuarias - Agronet: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>

Urkidi, L., & Walter, M. (2011). Dimensions of environmental justice in anti-gold mining movements in Latin America. *Geoforum*, 42(6), 683-695. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2011.06.003>

Vásquez, M., Bueno, J. E., Peña, D., Aponte, G., & Sánchez, H. (2013). *El empleo en el sector agrícola. En Ensayos sobre el desarrollo económico del Valle del Cauca: Sectores agrícola e industrial* (1º, p. 223).

Vitousek, P.M. (1994) Beyond Global Warming: Ecology and Global Change. *Ecology*, 75, 1861-1876. <https://doi.org/10.2307/1941591>

Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R., Fetzer, I., Wierik, S. te, Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlamann, H., Singh, C., Grever, P., Gerten, D., Keys, P. W., Gleeson, T., Cornell, S. E., Steffen, W., Bai, X., & Rockström, J. (2022). A planetary boundary for green water. *Nat Rev Earth Environ*, 3, 380-392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>.

Yang, X., Li, X., Luo, Y., Dong, S., Deng, X., & Wang, C. (2004). Farm production and resources sustainability in Northwest China. *5544*, 61-73. *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability*. <https://doi.org/10.1117/12.563384>

Zahedi, M., Mondani, F., & Eshghizadeh, H. R. (2015). Analyzing the energy balances of double-cropped cereals in an arid region. *Energy Reports*, 1, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2014.11.001>

Zareishahamat, E., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Abdeshah, A. (2013). Energy use and economical analysis of Sugarcane production in Iran a case study: *Debel Khazaei agro-industry*. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5, 249-252.

Autores

Mario Alejandro Pérez-Rincón, PhD.

*Profesor Titular Universidad del Valle – Facultad de Ingeniería -
Instituto CINARA*

Daniel Andrés Mosquera

Economista, MSc, Universidad del Cauca, Universidad del Valle

Isabella Puente Prado

Economista, Universidad del Valle

Katherine Mosquera Viquez

Ingeniera Agrícola, Universidad del Valle

Yinneth Andrea Molina Macías

Economista, Universidad del Valle



Epílogo

Este libro es realizado por el Colaboratorio Colombia y hace parte del sub-proyecto “Contribuciones de la Naturaleza a la Generación de Valor Económico en el Cultivo de Caña de Azúcar en la Cuenca Alta Del Río Cauca, Colombia, 1960 – 2022”, el cual se ejecuta en el marco del proyecto “HUB, Seguridad Hídrica y Desarrollo Sostenible”. En el desarrollo de este gran proyecto participamos cuatro países: Colombia, India, Etiopía y Malasia y está financiado por GCRF, UK Research and Innovation, siendo coordinado a nivel general por la Universidad de New Castle, Reino Unido.

De parte del Instituto Cinara de la Universidad del Valle, agradecemos inmensamente a todas las instituciones, directivos, profesionales y a la comunidad en general de la Cuenca Alta del Río Cauca (CARC), por habernos permitido trabajar en este campo de las relaciones sociedad-naturaleza alrededor de la caña de azúcar y en un territorio tan querido por todos/as nosotros/as como es la cuenca de nuestro río tutelar.

Rematamos este Epílogo con tres frases celebres que muestran una visión distinta a la del paradigma moderno occidental, y que recogen de alguna manera el espíritu de estos tres volúmenes: como en la Economía Ecológica, buscan recuperar la jerarquía y relevancia de la naturaleza sobre el sistema social, a través de tres grandes genios de nuestro mundo humano.

“Establecer contacto con la belleza de la naturaleza hace la vida mucho más hermosa, mucho más real, y, cuanto más atento y concentrado contemples la puesta de sol, más profundamente se te revelará”.

(Thich Nhat Han, Maestro Taoísta)

“Mira profundamente en la naturaleza y entonces comprenderás todo mejor”.

(A. Einstein)

“La naturaleza ofrece lo suficiente para satisfacer las necesidades de cada hombre, pero no la codicia de cada hombre”.

(M. Gandhi)