

Pardo Rozo, Y. Y., Marlés Betancourt, C., & Peña Torres, P. (2024, septiembre-diciembre).

Factores determinantes de la sostenibilidad en sistemas agropecuarios de la Amazonia colombiana. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (73), 142-173.

<https://www.doi.org/10.35575/rvucn.n73a6>

Factores determinantes de la sostenibilidad en sistemas agropecuarios de la Amazonia colombiana¹

Factors that determine sustainability in agricultural systems in the colombian amazon

Yelly Yamparli Pardo Rozo

Doctor en Ciencias Naturales y Desarrollo Sustentable
Programa Administración de Empresas, Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia

y.pardo@udla.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8060-0281>

CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000686662

Claritza Marlés Betancourt

Doctorado en Cultura y Educación Ambiental
Programa Administración de Empresas, Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia

c.marles@udla.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1314-7517>

CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000825115

Parcival Peña Torres

Doctorado en Gerencia y Política Educativa
Programa Administración de Empresas, Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia

pa.pena@udla.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1656-7111>

CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000353868

Recibido: 01 de septiembre de 2023

¹ Artículo derivado del proyecto de investigación: “Determinación de indicadores de sostenibilidad en sistemas agropecuarios de Belén de los Andaquíes, Caquetá” identificado con el código G-005 de 2021 de la Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia.

Evaluated: 07 de junio de 2024

Approved: 21 de julio de 2024

Tipo de artículo: Investigación.

Resumen

La sostenibilidad es un concepto multidimensional que involucra variables socioeconómicas, políticas y ambientales. La investigación tuvo como objetivo identificar los factores determinantes de la sostenibilidad en sistemas agropecuarios de la Amazonia colombiana. Se tomó una muestra de 70 fincas y se construyeron indicadores de sostenibilidad mediante el análisis de la envolvente de datos con las variables: razón beneficio costo (RBC), índice de necesidades básicas insatisfechas (INBI), carbono almacenado en la biomasa aérea, porcentaje de coberturas en bosque, suelos productivos y la percepción del productor sobre el apoyo del Gobierno (AG). Posteriormente, se empleó un modelo econométrico donde el índice de sostenibilidad estaba en función de variables de las diferentes dimensiones, cuyos coeficientes se hallaron con el método de máxima verosimilitud. En los resultados se encontró que 14 % de las fincas es sostenible y el 86 % tiene potenciales de mejora en: aumentos en la RBC, en el AG, la utilización del suelo productivo y la reducción de los costos operativos. Los factores determinantes de la sostenibilidad fueron: los gastos de la finca, el número de trabajadores y las hectáreas boscosas. Se concluye que existen sistemas agropecuarios en la Amazonia eficientes en lo socioeconómico, político y conservan mejor los servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Eficiencia técnica; Envolvente de datos; Modelo econométrico; Necesidades básicas; Servicio ecosistémico; Sostenibilidad.

Abstract

Sustainability is a multidimensional concept that involves socioeconomic, political, and environmental variables. The aim of this research was to identify the determinants of sustainability in agricultural systems in the Colombian Amazon. A sample of 70 farms was taken and sustainability indicators were constructed using data envelopment analysis with the following variables: benefit-cost ratio (BCR), index of unsatisfied basic needs (INBI), carbon stored in aerial biomass, percentage of forest cover, productive soils, and the producer's perception of government

support (GA). Subsequently, an econometric model was used where the sustainability index was a function of variables of the different dimensions, whose coefficients were found using the maximum likelihood method. The results showed that 14 % of the farms are sustainable and 86 % have potential for improvement in: increases in CBR, GA, use of productive land and reduction of operating costs. The determinants of sustainability were: farm expenses, number of workers and forested hectares. It is concluded that there are farming systems in the Amazon that are socioeconomically and politically efficient and that conserve ecosystem services better.

Key words: Technical efficiency; Data envelopment; Econometric model; Basic needs; Ecosystem service; Sustainability.

Introducción

La sostenibilidad es una condición de las unidades productivas que busca garantizar la satisfacción de las necesidades humanas, teniendo como restricción el respeto por el equilibrio y resiliencia de los ecosistemas, de forma que los impactos lleguen a ser imperceptibles (Suárez et al., 2021). El crecimiento demográfico y las actuales formas de producción y de consumo han generado la crisis ambiental que trajo como consecuencia el cambio climático, la tensión hídrica, especies en peligro de extinción y nuevos patrones meteorológicos; esto afecta la salud, la economía, la fauna, la flora y los servicios ambientales (Pardo Rozo, Andrade Adaime & Marlés Betancourt, 2022).

En ecosistemas estratégicos como la Amazonia, la introducción de actividades agropecuarias y mineras ha afectado negativamente la oferta de los recursos naturales. Esto ocurre debido a la presión en suelos, fuentes hídricas y la deforestación. El cambio climático generado por el calentamiento global es el resultado de la emisión de los gases de efecto invernadero. Según el IDEAM et al. (2021), el 59 % de las emisiones en Colombia provienen del sector agropecuario, por el cambio de tierras forestales a otros usos y por la degradación de los bosques. Por su parte, el 30 % proviene del sector de energía, dentro del cual el transporte representa la mayor proporción con un 12.5 %.

En respuesta a lo anterior, surgió el enfoque de sostenibilidad como un criterio de desarrollo en el cual las unidades productivas o de consumo garantizan la satisfacción de necesidades humanas en lo social, económico, financiero y político, respetando el capital natural. La política mundial se ha enfocado en estos aspectos para plantear los denominados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que involucran el concepto de intertemporalidad, es decir, las generaciones presentes y futuras (Rogelj et al., 2019). Por ello, la valoración de la sostenibilidad y la consideración de sus factores determinantes, en diferentes sectores y contextos, es una herramienta para la construcción de política (Portocarrero Sierra et al., 2023).

La Amazonia, como ecosistema estratégico, ha sido un escenario donde la valoración de la sostenibilidad se ha realizado a través de indicadores parciales, como mecanismo de monitoreo ante la presión antrópica producida por la introducción de sistemas agropecuarios ineficientes y procesos de deforestación. Estos procesos fragmentan los bosques, agotan el suelo y afectan los servicios ecosistémicos (SSEE) que la Amazonia sustenta (Peters et al., 2013). Entre los SSEE se encuentran la regulación del ciclo hídrico y microclimático, la formación de suelos, los sumideros de carbono, la protección de cuerpos hídricos, el hábitat de especies y sus corredores ecológicos, el potencial banco genético, la belleza escénica y los valores históricos y científicos, entre otros.

Desde este punto de vista, los sistemas agropecuarios que han afectado al paisaje amazónico mediante los cambios en el uso del suelo deben tener una evaluación desde las dimensiones de la sostenibilidad. Lo anterior, involucra estudiar la rentabilidad, el alcance de metas socio económicas y mejoras en la calidad de vida y el bienestar social, lo cual minimice, a su vez, el impacto al ambiente (Flórez Laisecca et al., 2021). Surge la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo valorar las dimensiones de la sostenibilidad y cómo identificar sus factores determinantes en los sistemas agropecuarios ubicados en la Amazonia colombiana?

Con ello, esta investigación tuvo como objetivos valorar la sostenibilidad a partir de variables en las dimensiones políticas, sociales, económicas y ambientales, y hallar sus factores determinantes. Esta investigación es de naturaleza positiva, mixta e inferencial. Las unidades de análisis fueron los sistemas agropecuarios de la Amazonia colombiana en el sur del país. En el marco teórico se expone la teoría del análisis de la envolvente de datos como un método de construcción de indicadores de sostenibilidad y las variables que la determinan en el contexto económico rural. Los resultados, discusión y conclusiones constituyen información relevante

como línea base para el eficiente planteamiento de planes, programas y proyectos que fortalezcan las políticas públicas de desarrollo rural y las acciones en las comunidades hacia un desarrollo sostenible.

Marco Teórico

Evolución del pensamiento ambiental: Desarrollo Sostenible y el sector agropecuario. La actual política mundial establecida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en la agenda de Naciones Unidas (2015), es el resultado de una serie de esfuerzos políticos, científicos, tecnológicos y sociales en la lucha histórica por garantizar el bienestar humano a partir de la conservación de los ecosistemas y sus servicios. A lo largo del siglo XX, la filosofía ambientalista en el mundo surge y se afianza desde 1960, luego de la posguerra. El documento de los Límites del Crecimiento, publicado por el llamado Club de Roma en 1972 (Meadows et al., 2004), presenta un panorama desolador de la proyección del mundo en los siguientes cien años. Se prevé el agotamiento de los recursos naturales y su resiliencia.

Ante esta situación, en el mismo año se establecen los 26 principios en el Tratado de Estocolmo, donde se reconoce el derecho de los seres humanos en el disfrute de un ambiente sano y la preservación de los recursos naturales y ambientales. Ya para 1987 surge el Protocolo de Montreal, con el objetivo de reducir las sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO). El mismo año aparece el Informe de Bruntland denominado “*Our Common Future*”, que confronta las consecuencias del desarrollo económico actual con el daño al ambiente. Allí se menciona por primera vez el término “Desarrollo sostenible”, entendido como aquel que permite la satisfacción de las necesidades humanas sin comprometer los recursos para las futuras generaciones (Naciones Unidas, 1987). Desde allí hasta la fecha, se convirtió en el criterio y principio que rige las cartas políticas en el mundo.

Entre los compromisos de Bruntland se pacta una nueva conferencia, la cual se realizó en 1992 y se ha conocido como la cumbre de la tierra, de Rio de Janeiro. Deja para el mundo la Agenda 21, la Convención de Diversidad biológica y la Declaración de bosques (Avellaneda, 2013). De este evento, una de las principales contribuciones, en Colombia y en el mundo, es la creación del Ministerio de Ambiente, que normatiza la administración de los recursos naturales y

ambientales (Pardo Rozo, Andrade Adaime & Marlés Betancourt, 2022). Mas adelante, en 1997, se realizaría el Protocolo de Kioto, cuyo mayor reto fue tratar de desacelerar el cambio climático mediante la reducción de las emisiones de los gases que aceleran el calentamiento global por parte de los países industrializados (Gómez Rodríguez, 2021).

Luego, en el 2000, se declara la nueva agenda mundial, llamada Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), con metas ambientales hacia el 2015 (Zarta Ávila, 2018). El Departamento Nacional de Planeación (DNP) en Colombia consignó los ODM en la política de gobierno, y en los planes de desarrollo nacional y local. Uno de los objetivos era la incorporación de los principios de sostenibilidad en las actividades de las naciones. Ante el incumplimiento de la agenda, se pactaron nuevas consideraciones en El Acuerdo de París y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el 2015, con metas a evaluar en 2030, se propusieron 17 objetivos entre los cuales se busca lograr la eliminación de la pobreza, mejorar la educación, promover el trabajo decente, la igualdad, la justicia, la paz, la salud y el bienestar, lograr ciudades sostenibles con la conservación de los recursos hídricos, terrestres y mitigar el cambio climático (Naciones Unidas, 2015).

Entre las metas para Colombia, respecto de la acción por el clima de los ODS, se encuentra la reducción del 20 % de las emisiones de los gases de efecto invernadero (Yáñez et al., 2020). En la zona rural, se les atribuye a las emisiones indirectas generadas por la deforestación (donde se pierde biomasa); a las emisiones directas de metano y óxido nitroso, provenientes de la fermentación entérica y la gestión del estiércol del ganado; o al uso de fertilizantes y plaguicidas en las actividades agrícolas; es decir, al cambio en el uso del suelo (de bosque a ganadería).

En este sentido, entre los mecanismos de desarrollo limpio para los países en vía de desarrollo se tiene la reforestación y recuperación de zonas degradadas. En materia agropecuaria, se promueve la instauración de modelos sostenibles de producción, tales como los sistemas agroforestales, agrosilvopastoriles y silvopastoriles, entre otros. La sostenibilidad en los sistemas rurales se entiende como la condición en las actividades de producción y de consumo que respetan el equilibrio de los ecosistemas y promueven la seguridad alimentaria, la aptitud de uso del suelo y la conservación de bienes y servicios ecosistémicos. Estos últimos se definen como el conjunto de insumos, materias primas, ciclos biogeoquímicos, elementos y dinámicas de los recursos naturales y ambientales que proporcionan beneficios al hombre (Pardo-Rozo et al., 2023).

Valoración de la sostenibilidad mediante la aplicación del análisis de la envolvente de datos (DEA) y sus factores determinantes. El análisis de frontera (o de la envolvente de datos) es una herramienta de análisis económico para evaluar y comparar la eficiencia relativa entre unidades productivas, organizaciones o empresas de un mismo sector. Utiliza las cantidades de producción (*output*) y las cantidades de insumos (*input*) de las unidades productivas y, con ello, determina los puntajes de eficiencia real y potencial para cada una de estas; su fundamento es la construcción de una frontera de eficiencia a partir de un conjunto de observaciones, mediante el uso de la programación lineal (Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006). El DEA no requiere de ninguna forma funcional entre insumos y productos, y constituye una alternativa frente a los métodos paramétricos (Cervera Muñoz & Oviedo García, 2024).

La metodología es válida para cualquier número de variables, de forma que, cuanto mayor sea su valor, mejor será el desempeño de la dimensión que la variable describe (Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006). En los últimos años se han desarrollado diversas aplicaciones que incluyen el DEA para la obtención de indicadores integrales, a partir de indicadores parciales, lo que permite comparar el desempeño de las unidades de comportamiento bajo análisis, e identificar aquellas que presentan el mejor desempeño, con el fin de establecer un indicador global y punto de comparación frente a un conjunto dado (Quiroga Martínez, 2007).

Los primeros estudios y desarrollos datan de Farrell (1957), quien usó la programación lineal con el fin de encontrar la combinación óptima de los insumos y productos, para estimar fronteras de producción eficientes que permitan comparar entre el nivel óptimo y el nivel observado de una unidad productiva. Al establecer una frontera virtual de eficiencia técnica, se puede comparar cada unidad productiva frente a ella.

El primer modelo aplicado fue el propuesto por Charnes et al. (1978), conocido por las siglas CCR, el cual implica unos rendimientos a escala constantes y está orientado hacia los insumos (*inputs*). El segundo modelo sirve para realizar un análisis de eficiencia, teniendo en cuenta los rendimientos variables a escala (BCC) (Banker et al., 1984). Estos modelos permiten realizar un análisis con orientación al producto (maximizar producción con un nivel dado de insumos) o un análisis con orientación al insumo (minimizar costos de insumos, dado un nivel de producto).

Entre las aplicaciones recientes del DEA son recurrentes los temas de sostenibilidad empresarial, como en Riaño Henao y Larrea Serna (2021), Flórez Laiseca et al. (2021) y Fontalvo et al. (2019), donde vinculan análisis de eficiencia técnica, productividad y estandarización.

En lo referente al DEA, en el análisis de la sostenibilidad atribuida al criterio de desarrollo sostenible y sus dimensiones (social, económica, política y ambiental), se encuentran los estudios desarrollados por Tsaples y Papathanasiou (2021), quienes realizaron una revisión literaria entre 2017 hasta 2020 para saber cómo los investigadores han utilizado el análisis envolvente de datos para medir la sostenibilidad, encontrando que de la dimensión social y política son las menos consideradas. Previamente, Zhou et al. (2018) ya habían identificado las tendencias y perspectivas del DEA frente a sus contribuciones en el análisis de la sostenibilidad ambiental, entre el periodo de 1996 y 2006, concluyendo que existen cuatro conglomerados temáticos: evaluación de la sostenibilidad corporativa, la evaluación de la sostenibilidad regional, la construcción de indicadores compuestos de sostenibilidad y el análisis de la productividad.

Otros trabajos destacados son los de Pan et al. (2021), quienes aplicaron DEA para construir el índice de sostenibilidad de Malmquist en la industria China; Despotis (2005), con el cálculo del índice de desarrollo humano; Cherchye y Kuosmanen (2004), quienes propusieron el uso de la herramienta para la derivación de una meta índice de desarrollo sostenible. De igual forma, Kido-Cruz et al. (2021) usaron el DEA para la construcción de indicadores de la sostenibilidad orientados al sector turismo. Los indicadores sintéticos han sido usados cada vez más como herramientas útiles para la toma de decisiones y la estimación de índices de sostenibilidad (Suárez Sánchez, 2015).

Por otro lado, en el estudio de Marshall y Shortliffe (2005) se construyó un índice de calidad de vida para países en vía de desarrollo a través del DEA. El trabajo desarrollado por Rodríguez-Mestre et al. (2022), en Cuba, utiliza el DEA para reconocer procesos de optimización en la explotación minera y de recursos naturales a partir de indicadores de sostenibilidad económicos y ambientales.

Otros campos de aplicación del DEA evalúan la eficiencia de las políticas públicas y tributarias, como en León Cáceres et al. (2019) y en el trabajo de Favila Tello (2019) con la medición de la eficiencia en la innovación en América Latina. En Colombia se han realizado también varios estudios de medición de la sostenibilidad, como en Gamarra Vergara (2004) y en

Pardo Rozo, Muñoz Ramos & Velásquez Restrepo, (2022), quienes integran las variables de las tres dimensiones de la sostenibilidad (socioeconómica y ambiental, sin la dimensión política), dirigida solo al sector ganadero en el piedemonte amazónico de Colombia.

Identificación de los factores o variables que determinan la sostenibilidad. Desde el paradigma del positivismo, la literatura en el contexto agropecuario latinoamericano refiere variables sociales, económicas, políticas, ambientales. Entre ellas se encuentran: las ventas o ingresos, oferta, demanda, materias primas, los precios del mercado (Riaño Henao & Larrea Serna, 2021); el nivel educativo, viabilidad económica, niveles tecnológicos, indicadores de calidad de vida y desarrollo humano, niveles tecnológicos (Suárez et al., 2021); indicadores de gobernabilidad y gobernanza, indicadores de biodiversidad, de calidad de agua, suelos y aire, eficiencia en las políticas públicas, indicadores de competitividad (Cherchye & Kuosmanen, 2004); variables asociadas a cambio climático, tales como disponibilidad, calidad de suelos, cobertura arbórea, sombra y su incidencia en la productividad ganadera (Álvarez et al., 2021); la rentabilidad y variables asociadas como el ingreso operativo, los costos operativos y utilidades, servicios ecosistémicos e indicadores de pobreza (Pardo Rozo, Muñoz Ramos & Velásquez Restrepo, 2022).

La pobreza, a su vez, es medible a través de la construcción del índice de necesidades básicas insatisfechas y el índice multidimensional de pobreza, de acuerdo con las metodologías desarrolladas por el Banco Interamericano de Desarrollo -BID- y el Departamento Nacional de Estadística -DANE-, el cual se vale de aspectos como dependencia económica, las condiciones de habitabilidad de la vivienda, hacinamiento, educación, salud y nutrición, entre otros (Pardo Rozo, Andrade Adaime & Marlés Betancourt, 2022).

Metodología

El estudio se desarrolló en la zona rural de Belén de los Andaquíes, municipio de Caquetá, departamento de la Amazonia, ubicada en el sur de Colombia. La investigación fue de tipo mixto (cualitativo y cuantitativo), dada la naturaleza de sus variables y los métodos de análisis empleados. También, es de tipo propositivo, porque plantea una alternativa para medir la sostenibilidad y sus determinantes en un contexto específico. De una población de 300 sistemas

agropecuarios se tomaron 70 fincas mediante un muestreo por conveniencia o tipo de muestreo no probabilístico (Jany, 1994).

Para la obtención de la información sobre las variables sociales, económicas y políticas se realizó un trabajo de campo en el que se aplicó la técnica de encuesta estructurada, dirigida a los productores de la zona con actividades agropecuarias. Esta herramienta contó con cuatro bloques de preguntas: i) características sociodemográficas, ii) aspectos financieros y económicos de la actividad agropecuaria, iii) percepción de aspectos políticos, iv) aspectos ambientales y usos del suelo. Como información secundaria se obtuvo la base de datos de las mediciones dasométricas y del estudio de Pardo-Rozo et al. (2021) para la variable ambiental “carbono almacenado por hectárea en bosque”.

Valoración de la sostenibilidad. Las fincas son unidades económicas que generan productos a partir de insumos. Estos insumos y productos constituyen variables que se asocian a las dimensiones de la sostenibilidad desde lo económico, social, político y ambiental. Bajo el fundamento del análisis de la envolvente de datos, se puede generar un indicador integral a partir de la relación óptima entre insumos y productos. Así, los productos de la finca en este estudio fueron: la rentabilidad por actividad agropecuaria (dimensión económica), las necesidades básicas satisfechas NBS (dimensión social), la valoración del apoyo del Gobierno (dimensión política) y el carbono almacenado en la biomasa de los bosques como servicio ecosistémico (dimensión ambiental). Estos productos de la finca se generan a partir de los siguientes insumos: costos de producción y nivel de gastos (variables económicas), nivel educativo del productor (variable social), nivel de seguridad de la finca (variable política), porcentaje de suelos productivos, bosques y densidad arbórea (variables ambientales).

Según la teoría microeconómica y la teoría de la toma de decisiones empresariales, en las fincas, como cualquier empresa, se busca resolver el problema de maximizar la utilidad o minimizar los costos de producción (eficiencia técnica o asignativa). Un método para resolver estos problemas planteados desde el enfoque de la programación lineal, se denomina el análisis de la envolvente de datos (*Data Envelopment Analysis - DEA*). Esta es una herramienta de la programación lineal que permite construir un indicador sintético a partir de otros parciales de tal forma que integra las variables (Quiroga Martínez, 2007); en este caso, de las diferentes dimensiones de la sostenibilidad (social, económica, política y ambiental).

Se espera que aquellas fincas que obtengan un puntaje de eficiencia igual a uno (1) se

consideran *sostenibles* (eficientes) y aquellas con puntaje entre cero (0) e inferior a uno (1) se consideran *no sostenibles* (ineficientes). En la teoría, las fincas *sostenibles* se ubican en una frontera de eficiencia, de forma que es posible hallar el potencial de mejora para aquellas que no fueron eficientes. Esta información permite realizar un *benchmarking* entre estos sistemas productivos y dilucidar políticas, planes, programas y proyectos encaminados hacia la búsqueda del desarrollo sostenible sectorial. La frontera de la sostenibilidad de este estudio se calculó mediante el DEA, a través del uso del programa *Banxia Frontier Analyst*, versión académica, que arrojó índices de eficiencia entre 0 y 1 para cada finca.

Las variables económicas de la dimensión económica se obtuvieron a través del cálculo de la razón beneficio costo -RBC- de las fincas, los costos anuales de producción y el porcentaje del suelo productivo en pasturas y cultivos respecto de la extensión total de la finca. Como variables de la dimensión social se tomó el puntaje de necesidades básicas satisfechas, el nivel educativo del productor y nivel de gastos. Las variables desde la dimensión política fueron: el apoyo del Gobierno (medido en escala de Likert entre 1 a 5), el porcentaje de tierra productiva y la valoración de la seguridad en la zona. Esta última referida al orden público que afecta las actividades productivas y comerciales, relativa al objetivo número 16 de los ODS, que tiene en cuenta la disminución de índices delincuenciales y problemas de orden público en general. Las variables desde la dimensión ambiental fueron: el carbono en biomasa aérea en bosque por hectárea, el porcentaje de cobertura boscosa de la finca y la densidad arbórea por hectárea. Así, atendiendo al modelo matemático general que resuelve este problema, se plantea el siguiente problema de programación lineal de acuerdo con Pardo Rozo, Hernández Castorena y Andrade Adaime (2022):

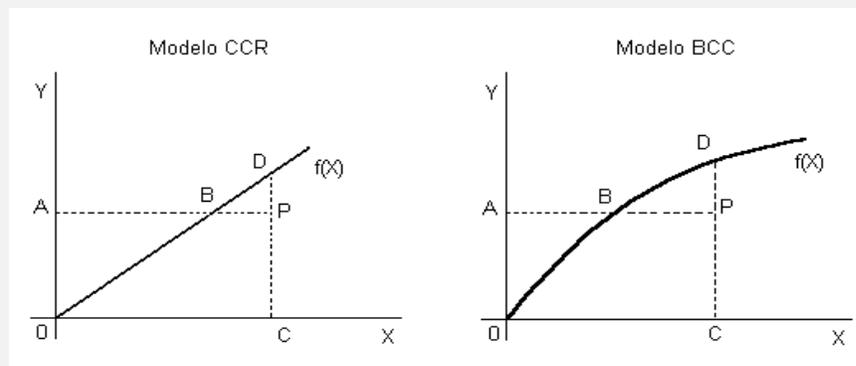
$$\begin{aligned} \text{Función objetivo:} & \quad \text{Max}_{U,V} (X_i, Y_i) \\ \text{Sujeto a:} & \quad VX_i = 1 \\ & \quad UY_i - VX_i \leq 0 \\ \text{Con:} & \quad i = 1, 2, \dots, N \\ & \quad U, V \geq 0. \end{aligned}$$

Donde, X_i es el vector de insumos de N fincas evaluadas de orden $I \times 1$; Y_i : es el vector de los productos de orden $P \times I$; U : es un vector de variables $P \times I$ productos óptimos; V : es un vector

de $I \times I$ la combinación óptima de insumos. La programación lineal halla los valores de U y V que optimizan la medida de eficiencia o *sostenibilidad*, restringido a los valores inferiores o iguales a la unidad. Los modelos de DEA pueden orientarse la producción (*output*) o hacia el insumo (*input*). Los rendimientos a escala pueden ser constantes (modelo CCR) o variables (BCC) (Figura 1).

Figura 1

Eficiencia técnica orientación a insumo y producto con rendimientos a escala constante (CCR) y a escala variable (BCC)



Nota. Elaboración propia adaptado de Gamarra Vergara (2004).

Las fincas eficientes (sostenibles) serán aquellas que se encuentren sobre la línea $0BD$ (Figura 1) y serán ineficientes las que se encuentren fuera de esta. Esto indica que allí se obtiene la optimización (se maximizan la producción o se minimiza el costo de insumos). El cociente de eficiencia orientado a insumo (*inputs*) se construye entre la relación AB/AP y en el enfoque orientado a producto (*outputs*) se mide entre CP/CD . El tipo de eficiencia puede ser: técnica (conocida como eficiencia física), eficiencia precio (o asignativa) o eficiencia global (también llamada eficiencia económica) (Pardo Rozo, Hernández Castorena & Andrade Adaime, 2022).

El modelo de CCR es también conocido como el modelo de eficiencia técnica global (ETG), y el modelo BCC es llamado también el modelo de eficiencia técnica pura (ETP). A partir del cociente entre estos dos anteriores (ETG/ETP) arroja un índice denominado como eficiencia de escala (EE), que sirve para identificar cuáles son las DMU que operan (o no) en una escala óptima. Los análisis deben realizarse sobre los modelos BCC. Los puntajes de eficiencia hallados a partir del DEA son

relativos; es decir, se limitan solo a la comparación entre el conjunto de datos analizados y no frente a una eficiencia absoluta que responda a un ideal teórico (Coll Serrano & Blasco Blasco, 2006).

Identificación de los factores determinantes de la sostenibilidad. Se propuso un modelo econométrico para complementar el análisis realizado con la envolvente de datos. Se usó análisis de regresión con la forma funcional Tobit en virtud de los datos censurados que presentan las variables del modelo (Meza Carvajalino, 2022) (Ecuación 1):

$$Nos = \beta_0 + \beta_1 * G + \beta_2 * B + \beta_3 * P + \beta_4 * Trab + \mu$$

(Ecuación 1)

Donde: *Nos*: es el puntaje de *no sostenibilidad* obtenido mediante el análisis de la envolvente de datos. Según Gamarra Vergara (2004), esta se estima así: $1 - [\theta_{CCR} / \theta_{BCC}]$, donde θ es el puntaje de eficiencia con retornos constantes a escala (CCR) y variables (BCC). La variable *G* representa los gastos anuales de la finca medido en pesos colombianos de 2022. *B* representa el número de hectáreas en bosque que tiene la finca. *P* es el número de hectáreas de la finca destinadas a pastos con fines ganaderos. *Trab* representa el número de trabajadores dentro de la finca. El elemento μ representa el componente probabilístico del modelo.

Los β son los coeficientes que acompañan a cada una de las variables del modelo. Estos fueron estimados por el método de máxima verosimilitud (Iglesias Ibarra & Fernández Rangel, 2022), mediante el paquete econométrico *Limdep* 11.0.

Resultados

La zona de estudio presentó las siguientes características sociodemográficas: el 95 % de las fincas es administrado por hombres y el 5 % por mujeres. Los grupos familiares se conforman por cuatro personas, en promedio, con un máximo de 8 y un mínimo de 2 personas. El nivel educativo de estas familias se distribuye así: educación básica primaria (78 %); educación básica secundaria (15 %) y educación media (5 %), y el porcentaje restante tiene formación técnica y profesional. El promedio de los ingresos operativos mensuales de la finca fue cercano a \$ 777.000 de 2022 (con un mínimo de \$ 150.000 y un máximo de \$ 5.000.000). El promedio de los gastos

mensuales de la finca fue de \$ 608.928 (con un mínimo de \$ 150.000 y un máximo de \$ 4.650.000). El 93 % de las fincas es rentable, según el cálculo de la razón beneficio costo (es decir $RBC > 1$). De estas 65 fincas, el valor promedio de la RBC fue 5, lo que indica que, por cada peso desembolsado como costo de producción, generó 5 pesos de ingresos operativos (con un mínimo de 1,1 y un máximo de 9,0). El 7 % tuvo una $RBC < 1$. Entre las principales actividades agropecuarias se encuentran la ganadería doble propósito (42 %) y la ganadería de leche (58 %).

En cuanto a cultivos agrícolas se encuentran el plátano, la yuca, la caña panelera, piña y frutales amazónicos. Algunos cultivos forestales como caucho, copoazú y palma de aceite. El 77 % de las fincas tiene cobertura de bosque, con una abundancia de 430 individuos. De aquellas fincas con bosques, se estimó cerca de $165 t.ha^{-1}$ de carbono almacenado (según la base de datos y metodología presentada en Pardo-Rozo et al., 2021). Se observó que un 77 % de las fincas presenta sistemas semiempresariales y el 23 % sistemas familiares. La Tabla 1 discrimina la evaluación sobre el apoyo del Gobierno por parte de los productores.

Tabla 1

Valoración de los productores sobre el apoyo del gobierno en aspectos

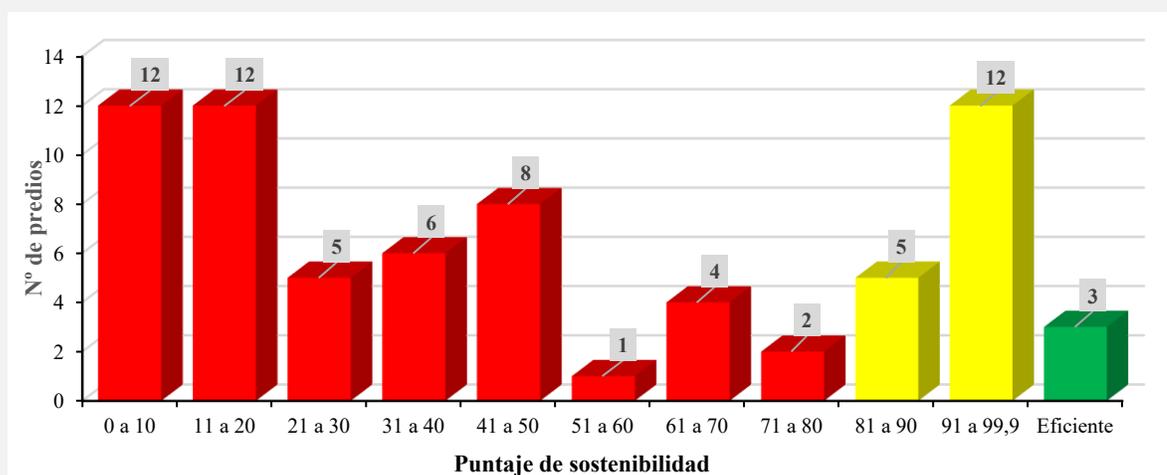
Valoración	Productividad	Seguridad	Científico	Financiero
Nulo (0)	53 %	3 %	62 %	58 %
Muy bajo (1)	13 %	5 %	14 %	13 %
Bajo (2)	18 %	9 %	15 %	18 %
Media (3)	14 %	21 %	4 %	9 %
Alta (4)	2 %	27 %	5 %	2 %
Muy alta (4)	0 %	35 %	0 %	0 %

Valoración de la sostenibilidad desde la dimensión económica. Se obtuvo el indicador a partir de la relación entre la RBC de la actividad agropecuaria (como *output*), frente a los costos anuales de producción y el porcentaje del suelo productivo, respecto de la extensión total de la finca -en pasturas y cultivos- como *input*. El problema fue maximizar la RBC sujeto a los costos y el porcentaje de suelo productivo. Los resultados de la envolvente del modelo orientado a producto bajo CCR mostraron que solo tres fincas (4,3 %) fueron eficientes, versus el 95,7 % ineficientes. Al revisar la distribución de los puntajes de eficiencia en la dimensión económica

(Figura 2) se puede corroborar que 67 fincas *no son sostenibles* (ineficientes económicamente); sin embargo, 17 de ellas están cerca de la frontera de eficiencia.

Figura 2

Distribución de los puntajes de sostenibilidad en la dimensión económica aplicada a los predios objeto de estudio en la Amazonia colombiana



Nota. En rojo los puntajes inferiores a 80, en amarillo puntajes entre 81 y 99,9, y en verde puntajes de 100.

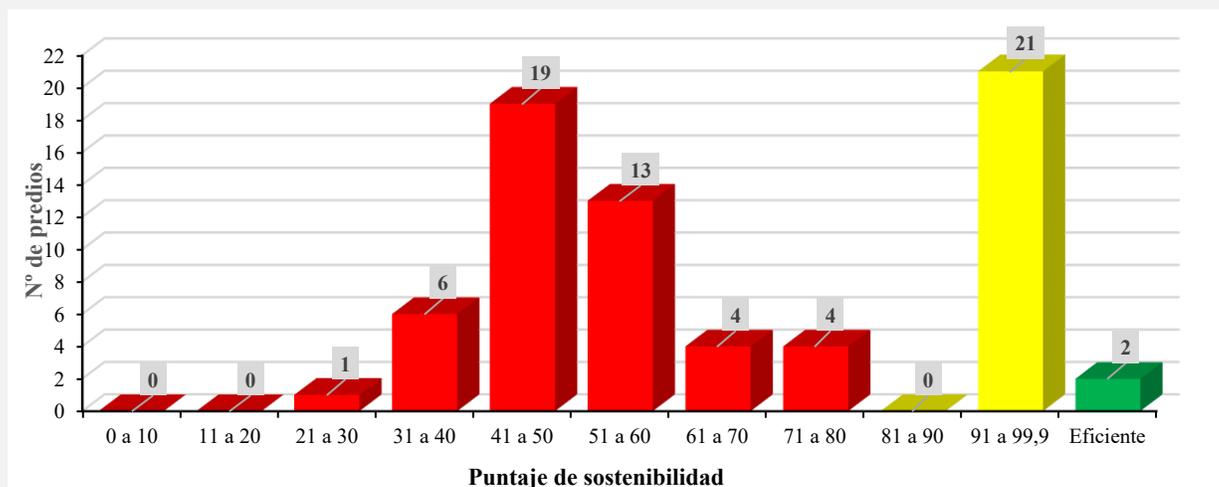
Si bien el 93 % de las fincas es rentable, desde la perspectiva financiera según la RBC, desde el criterio de optimización solo 3 fincas fueron eficientes. Con base en lo anterior, dentro de las mejoras potenciales se encontró que la RBC de las actividades primarias es muy baja, por tanto, su potencial de mejora fue alto (97,11 %). En el tema de los costos, se pueden generar ahorros del 0,49 % y las extensiones de tierras destinadas a las actividades económicas están siendo subutilizadas en 2,4 %.

Valoración de la sostenibilidad desde la dimensión social. La política de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, desde 2015, planteó que los hogares (en este caso, los inmersos en las unidades productivas) deben gozar de calidad de vida, representada en la satisfacción de las necesidades de salud, educación, vivienda, economía y bienestar. Por ello, se tomó como producto el

puntaje de NBS y como insumo el nivel educativo del productor, que supone probabilidades de mejora en su calidad de vida y el nivel de gastos. El problema fue maximizar las NBS, sujeta al nivel educativo y nivel de gastos. Los resultados de la envolvente del modelo orientado a producto con CCR mostraron solo dos fincas (2,8 %) ubicadas en la frontera de la sostenibilidad; es decir, sostenibles desde el punto de vista social.

Figura 3

Distribución de los puntajes de sostenibilidad en la dimensión social en las fincas de la muestra de estudio en la Amazonia colombiana (Caquetá, Colombia)



Nota. En rojo los puntajes inferiores a 80, en amarillo puntajes entre 81 y 99,9, y en verde puntajes de 100.

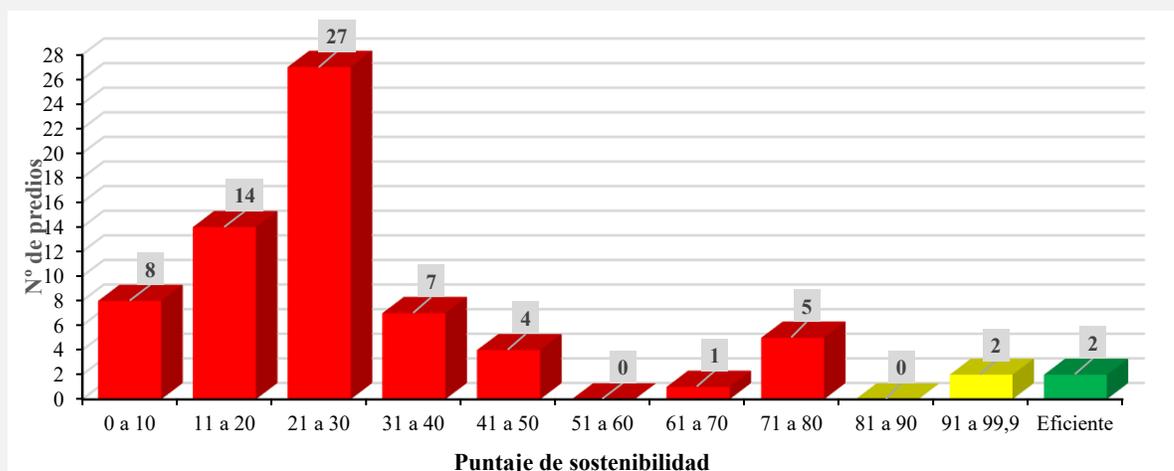
La distribución de los puntajes de sostenibilidad en la dimensión social (Figura 3), indican que 47 fincas son ineficientes desde lo social (*no sostenibles*) y 21 están cerca de la frontera de eficiencia social. En cuanto al porcentaje de mejora, las fincas ineficientes deben optimizar la relación gastos respecto de los ingresos, y disminuir las necesidades básicas insatisfechas, aunque estas no son una variable del control en los hogares (mejorar un 76,4 %). En las variables de control de las familias puede interpretarse como la necesidad de establecer cultura de ahorro y mejoras en los niveles educativos. Desde la perspectiva del Gobierno, puede traducirse como el aumento en las políticas públicas que son evidenciables en créditos blandos, acceso a la educación y gratuidad,

mejoramiento en las condiciones de vivienda y seguridad.

Valoración de la sostenibilidad desde la dimensión política. La sostenibilidad en la dimensión política fue medida a partir de la percepción de los productores acerca del apoyo que reciben desde la administración local para el desarrollo de sus procesos productivos. Como insumos, se emplearon el porcentaje de coberturas productivas en las fincas y la valoración de la seguridad en la zona, referida al orden público que afecta las actividades productivas y comerciales. Esta última se consideró relativa al objetivo número 16 de los ODS, que tiene en cuenta la disminución de índices delincuenciales y problemas de orden público en general. El problema fue maximizar la valoración que otorga el productor sobre el apoyo del Gobierno (AG), sujeto a la valoración de la seguridad de la zona y el porcentaje de tierras productivas (ver figura 4).

Figura 4

Distribución de los puntajes de sostenibilidad en la dimensión política aplicada a los predios objeto de estudio en el piedemonte amazónico (Caquetá, Colombia)



Nota. En rojo los puntajes inferiores a 80, en amarillo puntajes entre 81 y 99,9, y en verde puntajes de 100.

El modelo evidenció que solo dos unidades productivas (2,8 %) fueron sostenibles en el alcance de las políticas de Gobierno en materia de apoyo al pequeño y mediano productor. Esto puede

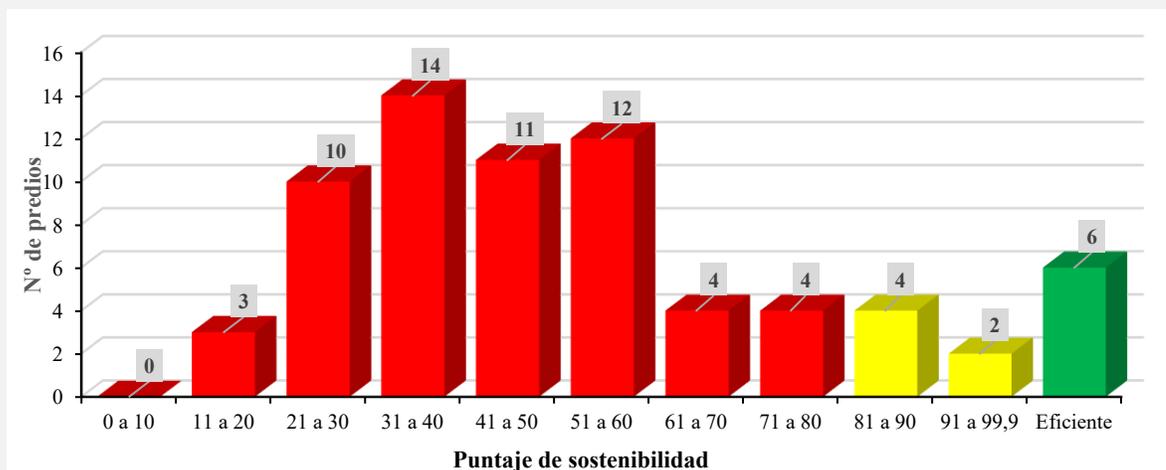
atribuirse a que los productores en la zona rural no experimentan un acompañamiento de la administración local, situación que rezaga la consolidación de la eficiencia y la competitividad, y, unido a los altos índices de pobreza, podría explicar la subutilización del suelo rural y su baja productividad. La distribución de los puntajes de sostenibilidad evidenció que 66 fincas son ineficientes (*no sostenibles*) y solo 2 de estas están cerca de la frontera de eficiencia.

Los productores consideraron notable la ausencia del gobierno local, el sector financiero y las actividades de las instituciones científicas. Respecto del potencial de mejora, la valoración del productor sobre el apoyo de los sectores gubernamentales puede mejorar en un 92,5 %. En promedio, un 18,3 % del suelo de las fincas fue reportado como improductivo desde el punto de vista ambiental y económico, pues se trataba de barbechos y potreros abandonados. El potencial de uso del suelo, en este sentido, representaba un costo de oportunidad promedio de \$ 1.200.000 por hectárea al año.

Valoración de la sostenibilidad de la dimensión ambiental. Los insumos usados para valorar la sostenibilidad desde la dimensión ambiental en los predios productivos fueron: el porcentaje de cobertura boscosa al interior de la finca y la densidad arbórea por hectárea. Ambos son insumos controlables. En estas condiciones, se buscó resolver el problema de maximizar el carbono en biomasa aérea por hectárea en bosque, sujeto a las hectáreas de bosque de la finca y la densidad arbórea. En el modelo DEA de maximización de producto bajo rendimientos constantes a escala (*output-CCR*), se encontró que solo seis (6) de las 70 unidades productivas evaluadas se localizaban sobre la frontera de sostenibilidad.

Figura 5

Distribución de los puntajes de sostenibilidad en la dimensión ambiental aplicado a los predios objeto de estudio en la Amazonia colombiana, Caquetá, Colombia



Nota. En rojo los puntajes inferiores a 80, en amarillo puntajes entre 81 y 99,9, y en verde puntajes de 100.

Se observa, en la Figura 5, que 58 fincas obtuvieron puntajes de eficiencia inferiores a 80; es decir, no son sostenibles en la dimensión ambiental, y solo 6 de ellas estuvieron cerca de la frontera de sostenibilidad (con puntajes entre 91 y 99). Dentro de las mejoras potenciales en las fincas consideradas no sostenibles, se observó que el porcentaje de bosques es inferior en un 0,13 %, respecto de las sostenibles. Como la densidad arbórea es un factor natural (incontrolable por el productor), la estrategia para aumentar el almacenamiento en bosque en las fincas podría detener la deforestación o realizar reforestación.

Determinación integral del puntaje de sostenibilidad. Luego de analizar parcialmente la sostenibilidad desde las dimensiones económica, social, política y ambiental, mediante modelos CCR y BCC orientados a producto, ahora se procedió a realizar un análisis integral, a partir de los promedios de sostenibilidad en cada una de las cuatro dimensiones de forma simultánea. Con los puntajes de sostenibilidad de los modelos anteriores se calculó la EE, la cual se obtiene del cociente entre el puntaje del modelo con rendimientos constantes y el modelo con rendimientos variables (en

cada orientación) (Tabla 2).

Tabla 2

Estadística descriptiva de los puntajes de sostenibilidad integral para las fincas objeto de estudio, a partir de los análisis parciales de los modelos orientados a producto con rendimiento a escala constante (CCR) y a escala variable (BCC)

Parámetro	Modelo					
	Orientación a insumos			Orientación a productos		
	θ_{CCR}	θ_{BCC}	θ_{EE}	θ_{CCR}	θ_{BCC}	θ_{EE}
Media puntaje sostenibilidad	71,7	78,7	0,90	71,7	99,1	0,70
Desviación estándar	19,3	19,8	0,10	19,3	3,9	0,20
Mínimo	33,4	36,7	0,60	33,4	76,9	0,30
Media de puntaje fincas no sostenibles	64,5	67,5	86,0	64,6	98,5	65,00
Cantidad Fincas sostenibles*	14,0	24,0	22,0	14,0	27,0	14,00
Cantidad Fincas no sostenibles*	56,0	46,0	44,0	56,0	43,0	56,0

Nota. EE: eficiencia a escala. θ_{CCR} : puntaje de sostenibilidad con rendimientos constantes. θ_{BCC} : puntaje de sostenibilidad con rendimientos variables. θ_{EE} : eficiencia de escala.

*: se consideraron sostenibles aquellas fincas cuyo puntaje de sostenibilidad fue igual a 1, las demás, tendrán potenciales de mejora hacia la sostenibilidad.

De acuerdo con la teoría, 14 fincas fueron sostenibles (con EE = 100) con rendimientos constantes a escala. Las características de estas fincas fueron las siguientes: la RBC arrojó un promedio de 7; un promedio de 178 t C_A ha⁻¹, un promedio de 4 NBS, un promedio de 2,5 en el puntaje de AG (en escala de 0,0 a 5,0); un promedio de porcentaje de tierras productivas del 50 %, un 13 % de cobertura boscosa en la finca. Estos valores de las fincas sostenibles fueron superiores a los valores medios de los *outputs* del total de las fincas de la muestra. Estas 14 fincas definen la envolvente de datos o frontera de la sostenibilidad, las cuales marcan una diferencia en los aspectos sociales, económicos, políticos y ambientales de manera integral.

Para aquellas fincas no sostenibles, se identificaron mejoras potenciales en las variables económicas, así: aumentar sus ingresos operativos anuales en un 97 %; disminuir sus costos operativos anuales en un 0,5 % y aumentar la productividad de los suelos en un 2,4 %. Las mejoras potenciales en la dimensión social indican que se deben disminuir las necesidades básicas

satisfechas, aumentar los niveles educativos (puede ser de primaria a bachillerato o hacia nivel profesional); y se pueden disminuir los gastos del hogar en un 23 %.

Las mejoras potenciales en las variables de la dimensión política indican que la administración pública local debe concretar sus políticas a través de la ejecución de proyectos, apoyos tecnológicos, transferencias de recursos para potenciar el campo. La valoración que otorga el productor sobre el apoyo del Gobierno debe mejorar el puntaje en un 92 %, y mejorar las condiciones de seguridad en un 100 %. En la dimensión ambiental, el llamado es a detener la deforestación al interior de las fincas, para aumentar la densidad arbórea en un 90 %.

Determinantes de la sostenibilidad en los predios productivos. La Tabla 3 presenta la salida del modelo econométrico Tobit que relaciona el puntaje de sostenibilidad de la finca versus las variables gastos, bosques, pasturas y número de trabajadores.

Tabla 3

Determinantes de la sostenibilidad de los predios objeto de estudio a través del modelo Tobit complementario al Análisis de la Envolvente de Datos

Variable	Coefficiente	Error estándar	P-valor	Media
Gastos*	0,000001	0.3812E-07	0,05	608.928
Bosques**	-0.00821	0,00538	0,10	3,45
Pasturas***	0.00138	0,00086	0,11	20,9
Trabajadores*	0.09001	0,01331	0,00	2,52

Nota. Significativo al *5 %, **al 10 % y ***al 5 %.

Se encontró que solo las hectáreas en bosque, el nivel de gastos y el número de trabajadores explican la puntuación de la *sostenibilidad* de las fincas. El signo negativo de la variable *bosque* indica que el incremento de las hectáreas forestales aumentaría el puntaje hacia la *sostenibilidad*, lo cual es coherente con la aptitud de uso del suelo amazónico. El coeficiente positivo de la variable gastos y número de trabajadores indica que un aumento en estos aumenta la probabilidad de ineficiencia en la finca.

Discusión

Los promedios de las variables C_A , RBC, NBS y densidad arbórea de las fincas sostenibles fueron superiores a los promedios de las fincas no sostenibles. Por ejemplo, el C_A en las fincas sostenibles fue de 178 t.ha^{-1} frente al promedio de $78,2 \text{ t.ha}^{-1}$ para las fincas no sostenibles. La RBC fue de 5 versus 4,5; las NBS fue de 4 versus 3. Luego, si el indicador de sostenibilidad hallado sintetiza las variables anteriores y, a su vez, este indicador depende de las hectáreas en bosque, según los resultados del análisis de regresión, entonces, las intervenciones de política que afecten positivamente la generación de la conservación de bosques, así como las mejoras potenciales identificadas en el análisis de eficiencia, aumentará la sostenibilidad en las fincas.

Los resultados del porcentaje de fincas sostenibles y no sostenibles fueron coherentes con las halladas en el estudio de Jurado Mejía et al. (2023). También, existe coherencia desde la perspectiva metodológica y la selección del variables (tanto del análisis de eficiencia como el análisis de regresión), con las experiencias sobre valoración de la sostenibilidad en Colombia, en el estudio de Figueroa Lucero (2016), donde la rentabilidad financiera como factor de la productividad fue considerada como un pilar para fomentar el desarrollo sostenible; y en el estudio de Suárez et al. (2021), quienes concluyeron que variables de naturaleza social, económica, política y ambiental específicas, como los ingresos por actividad económica y el trabajo familiar, fomentan la sostenibilidad en sistemas productivos agropecuarios. No obstante, los estudios de Calderón Cuartas & Flórez Yepes (2015), y Puentes-Ramírez et al. (2021), mencionan que la sostenibilidad en el contexto agropecuario también depende de otras variables de tipo ecológico y sociocultural. Sin embargo, a diferencia de los resultados de Gamarra Vergara (2004) y los mencionados en este párrafo, el modelo econométrico solo arrojó que el puntaje de sostenibilidad depende de la cobertura forestal.

En el ámbito amazónico colombiano, los resultados obtenidos en el estudio fueron acordes a lo encontrado por Pardo Rozo, Muñoz Ramos & Velásquez Restrepo (2022) y Jurado Mejía et al. (2023), quienes evidenciaron el alto nivel de pobreza en los sistemas rurales, identificando las unidades productivas de subsistencia, caracterizadas con el uso intensivo en pasturas, baja productividad, alto impacto ecológico; sin embargo, con potencial de adopción de prácticas agrosilvopastoriles y de transición hacia modelos sostenibles. Los determinantes de la sostenibilidad (eficiencia técnica en lo económico, social, político y ambiental) fueron similares a los hallados en el

estudio de Gamarra Vergara (2004), cuando identificó en la eficiencia ganadera las siguientes variables: usos del suelo (hectáreas en pasturas, hectáreas destinadas para riego y hectáreas fertilizadas orgánicamente), las cuales se relacionan con los suelos productivos; y el valor promedio de las vacas vendidas y los gastos de mantenimiento en instalaciones, las cuales se relacionan con los ingresos operativos de los sistemas agropecuarios.

Este ejercicio de valoración de la sostenibilidad desde cada una de las cuatro dimensiones representa una oportunidad para identificar las variables y las decisiones asociadas a estas, que están causando resultados ineficientes en las fincas agropecuarias. Por ejemplo, la RBC que arrojó una mejora potencial del 97 % para las fincas consideradas *No sostenibles* (desde la dimensión económica), implicaría mejoras tales como: i) aumentos en los niveles de producción de leche, o de la cantidad de animales en pie o en la cantidad de los productos cosechados; ii) disminución de los costos de producción que favorezca el aumento de los márgenes de utilidad; o iii) mejorar los rendimientos de los cultivos por hectárea al igual que la capacidad de carga y la producción de litros de leche al día por animal. La propuesta de valoración de la sostenibilidad, a partir de la integración de sus variables sociales, económicas, políticas y ambientales, mediante el uso de métodos cuantitativos no paramétricos (como el DEA) y paramétricos (como el análisis de regresión) permitió sintetizar e integrar muchas variables que la determinan.

Los determinantes del puntaje de sostenibilidad hallados en el modelo econométrico sugieren que los esfuerzos de política rural regional deben priorizar y concentrarse en mejorar la rentabilidad de las fincas ganaderas y la conservación de los bosques inmersos en estos predios agropecuarios, de modo que aumenta la probabilidad de generar sistemas rurales sostenibles desde lo económico y ambiental. Sin embargo, como lo menciona Suárez et al. (2021), la pobreza en el sector rural se relaciona con la baja tecnificación y bajos niveles de escolaridad, y conlleva a sistemas agropecuarios con baja rentabilidad. Una respuesta en el corto plazo es la instauración de modelos sostenibles de producción agroforestales (Álvarez et al., 2021) a partir de transferencia tecnológica de ONG, instituciones científicas y academia.

Por lo anterior, es claro que la sostenibilidad es multidimensional y su monitoreo permite observar impactos o los cambios que suscitan las políticas públicas. La sostenibilidad, como lo establecen Fonseca Carreño & Vega Baquero (2019), es considerada como una ventaja competitiva en las empresas, en las regiones, en los sectores. De acuerdo con Castrillón Martínez & González Gil

(2022), existe una oportunidad al sensibilizar a las familias para fortalecer su rol ecológico desde el manejo de los sistemas productivos de forma positiva con el entorno. La región amazónica cuenta con ventajas comparativas en materia de recursos naturales y ambientales, pese a ello, los gobiernos no han logrado generar un desarrollo rural eficiente. Como lo sugiere Jurado Mejía et al. (2023), optimizar la relación producto insumo en los sistemas de economía campesina, equivale a consolidar la seguridad alimentaria en las regiones, lo cual es un factor clave en el crecimiento económico de cualquier país.

Conclusiones

Para valorar la sostenibilidad a partir de las variables de la dimensión económica, política, social y ambiental, en los sistemas agropecuarios de la Amazonia colombiana, se propuso la construcción de un indicador sintético de sostenibilidad de las fincas a través del análisis de la envolvente de datos, el cual integra las anteriores variables. Luego, para hallar los factores determinantes de la sostenibilidad, se construyó un modelo econométrico cuya variable dependiente fue el indicador de sostenibilidad, en función del ingreso del propietario y los diferentes usos del suelo: coberturas en pastos, cultivos y bosques, así como la actividad económica (ganadería, agricultura y plantaciones forestales).

Los resultados de este trabajo permitieron evidenciar que, de acuerdo con los puntajes obtenidos en los indicadores de sostenibilidad de las fincas, solo un 6 % de las unidades productivas es sostenible; es decir, son eficientes en las cuatro dimensiones: la económica, social, política y ambiental. En este sentido, estas fincas sostenibles optimizan la relación producto insumo y cumplen simultáneamente con los criterios establecidos en la definición contemplada en el Artículo 3 de la Ley 99 de 1993, según los siguientes argumentos: i) tienen un crecimiento económico (que en este estudio se evidencia en una alta rentabilidad); ii) garantizan calidad de vida (aumentos en la satisfacción de las necesidades básicas); iii) generan bienestar social (han recibido apoyo del Gobierno en la seguridad y la productividad de sus fincas); y iv) no afectan los servicios ecosistémicos y su equilibrio (preservan bosques cuyos servicios ecosistémicos son la fijación y el almacenamiento de carbono). Lo anterior, es totalmente análogo con el concepto de desarrollo sostenible.

En contraste, las fincas consideradas *no sostenibles*, según el indicador, presentaron, por lo

menos, alguna de las siguientes situaciones: baja rentabilidad, más niveles de necesidades básicas insatisfechas, no perciben el apoyo del Gobierno o presentan un bajo almacenamiento de carbono. Esto indica que no cumplen de forma simultánea con todos los criterios de la sostenibilidad. Es decir, son ineficientes, ya sea en las metas económicas, sociales, ambientales o políticas. Cabe aclarar que no todas las variables son del control del productor; algunas se relacionan con el alcance de las políticas de desarrollo social, económico y sectorial (como los índices de pobreza) y otras dependen de las decisiones del productor (por ejemplo, el nivel educativo o la conservación de bosques en la finca).

Las mejoras potenciales halladas orientan a los propietarios y productores de las fincas agropecuarias en la toma de decisiones. Las fincas no sostenibles deben uno resolver uno o varios problemas relativos a la baja rentabilidad, subutilización del suelo productivo, altos costos operativos, y la disminución de la deforestación que afecta la oferta de servicios ecosistémicos.

El nivel de apoyo del Gobierno que percibe el productor, en general, fue muy bajo. Las mejoras potenciales son para la administración local, que deben buscar políticas rurales que estén al alcance de los productores y se materialicen en el fortalecimiento de los sistemas agropecuarios a través de financiamiento de proyectos de transición hacia modelos sostenibles, transferencias tecnológicas, créditos de inversión educativa y tecnología con bajos intereses u otros incentivos.

Frente a las variables que determinan estos indicadores de la sostenibilidad en las fincas, se encontró que las coberturas en bosque se relacionan de manera positiva con los sistemas sostenibles. Esto resalta la importancia de la dimensión ambiental para que una finca sea considerada como sostenible.

Esta investigación valoró la sostenibilidad como un concepto multidimensional, mediante la construcción de un indicador integral. De acuerdo con los resultados, se reveló el predominio de los modelos tradicionales frente a los modelos sostenibles. Con el análisis de regresión se identificaron las variables asociadas a la sostenibilidad, de forma que el diseño de políticas dirigidas a estas puede acelerar la transición hacia unidades rurales sostenibles. Disminuir los impactos atribuidos al cambio en el uso del suelo, por la introducción de sistemas agropecuarios, es una de las metas de los ODS para Colombia y el mundo en la lucha por la mitigación y adaptación al cambio climático. Entre las principales estrategias para la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero, para los países megadiversos como Colombia, se encuentran la protección de bosques y el aumento de los

sumideros de carbono. Justamente estas dos actividades se pueden potenciar desde los sistemas agropecuarios sostenibles en la Amazonia.

Referencias

- Álvarez, F., Casanoves, F., & Suárez, J. C. (2021). Influence of scattered trees in grazing areas on soil properties in the Piedmont region of the Colombian Amazon [Influencia de árboles dispersos en áreas de pastoreo sobre las propiedades del suelo en la región del piedemonte de la Amazonía colombiana]. *PLoS ONE*, 16(12), Article e0261612. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261612>
- Avellaneda, A. (2013). *Gestión Ambiental y Planificación del Desarrollo: el sujeto ambiental como actor político* (3 ed.). Ecoe Ediciones.
- Banker, R. D., Charnes A., & Cooper W. W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis [Algunos modelos para estimar ineficiencias técnicas y de escala en el análisis envolvente de datos]. *Management Science*, 30(9), 1078-1092. <https://www.jstor.org/stable/2631725>
- Calderón Cuartas, P. A., & Flórez Yepes, G. Y. (2015). Valoración y análisis de indicadores de sostenibilidad en seis unidades de producción agropecuaria de la cuenca media del río Chinchiná. *Luna Azul*, (41), 77-88. <https://doi.org/10.17151/10.17151/luaz.2015.41.5>
- Castrillón Martínez, Y., & González Gil, M. E. (2022). Pautas de crianza relacionadas con el comportamiento ambiental responsable en familias de zonas rurales del municipio de Ebéjico. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (66), 63-98. <https://doi.org/10.35575/rvucn.n66a4>
- Cervera Muñoz, A., & Oviedo García, W. (2024). Revisión bibliográfica de la aplicación de la metodología de análisis envolvente de datos (DEA) en el sector agropecuario de Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas*, 14(1), 24-43. <https://doi.org/10.47847/faccea.v14n1a2>
- Charnes, A., Cooper, W., & Rhodes, E. (1978). Measurement the efficiency of decision making units [Medición de la eficiencia de las unidades de toma de decisiones]. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)

- Cherchye, L., & Kuosmanen, T. (2004). *Benchmarking sustainable development: A synthetic meta index approach* [Evaluación comparativa del desarrollo sostenible: un enfoque de metaíndice sintético]. The United Nations University World Institute for Development Economic Research. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/63606/1/391513214.pdf>
- Coll Serrano, V., & Blasco Blasco, O. (2006). *Evaluación de la eficiencia mediante análisis de la envolvente de datos, introducción a los modelos*. Universidad de Valencia. https://www.uv.es/vcoll/libros/2006_evaluacion_eficiencia_DEA.pdf
- Congreso de la República de Colombia. (1993, 22 de diciembre). *Ley 99*, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html
- Despotis, D. K. (2005). A reassessment of the human development index via data envelopment analysis [Una reevaluación del índice de desarrollo humano a través del análisis envolvente de datos]. *Journal of the Operational Research Society*, 56(8), 969-980. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601927>
- Farrell, M. J. (1957). The Measurement of productive efficiency [La Medición de la eficiencia productiva]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), 253-290. <https://doi.org/10.2307/2343100>
- Favila Tello, A. (2019). Eficiencia de la innovación en América Latina. Una aproximación a través del Análisis Envolvente de Datos. *Análisis Económico*, 34(87), 249-267. <https://www.redalyc.org/journal/413/41362257011/html/>
- Figueroa Lucero, O. A. (2016, julio-diciembre). Evaluación de la Sostenibilidad de los sistemas de producción de café en fincas-hogar del sector San José, municipio de Linares-Nariño. *Tendencias*, 17(2), 111-125. <https://doi.org/10.22267/rtend.161702.6>
- Flórez Laiseca, A. M., Loaiza Trejos, P. A., & Correa Valencia, C. I. (2021, enero-junio). La sostenibilidad territorial: una apuesta desde la gestión empresarial en el departamento del Quindío. *Semestre Económico*, 24(56), 271-297. <https://doi.org/10.22395/seec.v24n56a12>
- Fonseca Carreño, N. E., & Vega Baquero, Z. Y. (2019). Sostenibilidad como estrategia de competitividad empresarial en sistemas de producción agropecuaria. *Revista Estrategia*

- Organizacional*, 8(1), 9-26. <https://doi.org/10.22490/25392786.3168>
- Fontalvo, T. J., De la Hoz, E. J., & Olivos, S. (2019). Methodology of data envelopment análisis (DEA) GLMNET for assessment and forecasting of financial efficiency in a free trade zone Colombia [Metodología de análisis envolvente de datos (DEA) GLMNET para la evaluación y pronóstico de la eficiencia financiera en una zona franca Colombia]. *Información Tecnológica*, 30(5), 263-270. <https://hdl.handle.net/20.500.12585/9228>
- Gamarra Vergara, J. R. (2004). Capítulo 5. Eficiencia técnica relativa de la ganadería de doble propósito en la Costa Caribe. Documentos de trabajo sobre economía regional. *Banco de la República Colombia*, 53, 1-75. <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-53.pdf>
- Gómez Rodríguez, D. (2021). Sostenibilidad. Apuntes sobre sostenibilidad fuerte y débil, capital manufacturado y natural. *Inclusión & Desarrollo*, 8(1), 131-143. <https://revistas.uniminuto.edu/index.php/IYD/article/download/2470/2088>
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA. (2021). *BUR3. Tercer informe bienal de actualización de cambio climático de Colombia. Dirigido a la convención Marco de las Naciones*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/BUR3%20-%20COLOMBIA.pdf>
- Iglesias Ibarra, Á. J., & Fernández Rangel, J. A. (2022). *Introducción a la econometría: teoría y aplicaciones usando Stata 17*. Fundación Universitaria del Área Andina.
- Jany, J. (1994). *Investigación integral de mercados, un enfoque operativo*. McGraw Hill.
- Jurado Mejía, A. G., Pardo Rozo, Y. Y., & Hernández Londoño, C. E. (2023). Tipificación de sistemas agropecuarios familiares y la seguridad alimentaria en el piedemonte amazónico colombiano. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 31(1), 31-51. <https://doi.org/10.18359/rfce.6239>
- Kido-Cruz, A., Cruz-Pérez, J. P., & Ortiz Zavala, A. (2021). Turismo y pobreza: un análisis de la envolvente de datos para municipios en México. *Inquietud Empresarial*, 21(2), 85-95. <https://doi.org/10.19053/01211048.12334>
- León Cáceres, C. R., Valero Ochoa, F. A., & Peñaherrera Larenas, M. F. (2019). El análisis envolvente de datos como herramienta para medir la eficiencia del sistema tributario ecuatoriano. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 3(23), 1-8.

<https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol3iss23.2019pp1-8>

- Marshall, E., & Shortle, J. (2005). Using DEA and VEA to evaluate quality of life in th Mid–Atlantic States [Uso de DEA y VEA para evaluar la calidad de vida en los estados del Atlántico Medio]. *Agricultural and Resource Economics Review*, 34(2), 185-203. <https://doi.org/10.1017/S1068280500008352>
- Meadows, D., Randers, J., & Meadows, D. (2004). *Limits to Growth: The 30-Year Update* [Límites al crecimiento: la actualización de 30 años]. Chelsea Green Publishing.
- Meza Carvajalino, C. A. (2022). *Econometría*. Ediciones Unisalle. <https://doi.org/10.19052/9786287510265>.
- Naciones Unidas. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo: Nuestro Futuro Común*. Gro Harlem Brundtland.
- Naciones Unidas (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Pan, W. T., Zhuang, M.-E., Zhou, Y. Y., & Yang, J. J. (2021). Research on sustainable development and efficiency of China’s E-Agriculture based on a data envelopment analysis-Malmquist model [Investigación sobre el desarrollo sostenible y la eficiencia de la ciberagricultura de China basada en un modelo de análisis envolvente de datos-Malmquist]. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, Artículo e120298. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120298>
- Pardo Rozo, Y. Y., Andrade Adaime, M. C., & Marlés Betancourt, C. (2022). *Hacia un desarrollo sostenible en sistemas agropecuarios en la Amazonia colombiana*. Editorial Uniamazonia. <https://www.uniamazonia.edu.co/documentos/docs/Vicerectoria%20de%20Investigaciones%20y%20Posgrados/Publicaciones/Libros/Hacia%20un%20desarrollo%20sostenible%20en%20sistemas%20agropecuarios%20de%20la%20amazonia%20colombiana.pdf>
- Pardo-Rozo, Y. Y., Andrade-Castañeda, H. J., Muñoz-Ramos, J., & Velásquez-Restrepo, J. E. (2021, julio-diciembre). Carbon capture in three land use systems in the Colombian Amazonia [Captura de carbono en tres sistemas de uso del suelo en la Amazonia colombiana]. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 38(2), 111-123. <https://doi.org/10.22267/rcia.213802.160>
- Pardo Rozo, Y. Y., Hernández Castorena, O., & Andrade Adaime, M. C. (2022). Key Factors of Competitiveness and Sustainability in Livestock Systems of The Andean-Amazonian

- Piedmont [Factores Claves de Competitividad y Sostenibilidad en los Sistemas Ganaderos del Piamonte Andino-Amazónico]. *Mercados y Negocios*, (45), 27-48. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2594-01632022000100027
- Pardo Rozo, Y. Y., Muñoz Ramos, J., & Velásquez Restrepo, J. E. (2022). Assessment of Sustainability in Livestock Systems in the Amazonian Piedmont, Colombia [Evaluación de la Sostenibilidad en Sistemas Ganaderos en el Piamonte Amazónico, Colombia]. *Equidad y Desarrollo*, 1(39), 1-23. <https://doi.org/10.19052/eq.vol1.iss39.1>
- Pardo-Rozo, Y. Y., Saldaña-Fonseca, L. A., & Peláez-Rodríguez, M. (2023). Valoración económica por servicios recreativos del río Hacha en el piedemonte amazónico colombiano. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 26(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n2.2023.2428>
- Peters, M., Herrero, M., Fisher, M., Erb, K.-H., Rao, I., Subbarao, G. V., Castro, A., Arango, J., Chará, J., Murgueitio, E., van der Hoek, R., Läderach, P., Hyman, G., Tapasco, J., Strassburg, B., Paul, B., Rincón, A., Schultze-Kraft, R., Fonte, S., & Searchinger, T. (2013). Challenges and opportunities for improving eco-efficiency of tropical forage-based systems to mitigate greenhouse gas emissions [Desafíos y oportunidades para mejorar la ecoeficiencia de los sistemas basados en forrajes tropicales para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero]. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 1(2), 156-167. [https://doi.org/10.17138/tgft\(1\)156-167](https://doi.org/10.17138/tgft(1)156-167)
- Portocarrero Sierra, L., Vanegas López, J. G., Restrepo Morales, J. A., & Aguilar Barreto, A. J. (2023). Escala de medición para la evaluación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en proyectos de inversión pública. El caso del Proyecto Morro de Moravia en Medellín, Colombia. *Cuadernos De Administración*, 36. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cao36.emeod>
- Puentes-Ramírez, E., Hidalgo-Guerrero, A., Ortiz-Bernal, Y., & Betancourt-Quiroga, C. (2021). Indicadores de sostenibilidad social y su relación con el concepto de capital social. *Revista de Arquitectura*, 23(1), 97-104. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.3072>
- Quiroga Martínez, R. (2007). *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas, CEPAL. <https://hdl.handle.net/11362/5498>

- Riaño Henao, C. A., & Larrea Serna, O. L. (2021). Análisis envolvente de datos y sus aplicaciones en sostenibilidad. *Ingeniare*, (31), 11-19. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.31.8934>
- Rodríguez-Mestre, L., Marrero-Ancízar, Y., & Reynaldo-Argüelles, C. L. (2022). Los indicadores como variables en los análisis de eficiencia en la minería del níquel en Cuba. *Minería y Geología*, 38(2), 116-131. <http://200.14.55.71/index.php/revistamg/article/view/2183>
- Rogelj, J., Huppmann, D., Krey, V., Riahi, K., Clarke, L., Gidden, M., Nicholls, Z., & Meinshausen, M. (2019). A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal [Una nueva lógica de escenario para el objetivo de temperatura a largo plazo del Acuerdo de París]. *Nature*, 573, 357-363. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1541-4>
- Suárez, A. E., Gutiérrez-Montes, I., Ortiz-Morea, F. A., Ordoñez, C., Suárez, J. C., & Casanoves, F. (2021). Dimensions of social and political capital in interventions to improve household wellbeing: Implications for coffee-growing areas in southern Colombia [Dimensiones del capital social y político en intervenciones para mejorar el bienestar de los hogares: Implicaciones para las zonas cafetaleras del sur de Colombia]. *PLoS ONE*, 16, Artículo e0245971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245971>
- Suárez Sánchez, M. (2015). *Planificación sostenible de sitios turísticos costeros: Indicadores de flujos de materiales y territorio para una herramienta de ayuda a la decisión* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio digital institucional. <http://hdl.handle.net/10803/336674>
- Tsaples, G., & Papathanasiou, J. (2021). Data envelopment analysis and the concept of sustainability: A review and analysis of the literatura [Análisis envolvente de datos y el concepto de sostenibilidad: una revisión y análisis de la literatura]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, Artículo e110664. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110664>
- Yáñez, E., Ramírez, A., Núñez-López, V., Castillo, E., & Faaij, A. (2020). Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry [Explorando el potencial de la captura de carbono y la recuperación mejorada de petróleo mediante almacenamiento como estrategia de mitigación en la industria petrolera colombiana]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 94, 102938. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102938>

- Zarta Ávila, P. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa*, (28), 409-423. <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>
- Zhou, H., Yang, Y., Chen, Y., & Zhu, J. (2018). Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions [Aplicación del análisis envolvente de datos en sostenibilidad: orígenes, desarrollo y direcciones futuras.]. *European Journal of Operational Research*, 264(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.023>