



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**OPTIMIZACIÓN LINEAL RESTRINGIDA PARA  
EVALUAR LOS CAMBIOS EN LAS DECISIONES DEL  
USO DEL SUELO EN LA CUENCA RIOGRANDE II**

Jenny Lorena Velásquez Díaz

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ciencias Económicas  
Medellín, Colombia

2021



**OPTIMIZACIÓN LINEAL RESTRINGIDA PARA EVALUAR LOS CAMBIOS EN  
LAS DECISIONES DEL USO DEL SUELO EN LA CUENCA RIOGRANDE II**

Jenny Lorena Velásquez Díaz

Trabajo de grado presentado como requisito  
para optar al título de:

**Economista**

Asesor

Juan David Osorio Múnera

M.Sc. Economía del Medio Ambiente y los Recursos Naturales

Universidad de Antioquia  
Facultad de ciencias económicas.

Medellín, Colombia

2021

## Contenido

Resumen .....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	1
Justificación .....	3
Objetivos específicos .....	4
1. Caracterización cuenca Río Grande II .....	5
1.1 Producción de alimentos.....	6
1.2.2 Papa .....	7
1.2.3 Tomate de árbol.....	7
1.3 Estado de los recursos naturales y el medio ambiente en la cuenca .....	7
2. Revisión de literatura.....	9
2.1 El concepto de Servicios Ecosistémicos .....	9
2.2 Usos del suelo y su efecto sobre los servicios ecosistémicos .....	9
2.3 Esquema de PSA.....	10
2.4 Modelo SWAT.....	11
2.5 Modelos de optimización.....	11
2.5.1 Optimización no lineal .....	12
2.5.2 Optimización lineal restringida .....	13
3. Metodología.....	16
3.1 Descripción de la información utilizada en el modelo .....	18
3.2 Información agrícola y pecuaria .....	19
3.3 Costo de oportunidad del productor representativo –PSA.....	24
3.4 Información hidrológica .....	26
3.4 Verbalización del modelo .....	28
3.4.1 Objetivo:.....	28
3.4.2 Decisión:.....	28
3.4.3 Restricciones .....	28
3.5 Formulación matemática.....	28
4. Resultados de la implementación computacional del modelo.....	31
Conclusiones.....	40

Referencias bibliográficas .....	42
----------------------------------	----

## Índice de tablas

Tabla 1: Sistemas de rotación de cultivos escenario 1.....	20
Tabla 2: Sistemas de rotación de cultivos escenario 2.....	21
Tabla 3: Asignación uso del suelo escenario 1.....	32
Tabla 4: Asignación uso del suelo escenario 2.....	34
Tabla 5: Resultado de Nitratos, Fosfatos y Erosión al año en la propuesta de uso del suelo en la Cuenca Rio grande II – Escenario 1.....	35
Tabla 6: Resultado de Nitratos, Fosfatos y Erosión al año en la propuesta de uso del suelo en la Cuenca Rio grande II – Escenario 2.....	35

## Índice de figuras

Figura 1: Cuenca Río Grande y Chico.....	6
Figura 2: Usos del suelo en pastos manejados, tomate de árbol, papa y otros cultivos transitorios.....	23
Figura 3: Mecanismos basados en el mercado para los servicios ambientales de la cobertura de bosque natural.....	24
Figura 4: Flujo de efectivo por cultivo.....	25
Figura 5: Agua aportada al caudal por URH.....	26
Figura 6: Niveles de erosión en cada periodo.....	36
Figura 7: Niveles de aporte de Nitratos en cada periodo.....	36
Figura 8: Niveles de aporte de fosfatos en cada periodo.....	37
Figura 9: Frontera de Pareto – Escenario 1.....	38
Figura 10: Frontera de Pareto – Escenario 2.....	38

## Resumen

La cuenca hidrográfica Riogrande II ubicada en los Andes Colombianos, caracterizada por su riqueza natural y biodiversidad, es considerada una fuente vital para la provisión de servicios ecosistémicos al territorio aledaño y el abastecimiento del 45% del agua potable que se consume en el valle de Aburrá. El área en uso para la producción agropecuaria de la cuenca está dedicada principalmente a la ganadería especializada en leche, cultivos de tomate de árbol y papa. Estas actividades productivas, debido a la sobreexplotación del suelo y técnicas de producción tradicionales generan afectaciones ambientales negativas sobre suelo y agua. La integración de modelos hidrológicos y económicos sirve como base científica para planear escenarios de uso del suelo, que sean racionales y adecuados a la actual vocación agropecuaria de la zona. Partiendo de los datos obtenidos de la aplicación del modelo SWAT a la cuenca, realizada por Osorio, Uribe, García & Bustamante, (2019), se plantea un modelo de optimización lineal en dos escenarios para determinar el uso óptimo de suelo acorde con restricciones ambientales y un esquema de Pagos por Servicios Ambientales (PSA), asociado a los servicios ecosistémicos prestados por la cobertura de bosque natural (estimado de acuerdo al costo de oportunidad del productor representativo), encontrando en ambos escenarios que; para asegurar la sostenibilidad de la cuenca es necesario una reducción del suelo actualmente dedicado a actividades productivas y sugiere su reforestación (cobertura de bosque natural).

Palabras clave: uso de suelo, optimización lineal, cuencas hidrográficas, SWAT, servicios ecosistémicos, PSA.

JEL: C61, H23, Q12, Q15, Q24, Q25.

## **Abstract**

The Riogrande II hydrographic basin located in the Colombian Andes, characterized by its natural wealth and biodiversity, is considered a vital source for the provision of ecosystem services to the surrounding territory and the supply of 45% of the drinking water consumed in the Aburrá valley. The area in use for agricultural production in the basin is mainly dedicated to livestock specialized in milk, tomato and potato crops. These activities generate negative environmental effects on soil and water, due to soil overexploitation and traditional production techniques whom generate negative environmental effects on soil and water. The integration of hydrological and economic models serves as a scientific basis for land use scenarios that are rational and appropriate to the current agricultural vocation. Based on data obtained from the application of the SWAT model to the basin carried out by Osorio, Uribe, García & Bustamante, (2019), a linear optimization model is proposed in two scenarios to determine the optimal use of land according to environmental restrictions and a scheme of Payments for Environmental Services (PES), associated to the ecosystem services provided by the natural forest cover (estimated from c to the opportunity cost of the representative product), finding in both scenarios that; To ensure the sustainability of the basin, it is necessary to reduce the soil currently dedicated to productive activities and suggest its reforestation (natural forest cover).

Keywords: Use of soil, linear optimization, hydrographic basin, SWAT, ecosystem services, PES.

JEL: C61, H23, Q12, Q15, Q24, Q25

## Introducción

La cuenca del Río Grande y Chico se encuentra ubicada al Noroccidente de Medellín, entre los municipios de Entrerriós, San Pedro de los Milagros, Belmira, Santa Rosa de Osos, Yarumal y Don Matías. Según CORANTIOQUIA (2015) esta cuenca produce energía para las centrales hidroeléctricas de Niquia y Tasajera, y abastece alrededor del 45% del agua potable del Valle de Aburrá.

El territorio aledaño a la cuenca lo habitan familias que obtienen su sustento a través del uso del suelo para fines productivos, como lo indican Osorio, Uribe, García, & Bustamante (2019), usualmente estas actividades no se realizan con técnicas agrícolas sostenibles, sino con técnicas tradicionales como el arado manual o en ocasiones arado apoyado por animales, estas prácticas generan una externalidad negativa en el entorno que se traduce en un deterioro en la calidad del suelo. Adicionalmente, como lo indica CORANTIOQUIA (2015) el uso de insumos químicos como pesticidas y fertilizantes, trae consigo contaminación del suelo que termina por degradar la calidad del recurso hídrico por el exceso de nutrientes que se transportan por escorrentía. El deterioro causado no solo tiene repercusiones ambientales, como la erosión de suelos, sino también efectos económicos como pérdida de productividad en las actividades agrícolas de sus habitantes.

Identificada esta problemática, se indagaron estudios similares que emplearon diferentes metodologías, encontrando en todos los casos que para este tipo de estudios se recomiendan modelos de optimización y no otros modelos matemáticos o econométricos, dada la demanda de requerimientos técnicos que estos requieren. Si bien para abordar este tipo de investigaciones es recurrente el uso de optimización multiobjetivo, también la optimización lineal es bastante eficiente para plantear un modelo capaz de integrar la información económica y ambiental disponible, adaptándose a las necesidades del territorio y permitiendo una representación simplificada de la realidad. En este orden de ideas, se propone el planteamiento de un modelo de optimización lineal que busque estimar una función objetivo contemplando los rendimientos del productor representativo para las

principales actividades económicas con presencia en la cuenca, que esté sujeta a una serie de restricciones que se calcularon con base en parámetros físico ambientales que afectan la calidad del suelo y del recurso hídrico, arrojados por la aplicación del modelo SWAT<sup>1</sup>, desarrollado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos (Arnold, y otros, 2013) y posteriormente aplicado a la zona por (Osorio, et al. 2019)

En este modelo se presenta un análisis sobre los efectos de considerar un valor económico-social para la cantidad de agua generada en  $m^3$  por hectárea, además de un resultado óptimo sobre el uso del suelo. Asimismo, se presenta la posibilidad de implementar un pago por el servicio ambiental calculado con base en el costo de oportunidad del productor representativo, atribuido a los servicios ambientales prestados por la cobertura de bosque natural (ecosistemas forestales). Esto dado a que la mayor parte de los servicios ecológicos que benefician a la sociedad son prestados directa o indirectamente por estos ecosistemas, por ejemplo, regulación de gases (balance  $CO_2$ <sup>2</sup> ozono para protección UVB<sup>3</sup>), y aporte de agua (provisión de agua en cuencas, embalses y acuíferos), entre otros. (Brunett, 2012)

---

<sup>1</sup> SWAT: por sus siglas en ingles Soil and Water Assessment Tool.

<sup>2</sup>  $CO_2$ : Dióxido de carbono.

<sup>3</sup> UVB: Radiación ultravioleta de longitud media.

## **Justificación**

Se busca desarrollar este ejercicio, con el fin de plasmar la importancia del uso racional del suelo y desde la economía ambiental, mostrar el aporte que representa el análisis económico aplicado a problemáticas frente al uso de los recursos naturales.

La inclusión de alternativas de rotación de cultivos típicos de la zona, mezclados a su vez con cobertura de bosque natural -de avance progresivo en el tiempo-, permite mostrar que; a partir de la integración de los datos obtenidos de la simulación preliminar en la zona de un modelo hidrológico (SWAT) y un modelo económico de optimización lineal, se determina la alternativa óptima de uso del suelo.

La investigación sugiere, destinar una parte del área productiva disponible en la cuenca, como zona de conservación de bosque natural, esto permitirá incentivar a la reforestación, conservación de la calidad del suelo y del recurso hídrico, a través de un pago por servicio ambiental.

Esta integración de información económica y ambiental, prueba que de alguna manera sí se puede lograr un equilibrio entre la explotación y la conservación de los recursos naturales en el tiempo.

## **Objetivo General**

Evaluar mediante un modelo de optimización lineal, los cambios en las decisiones económicas de uso del suelo en la cuenca Riogrande II dada la inclusión de incentivos a la conservación.

## **Objetivos específicos**

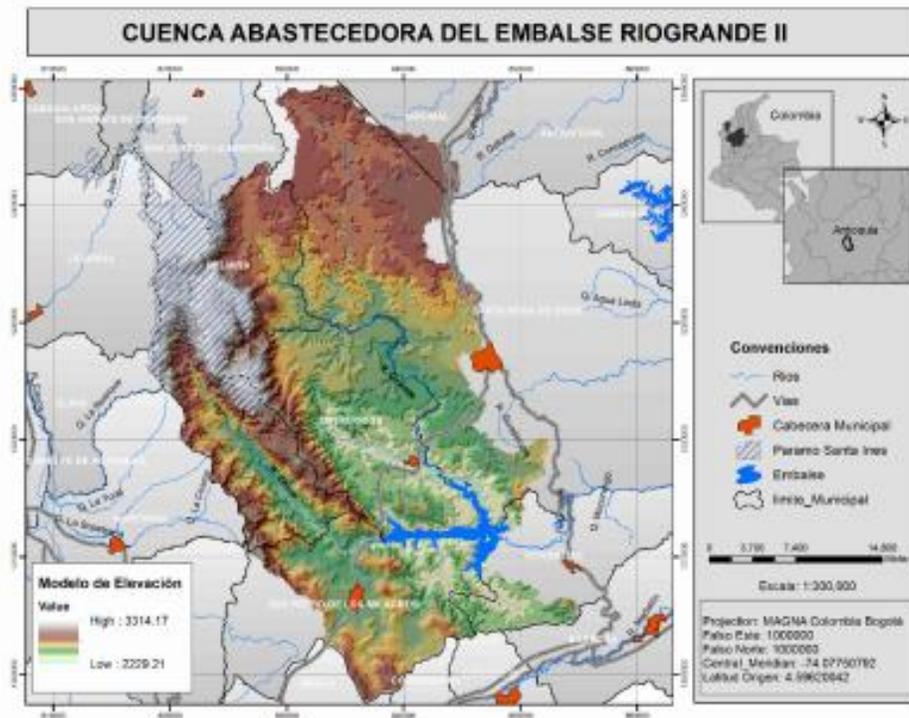
- Estimar una función objetivo que maximice los beneficios económicos del productor y que contemple los rendimientos de las principales actividades económicas desarrolladas en el territorio aledaño a la cuenca Riogrande II.
- Evaluar los cambios en las decisiones económicas de uso del suelo en la cuenca, tras incluir un valor ambiental-social, asociado al aporte de agua por cada cultivo o cobertura del suelo.
- Evaluar el efecto de un esquema de incentivos a la conservación, de acuerdo con la función objetivo estimada y sujeto a una serie de restricciones ambientales.

## **1. Caracterización cuenca Río Grande II**

La cuenca de Río Grande y Chico comprende un área de 127,986.29 hectáreas, esta cuenca hace parte de la Región Andina y cuenta con variedad de pisos térmicos según (CORANTIOQUIA, 2015).

En dicha cuenca se encuentra el embalse de Río grande II, el cual produce energía para las Centrales Hidroeléctricas de Niquia y Tasajera. Además de la generación de energía, esta cuenca abastece el agua para el consumo doméstico, pecuario e industrial de los municipios de Belmira, Entreríos, Don Matías, San Pedro de los Milagros, Santa Rosa de Osos y a una gran parte del Valle de Aburrá (Lina María Berrouet et al., 2018; Ram & Orrego, 2015; Universidad Nacional de Colombia, 2012).

En la parte alta de la cuenca se cuenta con ecosistemas de páramos y abundancia de bosque natural, que prestan servicios vitales tales como la captura de CO<sub>2</sub> y la producción y conservación del recurso hídrico. Adicionalmente, albergan diversidad de especies de flora y fauna, cerca de dieciocho especies de aves, cinco especies de reptiles y siete especies de mamíferos. Por tanto, la cuenca tiene vital importancia en términos ecosistémicos y económicos.



*Figura 1: Cuenca Río Grande y Chico.*

*Fuente: (Osorio & UT-GRA, 2018)*

## 1.1 Producción de alimentos

### 1.1.1 Producción lechera

Según CORANTIOQUIA (2015) la ganadería especializada en leche constituye la principal actividad económica en el área aledaña a la cuenca. En general, en toda la región, predomina la raza bovina Holstein, su principal fuente de alimento son los pastos, estos representan el principal forraje del área productiva de la cuenca, predomina el pasto de tipo Kikuyo4 y cubre un área del 67,1%.

---

4 Kikuyo: pennisetum clandestinum: Es una especie perenne tropical de Poaceae, comúnmente llamado grama gruesa, que proviene de la región de África oriental.

Este forraje es abonado usualmente con fertilizantes como la porquinaza o agroquímicos nitrogenados, siendo el primero menos dañino para los suelos, ya que el uso de agroquímicos causa un desequilibrio en el pH natural del suelo, haciéndolo más ácido.

### **1.2.2 Papa**

La papa es el segundo cultivo predominante en el área de la cuenca, es de tipo transitorio, su período vegetativo es de cinco meses y cuenta con dos épocas principales de cosecha al año. La papa se cultiva usualmente como actividad secundaria para la renovación de potreros<sup>5</sup>. Cabe destacar que este cultivo requiere un uso abundante de fertilizantes industriales, plaguicidas y el uso de maquinaria pesada para su recolección, causando deterioro la calidad de los suelos.

### **1.2.3 Tomate de árbol**

El tomate de árbol es el tercer cultivo predominante en el área de la cuenca, este cultivo es semipermanente y cuenta con un periodo vegetativo de 3 a 4 meses, se puede cosechar en cualquier momento del año. Sin embargo, el cultivo de tomate de árbol exige abundancia en elementos nutricionales y es muy susceptible a plagas, requiere una riega excesiva de abono, fertilizantes industriales y pesticidas para protegerlo.

## **1.3 Estado de los recursos naturales y el medio ambiente en la cuenca**

El deterioro de los recursos naturales en la cuenca Riogrande II se ha presentado de manera progresiva en los últimos años, debido a la expansión de la frontera agrícola y utilización excesiva de agroquímicos que generan disminución en la calidad de los suelos y del agua, esto debido a la cantidad de químicos, desechos y estiércol que son depositados en la cuenca, tal y como se menciona en Insuasty (2016).

---

<sup>5</sup> Potrero: lugar destinado a la cría y pastoreo del ganado.

Asimismo, Montoya & Tamayo (2011), señalan en lo que concierne a la degradación de los suelos que, el sobrepastoreo, el uso de agroquímicos, el uso de maquinaria y los monocultivos son los principales fenómenos que han contribuido a que se presenten problemas de erosión, contaminación de las fuentes hídricas y degradación de los ecosistemas.

Por lo mencionado y teniendo presente los beneficios económicos, ambientales y sociales prestados por el territorio de interés, se hace necesario priorizar la financiación de esquemas de pagos por servicios ambientales, para incentivar así, a que quienes practican la explotación de los recursos naturales le apuesten a la conservación del recurso hídrico, el cual es un bien público y un derecho fundamental.

## **2. Revisión de literatura**

### **2.1 El concepto de Servicios Ecosistémicos**

Como se mencionó anteriormente, los ecosistemas (principalmente los forestales) son de vital importancia debido a los servicios que estos aportan a la sociedad en general, es así como Camacho y Ruiz, (2012) retoman el concepto de servicios ecosistémicos que fue inicialmente esbozado por Westman en 1977 como “Servicios de la naturaleza”.

El concepto hace referencia entonces a las condiciones naturales o procesos de los ecosistemas que sustentan y satisfacen las necesidades de la vida humana, proporcionan alimentos y diversos servicios que de manera directa o indirecta benefician a la sociedad.

Siguiendo a Camacho y Ruiz (2012) los objetivos principales para introducir el concepto de Servicio Ecosistémico (SE) son incluir las preocupaciones ecológicas en términos económicos, enfatizar la dependencia de la sociedad a los ecosistemas naturales, además de impulsar el interés público en la conservación de la biodiversidad.

### **2.2 Usos del suelo y su efecto sobre los servicios ecosistémicos**

Siguiendo a Burbano (2016) tenemos que: el suelo es un recurso natural finito y no renovable, que presta diversos servicios ecosistémicos y/o ambientales. Además, influye sobre el medio donde está ubicado, y repercute en las actividades sociales y económicas de los grupos humanos que se asientan sobre el mismo, los cuales ejercen sobre él diferentes grados de presión, que le generan afectación o deterioro.

Es importante resaltar algunos servicios ambientales que brindan los suelos, por su pertinencia en la presente investigación y de acuerdo con Burbano (2011) que menciona

algunos servicios como proveer un escenario indispensable para los ciclos biogeoquímicos<sup>6</sup>, los cuales son mecanismos indispensables para que haya condiciones estables en la Tierra, y para que se dé la vida. Por otra parte, destaca el almacenamiento y filtración de agua, en el cual el suelo capta, infiltra y almacena el agua, permitiendo así la recarga de los acuíferos, finalmente el suelo presta un servicio ecosistémico como soporte de las actividades humanas y fuente de materias primas.

### **2.3 Esquema de PSA**

Los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) son instrumentos económicos diseñados para dar incentivos a los usuarios del suelo, de manera que continúen ofreciendo un servicio ambiental (ecológico) que beneficia a la sociedad como un todo CIFOR (2016). Históricamente el PSA de las cuencas en Colombia ha sido objeto de trabajo de las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs), aparecen a partir de la Ley 99 de 1993, y tienen por objetivo la administración y manejo de los recursos naturales en el área de su jurisdicción. Tobón (2013).

Como plantea la FAO (2016) es posible distinguir cuatro servicios ambientales que califican para la implementación de PSA: secuestro de carbono, conservación de la biodiversidad, servicios hidrológicos, belleza escénica y recreación.

Estos pagos tienen cinco rasgos distintivos:

1. El PSA es un acuerdo voluntario y negociado, no una medida de mando y control.
2. Se debe definir claramente lo que se está comprando – ya sea un servicio mensurable o un uso equiparable de la tierra.
3. Debe darse una transferencia de recursos de al menos un comprador del Servicio

---

<sup>6</sup> Ciclos biogeoquímicos: Movimiento de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, azufre, fósforo, potasio, carbono y otros elementos en los seres vivos y el ambiente, mediante procesos de producción y descomposición.

Ambiental (SA).

4. Debe haber por lo menos un vendedor directo o través de un intermediario.
5. Los pagos que los compradores hacen deben ser por un servicio ofrecido de manera ininterrumpida durante la duración del contrato. CIFOR (2016).

Continuando con la FAO (2016) Los PSA pueden darse bajo modalidades públicas o privadas. Desde el sector público el Estado actúa en representación de los compradores de SA mediante el cobro de impuestos y captación de donaciones para pagar a los proveedores de los servicios brindados por las áreas naturales. Mientras que en el caso del sector privado la gestión de los PSA se encuentra directamente a cargo de los compradores del servicio ambiental.

En lo que respecta a la financiación y pagos, existen diversas modalidades de financiamiento de PSA, las cuales deben circunscribirse a las condiciones legales vigentes de cada país. De modo general, los pagos se pueden recibir a través de mercados, de donaciones o de subsidios.

## **2.4 Modelo SWAT**

El modelo SWAT, es un modelo de cuencas hidrográficas semidistribuido en tiempo continuo y basado en procesos, diseñado para simular los efectos de las decisiones de gestión en la cantidad y calidad del agua, definición de Neitsch, Arnold y Williams (2011). Arnold et al. (1998) mencionan que las unidades de procesamiento del modelo son unidades de respuesta hidrológica (UHR): pequeñas áreas de tierra con combinaciones únicas de tipo de suelo, uso del suelo y prácticas de manejo agrícola (Osorio, et al. 2019). Los insumos necesarios para el modelo incluyen información espacial, como el uso de la tierra, el tipo de suelo, la topografía, clima y las prácticas de manejo agrícola.

## **2.5 Modelos de optimización**

### **2.5.1 Optimización no lineal**

Al revisar algunos antecedentes con ciertas similitudes en los objetivos de esta investigación, se encontró que a la hora de implementar modelos de optimización para determinar el uso adecuado del suelo, autores como Yang y Best, (2015) y Tran, Ishidaira, Nakamura, Do, y Nishida, (2017) emplean modelos de optimización no lineal, señalan que estos modelos permiten un análisis cuidadoso de las variables que inciden en los PSA y en las decisiones de uso del suelo en sus respectivos contextos, como buscar el impacto de las actividades agropecuarias en las cuencas o el efecto de minerales como el Zinc, Fósforo y Magnesio en la calidad del agua.

Siguiendo a estos autores, se encuentra que la implementación de modelos de optimización no lineal permite, por ejemplo, simular las cargas de nitrógeno total introducidas en el modelo SWAT, con el fin de evaluar las principales contribuciones de nitrógeno que llegan de fuentes naturales, de cultivos, del ganado, de las industrias y de los hogares aledaños a las cuencas hídricas (Tran, et al. 2017).

Adicionalmente, la optimización no lineal presenta otras bondades como la posibilidad de ser aplicada en múltiples sitios, esto permite encontrar mecanismos para estimar la carga de contaminantes sectorizada, identificar los sitios con mayor descarga, y además emplear un algoritmo multi-objetivo, que permite implementar según la necesidad del sitio, mejores prácticas de gestión, de forma que se reduzca la carga de nitrógeno o fósforo y se mejore la calidad del agua como presentan respectivamente Yang y Best , (2015) y Barletta (2017).

Profundizando en esta misma línea Azuara, Palacios, García-Ferrer, & Montesinos, (2017) y desarrollan un modelo de optimización multi-objetivo integrando información espacial y adaptándolo a las particularidades territoriales una zona, desarrollan un Modelo de Asignación de Uso Sostenible del Suelo con técnicas Dinámicas de los Sistemas (MAUSS - DS), un modelo que permite integrar información económica, demográfica, disponibilidad de recursos hídricos, entre otros. Los resultados obtenidos muestran que al imponer restricciones de uso del suelo de acuerdo con las necesidades de cada territorio es posible

encontrar soluciones sostenibles de uso del suelo que tienen en cuenta mejoras sociales, económicas y ambientales.

Con lo previamente expuesto, queda claro que los modelos de optimización no lineal son bastante eficientes en cuanto a un mecanismo que sirve como herramienta para determinar el uso adecuado del suelo y que contribuye a la consolidación de PSA, no obstante, la implementación de este modelo es muy demandante en lo que respecta a sus requerimientos técnicos, pues precisa la inserción e identificación de múltiples variables que lo complejizan.

### **2.5.2 Optimización lineal**

Con el fin de indagar en investigaciones preliminares acerca de la efectividad de la aplicación de los modelos de optimización lineal para encontrar el uso adecuado del suelo, se destacan estudios como el presentado por Wagner, Bhallamudi, et al. (2015) donde logran integrar dinámicamente las proyecciones del modelo de uso de la tierra (SLEUTH7) y uno de crecimiento urbano, con un modelo hidrológico (SWAT) para analizar los posibles impactos que generen los cambios en el uso de la tierra sobre el recurso hídrico en una cuenca ubicada en la ciudad de Pune, India. Se obtiene como resultado expansión del área urbana y disminución en el uso de tierra para cultivos agrícolas y áreas seminaturales. Lo que permitió identificar que estos cambios en el uso del suelo traen consigo un desbalance en los cambios estacionales, que tienen como resultado un aumento en el nivel del caudal, deterioro de la calidad del agua y disminución de la evapotranspiración, todo esto debido a la reducción del área protegida.

Continuando con esta la línea de investigación se encontró el estudio de (Duarte, Pulido, Silva, & Holmann, 2003) desarrollado en el Valle del Cesar, Colombia. Este estudio sirve como insumo a este trabajo por las similitudes que presenta con el tema que aquí se pretende

---

7 SLEUTH: modelo espacial y pronóstico de la expansión de la mancha urbana.

analizar. Se desarrolla un modelo de optimización lineal integrando información técnico-económica de los tres cultivos principales de la zona y se evalúa el efecto de introducir leguminosas arbóreas como forraje del suelo en las decisiones de uso del suelo. Se encuentran que, si bien el sistema ganadero presenta las mejores rentabilidades, incorporar leguminosas arbóreas presenta un potencial significativo no solo para obtener mayores beneficios económicos, sino para asegurar el sostenimiento de los recursos naturales y el uso racional del suelo.

Ahora bien, revisando antecedentes de interés para desarrollar este trabajo, se encontró que el cambio climático es un factor común preocupante en diversos estudios y que, si bien no es considerado en la presente investigación, representa una herramienta interesante para contemplar en futuras investigaciones.

Un ejemplo de esto, es el trabajo elaborado por Esteve, Varela-Ortega, Gutiérrez, y Downing (2015), en este se evalúan los efectos potenciales del cambio climático en la agricultura, y las posibilidades de adaptación a futuro en Cuenca del Guadiana - Península Ibérica, esto integrando un modelo económico con uno hidrológico (WEAP8), encontrando que las estrategias basadas en la preservación y ahorro del recurso hídrico, dado un precio asociado al agua, son realmente efectivas para mitigar la demanda de agua y lograr adaptación de diferentes cultivos; si bien pueden representar sobrecostos para los agricultores, también pueden asegurar la permanencia y calidad del recurso hídrico.

Lo anterior muestra que al asociarse un valor social al agua y evaluarse dentro de un modelo de optimización lineal, se consigue evidenciar un cambio en las decisiones de uso del suelo, lo que permite a esta investigación tener un antecedente claro y factible.

---

8 WEAP: Por sus siglas en inglés Water Evaluation And Planning. Es una herramienta de simulación para la planeación integrada de recursos hídricos.

Estos ejemplos permiten evidenciar que este tipo de modelo puede adaptarse a las necesidades de quien lo emplea o de las propias dinámicas un territorio.

Dado que la optimización lineal es eficiente y empleada de forma recurrente para la construcción de esquemas de PSA, la integración de modelos ambientales y económicos, y que permite una representación simplificada de la realidad, se partirá de este modelo para el abordaje de la problemática que atañe a este estudio.

### 3. Metodología

Para llevar a cabo la investigación, se consultaron bases de datos, artículos y tesis, con el fin de indagar qué se había estudiado preliminarmente que permitiera orientar el presente análisis. Basándonos en el modelo planteado por Quintero, Estrada, & García (2006) y siguiendo a Esteve et al. (2015), se decidió desarrollar un modelo de optimización lineal, partiendo de que es una herramienta eficiente para el análisis económico, sujeto a una serie de restricciones ambientales.

Este estudio busca establecer el uso óptimo del suelo que maximice los beneficios económicos del productor representativo y que cumpla con las restricciones ambientales impuestas.

Siguiendo a (Valencia, 2015) se utilizó el método SIMPLEX como herramienta matemática para la toma de decisiones, dado que es un proceso iterativo que parte de la programación lineal capaz de resolver modelos sencillos y complejos pasando de una solución factible a otra alcanzando una solución óptima, es decir, el mayor o menor valor posible, según el caso, que satisface todas las restricciones impuestas al modelo.

El profesor Juan Guillermo Villegas define el algoritmo Simplex de manera formal (para hallar el menor valor posible):

Para iniciar el proceso iterativo se parte del supuesto de que se conoce la base factible:

Sea  $B$  Una base factible, es decir una matriz con inversa  $B^{-1}$ , entonces:

*Calcular  $B^{-1}$*

Sea  $\bar{c}^T$  vector de costos relativos (o reducidos), el vector definido como:

$$\text{Calcular } \bar{c}^T := c^T - c_B^T B^{-1} A;$$

**Costo reducido**

**Importante:** La componente básica de todo vector de costos relativos para toda base B debe ser siempre nula, es decir,  $\bar{c}_B = 0$ .

Si el vector de costos relativos  $c_j \geq 0$  para todo  $j = 1, \dots, n$  entonces, la solución factible asociada a dicha base es una solución óptima del problema.

Entonces, para buscar una solución mínima óptima se debe:

Elegir  $h$  tal que  $\bar{c}_h < 0$ ;

Sea  $b$  la solución básica asociada a la base factible B

$$\text{Calcular } b := B^{-1} b;$$

En un proceso iterativo de operaciones con matrices, constantemente deben estar columnas entrando y saliendo hasta que se encuentre una única solución óptima.

En este orden de ideas, sea  $\bar{a}_h$  una columna entrante para evaluación en reemplazo de una columna  $a_h$  que ya fue evaluada,  $\bar{a}_h$  debe garantizar que el costo del nuevo punto elegido sea no mayor al anterior.

$$\text{Calcular } \bar{a}_h := B^{-1} a_h;$$

Si  $\bar{a}_{ih} \leq 0$  para todo  $i = 1, \dots, m$  entonces,  $a_h$  puede aumentar indefinidamente, entonces el costo de los posibles puntos factibles disminuye indefinidamente

En otro caso, si existe algún componente positivo en el vector  $\bar{a}_h$  entonces  $a_h$  puede aumentar solo hasta  $\min \{ \bar{b}_i / \bar{a}_{ih} : \bar{a}_{ih} > 0 \}$

Entonces, para alcanzar el valor mínimo se debe;

Elegir  $r$  tal que  $\bar{b}_r / \bar{a}_{rh} := \min \{ \bar{b}_i / \bar{a}_{ih} : \bar{a}_{ih} > 0 \}$ ;

**Razón mínima**

Cuando la variable  $a_h$  toma el valor límite, la variable  $a_{B[r]} = 0$  inmediatamente, por tanto, debe salir de la base, es decir, cambiar B en la columna  $a_{B[r]}$  por la columna  $a_h$

De esta manera se llega a la solución óptima a través de una metodología iterativa.

Ahora bien, para el modelo de optimización se plantean dos escenarios en los que se consideraron las tres principales actividades económicas de las cuales se logró obtener información. Adicionalmente, se consideró en el primer escenario el efecto de incluir un valor ambiental-social asociado al agua medida en  $m^3$  generada por cada cultivo o cobertura, en las decisiones de uso del suelo, y en el segundo escenario, se planteó un esquema de PSA asociado a la cobertura de bosque natural.

Inicialmente se consideran cuatro sistemas de rotación y niveles máximos permitidos para las restricciones ambientales de acuerdo al estudio preliminar de Osorio, et al. (2019) y, restricción de área de acuerdo al número de hectáreas disponibles en la cuenca para la explotación del suelo. Para los dos escenarios que aquí se plantean los valores anuales que toman las restricciones ambientales, es decir, para los niveles aceptados de erosión (perdida del suelo) y aporte de niveles de nitrógeno y fósforo por cultivo, se introdujeron al modelo proponiendo una reducción de aproximadamente del 50% de los valores promedio registrados por los sistemas de rotación.

### **3.1 Descripción de la información utilizada en el modelo**

En esta sección se describe la información utilizada para abordar el problema de optimización de uso del suelo de la cuenca de Riogrande II. La información se subdivide en los datos económicos de los sistemas productivos y el mantenimiento de la cobertura de bosque natural, la información del suelo y del agua del modelo hidrológico SWAT, aplicado preliminarmente por Osorio, et al. (2019), la valoración en términos económicos del agua como parámetro de referencia del valor del agua y el costo de oportunidad en términos económicos del productor representativo.

En síntesis, la información para tomar la decisión del área a utilizar por sistema productivo en el escenario número 1, consiste en el flujo neto de efectivo (ingresos menos costos de producción / año), la erosión generada, el balance de nitrógeno y fósforo, el total de área productiva disponible en la cuenca, la cantidad de agua generada y el valor económico de la importancia social de un  $m^3$  de agua disponible en Colombia. En el caso del escenario número 2, en el flujo neto de efectivo se introduce un PSA asociado a la cobertura de bosque natural; este PSA se calculó con base en el costo de oportunidad del productor representativo y se justifica por los diferentes servicios ecosistémicos que presta el bosque natural a la cuenca hidrológica, a mantener y mejorar la calidad del suelo y del agua, la captura de carbono, etc.

### **3.2 Información agrícola y pecuaria**

Los sistemas de rotación de cultivos en la cuenca de Rio grande II se presentan en 2 escenarios para 10 periodos de tiempo; en el primer escenario se consideran 7 sistemas de rotación, los primeros cuatro fueron planteados según el plan de ordenamiento y manejo de la cuenca de los Río Grande y Chico (CORANTIOQUIA, 2015) y los resultados del proyecto de investigación realizado por Osorio y UT-GRA (2018), un sistema de rotación donde se propone la permanencia de la cobertura de bosque natural en todos los periodos de tiempo y en los siguientes dos sistemas de rotación se consideró un cambio progresivo del uso del suelo de cultivos semipermanentes y transitorios a cobertura de bosque natural. En el segundo escenario se plantean 6 sistemas de rotación, los cuatro iniciales y los 2 finales del escenario 1.

Estos sistemas de rotación se plantearon buscando mostrar un análisis de resultados económicos y ambientales de las diferentes alternativas del uso del suelo, con el fin de probar la sostenibilidad ambiental y rentabilidad económica al productor representativo.

Año (Periodo)	Sistemas de rotación Escenario 1						
	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Rotación 5	Rotación 6	Rotación 7
<b>2006</b> 1	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo
<b>2007</b> 2	Papa	Tomate de árbol	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,2 bosque natural + 0,8 tomate de árbol	0,2 bosque natural + 0,8 Pasto Kikuyo
<b>2008</b> 3	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,2 bosque natural + 0,8 tomate de árbol	0,2 bosque natural + 0,8 Pasto Kikuyo
<b>2009</b> 4	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,4 bosque natural + 0,6 tomate de árbol	0,4 bosque natural + 0,6 Pasto Kikuyo
<b>2010</b> 5	Papa	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,4 bosque natural + 0,6 tomate de árbol	0,4 bosque natural + 0,6 Pasto Kikuyo
<b>2011</b> 6	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,6 bosque natural + 0,4 tomate de árbol	0,6 bosque natural + 0,4 Pasto Kikuyo
<b>2012</b> 7	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,6 bosque natural + 0,4 tomate de árbol	0,6 bosque natural + 0,4 Pasto Kikuyo
<b>2013</b> 8	Papa	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,8 bosque natural + 0,2 tomate de árbol	0,8 bosque natural + 0,2 Pasto Kikuyo
<b>2014</b> 9	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	0,8 bosque natural + 0,2 tomate de árbol	0,8 bosque natural + 0,2 Pasto Kikuyo
<b>2015</b> 10	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	Bosque natural	Bosque natural

*Tabla 1: Sistemas de rotación de cultivos escenario 1.*

*Fuente: Elaboración propia*

Año (Periodo)	Sistemas de rotación Escenario 2					
	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Rotación 5	Rotación 6
<b>2006</b>	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo
<b>1</b>						
<b>2007</b>	Papa	Tomate de árbol	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,2 bosque natural + 0,8 tomate de árbol	0,2 bosque natural + 0,8 Pasto Kikuyo
<b>2</b>						
<b>2008</b>	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,2 bosque natural + 0,8 tomate de árbol	0,2 bosque natural + 0,8 Pasto Kikuyo
<b>3</b>						
<b>2009</b>	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,4 bosque natural + 0,6 tomate de árbol	0,4 bosque natural + 0,6 Pasto Kikuyo
<b>4</b>						
<b>2010</b>	Papa	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,4 bosque natural + 0,6 tomate de árbol	0,4 bosque natural + 0,6 Pasto Kikuyo
<b>5</b>						
<b>2011</b>	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,6 bosque natural + 0,4 tomate de árbol	0,6 bosque natural + 0,4 Pasto Kikuyo
<b>6</b>						
<b>2012</b>	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,6 bosque natural + 0,4 tomate de árbol	0,6 bosque natural + 0,4 Pasto Kikuyo
<b>7</b>						
<b>2013</b>	Papa	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,8 bosque natural + 0,2 tomate de árbol	0,8 bosque natural + 0,2 Pasto Kikuyo
<b>8</b>						
<b>2014</b>	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	0,8 bosque natural + 0,2 tomate de árbol	0,2 bosque natural + 0,2 Pasto Kikuyo
<b>9</b>						
<b>2015</b>	Pasto Kikuyo	Pasto Kikuyo	Tomate de árbol	Pasto Kikuyo	Bosque natural	Bosque natural
<b>10</b>						

*Tabla 2: Sistemas de rotación de cultivos escenario 2*

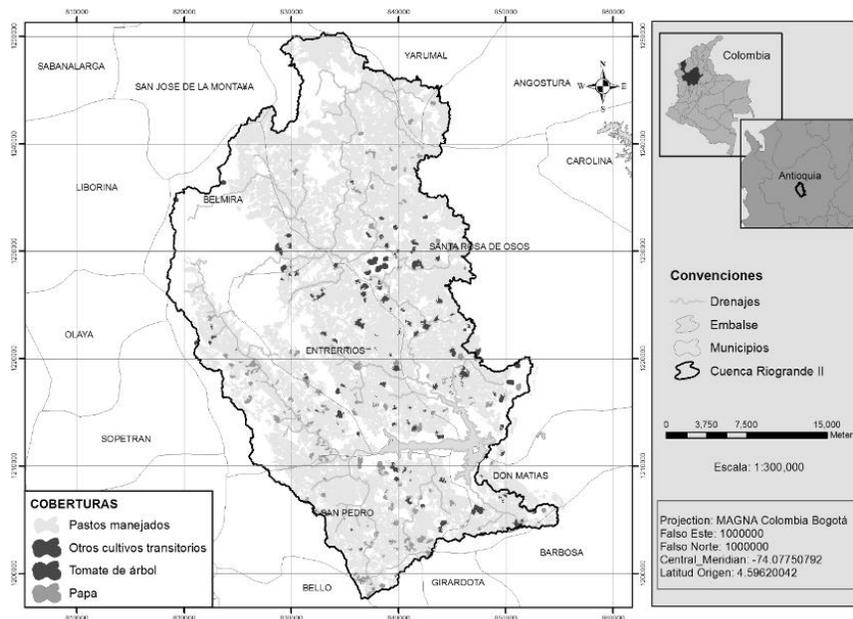
*Fuente: Elaboración propia*

La base de datos económica de la actividad pecuaria se obtuvo del proyecto desarrollado por Vélez (2016), en el cual se realizaron encuestas a 44 unidades productivas o fincas especializadas en leche, ubicadas en la zona de estudio; se estimaron valores promedio de costos, productividad, prácticas de manejo y capacidad productiva.

Siguiendo a Osorio, et al. (2019) las series de precios de leche, carne, salarios agropecuarios y concentrados utilizadas en este trabajo, fueron corregidas por inflación, usando como deflatores al Índice de Precios al Productor –IPP–, con base en 2015.

Referente al cultivo transitorio de la papa, la información fue obtenida de un productor de capacidad media en la zona, que se dedica expresamente al cultivo de papa bajo la modalidad preponderante: alquiler o acuerda el uso del suelo para la producción de papa por 1 año; posteriormente, deja adecuados los terrenos para la ganadería. Esta información al igual que la obtenida para el cultivo semipermanente de tomate de árbol, está calculada a precios del 2015 y se realizó por consulta con las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATAS) presentes en la cuenca y utilizadas en los trabajos (Osorio & UT-GRA, 2018) y (Osorio, et al. 2019)

Es importante mencionar que durante el desarrollo de este estudio se presentaron dificultades para la obtención y actualización de información que limitaron el alcance del trabajo, debido a que no se encontraron en las UMATAS de los municipios de interés información precisa acerca de los cultivos de papa y tomate de árbol. Se decidió seguir adelante con la información que se obtuvo a precios del 2015, dado que para la leche se asegura que se tiene información de calidad gracias al proyecto desarrollado por Vélez (2016). Sin embargo, es importante resaltar que actualizar la información y repetir el ejercicio permitiría hacer un análisis comparativo y proponer alternativas más acordes a la línea temporal.



*Figura 2: Usos del suelo en pastos manejados, tomate de árbol, papa y otros cultivos transitorios.*

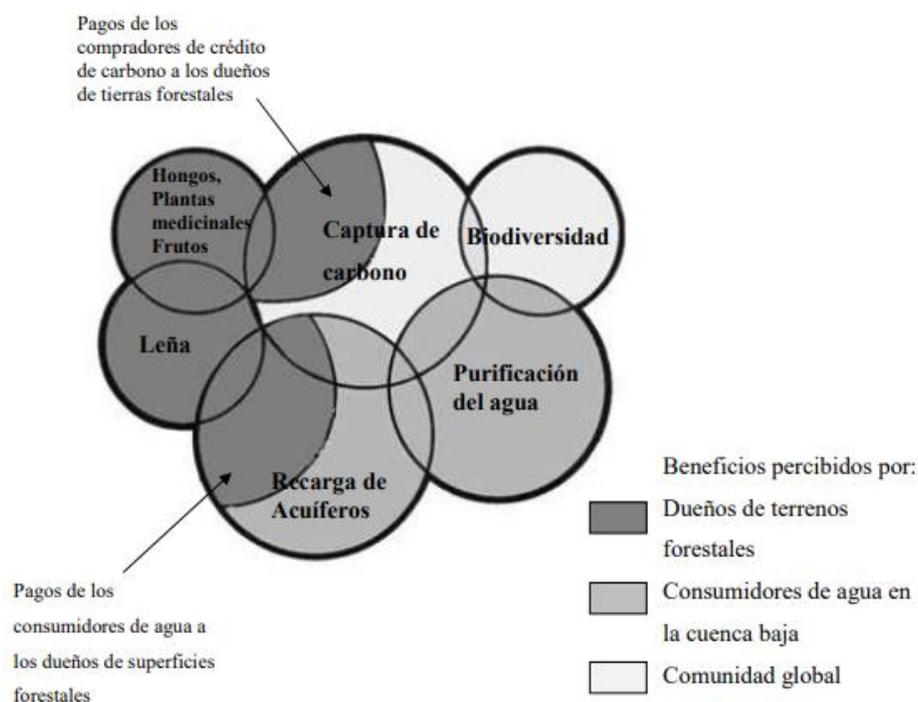
*Fuente: (Osorio & UTGRA, 2018)*

En la figura 2 se permite identificar en el territorio de interés, la localización de cultivos de papa, tomate de árbol, otros cultivos transitorios como; café, frijol o mora y el forraje de pastos manejados para alimentación de ganado.

La información acerca del costo de mantenimiento del bosque natural fue obtenida de uno de los guardabosques pertenecientes a la UMATA del municipio de Belmira, encargado especialmente del cuidado y mantenimiento del bosque natural de la zona.

### 3.3 Costo de oportunidad del productor representativo –PSA

Para el desarrollo de este caso de estudio, se tuvo en cuenta el **valor de uso indirecto**, que en conjunto con el valor de uso directo conforma el Valor Económico Total (VET) de un recurso natural según Azqueta, 1994 y Barbier, Acreman y Knowler, 1997 citados en (Brunett, 2012).



*Figura 3: Mecanismos basados en el mercado para los servicios ambientales de la cobertura de bosque natural.*

*Fuente: (Brunett, 2012)*

La figura 3 explica las relaciones a distintos niveles entre el pago por venta del servicio ambiental generado y el beneficio económico adicional que puede extraer el tenedor de este ecosistema, como leña, frutos, entre otros, además de los servicios prestados al recurso hídrico como la recarga y purificación del agua y los servicios generados a la comunidad global, como lo son la captura de carbono y conservación de biodiversidad.

Para el desarrollo de este caso de estudio, se consideró el costo de oportunidad como instrumento para calcular un pago mínimo que incentive al productor representativo a destinar una parte de sus predios a la conservación de bosque natural. El costo de oportunidad analiza aquello a lo que se renuncia por la preferencia de una alternativa entre varias posibilidades, como lo indica Azqueta (1994), citado en (Brunett, 2012).



*Figura 4: Flujo de efectivo por cultivo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Para que un productor representativo esté dispuesto a renunciar a cultivar en una porción de sus predios y la destine para la conservación de bosque se le debe garantizar en términos económicos que va a obtener por lo menos los beneficios que obtendría si estuviese cultivando.

De la información económica acerca de la papa, tomate de árbol y pasto kikuyo, se obtuvo que los beneficios para cada cultivo son \$16.579.230, \$2.060.551, \$773.660 respectivamente. Con el objetivo de simplificar y no dar lugar a un posible intento de fraude (cambiar de un cultivo a otro con el fin de obtener una mayor compensación), se propone un

pago por servicios ambientales prestados por la cobertura de bosque natural que garantice en cada periodo, que el productor representativo obtendrá mínimamente los mismos beneficios económicos que obtendría cultivando papa, la actividad económica más rentable, en este caso.

### 3.4 Información hidrológica

La información anual por sistema de rotación para el periodo 2005-2015 correspondiente a erosión (ton/ha), nitratos (ton/ha), fosfatos (ton/ha) y el total de agua generada ( $m^3$ /ha), se obtuvo de los resultados de la aplicación del modelo SWAT realizado por Osorio, et al. (2019). La información base para la aplicación del modelo SWAT se obtuvo por Osorio y UTGRA, (2018) de las Estaciones ubicadas en la cuenca, operadas por Empresas Públicas de Medellín (EPM).

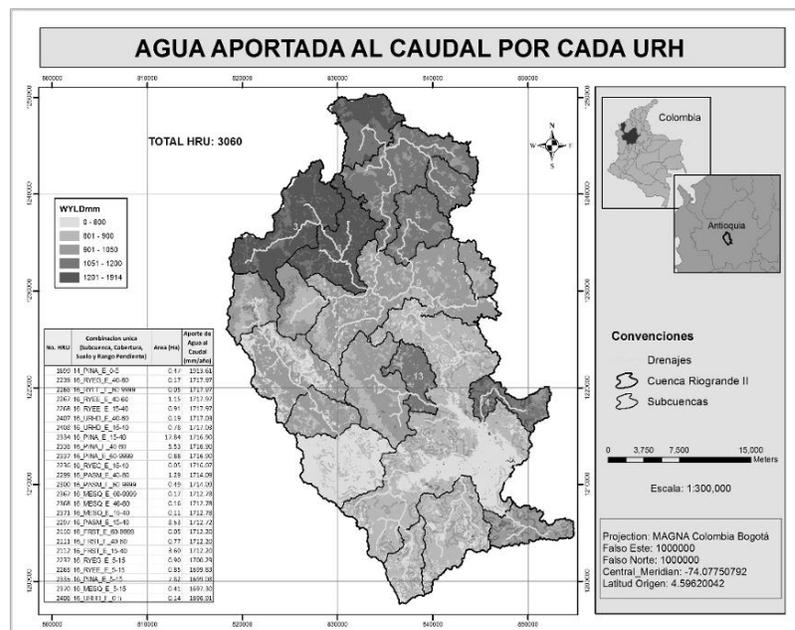


Figura 5: Agua aportada al caudal por URH

Fuente: (Osorio & UT-GRA, 2018)

En la Figura 5 se muestra el aporte de agua al caudal calculado por el modelo SWAT aplicado por Osorio, et al. (2019), donde se muestra la disponibilidad de agua a lo largo y ancho del territorio de interés. En la parte alta de la cuenca se encuentra la mayor disponibilidad del recurso hídrico, esto se atribuye a la presencia de páramo, menor intervención humana y, por tanto, mayor cobertura de bosque, también se observan las áreas de la cuenca media y baja, donde se evidencia una menor oferta de agua, atribuida a mayor intervención humana.

Por último, la información acerca del valor por  $m^3$  de agua fue obtenida de promediar el historial de tarifa plena (la tarifa correspondiente al estrato 4 de la ciudad de Medellín) de EPM para el 2015 (\$1.176,81 COL), dado que el valor no incluye porcentaje del subsidio que brinda el consejo municipal de la ciudad aplicada a los estratos 1,2 y 3 y tampoco contempla impuestos aplicados a los estratos 5 y 6.

La tarifa es calculada con base en la metodología tarifaria establecida por la (CRA), que permite establecer costos económicos de referencia para prestar los servicios públicos domiciliarios, la tarifa final para el estrato 4 corresponde solamente a niveles de uso de cada hogar.

### **3.4 Verbalización del modelo**

#### **3.4.1 Objetivo:**

Maximizar los beneficios económicos de la destinación del área de la cuenca a los sistemas de rotación productivos.

#### **3.4.2 Decisión:**

Se debe decidir la cantidad de área en hectáreas de cada sistema de rotación de cultivos o cobertura de bosque natural (uso del suelo).

#### **3.4.3 Restricciones**

Las decisiones se encuentran limitadas por las siguientes restricciones:

- No exceder la disponibilidad de área productiva disponible en la cuenca.
- No exceder la cantidad de erosión aceptada en la cuenca en cada periodo.
- No exceder la cantidad de nitratos aceptada en la cuenca en cada periodo.
- No exceder la cantidad de fosfatos aceptada en la cuenca en cada periodo.
- La cantidad de área utilizada debe ser no negativa.

### **3.5 Formulación matemática**

#### **Conjuntos:**

##### **Escenario 1**

- **J:** Conjunto de sistemas de rotación de cultivos  $j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ .
- **T:** Conjunto de años de producción  $t \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ .

##### **Escenario 2**

- **J:** Conjunto de sistemas de rotación de cultivos  $j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .
- **T:** Conjunto de años de producción  $t \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ .

### Parámetros:

- $\pi_j$ : flujo efectivo neto (\$/ha) del sistema de rotación j.
- $H$ : Cantidad de área productiva disponible en la cuenca.
- $e_{jt}$ : niveles de erosión en toneladas por hectárea al año del sistema de rotación j en el periodo t.
- $n_{jt}$ : niveles de nitratos en toneladas por hectárea al año del sistema de rotación j en el periodo t.
- $f_{jt}$ : niveles de fosfatos en toneladas por hectárea al año del sistema de rotación j en el periodo t.
- $vaj$ : Valor económico de la cantidad de agua generada en metros cúbicos por hectárea de cada sistema de rotación j.
- $E_t$ : máximo aceptable de toneladas de erosión en el periodo t.
- $N_t$ : máximo aceptable de toneladas de nitratos en el periodo t.
- $F_t$ : máximo aceptable de toneladas de fosfatos en el periodo t.

### Variables de decision:

- $x_j$ : Cantidad de área (ha) para cada sistema de rotación j.

### Función Objetivo (primer escenario):

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{j \in J} \pi_j x_j + v a_j x_j$$

### Función Objetivo (segundo escenario):

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{j \in J} \pi_j x_j$$

**Restricciones:**

- a) No exceder la disponibilidad de área productiva disponible en la cuenca.

$$\sum_{j \in J} x_j \leq H$$

- b) No exceder la cantidad de erosión aceptada en la cuenca en el periodo t.

$$\sum_{j \in J} x_j e_{jt} \leq E_t \forall t \in T$$

- c) No exceder la cantidad de nitratos aceptada en la cuenca en el periodo t.

$$\sum_{j \in J} x_j n_{jt} \leq N_t \forall t \in T$$

- d) No exceder la cantidad de fosfatos aceptada en la cuenca en el periodo t.

$$\sum_{j \in J} x_j f_{jt} \leq F_t \forall t \in T$$

- e) Dominio de las variables.

$$x_{jt}, q_{jt} \in R^+$$

## **4. Resultados de la implementación computacional del modelo**

Para la implementación del modelo se utilizó el paquete Pyomo del software Python para formular modelos de optimización, y el Solver glpk, como kit diseñado para resolver problemas de optimización lineal. Para la solución del problema lineal se utilizó el método **Simplex**, como se mencionó anteriormente.

### **Escenario base**

Se fija un escenario base con el fin de tener una línea para comparar los resultados de los dos escenarios planteados, en el escenario base se busca maximizar los beneficios del productor representativo sujeto a restricciones ambientales y de área durante 10 periodos. Este escenario base propone que el sistema de rotación 1 propuesto en la Tabla 1 tenga destinada un área de 909.19 hectáreas, lo que corresponde a un 1,48% del área productiva y al sistema de rotación 3, el modelo le asigna un área de 60637.02 hectáreas, lo que corresponde al 98,52% del área productiva.

Esta asignación del suelo genera una suma de beneficios económicos de \$ 1.299.601.440.991 de los cuales el 4% corresponde a los beneficios de la venta de leche, carne y papa y un 96% a la venta de tomate de árbol.

### **Escenario 1**

Para el primer escenario, se considera evaluar el cambio en las decisiones de uso del suelo tras incluir un valor social asociado al agua generada por cada cultivo o cobertura del suelo, los resultados óptimos al problema de definir el uso del suelo en la cuenca que maximice el flujo de efectivo en 10 periodos, y cumpla con las restricciones de área y una reducción de aproximadamente el 50% con respecto al escenario base de los límites establecidos para las restricciones ambientales, proponen que el sistema de rotación 2 propuesto en la Tabla 1

tenga destinada un área de 14764.74 hectáreas, aproximadamente un 24% del área productiva. Al sistema de rotación 4, el modelo le asigna un área de 27396.19 hectáreas, un 44.5% del área productiva y por último, al sistema de rotación 5, (sistema de rotación de conservación), el modelo le asigna un área de 19385.28 hectáreas, es decir, 31,5% del área productiva.

Esta asignación del suelo genera una suma de beneficios económicos de \$ 650.462.014.009 de los cuales el 32,3% corresponden a los beneficios de la venta de leche, carne y tomate de árbol y un 67,7% a los beneficios sociales obtenidos por el aporte de agua los sistemas de rotación.

<b>Indicadores Óptimos</b>	<b>Sistemas de rotación Escenario 1</b>						
	<b>Rotación 1</b>	<b>Rotación 2</b>	<b>Rotación 3</b>	<b>Rotación 4</b>	<b>Rotación 5</b>	<b>Rotación 6</b>	<b>Rotación 7</b>
Asignación óptima uso del suelo (ha)	0	1476.74	0	27396.19	19385.28	0	0
Flujo efectivo venta de productos (\$ COL)	\$ 0	\$ 11.597.273	\$ 0	\$ 165.792.300	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Beneficios económicos por agua (\$ COL)	\$ 0	\$ 11.929.327	\$ 0	\$ 12.804.364	\$ 10.606.012	\$ 0	\$ 0
Total de beneficios económicos por sistema de rotación (\$ COL)	\$ 0	\$ 23.526.600	\$ 0	\$ 178.596.664	\$ 10.606.012	\$ 0	\$ 0

*Tabla 3: Asignación uso del suelo escenario 1*

*Fuente: Elaboración propia.*

Al comparar los resultados del escenario 1 con el escenario base, se puede evidenciar una reducción del alrededor del 50% en los beneficios económicos, todo esto atribuido a la reducción de los límites impuestos para las restricciones ambientales.

## **Escenario 2**

Para el segundo escenario, como se observa en la tabla 2, no se tiene en cuenta el sistema de rotación 5 que se consideró en el escenario 1, dada la naturaleza de los bajos costos de mantenimiento del bosque natural, y el pago por servicio ambiental calculado, los resultados al problema de definir el uso óptimo del suelo apuntaron claramente a destinar todo el área productiva a un sistema de conservación, este resultado es a penas lógico, sin embargo, con el fin de buscar un equilibrio entre actividades productivas y conservación para evitar alejar demasiado de la realidad el trabajo, se decidió excluir este sistema de rotación del segundo escenario.

En este orden de ideas, en el segundo escenario, los resultados óptimos al problema de definir la propuesta de uso del suelo, proponen que el sistema de rotación 5 de la Tabla 2, ocupe un área de 33252.27 hectáreas, aproximadamente un 54% del área productiva y el sistema de rotación 6 de la Tabla 2, ocupe 28293.86 hectáreas, es decir, un 46% del área productiva.

Esta asignación genera una suma de beneficios económicos de \$ 5.553.976.264.858,7 de los cuales aproximadamente el 35% corresponden a los beneficios de la venta de leche, carne, tomate de árbol y un 65% a los beneficios obtenidos por el PSA prestados por la cobertura de bosque natural.

<b>Indicadores Óptimos</b>	<b>Sistemas de rotación Escenario 2</b>					
	<b>Rotación 1</b>	<b>Rotación 2</b>	<b>Rotación 3</b>	<b>Rotación 4</b>	<b>Rotación 5</b>	<b>Rotación 6</b>
Área óptima del uso del suelo (ha)	0	0	0	0	33252.27	28293.86
Flujo efectivo venta de productos (\$ COL)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.115.036.308.139	\$ 824.970.172.780
Beneficios económicos por PSA (\$ COL)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 1.984.038.462.446	\$ 1.629.931.321.494
Total de beneficios económicos por sistema de rotación (\$ COL)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 3.099.074.770.585	\$ 2.454.901.494.274

*Tabla 4: Asignación uso del suelo escenario 2*

*Fuente: Elaboración propia.*

Al comparar los resultados del escenario 2 con el escenario base, se puede evidenciar un aumento del alrededor del 425% en los beneficios que se pueden obtener del uso del suelo, todo esto atribuido a la reducción de los límites impuestos para las restricciones ambientales y al esquema de PSA para la cobertura de bosque natural.

## Restricciones

<b>ESCENARIO 1</b>			
<b>Periodo</b>	<b>N (T/ha)</b>	<b>P (T/ha)</b>	<b>E (T/ha)</b>
<b>1</b>	788.3	433.0	436902.6
<b>2</b>	1177.9	637.2	518526.0
<b>3</b>	956.5	592.2	406210.1
<b>4</b>	973.5	243.4	335550.9
<b>5</b>	1006.7	290.6	494490.0
<b>6</b>	1224.9	314.5	611817.9
<b>7</b>	709.0	275.7	562486.7
<b>8</b>	814.3	220.2	288906.0
<b>9</b>	534.5	189.9	336806.8
<b>10</b>	310.5	126.9	208021.7

*Tabla 5: Resultado de Nitratos, Fosfatos y Erosión al año en la propuesta de uso del suelo en la Cuenca Rio grande II – Escenario 1*

*Fuente: Elaboración propia.*

<b>ESCENARIO 2</b>			
<b>Periodo</b>	<b>N (T/ha)</b>	<b>P (T/ha)</b>	<b>E (T/ha)</b>
<b>1</b>	884.7	780.4	517208.2
<b>2</b>	1077.1	921.9	518526.0
<b>3</b>	890.3	874.0	419959.6
<b>4</b>	431.6	616.0	263378.5
<b>5</b>	582.6	782.4	494490.0
<b>6</b>	475.2	489.5	308353.5
<b>7</b>	366.2	425.0	253524.5
<b>8</b>	182.2	186.7	92010.3
<b>9</b>	194.0	317.2	172112.4
<b>10</b>	33.4	5.66	11166.3

*Tabla 6: Resultado de Nitratos, Fosfatos y Erosión al año en la propuesta de uso del suelo en la Cuenca Rio grande II – Escenario 2*

*Fuente: Elaboración propia.*

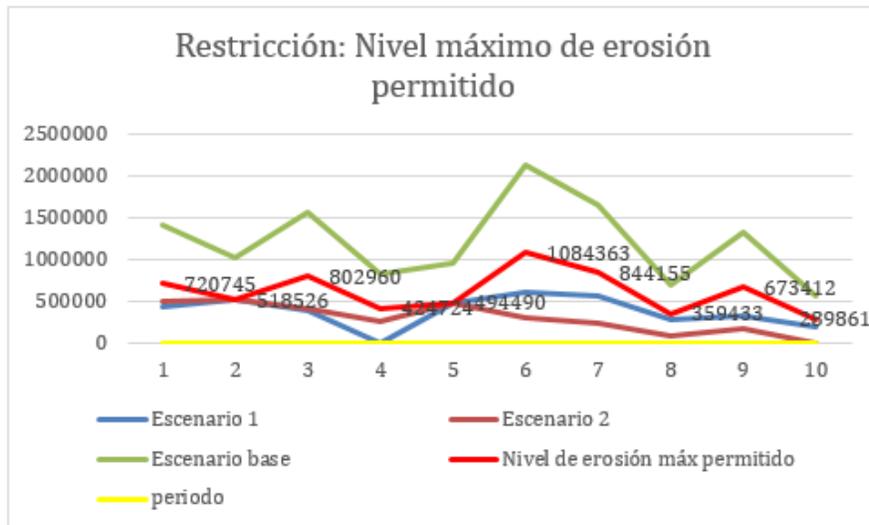


Figura 6: Niveles de erosión en cada periodo.

Fuente: Elaboración propia.

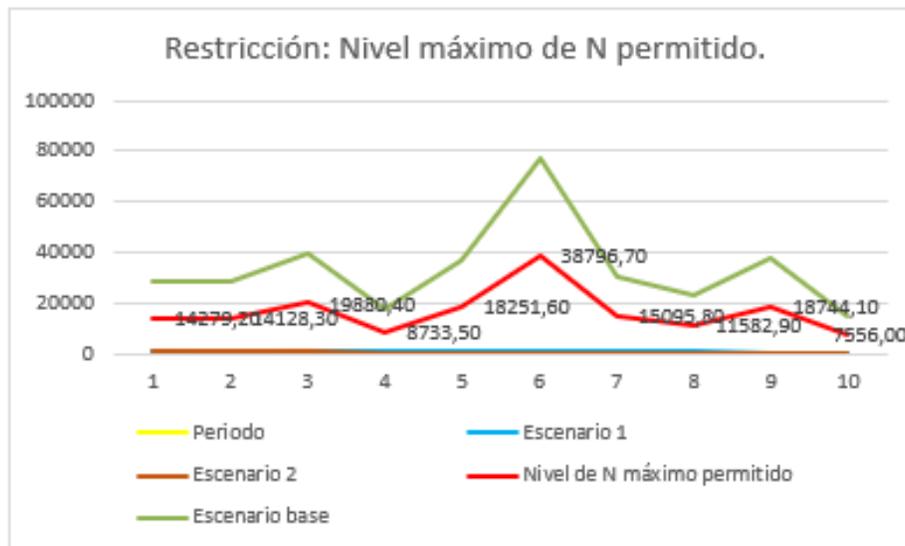


Figura 7: Niveles de aporte de Nitratos en cada periodo.

Fuente: Elaboración propia.

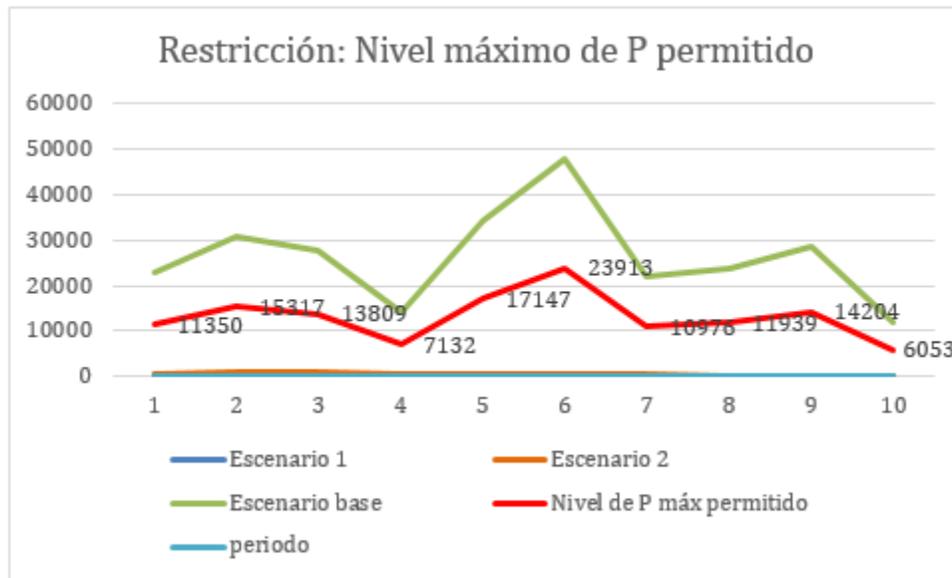


Figura 8: Niveles de aporte de fosfatos en cada periodo.

Fuente: Elaboración propia.

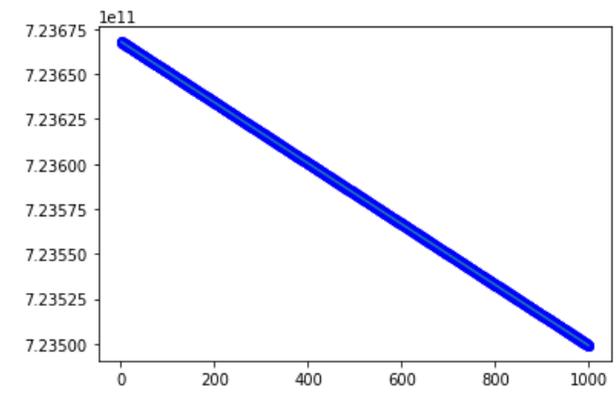
Para ambos escenarios los niveles de Erosión generada y aporte de nitratos y fosfatos por sistema de rotación se mantienen dentro del límite establecido a excepción de los periodos 2 y 5, donde la restricción del nivel de erosión permitido toma su valor máximo.

Entre escenarios se evidencian diferencias entre los valores asignados a las variables ambientales por el modelo, esto se atribuye a que; en el escenario 2, el modelo le asigna toda el área productiva a los sistemas de rotación 6 y 7 que corresponden a un cambio progresivo de cultivos a cobertura de bosque natural, y el bosque natural característicamente a diferencia de los cultivos y según los resultados del modelo SWAT aplicado por Osorio, et al. (2019), genera niveles mucho menores de erosión, aporte nitratos.

## Frontera de Pareto

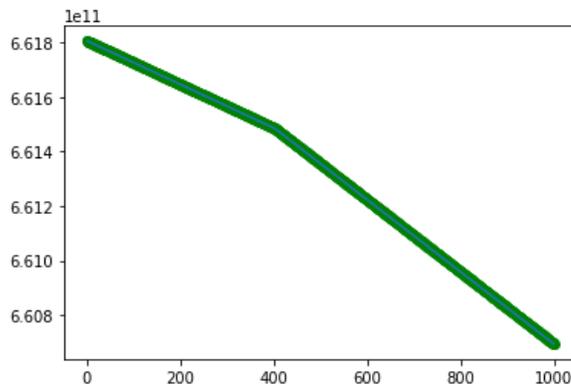
El ejercicio de plasmar una frontera de Pareto se decidió llevar a cabo cuando en el ejercicio de programación, a través de diferentes tabulaciones se observó que el modelo presentaba particularmente una alta sensibilidad a los niveles permitidos de erosión para definir el uso del suelo para cada sistema de rotación.

En las gráficas se podrá observar la relación directa que existe entre los beneficios del productor representativo (eje horizontal) y la cantidad de erosión permitida anualmente por cada sistema de rotación (eje vertical).



*Figura 9: Frontera de Pareto – Escenario 1*

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 10: Frontera de Pareto – Escenario 2*

*Fuente: elaboración propia.*

Los resultados muestran una relación directa, es decir, entre menor sean las toneladas de erosión permitidas, menores serán los beneficios económicos; esto se evidencia en la pendiente de la frontera para ambos casos.

En las figuras se puede observar que, aunque los niveles de erosión permitidos para ambos escenarios fueron exactamente iguales, en el escenario 2 se toman menores valores para el nivel de erosión, esto se atribuye a que en este escenario no se le asignó ninguna proporción de suelo al cultivo transitorio de papa (el que más erosión genera).

Adicionalmente, en el escenario 2 se evidencia un aumento en la pendiente de la frontera de Pareto, esto se atribuye a la asignación que sugiere el modelo (cambio progresivo de cultivos a cobertura boscosa), cuando en esta asignación la cobertura de bosque pasa a ocupar alrededor del 40% del área productiva disponible, la relación entre los niveles de erosión permitidos y los beneficios económicos obtenidos cambia, pues dadas las características naturales del bosque (genera niveles bajos de erosión), la obtención de los beneficios económicos deja de depender en mayor medida de la restricción.

## Conclusiones

El modelo de optimización lineal planteado integra la importancia del recurso hídrico a las actividades económicas presentes en el territorio de la cuenca Riogrande II. El modelo presenta desde el análisis económico una aproximación a la gestión de los recursos naturales en el territorio, pues maximiza los beneficios económicos del productor representativo acorde a unas restricciones ambientales fundamentales para garantizar la calidad y estabilidad de estos recursos. Adicionalmente, incentiva al uso racional del suelo, pues la población de este territorio ha logrado su supervivencia a partir de la explotación de los recursos naturales y ha hecho una expansión de la frontera agrícola a través del tiempo, lo que ha generado externalidades negativas que finalmente se traducen en pérdida del suelo y contaminación del recurso hídrico por diferentes factores, como técnicas de arado tradicionales y el uso de agroquímicos, es decir, han puesto en riesgo la permanencia y sostenibilidad del recurso en el tiempo.

La inclusión del bosque natural a los sistemas de rotación y el planteamiento de un PSA asociado a estos ecosistemas permite generar un incentivo a la conservación y a la reforestación, pues de acuerdo a los resultados del escenario 2 el modelo sugiere que con los sistemas de rotación propuestos se podría percibir un aumento hasta del 425% de los beneficios obtenidos por el uso del suelo. La cobertura boscosa además de albergar vida en términos de flora y fauna, y de prestar servicios ecosistémicos como la captura de carbono y el aporte de agua es el uso del suelo que puede garantizar en el tiempo la permanencia y sostenibilidad del recurso hídrico.

La presente investigación cumplió con resolver los objetivos específicos planteados al inicio del trabajo, ya que este ejercicio investigativo sólo fue una descripción de cómo pueden evaluarse los efectos del cambio en las decisiones del uso del suelo en la cuenca Río Grande II, tras incluir un valor ambiental-social asociado al aporte de agua generado por cada cultivo o cobertura de bosque, y al incluir un esquema de PSA, la investigación podría mejorarse a través de la inclusión de un mayor número de sistemas de rotación, con variedad de cultivos de la zona, estableciendo los límites adecuados para las restricciones ambientales, también

podría evaluarse el efecto de plantear un PSA ajustado al costo económico por contribución a la pérdida del suelo, aportes de nitratos y fosfatos de cada productor representativo.

## Referencias bibliográficas

- (CIFOR), C. I. (2006). Pagos por servicios ambientales: principios básicos esenciales.
- Arnold, Kiniry, Srinivasan, Williams, Haney, & Neitsche. (2013). Soil & Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012. Texas A&M University.
- Brunett, E. (2012). El costo de oportunidad como instrumento de apoyo para el pago por servicios ambientales. el colegio de la frontera norte.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. Revista de ciencias Agrícolas, 117-124.
- Camacho, V. & Ruiz, L. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos.
- Chávez, R. (2014). Resolución de problemas de optimización lineal, mediante el método símplex. Univerisdad del Bío Bío- Red de Bibiliotecas.
- CORANTIOQUIA. (2015). Actualización y ajuste plan de ordenación y manejo de la cuenca de los ríos Grande y Chico. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2020). Tarifas de los años anteriores 2009-2019.
- Montoya, J., & Tamayo, L. (18 de 5 de 2011). Ecosistemas Tropicales. Obtenido de <http://ecosistemastropicalesucn.blogspot.com/2011/03/embalse-riogrande-ii-antioquia.html>
- Osorio, J. D., & UT-GRA. (2018). Efectos económicos y ambientales de los usos del suelo: bases para una política ambiental de incentivos en sistemas productivos agroindustriales. Univerisdad de Antioquia, Antioquia, Medellín.

- Osorio, J. D., Uribe, N., García, L. M., & Bustamante, E. A. (2019). Optimización de uso del suelo acorde con restricciones ambientales y sociales: caso cuenta de Riogrande II. *Semestre Económico*, 23.
- P., E., Varela-Ortega, C., & Blanco-Gutiérrez, I. D. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*.
- Quintero, M., Estrada, R. D., & Garcia, J. (2006). Modelo de optimización para evaluación ex ante de alternativas productivas y cuantificación de externalidades ambientales en cuencas andinas. Modelo de evaluación económica, social y ambiental de la tierra (ECOSAUT). Lima: Centro internacional de la Papa.
- Tran, V.-B., Ishidaira, H., Nakamura, T., Do, T.-N., & Nishida, K. (2017). Estimation of Nitrogen Load with Multi-pollution sources using. *Journal of water and environment technology the SWAT model: a case study in the cau river basin in Northern Vietnam*.
- Valencia, K. (2015). *Introducción al método SIMPLEX*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Wagner, P., Bhallamundi, M., Narashimhan, B., Kantakumar, L., Sudheer, K., Kumar, S., & Fiener, P. (2015). Dynamic integration of land use changes in a hydrologic assessment of rapidly developing Indian catchment. Copyrights.
- Yang, G., & Best, E. P. (2015). Spatial optimization of watershed management practices for nitrogen load reduction using a modeling-optimization framework. *Journal of Environmental Management*, 252-260.
- Antonella Barletta . (2017). Modelos de optimización y multiatributo para la asignación de usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Rocha. *Universidad de la República*.

- Tobòn, M. (2013). Pago por Servicios Ecosistémicos para el Manejo Forestal Sostenible de la Cuenca del Rio Guarino, Departamentos Caldas y Tolima, Colombia. Programa de Manejo Forestal Sostenible en la Región Andina.
- FAO (2016) Pago por Servicios Ambientales en Áreas Protegidas en América Latina. Organismo Autónomo Parques Nacionales (OAPN) Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España.
- Azuara, G., Palacios, E., García-Ferrer, A., & Montesinos, P. (2017). Multi-objective spatial optimization: Sustainable land use allocation at sub-regional scale. *Sustainability*.
- Duarte, O., Pulido, J., Silva, J., & Holmann, F. (2003). Modelo de optimización para los sistemas de producción agropecuarios de la microrregión Valle del Cesar, Colombia. *Programa Nacional de Agrosistemas CORPOICA, Centro Nacional de Investigación Tibaitatá, Corpoica*.
- Villegas, J. G. (s.f). Solución de programas lineales METODO SIMPLEX . *Departamento de ingeniería industrial - Universidad de Antioquia*.
- Vélez, L. D. (2016). *Formulación de Indicadores para Evaluar y Monitorear las Dinámicas de los Agroecosistemas, las Racionalidades y Estrategias Productivas de los Agricultores en Escenarios de cambio Climático*. Programa de Investigación en Gestión del Riesgo Asociado con cambio Climático y Ambiental en Cuencas Hidrográficas, convocatoria 543 de Colciencias. Medellín, Colombia.