



Aportes para el diseño de esquemas de pagos por servicios ambientales en la cuenca del lago de Tota, Colombia

*Sabina Talero Cabrejo**
*Erika Milena Salcedo Silva***

Fecha de recepción: 23 de septiembre de 2019

Fecha de aprobación: 10 de enero de 2020

Resumen: Con este artículo se pretende contribuir al diagnóstico previo al diseño de un esquema de pagos por servicios ambientales (PSA), a través de la estimación de los costos de oportunidad (CO) relacionados con la decisión de renunciar a desarrollar actividades agrícolas convencionales, con el propósito de conservar o restaurar áreas de páramo y zona de protección del humedal en la cuenca del lago de Tota (departamento de Boyacá, Colombia). Se identificaron las áreas y ecosistemas estratégicos de la cuenca y se realizó un análisis socioeconómico de las unidades productoras que existen en la zona, a fin de identificar los usos del suelo representativos. Posteriormente, se estimaron las funciones de producción de los principales cultivos existentes para calcular el valor presente neto del costo de oportunidad de las áreas de los predios de la cuenca para contratos de PSA a cinco y diez años de duración. En último término, se concluye sobre las posibilidades de implementación de esquemas de tipo PSA en dicha cuenca, conforme con la literatura revisada y el análisis de resultados.

Palabras clave: pagos por servicios ambientales, costo de oportunidad, conservación ambiental, gestión ambiental, gestión de los recursos hídricos, gobernabilidad, economía agraria.

Clasificación JEL: H23, Q1, Q2, R1, C31.

Cómo citar este artículo/ To reference this article / Comment citer cet article / Para citar este artigo:

Talero Cabrejo, S., & Salcedo Silva, E. (2020). Aportes para el diseño de esquemas de pagos por servicios ambientales en la cuenca del lago de Tota, Colombia. *Apuntes Del Cenes*, 39(69). Págs. 267 - 298 <https://doi.org/10.19053/01203053.v39.n69.2020.10078>

* Geógrafa y contadora pública. Magíster en Economía Aplicada. Consultora independiente en incentivos a la conservación y responsabilidad social empresarial. Bogotá - Colombia. Correo electrónico: sabina.talero@uniandes.edu.co <http://orcid.org/0000-0003-2806-560X>

** Magíster en Economía Aplicada. Asesora Oficina de Planeación y Finanzas del Ministerio de Educación Nacional. Bogotá - Colombia. Correo electrónico: em.salcedo10@uniandes.edu.co <http://orcid.org/0000-0002-4490-738X>

Contributions for Designing Payments Schemes for Environmental Services in the Basin of Tota Lake, Colombia

Abstract

This study aims to contribute to the assessment prior to the design of a payments scheme for environmental services by estimating the opportunity costs (OC) related to renounce to agricultural activities in order to conserve or restore the moorland area and wetland protection zone in the Tota lake basin, located in Boyacá, Colombia. Strategic areas and ecosystems of the basin were identified and a socio-economic analysis of production units of the area was carried out, identifying the most representative land uses. Subsequently, the authors estimated the production functions of the main currently crops to calculate net current value of the opportunity cost of the watershed property areas for 5 and 10 years contracts. Finally, it is concluded on the possibilities of implementation of schemes of the kind of environmental services payment in that basin, according to the reviewed literature and the analysis of results.

Keywords: environmental services payments, opportunity cost, environmental conservation, environmental management, water resources management, governance, agricultural economy.

INTRODUCCIÓN

El lago de Tota es el cuerpo de agua dulce más grande de Colombia y el segundo lago más grande en montaña en Suramérica. Este cuerpo de agua representa alrededor del 13.55% de las reservas de agua dulce de nuestro país y el 57% del territorio de la cuenca pertenece al complejo de páramos Mamapacha-Bijagual-Tota (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2014). En la bibliografía consultada se identifican varios problemas de degradación de los servicios ambientales de provisión de agua, regulación hídrica, regulación de la erosión y pérdida de biodiversidad en la cuenca del lago de Tota. Esto debido a la contaminación hídrica y edáfica generada por el exceso del uso de fertilizantes y plaguicidas en áreas de cultivo de cebolla y papa, y a la realización de la acuicultura de trucha a gran escala. Además, se han perdido extensas áreas de vegetación natural por la ampliación de la frontera agropecuaria en zonas de páramo y protección hídrica del humedal.

El Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES, 2014) publicó un documento titulado *Manejo integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota*, el cual identificó la necesidad de diseñar y poner en marcha instrumentos de política adicionales a los ya existentes, para conservar y recuperar los servicios ambientales provistos por los ecosistemas estratégicos de la cuenca. El CONPES planteó como una opción viable la implementación de un esquema de pagos por servicios ambientales (PSA). Que sepamos, hasta el momento no se tienen estudios de diagnóstico ni un diseño de un esquema de este tipo. Por tanto, con este trabajo se pretende contribuir al diagnóstico previo al diseño de un esquema de PSA, a través del cálculo de los costos de oportunidad (CO) de conservar o restaurar áreas en ecosistemas estratégicos que son susceptibles o están siendo transformadas por actividades económicas representativas.

El estudio considera una aproximación de la disponibilidad a aceptar (DAA) de los propietarios o poseedores de predios en áreas con ecosistemas estratégicos,

a partir de los CO relacionados con la decisión de renunciar a desarrollar actividades agrícolas para conservar o restaurar esas áreas. La metodología de estimación del beneficio neto de las actividades más representativas está en concordancia con el método de avalúo catastral para predios rurales (IGAC, Resolución 620 de 2008), con lo dispuesto en la guía metodológica del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2012) y lo indicado en el Decreto 1007 de 2018 del MADS, el cual reglamenta los pagos por servicios ambientales en Colombia.

Los resultados obtenidos indican que el CO por uso agrícola del suelo, en siembra potencial de cebolla larga, es en promedio 1 672 000 pesos ha/año. Si bien el cálculo del CO es el principal referente para estimar el monto del incentivo por pagar, los valores obtenidos en este trabajo deben ser considerados como una evaluación aproximada de los límites superiores del valor base para la definición del incentivo que se va a pagar por PSA. Estos valores no consideran actividades y compromisos que se pacten en los contratos para conservación o restauración de los ecosistemas, ni tienen en cuenta los recursos disponibles y los costos de operación y monitoreo del esquema de PSA (MADS, 2012, p. 27).

El artículo se organiza de la siguiente forma: esta introducción, una descripción del contexto biofísico, socioeconómico y la problemática ambiental en la cuenca del lago de Tota; el marco

conceptual, la metodología utilizada, los resultados, la discusión y finalmente las conclusiones y recomendaciones.

CONTEXTO BIOFÍSICO, SOCIOECONÓMICO Y PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

La cuenca del lago de Tota tiene un área de 22 370 ha y se encuentra localizada en los municipios de Aquitania, Cuítiva, Tota y Sogamoso (departamento de Boyacá, Colombia), en la subzona hidrográfica del lago de Tota de la parte alta del río Upía, correspondiente a la zona hidrográfica del Orinoco. Está rodeada en su parte alta por el complejo de páramos Tota-Bijagual–Mamapacha, los cuales ocupan el 86% del territorio de la cuenca (según análisis espacial de información del IAvH, 2015). El lago de Tota es el cuerpo de agua dulce más grande de Colombia y constituye el 13.55% de las reservas de agua del país. Esta cuenca abastece de agua a 250 000 habitantes, aproximadamente el 20% del total de la población de Boyacá (DNP, 2014, p. 11).

Esta cuenca se caracteriza por tener topografía ondulada y quebrada, altitud superior a los 3200 msnm, clima muy frío y muy húmedo, y profundidad de suelos menor a 30 cm. En la zona de estudio se pueden identificar distintas unidades de suelo con características geomorfológicas y clima similares (CORPOBOYACÁ, 2005). Solo el 22% de los predios cultivados tiene suelos medianamente aptos para agricultura;

mientras que el 78% de los predios tiene suelos que por las condiciones de relieve no serían aptos para agricultura tradicional, sino para la conservación o el desarrollo de algunos sistemas agroforestales o silvopastoriles de bajo impacto (según análisis espacial de cartografía del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca -POMCA- del Lago de Tota, [CORPOBOYACÁ](#), 2005).

En la cuenca existen 18 233 predios ([IGAC](#), 2019); de estos, 9146 se encuentran en área de páramo y ocupan el 86% del área del total de predios de la cuenca. En la zona de protección del humedal existen 1421 predios, de los 1609 que rodean el lago de Tota. Estos predios ocupan 567 ha (2.5% del área de la cuenca) de ronda de protección hídrica (ver Figura 1). Casi el 80% del área de la cuenca tiene ecosistemas de páramo y humedal. Estas zonas deberían tener coberturas arbóreas de protección y un sistema de aprovechamiento sostenible de los recursos naturales existentes para favorecer la provisión de servicios ecosistémicos claves. Los principales servicios ambientales en ecosistemas de alta montaña son la provisión de agua, la regulación hídrica y la disminución o prevención de la sedimentación ([Quintero](#), 2010).

En la zona se cultivan cerca de 2500 ha de cebolla en rama y en el lago se

realiza una explotación piscícola que representa aproximadamente 100 t de trucha arcoíris al mes ([DNP](#), 2014, p. 11). Según estudio de [CORPOBOYACÁ](#) (2015, p. 360), en la cuenca del lago de Tota predomina el monocultivo de cebolla hasta los 3300 msnm.

Los datos del Tercer Censo Nacional Agropecuario (CNA) del DANE (2016) permiten describir el uso del suelo en la cuenca. Existen 9978 unidades de producción (UP) (unidad de medida del CNA), que corresponden a un área censada de 18 910 ha. El 98% de las UP de la cuenca son predios menores de 10 ha y representan el 59.4% del área de la cuenca. La mayoría de las UP tienen uso agropecuario (71.2 %), mientras que un 16.7% corresponde a cobertura de bosques naturales y un 10.9% a cobertura de rastrojo, en descanso o barbecho. En el año 2013 (año de referencia para la proyección del análisis de la producción agrícola), el 54.6% de las UP con uso agropecuario tuvo presencia de cultivos con un total de área sembrada de 3416,7 ha. De estas, el 43.7% correspondió al cultivo de cebolla larga, 12.3% al cultivo de papa, 9.8% al cultivo de papa criolla, 9.8% al cultivo de cebolla cabezona y el restante 27.5% a otros cultivos. En cuanto a la producción total, esta fue de 42 323,3 t durante el 2013, de las cuales el 73.5% corresponde a cebolla larga y el 11.9% a papas.

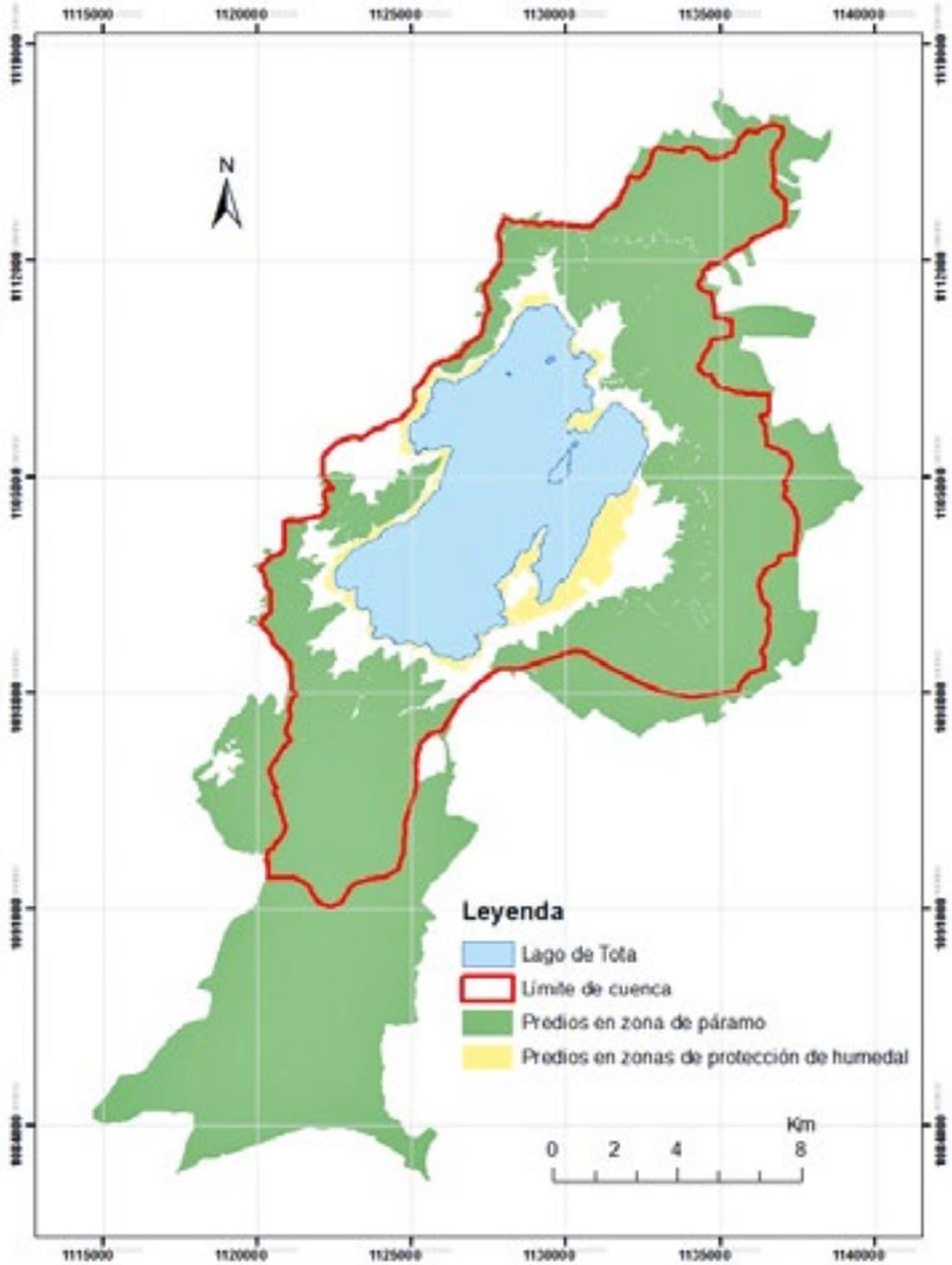


Figura 1. Identificación de las áreas de los ecosistemas estratégicos (páramo y zona de protección del humedal) en la cuenca del lago de tota

Fuente: elaborado por las autoras según datos CORPOBOYACÁ (2015) y IAvH (2015)

La cuenca del lago de Tota es afectada por las actividades económicas y el crecimiento de la población, los cuales ejercen una fuerte presión sobre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico. Existen externalidades negativas de la producción agrícola y piscícola sobre el consumo y producción de otras actividades (turismo), debido a que muchos piscicultores no tratan las heces de los animales en la actividad acuícola y los agricultores utilizan gallinaza cruda para fertilizar el cultivo de la cebolla. Esto ocasiona contaminación orgánica y eutrofización del lago, lo cual imposibilita el desarrollo de actividades recreativas cerca del espejo de agua. Las actividades económicas agropecuarias y hoteleras, que no cuentan con tratamiento de aguas residuales, también generan externalidades negativas para los usuarios de agua para consumo humano, puesto que aumentan el costo en la potabilización del agua para surtir a los acueductos o incrementan los costos asociados a la salud. Por último, también existe una externalidad negativa del consumo de agua de los acueductos urbanos fuera de la cuenca sobre la producción y el consumo de agua en el interior de la cuenca, pues los primeros ejercen presión sobre la disponibilidad de la oferta hídrica dentro de la cuenca para consumo humano y demás actividades económicas. El crecimiento urbano fuera de la cuenca incide de forma directa en el agotamiento del recurso, aumentando la tasa de extracción de agua (WAVES, 2016; DNP, 2014).

Los costos de la afectación de ecosistemas se presentan como costos sociales asociados al ejercicio de las actividades económicas. Estos incluyen costos de daño y de reducción de la vulnerabilidad por agotamiento del recurso hídrico (disminución de la disponibilidad de un recurso con cierta calidad). Estos últimos costos pueden asumirse como gastos de inversión y mantenimiento de la conservación del recurso hídrico que podrían internalizar los productores o asumirían los terceros. Estos costos incluyen: costo de reconversión de actividades productivas a conservación –los cuales contienen los CO asociados a los cambios de uso productivo del suelo en ecosistemas estratégicos–, costos de cambio tecnológico a través de mecanismos de producción limpia y consumo responsable, y costos de generación y mantenimiento de los servicios ecosistémicos a través de acciones de conservación y recuperación (restauración de suelos y reforestación).

De acuerdo con la información consultada en las oficinas de la autoridad ambiental, CORPOBOYACÁ, actualmente no existen valores monetizados sobre los beneficios de los servicios ambientales provistos por los ecosistemas estratégicos en la cuenca del lago de Tota. Tampoco se encontraron estudios publicados sobre los costos de daño identificados y los costos de reconversión tecnológica de actividades agropecuarias que hacen un uso intensivo del agua y el suelo (cebolla, acuicultura, papa y pastos) en esas áreas estratégicas.

MARCO CONCEPTUAL

La literatura menciona que la regulación de las externalidades puede realizarse mediante políticas de comando y control o por medio de instrumentos económicos. Según [Moreno-Sánchez \(2012\)](#), estos últimos pueden categorizarse en aquellos que racionan precios a través de instrumentos fiscales, tributarios y tasas; crean y mejoran mercados (p. ej. PSA); asignan derechos de propiedad, ofrecen asistencia financiera y adjudican una responsabilidad legal para la no contaminación y conservación.

Hasta el momento, en la cuenca del lago de Tota se aplican los siguientes instrumentos económicos: concesiones de agua, tasa por uso de agua, tasa retributiva por vertimientos superficiales, asistencia financiera de entidades de cooperación internacional de gobiernos europeos y ONG para la gobernanza de la gestión y diseño e implementación de programas y proyectos de conservación, restauración y reconversión de actividades productivas ([CORPOBOYACÁ, 2015](#)), y establecimiento de multas por incumplimientos de límites permitidos en la captura o contaminación de agua por parte de la autoridad ambiental –CORPOBOYACÁ–. Estos no han sido suficientes para lograr un uso eficiente del recurso y disminuir la contaminación dentro de la cuenca de Tota ([WAVES, 2016](#)). En cuanto a otros instrumentos económicos viables, que aún no se han implementado en la

cuenca, están aquellos asociados con la creación de mercados, tales como permisos negociables, PSA, seguros ambientales, certificación y ecoetiquetado, y ecoturismo.

El Gobierno nacional promueve la implementación de un esquema de PSA para coadyuvar al manejo integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota ([CONPES 3801 de 2014](#)). En el Decreto Ley 870 de 2017 se establecen los principios para el desarrollo de los PSA y otros incentivos a la conservación, que permitan el mantenimiento y la generación de servicios ambientales en áreas y ecosistemas estratégicos, a través de acciones de preservación y restauración. En el Decreto 1007 del 14 de junio de 2018 se reglamenta el incentivo de PSA y se establecen los elementos básicos para el diseño, la implementación y el seguimiento de estos proyectos; dentro de los cuales está la estimación del valor del incentivo por costo de oportunidad. Para ello se deberá:

Estimar, como un valor de referencia, el costo de oportunidad de las actividades productivas agropecuarias más representativas que se adelanten en las áreas y ecosistemas estratégicos y que afectan en mayor grado su cobertura natural, mediante alguna de las siguientes opciones:

1. Los beneficios económicos netos que generan las actividades productivas agropecuarias más representativas, o;

2. El valor de la renta o alquiler de la tierra, para las actividades productivas antes señaladas. (Artículo 2.2.9.8.2.5 del Decreto 1007 de 2018 del MADS, p. 7)

La norma citada estipula que se debe seleccionar el menor costo de oportunidad, calculado a partir de alguna de las opciones mencionadas y que, de conformidad con el principio de costo-efectividad, se debe determinar el valor que cubra una mayor cantidad de área para los recursos disponibles. Este valor resultante será el valor máximo del incentivo por reconocer anualmente por hectárea, que regirá para todos los predios que hacen parte del área o ecosistema estratégico respectivo, ya sea que las áreas de los predios se destinen para la preservación o restauración.

En la actualidad no hay una guía específica para identificar los costos y gastos de producción que deberían ser considerados para calcular los beneficios económicos netos de las actividades agropecuarias representativas, pero sí existen procedimientos de avalúo que contemplan los métodos de capitalización de rentas o ingresos netos y de comparación o de mercado (Resolución 620 de 2008 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]), los cuales son métodos asimilables a los estipulados en el Decreto 1007 de 2018.

La literatura reciente sobre PSA destaca la importancia del cálculo de los CO

de los usos del suelo en actividades productivas como insumo o valor de base para la negociación entre oferentes (contribuyentes) y demandantes (retribuyentes) de los servicios ambientales provistos por los ecosistemas para conservar o recuperar. En el MADS se hizo una estimación preliminar del costo de oportunidad de usos de suelo para actividades productivas representativas en ecosistemas estratégicos (páramos, humedales, bosques de manglar y bosque seco tropical) con base en el cálculo de utilidades operacionales de estas actividades, con el fin de identificar las necesidades de financiación de un Programa Nacional de PSA (Borda & Sosa, 2016). Según los cálculos de dicho estudio, el CO promedio de una hectárea por año de los ecosistemas estratégicos páramo y humedal es de 1 159 000 pesos colombianos y de 265 000 pesos colombianos (a precios corrientes de 2019), respectivamente.

En la literatura académica consultada no se encontraron estudios que permitan contrastar diversos CO para distintos usos del suelo. Esto se debe a la heterogeneidad de los CO, por factores como la diferenciación espacial entre predios en zonas altas y bajas de las cuencas, la ubicación y distribución de las zonas núcleo y de amortiguamiento de los ecosistemas estratégicos, la distancia a fuentes hídricas, las diferencias en el uso del suelo (p. ej. sistemas productivos y tipos de cultivos) y las características socioeconómicas de los propietarios o

poseedores (p. ej. tenencia de la tierra), entre otros factores (Rendon, Dallimer, & Paavola, 2016).

Sin embargo, la literatura sobre determinación de niveles de pago cercanos al CO de la provisión de servicios ambientales identifica tres enfoques de estimación: i. Obtención de información sobre atributos observables del predio y los poseedores a través de *rent approach* o enfoque basado en encuestas sobre las rentas anuales de la tierra; *flow approach* o enfoque basado en el cálculo de retornos netos de la tierra en el nivel local, y *model approach* o cálculo de retornos netos por hectárea donde existe información sobre variables socioeconómicas y espaciales que explican los beneficios netos de los usos del suelo (Wunscher, Engel & Wunder, 2011); ii. Revisión de valores de contratos de arrendamiento, y iii. Realización de subastas (*procurement auctions*), donde los poseedores hacen ofertas para competir por contratos de PSA, revelando así información sobre sus verdaderos CO para la provisión de servicios ambientales (Lundberg, Persson, Alpizar, & Lindgren, 2018).

En este estudio se utiliza el primer enfoque de estimación, usando un modelo de regresión para calcular el rendimiento agrícola por hectárea para cultivos representativos en áreas estratégicas de la cuenca (zona de protección del humedal y páramo). Con ello se pretende tasar el valor presente de los beneficios netos esperados de usos del suelo represen-

tativos, lo cual coincide con el primero de los métodos de estimación de CO de usos del suelo, según la ley colombiana.

METODOLOGÍA

Estrategia empírica

Aunque existen diversos métodos para valorar económicamente los servicios ambientales (MADS, 2017 y ANLA, 2017), según el cálculo de las disponibilidades por pagar o aceptar para conservarlos o recuperarlos, este estudio estima una aproximación de la disponibilidad por aceptar (DAA) de los propietarios o poseedores de predios en áreas con ecosistemas estratégicos, a partir de los CO relacionados con la decisión de renunciar a desarrollar actividades agrícolas convencionales para conservar o restaurar esas áreas. El valor calculado debe ser considerado como una estimación aproximada del valor base para la definición del PSA. Estos valores no consideran actividades y compromisos que se pacten en los contratos para conservación o restauración de los ecosistemas, ni tienen en cuenta los recursos disponibles y los costos de operación y monitoreo del esquema de PSA (MADS, 2012, p. 27).

La metodología utilizada en este estudio sigue el procedimiento general de cálculo de los CO sugerido por Borda & Sosa (2016) en el estudio del MADS, pero se diferencia en los siguientes aspectos: a) la escala de estudio es regional y no nacional, situación requerida para el

diseño de un PSA; b) el marco estadístico es un censo cuya unidad mínima de observación, la UP, es la más detallada para estimar CO de usos del suelo; c) se incorporan condiciones locales y decisiones específicas de los productores en cuanto a prácticas agrícolas; d) se incluyen características espaciales, e) sigue los lineamientos del método de capitalización de rentas o ingresos para los avalúos del catastro rural del IGAC; y f) la metodología puede replicarse en otras regiones, utilizando las variables y datos del Tercer CNA 2013-2014 del DANE (2016).

El estudio se basa en el análisis econométrico de los datos declarados sobre número de hectáreas sembradas, rendimiento por hectárea y prácticas agrícolas por parte de los productores para cada uno de los predios en el Tercer CNA del DANE (2016) y no a partir de inventarios técnicos por tipo de cultivo. En la Figura 2 se identifica el esquema metodológico implementado para estimar los CO de los usos de suelo asociados a las principales actividades económicas agropecuarias en predios ubicados en las áreas de los ecosistemas estratégicos, de páramo y ronda del humedal, de la cuenca del lago de Tota.

En primer lugar, se identifican los ecosistemas estratégicos que se requiere recuperar o conservar para el mantenimiento y generación de servicios ambientales, principalmente, la calidad y la regulación hídrica en la cuenca. Tal identificación se realiza a través de

la unión espacial de los polígonos que identifican estas áreas. Las fuentes de información son los mapas de: el POMCA de la cuenca del lago de Tota (escalas 1:25.000 y 1:100.000), el mapa de definición de ronda del humedal (1:25.000) realizado por CORPOBOYACÁ (2014) y el mapa de delimitación del área de páramo del complejo Mamapacha-Bijagal-Tota (escala 1:25.000) realizado por CORPOBOYACÁ-IAvH (2015).

En segundo lugar, se identifican las actividades económicas agropecuarias representativas que caracterizan el uso del suelo predominante en la cuenca del lago de Tota. Con base en el análisis de las estadísticas descriptivas de las variables socioeconómicas de la cuenca (DANE, 2016), se definieron las actividades agrícolas representativas para la zona de estudio: el cultivo de cebolla larga y el cultivo de la papa, según la caracterización mencionada en la primera sección.

En tercer lugar, se especificó un modelo econométrico para estimar el rendimiento por hectárea según actividad agropecuaria representativa (ecuación 1). Se definieron las funciones de producción de ambos cultivos, cuya variable dependiente es el logaritmo del rendimiento por hectárea ($\log Y$) en función de variables asociadas al uso de los factores de producción como tecnología (T), capital (K), tierra (L) y trabajo (W). Dado que las variables de tierra y trabajo son continuas, estas se especifican en forma logarítmica. Adicionalmente,

se incluyeron características espaciales (S) como el tipo de suelo, el cual influye en los modelos de productividad. La función de rendimiento agrícola es modelada con una especificación log-log, la cual considera que los factores de producción en agricultura no son perfectamente sustitutos entre sí. En lugar de usar directamente el promedio de los rendimientos declarados, este trabajo estima el rendimiento agrícola como una función de los factores de producción y características espaciales, dado que permite: i) identificar el

efecto de los factores de producción que explican la productividad de un cultivo en una región específica, teniendo en cuenta las prácticas de los agricultores y variables biofísicas que inciden en la productividad; y ii) predecir el CO del uso del suelo de otros predios que en el momento no están siendo cultivados, pero que en el futuro podrían estarlo.

Los modelos descritos se representan de la siguiente manera:

Modelo econométrico de la estimación del rendimiento agrícola con variables espaciales

$$\log Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \log L_{ij} + \beta_2 \log W_{ij} + \beta_3 K_{ij} + \beta_4 T_{ij} + \beta_5 S_{ij} + u_{ij} \quad [1]$$



Figura 2. Esquema metodológico.

Los factores de producción se han seleccionado a partir de la revisión de literatura agronómica y económica asociada a las estructuras de costos de los diversos cultivos. También se entrevistó a un productor de cebolla de la zona para corroborar la importancia del uso de ciertos factores de producción en el rendimiento de estos. Por último, se efectuaron varios modelos econométricos y pruebas estadísticas para definir el modelo que mejor se ajustaba a los datos obtenidos del Tercer CNA.

En cuarto lugar, se calcularon los beneficios netos obtenidos de las actividades agropecuarias más representativas en la economía de la cuenca para 2013, teniendo en cuenta los precios de venta en finca (ver Tabla 1) y costos unitarios de producción (Tabla 2), según información secundaria disponible en la Encuesta Nacional Agropecuaria (DANE-ENA, 2017) y los estudios de costos de producción del DANE (2017b), FEDEPAPA (2014) y DANE-SIPSA (2019).

Tabla 1. Precios promedio de los principales productos (pesos corrientes/t) producidos en la cuenca del Lago de Tota

	Inflación								
		1,94	3,66	6,77	5,75	4,09	3,18	3,4	3,3
Rendimiento (ton/ha)		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019*	2020*
Cebolla en rama	120	\$429.144	\$427.842	\$688.501	\$763.553	\$742.000	\$765.596	\$791.626	\$817.750
Cebolla cabezona	25	\$717.198	\$715.022	\$1.150.643	\$900.224	\$872.000	\$899.730	\$930.320	\$961.021
Papa	20	\$426.219	\$666.319	\$730.886	\$906.623	\$576.000	\$594.317	\$614.524	\$634.803
Papa criolla	11,12	\$1.340.500	\$1.436.300	\$1.500.250	\$2.221.833	\$832.000	\$858.458	\$887.645	\$916.937

Fuente: DANE

Nota: los precios de 2013-2018 corresponden a los promedios de precios al productor según la Encuesta Nacional Agropecuaria -ENA- del DANE
(*) Precios proyectados con los datos de inflación año corrido del DANE y proyecciones del Banco de República

Tabla 2. Costos unitarios de producción promedio (pesos corrientes/t)

	Inflación agro								
		-3,1 %	19,4 %	15,6 %	1,0 %	0,9 %	4,6 %	3,4 %	3,3 %
Rendimiento (ton/ha)		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019*	2020*
Cebolla junca Aquitania (1)	120	\$436.110	\$520.729	\$601.702	\$608.003	\$613.262	\$641.538	\$663.350	\$685.241
Cebolla cabezona amarilla Choachí (2)	25	\$989.583	\$1.181.592	\$1.365.330	\$1.379.627	\$1.391.561	\$1.455.721	\$1.505.216	\$1.554.888
Papa nacional (3)	20	\$501.475	\$598.776	\$691.886	\$699.131	\$705.179	\$737.692	\$762.774	\$787.945
Papa mediano cundiboyacense (4)	17,333	\$645.044	\$770.202	\$889.969	\$899.288	\$907.067	\$948.889	\$981.151	\$1.013.529
Papa pequeño cundiboyacense (4)	14,636	\$649.864	\$775.957	\$896.618	\$906.007	\$913.844	\$955.979	\$988.482	\$1.021.102
Papa criolla mediano cundiboyacense (4)	11,9	\$637.222	\$760.863	\$879.177	\$888.383	\$896.068	\$937.383	\$969.254	\$1.001.239
Papa criolla pequeño cundiboyacense (4)	10,333	\$676.946	\$808.293	\$933.983	\$943.763	\$951.927	\$995.817	\$1.029.675	\$1.063.655

Fuentes: (1)DANE (2017), (2) Banco Agrario (2008), (3) Fedepapa (2014), (4) SIPSA-DANE (2019)

Nota: Los datos sombreados en oscuro son datos provenientes de los estudios. Los demás, son datos corregidos por inflación a partir de estos.

El beneficio neto estimado por hectárea (Π_i) (ver ecuación 2) se basa en el método sugerido por Borda y Sosa (2016), el cual es similar al método de capitalización de rentas o ingresos sugerido por el IGAC para obtener los beneficios netos presentes. Según la Resolución 620 del 2008 del IGAC, el método de capitalización de rentas o ingresos es la técnica valuatoria que busca establecer el valor comercial de un bien, a partir de las rentas o ingresos que se puedan obtener del mismo bien, o inmuebles semejantes y comparables por sus características físicas, de uso y ubicación, trayendo a valor presente la suma de los probables ingresos o rentas generadas en la vida remanente del bien objeto de avalúo, con una tasa de capitalización o interés (IGAC, arts. 17 y 29 de la Resolución 620 de 2008).

Para aplicar este método a cultivos, el artículo 17 de dicha Resolución indica que el cálculo deberá incluir, además de los ingresos netos del cálculo de flujo de caja traídos a valor presente, “la inversión o costo de instalación y los costos de mantenimiento del cultivo de su etapa improductiva, lo mismo que al arrendamiento”. Debido al desconocimiento particular de estos últimos costos para los predios de la cuenca estudiada, este trabajo solo considera los beneficios netos de la actividad productiva; sin embargo, se consideran otras de las disposiciones requeridas en los avalúos comerciales de predios en zonas rurales, tales como características espaciales que están incorporadas en el modelo econométrico.

Estimación del beneficio neto
(utilidad bruta) por predio
según tipo de cultivo

$$\hat{\pi}_{ij} = (p_{ij} - c_{ij}) * \hat{Y}_{ij} \quad [2]$$

En quinto lugar, se estimó el valor presente de los beneficios netos futuros por hectárea de las principales actividades productivas (cultivo de cebolla larga y papa) a 1 de enero de 2019 para proyectos de PSA de cinco y diez años (ecuación 3). Para ello, se tuvieron en cuenta la tasa de interés y la tasa de descuento, considerando: el promedio de la inflación de los últimos cinco años (4 %), el promedio de las primas de ahorro (1 %) y la rentabilidad de los fondos de pensiones (2.5 %). Se calcularon las tasas de descuento para quienes participarían en un contrato de PSA (ρ =inflación + 1 %) y para los operadores financieros del esquema (r =inflación + 2.5 %).

Estimación del valor presente neto
del costo de oportunidad (\$/ha)

$$\widehat{CO}_{ij} = \hat{\pi}_{ij} \left[\frac{1+r}{r-\rho} \right] \left[1 - \left(\frac{1+\rho}{1+r} \right)^N \right] \quad [3]$$

Finalmente, a fin de escoger los predios a los cuales se les aplicaría el instrumento, se definieron dos escenarios para estimar el monto total requerido para financiar los PSA, según los CO que los propietarios o poseedores de los predios podrían obtener en zonas con alto valor ecológico o en ecosistemas estratégicos.

Estos montos corresponden a la suma del valor presente neto por ha/año para esquemas de cinco años, multiplicado por el número de hectáreas de los predios seleccionados, según criterios definidos.

Los escenarios elegidos corresponden a dos alternativas: 1) la selección y priorización de predios para toda la cuenca, según la reglamentación existente (decretos 870 de 2017 y 1007 de 2018), y 2) la selección de grupos de predios para comenzar un ejercicio piloto de PSA en la cuenca, con base en los predios seleccionados en el primer escenario. Para el primer escenario, con el *software* Arc Gis se seleccionaron los predios de la cuenca que cumplían con los criterios, en el siguiente orden secuencial: a. predios que se encuentran en área delimitada como páramo o ronda de protección del humedal, b. predios con presencia de corrientes hídricas superficiales, c. predios en cercanía a parches de cobertura vegetal o *buffers* de ronda hídrica (a menos de 100 m), d. predios con más del 20% del área con cobertura de bosques o con cobertura natural y más del 20% de su área con cultivos o pasto, según datos del Censo Nacional Agropecuario 2013-2014; e. predios con zonificación ambiental de alto y muy alto valor ecológico. Luego, se prefirieron aquellos predios que tenían más del 50% de su área con cobertura natural (arbustal y herbazal), según mapa de cobertura y uso del suelo 2012 Corine Land Cover (escala 1:100.000), y cuyo tamaño fuera mayor a 10 ha.

Debido a que el 98% de los predios en la zona son de menos de 10 ha (micro y minifundios), existe la preocupación de que los predios interesados en participar en un PSA se encuentren dispersos en la cuenca, lo que limitaría los beneficios de conservación de áreas estratégicas. Por ello, en el segundo escenario se seleccionan aquellos predios identificados en el escenario 1 que se pueden agrupar en *clusters*, según su contigüidad espacial. Se identificaron cinco zonas específicas, de tal manera que se cumpla con el propósito de conectar parches de cobertura natural representativos con la ronda de protección hídrica del lago.

Datos

La principal fuente de datos para este estudio son 9978 encuestas del Tercer CNA del DANE (2016), con resultados por unidad de producción (UP). En el análisis se seleccionaron aquellas encuestas cuyas coordenadas del centroide de la UP coincidieron perfectamente con las coordenadas del centroide del polígono del predio. Dado que la unidad de análisis del censo tomó como referencia los predios rurales para el control de la cobertura censal, se asume que cada una de las encuestas que quedaron en el análisis de estudio corresponde a información de los predios catastrales. Solo el 8.5% del total de encuestas disponibles para la cuenca fueron descartadas del análisis, debido a la no correspondencia entre centroides. Finalmente, el análisis se concentró en 9 132 unidades de producción, de

las cuales 2 863 reportaron tener áreas sembradas con cultivos.

Aunque algunos predios no reportaron áreas sembradas de cebolla o papa en el 2013, pero sí de otros cultivos, las estimaciones incluyen estos predios, dado que estos cultivos podrían llegar a ser sustituidos en cualquier momento por los cultivos representativos de la zona que son objeto del estudio. Debido a que el rendimiento agrícola del cultivo de cebolla o papa fue 0 para unas

unidades productivas, este se puede entender como una variable latente y modelarse como datos censurados. Para ese propósito, se utilizó también regresión censurada (Tobit) con límite inferior de cero. Los resultados de esta regresión fueron muy similares a los encontrados en el modelo de regresión lineal calculado por mínimos cuadrados ordinarios; por ello los análisis centrales de las estimaciones del CO se reportan solo para el modelo lineal.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de variables continuas del modelo

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Rendimiento (ton/ha) cebolla larga	2853	15,683	9,083	0	23,103
Área sembrada (ha) cebolla larga	2853	0,489	0,659	0	16,622
Rendimiento (ton/ha) papa	2853	0,856	3,787	0	22,712
Área sembrada (ha) papa	2853	0,178	1,562	0	43,725
Horas hombre mes	9136	294,413	514,166	0	19200

Fuente: 3er CAN-DANE (2016). Cálculo de las autoras

Se eligieron 96 variables relevantes del universo de variables del Tercer CNA (DANE, 2016) por estar asociadas directamente con factores de producción agrícola. Después de realizar pruebas de especificación de modelos de funciones de rendimiento de la producción, se definieron las siguientes variables para los modelos de rendimiento de papa y cebolla: rendimiento (t/ha) del cultivo de cebolla larga y del cultivo de papa, área sembrada por tipo de cultivo, horas hombre mes (Tabla 3), crédito o financiación solicitado que fue aprobado (Sí=1, No=0), si el productor declara pertenecer a alguna asociación (Sí=1,

No=0), el tipo de sistema de riego para cultivos (Aspersión=1 para cultivo de cebolla, Bombeo=1 para cultivo de papa y 0=otros sistemas de riego), método de mejoramiento de suelos utilizado (si usa solo fertilizante químico, si usa solo orgánico o si usa solo fertilizante químico y orgánico en conjunto) y el tipo de control de plagas y malezas utilizado (si controla plagas y malezas con solo químico, si controla plagas y malezas manualmente, si controla plagas y malezas con químico, y solo manualmente) (ver Tabla 4).

Inicialmente, se analizaron las variables espaciales: la clasificación de los suelos según su relieve, las características del suelo y pendiente; la disponibilidad efectiva de agua, según la distancia del predio al drenaje más cercano y al lago; el acceso físico, a través de la distancia del predio a vías principales; las zonas de vida predominantes, según precipitación, temperatura y altitud; y las restricciones para la adecuación del terreno, tales como predios con pendientes promedio quebradas y escarpadas. De todas las anteriores, la variable biofísica más relevante para explicar

los cambios en los rendimientos de los cultivos fue la clasificación de los tipos de suelo, pues esta variable internaliza diversos factores como la temperatura, la precipitación, la pendiente, el relieve, el contenido de nutrientes, la textura y fertilidad del suelo.

El modelo incluyó como variables espaciales el tipo de suelos. Los suelos están categorizados de 1 a 5, siendo el tipo 1 más aptos para agricultura y el tipo 5 más aptos para la conservación.

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de variables dicótomas del modelo

	Financiación	Asociatividad	Aspersión	Bombeo
No (0)	8846	8949	548	2267
Si (1)	290	187	2138	419
Total observaciones	9136	9136	2686	2686
% respuestas afirmativas	3 %	2 %	80 %	16 %

	Usa solo fertilizante químico	Usa solo fertilizante orgánico	Usa solo fertilizante químico y orgánico
No (0)	6297	6589	6410
Si (1)	1365	1073	1252
Total observaciones	7662	7662	7662
% respuestas afirmativas	18 %	14 %	16 %

	Controla plagas solo con químico	Controla plagas manualmente	Controla plagas química y manualmente
No (0)	6007	7196	6786
Si (1)	1679	490	900
Total observaciones	7686	7686	7686
% respuestas afirmativas	22 %	6 %	12 %

Fuente: 3er CAN-DANE (2016). Cálculo de las autoras

RESULTADOS

En la Tabla 5 se pueden apreciar los resultados del modelo de rendimiento agrícola para las áreas sembradas con cebolla larga y papa. En el modelo básico del rendimiento de la cebolla larga no se tuvo en cuenta la variable tipo de suelos, sino las demás variables asociadas a los factores de producción (tierra, mano de obra, capital y tecnología). El modelo para la cebolla larga explica el 93% de su rendimiento, con las variables escogidas de la encuesta que están asociadas a los factores de producción. El modelo para papa no explica de forma importante el rendimiento, pues la productividad promedio es muy baja.

Este modelo tiene sesgo de especificación, posiblemente debido a variables omitidas o errores de medición en las variables área sembrada y producción, dado que en la encuesta se solicita dicha información a los encuestados. Prueba de ello es que los valores predichos de rendimiento (cebolla larga: 16,4 t/ha y papa: 1,15 t/ha) son ostensiblemente menores a los promedios reportados en fuentes oficiales (Tabla 2). Por otro lado, según las pruebas realizadas en el *software* STATA, el modelo tiene problemas de heterocedasticidad en los residuos y el error no sigue una distribución normal. Por lo tanto, no se cumplen todos los supuestos del modelo de regresión MCO.

Sin embargo, los resultados del modelo concuerdan con la teoría sobre los efec-

tos de los factores de producción en el rendimiento agrícola. Se puede concluir que existe una relación negativa y estadísticamente significativa entre el área sembrada con cebolla larga y el rendimiento agrícola; mientras que en el caso de la papa esta relación es positiva. Cada 1% de aumento del área sembrada en cebolla, disminuye el rendimiento promedio en 0.1 %, mientras que cada 1% de aumento del área sembrada de papa, aumenta su rendimiento en 0.65 %. En el caso de la cebolla, la explicación podría ser que en promedio las áreas más pequeñas tienden a ser más productivas que unidades de producción más grandes. En el caso de la papa podría explicarse porque su destino de producción no es exclusivamente comercialización, sino también el autoconsumo o el uso de su cultivo como mecanismo de preparación de la tierra para la siembra de cebolla larga. Esto explicaría por qué el nivel de producción de la papa está muy por debajo del nivel promedio y, por lo tanto, al incrementar el área de producción de este cultivo se puede aumentar su rendimiento.

Mientras que la variable log de las horas de mano de obra permanente tiene una relación positiva y significativa con el rendimiento agrícola de la cebolla larga, en el caso de la papa esta relación es negativa. Es decir, por un 1% de aumento de las horas hombre permanente en el cultivo de cebolla, el rendimiento agrícola crece un 0.024% ($p\text{-value}=1\%$); mientras que en papa este disminuye un 0.019% ($p\text{-value}=10\%$). En el caso de la

cebolla, el incremento de mano de obra aumenta el rendimiento de este cultivo, dadas las exigencias para su cuidado en todas las etapas de producción. Por otro lado, la asociatividad como medida de capital social tiene una relación positiva y significativa con el rendimiento agrícola en el caso de la cebolla.

La tecnología de riego es la variable que explica mejor el rendimiento agrícola en ambos cultivos, razón por la cual es muy evidente la necesidad de racionalizar el uso del agua y proteger las coberturas vegetales que permiten la regulación del régimen hídrico y la reducción de la erosión. La cebolla larga requiere riego frecuente y por ello la mayoría de los cultivos se localizan al borde de la laguna y utilizan la aspersión como método más común. En cambio, la papa se cultiva en terrenos a mayor altitud, por lo cual se necesita el bombeo.

Tanto en el cultivo de cebolla como en el de papa, existe una relación positiva y significativa en el uso de fertilizantes orgánicos y químicos, puesto que el fertilizante más utilizado es la gallinaza, la cual aporta nitrógeno al suelo. También existe una relación positiva entre el uso de químicos para el control de plagas y el rendimiento agrícola de la cebolla; en cambio, en el caso de la papa solo hay una relación positiva en el control de plagas ,químico y manual. Estas diferencias de los resultados pueden deberse a varios factores asociados con las necesidades particulares de cada cultivo y su grado de tecnificación. El cultivo de cebolla es un cultivo comercialmente productivo con mayor grado de tecnificación, que requiere más labores en cada uno de sus ciclos; mientras que la papa se cultiva como producto de autoconsumo y venta, pero en general como mecanismo de preparación del suelo para la siembra de cebolla, según lo explicado por un agricultor de la zona.

Tabla 5. Resultados de las regresiones (MCO) del modelo de funciones de producción (rendimiento t/ha) de productos representativos de la cuenca del lago de Tota

Variables independientes	Básico cebolla		Cebolla Larga		Papa	
	coef	se	coef	se	coef	se
Tierra (L)	Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna6
Log área sembrada	-0,099***	0,019	-0,099***	0,0193	0,650***	0,129
Mano de obra (W)						
Log horas hombre mes	0,024***	0,008	0,026***	0,008	-0,019*	0,011
Capital (K)						
Financiación	-0,007	0,036	-0,009	0,036	0,073	0,053
Asociatividad	0,055**	0,025	0,054**	0,025	-0,045	0,043
Tecnología (L)						
Aspersión	2,881***	0,031	2,873***	0,034		
Bombeo					0,144***	0,043
Usa solo fertilizante químico	0,024	0,023	0,024	0,023	-0,007	0,036
Usa solo fertilizante orgánico	0,043*	0,024	0,046*	0,025	0,047	0,040

Continuacion Tabla 5

Usa solo fertilizante químico y orgánico	0,052**	0,024	0,051**	0,024	-0,016	0,033
Controla plagas solo con químico	0,032**	0,016	0,031**	0,016	-0,008	0,026
Controla plagas manualmente	-0,045	0,037	-0,048	0,037	-0,031	0,034
Controla plagas química y manualmente	-0,023	0,021	-0,024	0,021	0,075**	0,030
Variables geográficas						
2.Suelos con mediana aptitud para agricultura			-0,023	0,016	-0,007	0,019
3.Suelos con baja aptitud para agricultura			-0,036	0,023	0,235***	0,064
4.Suelos con alta aptitud para conservación			-0,051	0,032	-0,144***	0,048
5.Suelos con muy alta aptitud para conservación			-0,153***	0,040	-0,135**	0,058
_cons	-0,120***	0,044	-0,106**	0,045	0,154**	0,062
No. observaciones		2.663		2.663		2.663
Prob>F		0,000		0,000		0,000
R ² ajustado		0,931		0,931		0,131
p-values: .01 ***; .05 **; .1 *						

Al incluir en el modelo de rendimiento de cebolla larga la variable tipo de suelo y analizar los efectos del tipo de suelo con respecto al más apto para agricultura (tipo 1), se observa que, en general, a medida que disminuye la calidad del tipo de suelo para la agricultura, decrece el rendimiento agrícola. Lo anterior es consistente con la teoría, puesto que a mejor calidad del suelo, mayor debería ser el rendimiento. Para el caso de la cebolla, la relación es significativa para suelos tipo 5, mientras que para la papa es significativa para suelos tipo 4 y 5; sin embargo, en el caso de la papa, los rendimientos aumentan de forma positiva y significativa en suelos de baja aptitud para agricultura y con mayor pendiente (tipo 3), con respecto a los rendimientos promedio en suelos más aptos para la agricultura (tipo 1). Esto es porque la

papa puede adaptarse a las condiciones climáticas del páramo.

Según la distribución de la frecuencia acumulada de las estimaciones de los CO (beneficio neto a 31 de dic. de 2019) obtenidos para los predios de la cuenca cultivados, se halló un valor promedio de costo de oportunidad de -250 000 pesos ha/ año aprox. (2019) para el 100% de los predios de la cuenca cuando se cultiva papa (ver Tabla 6). Por otro lado, se obtuvo un valor promedio de costo de oportunidad 1 670 000 pesos ha/ año aprox. (2019) de los predios de la cuenca, cuando se cultiva cebolla larga (ver Tabla 7). La estimación del CO del cultivo de cebolla puede interpretarse como un límite superior del CO en la cuenca.

Tabla 6. Resultados esperados a partir de la estimación del modelo de función de producción de la papa en la cuenca del lago de Tota

Tamaño	No. predios		Total área sembrada (has)		Rendimiento declarado promedio (ton/ha)	Rendimiento predicho promedio (ton/ha)	Utilidad bruta promedio 2019 (\$/ha/año)	VPN Costo de oportunidad 5 años (\$/ha)	VPN Costo de oportunidad 10 años (\$/ha)
Gran propiedad									
Mediana	4	0 %	0,00	0 %	1,00	1,34	-\$293.345	-\$1.425.986	-\$2.754.339
Pequeña	15	1 %	19,23	4 %	1,72	1,14	-\$305.485	-\$1.485.003	-\$2.868.333
Minifundio	105	4 %	174,59	34 %	3,62	1,51	-\$331.389	-\$1.611.268	-\$3.110.912
Microfundio	2729	96 %	313,95	62 %	4,51	1,39	-\$249.429	-\$1.212.508	-\$2.342.068
Total general	2853		507,76		1,80	1,15	-\$252.775	-\$1.228.786	-\$2.373.460

Tabla 7. Resultados esperados a partir de la estimación del modelo de función de producción de la cebolla larga en la cuenca del lago de Tota

Resultados de precios con cebolla larga con precios de finca (ENA)									
Tamaño	No. predios		Total área sembrada (has)		Rendimiento declarado promedio (ton/ha)	Rendimiento predicho promedio (ton/ha)	Utilidad bruta promedio 2019 (\$/ha/año)	VPN Costo de oportunidad 5 años (\$/ha)	VPN Costo de oportunidad 10 años (\$/ha)
Gran propiedad									
Mediana	4	0 %	2,88	0 %	10,85	9,59	\$1.008.824	\$4.904.017	\$9.453.297
Pequeña	15	1 %	31,01	2 %	15,55	14,09	\$1.463.270	\$7.114.995	\$13.731.334
Minifundio	105	4 %	104,56	7 %	14,86	14,74	\$1.520.707	\$7.393.633	\$14.277.853
Microfundio	2729	96 %	1256,99	90 %	15,98	16,49	\$1.680.430	\$8.168.654	\$15.778.563
Total general	2853		1395,43		15,93	16,40	\$1.672.462	\$8.129.981	\$15.703.636

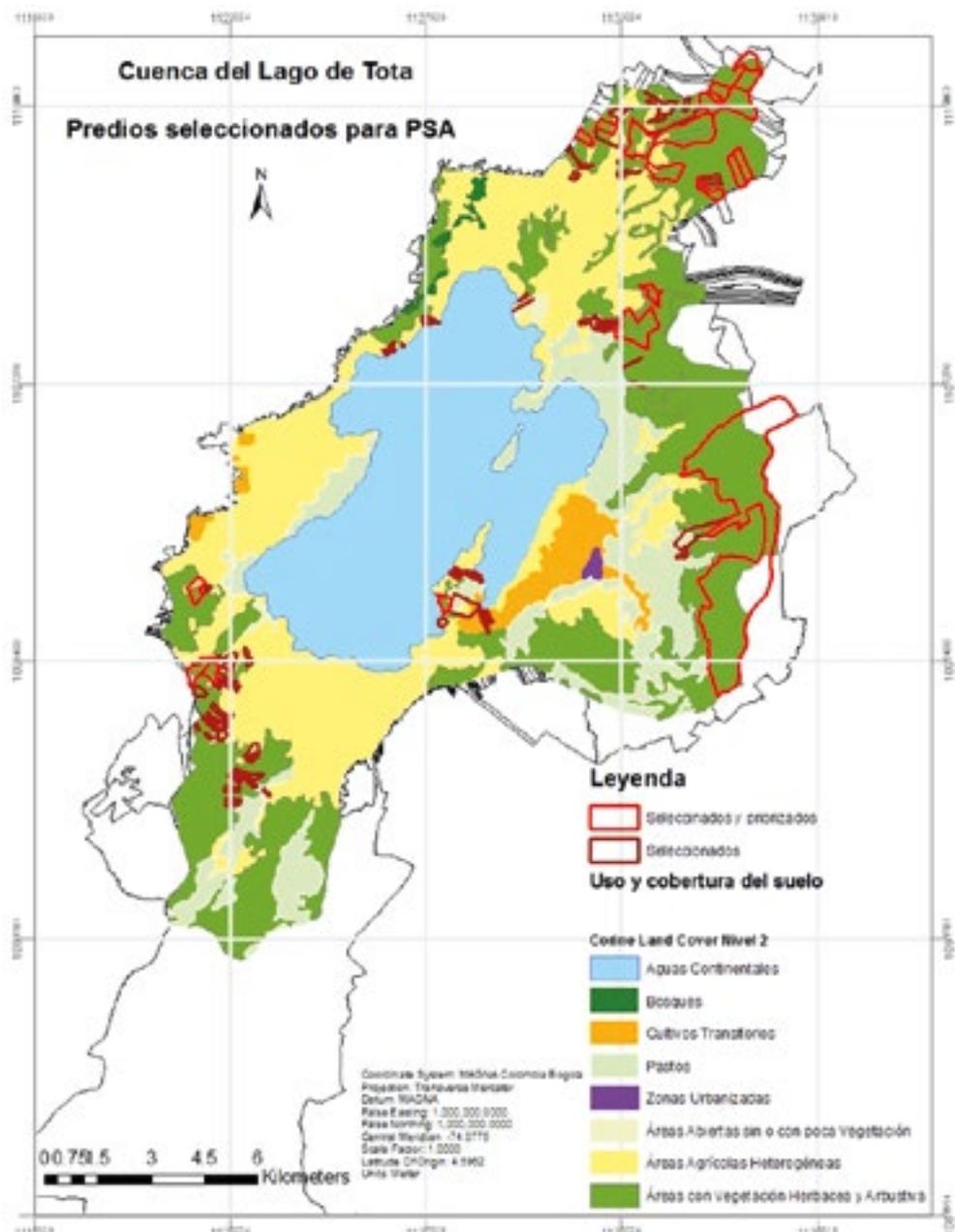


Figura 3. Predios seleccionados y priorizados en diferentes tipos de cobertura de la tierra

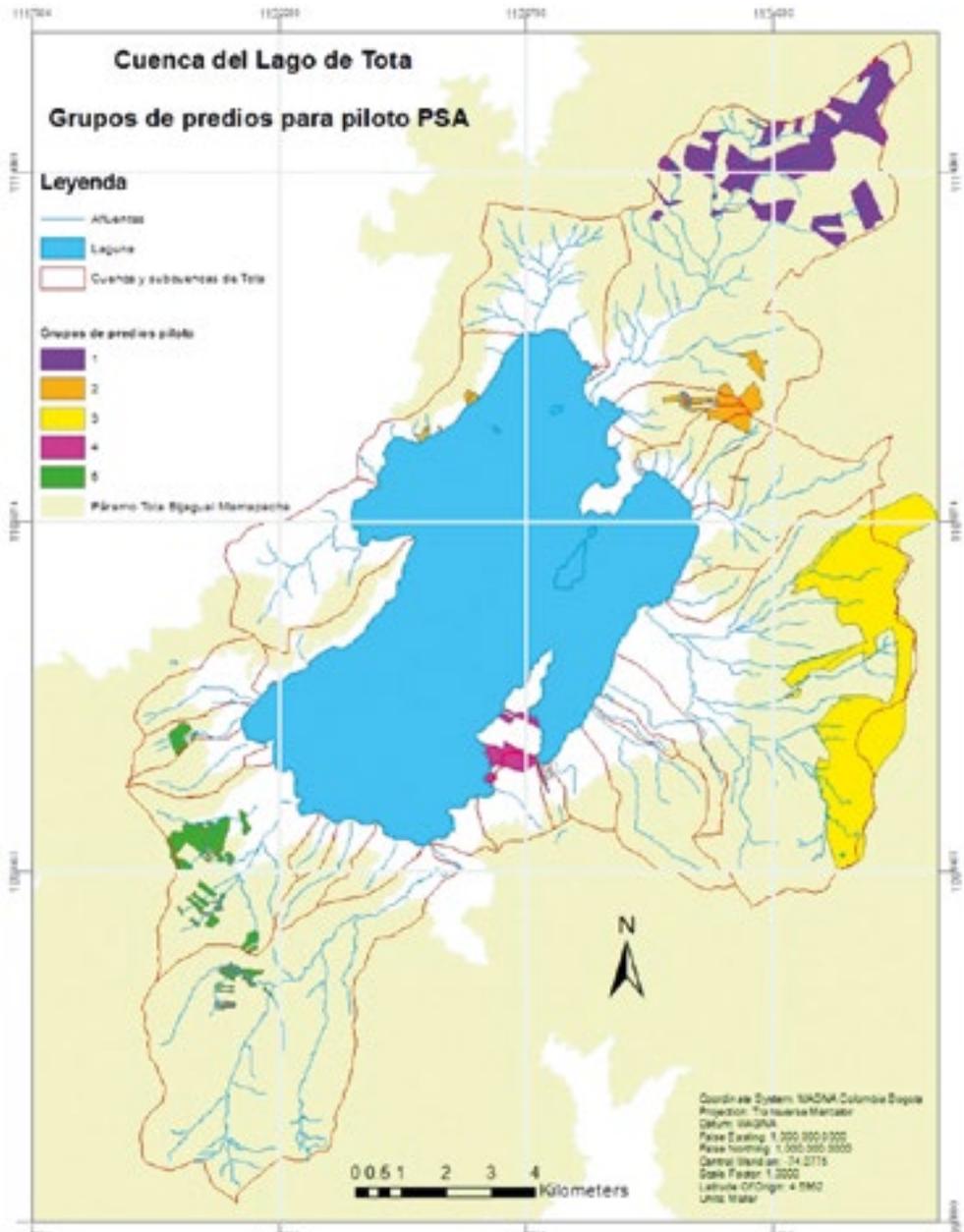


Figura 4. Grupos de predios para pilotos de PSA por etapas en páramo y zona de humedal

De acuerdo con la información disponible y los criterios especificados para la selección de predios en el escenario 1, se seleccionaron 131 predios que cumplen con la totalidad de los criterios estipulados. Del conjunto de predios seleccionados, tan solo 20 podrían preferirse para que cumplan con el criterio de presencia representativa de cobertura natural (más del 50% del área) y tamaño (predios pequeños y medianos de más de 10 ha) (ver Figura 3). Si tan solo se eligieran los 20 predios preferidos, se cubriría un área de 1621 ha; mientras que con la totalidad de los predios seleccionados se cubriría un área de 1982 ha.

La segunda alternativa o escenario recomendado es realizar un proyecto piloto que secuencialmente vaya incluyendo nuevas áreas. Para esto se identificaron cinco zonas (cuatro en páramo y una en zona de protección hídrica del humedal) para iniciar el proyecto piloto de la implementación del esquema (ver Figura 4). Se recomienda comenzar por la zona 3, dado que tiene menos predios (4) y ocupa una mayor área en zona estratégica (1084 ha). No obstante, se considera que la efectividad de la aplicación del esquema PSA, en tan solo los 131 predios seleccionados, puede ser baja en términos de su efecto marginal en el mejoramiento de los servicios ambientales de la cuenca.

DISCUSIÓN

Es necesario contrastar los valores de CO de usos del suelo agrícola encontra-

dos, con otras fuentes de información referidas a paisajes agrícolas en zonas en alta montaña andina. En la literatura revisada no se hallaron valores comparativos de CO de usos del suelo agrícola para distintas zonas o regiones, sino para distintos cultivos o métodos en una misma zona de estudio (Wunscher et al., 2011; Rendon et al., 2016), debido a la heterogeneidad de factores que inciden en el cálculo; sin embargo, sí existe una literatura más amplia que compara valores de los pagos acordados para distintos PSA según servicio ambiental o actividades asociadas a la conservación o recuperación de estos (Kosoy, Martínez-Tuna, Muradian & Martínez-Alier, 2007; Wunder, Engel & Pagiola, 2008; Ferraro, 2008; Ojea & Martín-Ortega, 2015; Grima, Singh, Smetschka & Ringhofer, 2016)

Teniendo en cuenta lo anterior, se consultó con habitantes de la zona o investigadores que han trabajado en esta área, para tener una idea sobre el precio de arrendamiento y venta de la tierra en la cuenca del lago de Tota. Según lo informado por estos, el valor del arriendo de una hectárea para la siembra en zona apta para el cultivo de cebolla puede oscilar entre los 300 000 pesos/mes y los 2 000 000 pesos/mes. El límite superior de costo de oportunidad hallado con el modelo utilizado en este estudio (1,67 millones de pesos/ha/año) se encuentra muy por debajo de ese rango de valores; lo cual plantea la necesidad de cuestionar la comparabilidad de los métodos de estimación de costo

de oportunidad permitidos por la norma (beneficio económico neto y renta o alquiler de la tierra).

La metodología utilizada en este estudio tiene varias ventajas, las cuales fueron mencionadas con anterioridad. Sin embargo, existen algunas limitaciones que se deben señalar. Por un lado, se requiere especificar la función de rendimiento agropecuario para cada actividad económica representativa en cada región específica. Además, se podría disminuir el error en la estimación al incluir datos sobre costos y precios de producción en fincas para la región específica, información biofísica y socioeconómica relevante a escalas acordes con el tamaño de los predios e información métrica de más variables asociadas a los factores de producción.

Adicionalmente, es necesario mantener la atención en el principio de costo-efectividad del instrumento PSA, para recuperar el rendimiento hídrico y la calidad del agua en la cuenca. Esto debido a la dificultad operativa y técnica para negociar y celebrar contratos de PSA, administrar los pagos y monitorear a cientos de propietarios o poseedores de 10 500 predios potenciales que están en áreas de páramo y ronda de protección hídrica del humedal. Ahora bien, si solo se tuvieran en cuenta los 131 predios (7.1% del área de la cuenca) seleccionados, no se cumpliría con el principio de costo-efectividad del instrumento, puesto que el efecto del mejoramiento de los servicios ambientales con la

conservación o restauración no sería significativo. Por lo tanto, es pertinente contemplar en el diseño e implementación del PSA su articulación y complementariedad con otros instrumentos de política ambiental, luego de revisar y mejorar la efectividad de los instrumentos de comando y control, y económicos ya existentes.

Por último, también es necesario cuestionar si la estimación de los CO, en términos de beneficios netos descontados de las actividades económicas agropecuarias representativas en áreas y ecosistemas estratégicos, es una base apropiada para calcular el CO cuando se cultiva para la seguridad alimentaria del hogar. Quizás es más apropiado establecer otras bases para la evaluación del incentivo en el caso de autoconsumo, puesto que los beneficiarios no generan renta con la producción agropecuaria, ni cambian su uso con la intención de generar plusvalía. Esta situación plantea que la estimación de montos para pagar por PSA no solo debe tener en cuenta el CO como base de cálculo del incentivo, sino que también se pueden explorar otros métodos que incluyan criterios de equidad, asociados a las consideraciones socioeconómicas de los ocupantes y la distribución de la propiedad rural.

La principal limitación que tiene la implementación de un esquema de PSA en la cuenca es el número de poseedores y propietarios involucrados en la negociación, dado que hay más de 18 000 predios en esta región. En segundo

lugar, para diseñar e implementar un esquema de PSA que no genere incentivos perversos y sea efectivo, se requiere minimizar la posibilidad de desplazamiento de las actividades no deseadas hacia otras cuencas o la falta de permanencia en el programa. Para ello, la aplicación del instrumento necesariamente debe ser complementaria a esquemas de reconversión tecnológica de la producción agrícola, apoyo a la sustitución de actividades de alto impacto en el páramo y control de concesiones de agua para riego y tecnología para su captación y distribución.

Además, se necesita monitorear y controlar la adicionalidad que las acciones implementadas generen en la conservación o recuperación de los servicios ambientales. El monitoreo de la adicionalidad en áreas de páramo es un asunto que aún es materia de investigación y que debe concertarse en los planes de manejo ambiental con las comunidades. Por otro lado, el área de páramo en la cuenca hace parte de un complejo de páramos que cubre una vasta extensión de varios municipios de Boyacá. Por lo tanto, cualquier esquema de PSA en la cuenca, que tenga como prioridad conservar las coberturas de arbustales y herbazales de páramo, requiere contemplar un área de acción más extensa que la propia cuenca del lago de Tota.

CONCLUSIONES

Se considera que los PSA pueden ser de utilidad para compensar las externali-

dades ocasionadas por el uso inadecuado e ineficiente del recurso hídrico en la cuenca del lago de Tota. Su objetivo es compensar, a través de un pago (en dinero o en especie), las actividades de preservación y restauración realizadas por propietarios y poseedores en predios ubicados en áreas y ecosistemas estratégicos como el páramo y el humedal. Por ello, fue necesario llevar a cabo un ejercicio de estimación de los CO de cambios de uso de suelo agrícola de predios sembrados con los cultivos representativos de la zona (cebolla larga y papa).

Se calcularon los CO de usos del suelo rural representativos en una región específica, utilizando una metodología establecida para avalúos catastrales de predios rurales; de tal forma que la valoración hecha puede ser un buen predictor del precio comercial de los predios o del valor de renta de estos. Adicionalmente, se utilizó el marco estadístico del Tercer CNA (DANE, 2016), se incorporaron condiciones locales y decisiones específicas de los productores en cuanto a prácticas agrícolas. Se incluyeron características espaciales en el modelo de estimación y en el ejercicio de selección e identificación de escenarios de aplicación del esquema. Por todo esto, la metodología podría replicarse y utilizarse para plantear escenarios de aplicación del instrumento en otras regiones del país.

Los resultados obtenidos indican que el CO por uso agrícola del suelo, en

siembra potencial de cebolla larga, es en promedio 1 672 000 pesos ha/año (2019); mientras que el CO en áreas potenciales de siembra de papa es negativo. La diferencia en los resultados se explica por el grado de tecnificación y el destino de la producción de cada uno de los cultivos, siendo la cebolla larga un cultivo comercialmente productivo y con mayor grado de tecnificación, a diferencia del cultivo de la papa. Para ambos cultivos, los factores que mejor explican su rendimiento son el área sembrada y el tipo de suelo, la mano de obra permanente y la tecnología (sistema de riego y prácticas de mejoramiento del suelo y control de plagas).

Se realizó un ejercicio de identificación de escenarios para que quienes toman decisiones sobre la gobernanza del agua en la cuenca identifiquen posibles estrategias y limitaciones para la ejecución de los PSA según el marco regulatorio vigente. Por ello, se seleccionaron 131 predios que cumplen con los criterios requeridos en la normativa y cubren un área de 1982 ha.; sin embargo, debido a que el área total de los 131 predios seleccionados corresponde a tan solo el 7.1% del área de la cuenca y que los predios se encuentran dispersos, no es factible que el instrumento sea costo-efectivo para el mejoramiento de los servicios ambientales. Por lo tanto, se sugiere obtener información sobre otros criterios técnicos para evaluar la capacidad de regulación hídrica de las coberturas naturales y la contaminación hídrica en

los afluentes, de tal manera que se pueda focalizar mejor el PSA para maximizar los beneficios esperados.

Para comparar los valores obtenidos, se recomienda llevar a cabo un ejercicio de valoración de la disponibilidad a aceptar (DAA) a través del uso de cartografía social y experimentos de elección, para que los propietarios o poseedores identifiquen las unidades socioecológicas en el paisaje de la cuenca y asignen la importancia de estas, según su percepción de los servicios ambientales que estas les proveen. A partir de ese ejercicio, se elaboraría una matriz de identificación de costos y beneficios de restricciones de uso del suelo en las áreas estratégicas (unidades socioecológicas importantes) y, conforme a esta matriz, se podría efectuar un experimento de elección con base en tres atributos: restricciones del uso del suelo en áreas estratégicas, cambios en el rendimiento agrícola, cambios en el rendimiento y contaminación hídrica, y generación de ingresos con PSA.

Adicionalmente, se recomienda hacer un ejercicio de cálculo de la disponibilidad a pagar (DAP) de los beneficiarios de los servicios ambientales (usuarios de acueductos y sistemas de riego). Para ello, se aconseja evaluar las funciones de producción de sedimentos, carga orgánica y rendimiento hídrico (disponibilidad del recurso), para tasar las tarifas de compensación por disminución de erosión y mejora de la capacidad de infiltración de los

suelos en la cabecera de la cuenca cuando se conservan y recuperan los ecosistemas estratégicos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores Jorge Bonilla, Rocío Moreno y Fernando Carriazo, de la Facultad de Economía de la Universidad de los Andes, por su dedicación y contribuciones a esta investigación. Queremos reconocer el aporte oportuno de CORPOBOYACÁ y el DANE, instituciones que nos suministraron la información geográfica y alfanumérica necesaria para poder realizar este trabajo. También, agradecemos a los funcionarios de Patrimonio Natural y la Oficina de Negocios Verdes

del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible por invitarnos a socializar los resultados de esta investigación y hacer aportes para su análisis y aplicación en la región de estudio. Este trabajo fue posible gracias a la Gobernación de Boyacá y COLCIENCIAS, por la financiación otorgada para la formación de capital humano de alto nivel del departamento de Boyacá en el 2015.

Las autoras agradecen los comentarios y sugerencias de los evaluadores anónimos. Así mismo, asumen la responsabilidad por las opiniones contenidas en el presente artículo. Todas las omisiones u errores son de exclusiva responsabilidad de las autoras.

REFERENCIAS

- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2017). *Criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades objeto de licenciamiento ambiental*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Borda, C. & Sosa, C. (2016). *Estimación preliminar de necesidades de financiación de un programa nacional de pago por servicios ambientales para ecosistemas estratégicos a partir del costo de oportunidad*. (Documento interno no publicado). Bogotá, D.C.: Oficina de Negocios Verdes, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social -CONPES-. (2014). *Manejo integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota*. Bogotá: CONPES.
- Corporación Autónoma Ambiental de Boyacá -CORPOBOYACÁ-. (2005). *Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del lago de Tota -POMCA lago de Tota-. Convenio 038 del 2004*. CORPOBOYACÁ-PUJ.
- Corporación Autónoma Ambiental de Boyacá -CORPOBOYACÁ-. (2015). Estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales para la identificación y delimitación del Complejo Tota-Bijagual-Mamapacha a escala 1:25.000. Convenio 13-13-014-299-CE entre CORPOBOYACÁ, la Gobernación de Boyacá y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Recuperado de: <https://bit.ly/2Ecctva>
- Corporación Autónoma Ambiental de Boyacá -CORPOBOYACÁ-. (2016a). *Tasas por uso de agua*. Recuperado de: <http://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/tasas-por-uso-de-agua/>
- Corporación Autónoma Ambiental de Boyacá -CORPOBOYACÁ-. (2016b). *Tasas retributivas*. Recuperado de: <http://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/tasas-retributivas/>
- Departamento Nacional de Estadística -DANE-SIPSA-. (2010). *Costos de producción por hectárea*. Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario SIPSA. Recuperado de: <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>

- Departamento Nacional de Estadística -DANE- (2016). *Microdatos anonimizados. Tercer Censo Nacional Agropecuario*. Recuperado de: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014>
- Departamento Nacional de Estadística -DANE-SIPSA-. (2017a). *Precios anuales promedio de productos agrícolas en plazas de mercado*. Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario.
- Departamento Nacional de Estadística -DANE-SIPSA-. (2017b, mayo). El cultivo de la cebolla de rama (*Allium fistulosum* L.) y un estudio de caso de los costos de producción. *Boletín Mensual Insumos y Factores Asociados a la Producción Agropecuaria*, (59).
- Departamento Nacional de Planeación -DNP-. (2014). *CONPES 3801: Manejo integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota*. Recuperado de: <https://www.dnp.gov.co/CONPES/documentos-conpes/Paginas/documentos-conpes.aspx>
- Federación Colombiana de Productores de Papa -FEDEPAPA-. (2014). *Diagnóstico de la cadena productiva de la papa*. Recuperado de: <https://www.fedepapa.com/recursos/TÉRMINOS%20DE%20REFERENCIA%20.pdf>
- Ferraro, P. J. (2008). Asymmetric Information and Contract Design for Payments for Environmental Services. *Ecological Economics*, 65(4), 810-821. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.029>
- Grima, N., Singh, S. J., Smetschka, B. & Ringhofer, L. (2016). Payment for Ecosystem Services (PES) in Latin America: Analysing the Performance of 40 Case Studies. *Ecosystem Services*, 17, 24–32. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.11.010>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (2008). *Resolución 620 del 23 de septiembre de 2008: por la cual se establecen los procedimientos para los avalúos ordenados dentro del marco de la Ley 388 de 1997*. Bogotá, D.C.: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (2019). *Base de datos catastrales del departamento de Boyacá*. Recuperado de: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-catastro>
- Kosoy, N., Martínez-Tuna, M., Muradian, R. & Martínez-Alier, J. (2007). Payments for Environmental Services in Watersheds: Insights from a Comparative Study

- of Three Cases in Central America. *Ecological Economics*, 61(2–3), 446–455. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.03.016>
- Lundberg, L., Persson, U. M., Alpizar, F. & Lindgren, K. (2018, April). Context Matters: Exploring the Cost-effectiveness of Fixed Payments and Procurement Auctions for PES. *Ecological Economics*, 146, 347–358. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.021>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico (PNGIRH)*. Bogotá, D.C.: MADS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2012). *Guía metodológica para el diseño e implementación del incentivo económico de pago por servicios ambientales -PSA-*. Recuperado de: http://www.crc.gov.co/files/GestionAmbiental/RHidrico/Guia_Met_PSA_ONVS_2012_Talleres_Cars.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2015). *Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2015). *Decreto 1076 del 26 de mayo de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2017). *Guía de aplicación de la valoración económica ambiental*. Bogotá, D.C.: Oficina de Negocios Verdes, MADS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2017). *Decreto 870 de 2017: Por el cual se establece el pago por servicios ambientales y otros incentivos a la conservación*. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-. (2018). *Decreto 1007 de 2018: Por el cual se modifica el Capítulo 8 del Título 9 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la reglamentación de los componentes generales del incentivo de pago por servicios ambientales y la adquisición y mantenimiento de predios en áreas y ecosistemas estratégicos*

que tratan el Decreto Ley 870 de 2017 y los artículos 108 y 111 de Ley 99 de 1993, modificados por los artículos 174 de la Ley 1753 de 2015 y 210 de la Ley 1450 de 2011, respectivamente. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional.

- Moreno-Sánchez, R. P. (2012). Instrumentos económicos para la conservación: definición y taxonomía. En *Incentivos económicos para la conservación: un marco conceptual*. Lima: Sociedad Peruana de Derecho Ambiental.
- Ojea, E. & Martin-Ortega, J. (2015). Understanding the Economic Value of Water Ecosystem Services from Tropical Forests: A Systematic Review for South and Central America. *Journal of Forest Economics*, 21(2), 97-106. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2015.02.001>
- Quintero, M. (Ed.) (2010). *Servicios ambientales hidrológicos en la región andina. Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales*. Lima: Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CODESAN) e Instituto de Estudios Peruanos (IEP).
- Rendon, O. R., Dallimer, M. & Paavola, J. (2016). Flow and Rent-based Opportunity Costs of Water Ecosystem Service Provision in a Complex Farming System. *Ecology and Society*, 21(4). Doi: <https://doi.org/10.5751/ES-08787-210436>
- Wealth Accounting and Valuation Ecosystem SERVICES -WAVES-. (2016). *Contabilidad ambiental y económica para el agua: caso piloto para la cuenca del lago de Tota*. Recuperado de <http://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2016/05/Informe-cuenta-del-agua-Lago-Tota-.pdf>
- Wunder, S., Engel, S. & Pagiola, S. (2008). Taking Stock: A Comparative Analysis of Payments for Environmental Services Programs in Developed and Developing Countries. *Ecological Economics*, 65(4), 834–852. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.010>
- Wunscher, T., Engel, S. & Wunder, S. (2011). Practical Alternatives to Estimate Opportunity Costs of Forest Conservation. In *Paper prepared for presentation at the EAAE 2011 Congress Change and Uncertainty Challenges for Agriculture, Food and Natural Resources*, 12. Retrieved from <http://ideas.repec.org/p/ags/eaee11/115774.html>