



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efectos del cambio de uso del suelo y políticas de gestión sobre la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con el recurso hídrico

Caso de estudio: microcuenca San Pedro, corregimiento de Santa Elena

Melissa Patiño Pérez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2019

Efectos del cambio de uso del suelo y políticas de gestión sobre la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con el recurso hídrico. Caso de estudio: microcuenca San Pedro, corregimiento de Santa Elena

Melissa Patiño Pérez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Directora:

PhD, Clara Inés Villegas Palacio

Codirector:

PhD, Santiago Arango Aramburo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias

Medellín, Colombia

2020

*“Los mayores problemas en el mundo son el resultado de
la diferencia entre cómo funciona la naturaleza y la
manera de pensar de la gente”*

*Gregory Bateson
Pasos hacia la ecología de la mente, 1972*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia y la Alcaldía de Medellín por permitirme hacer parte del proyecto “Evaluación de la efectividad ambiental de intervenciones forestales de restauración ecológica sobre la regulación hídrica de la microcuenca San Pedro, corregimiento de Santa Elena, Medellín, Colombia”, del cual surgió esta investigación.

A la profesora Clara Inés Villegas Palacio, por ser como una madre, educar con amor, paciencia; por su apoyo incondicional y por creer en mis capacidades. Al profesor Santiago Arango Aramburo, codirector de la tesis, por transmitir su conocimiento, enorme paciencia y buena energía.

A mi familia que me apoyó día tras días en este proceso y entendieron mis ausencias. A mi hermana Luisa Fernanda Patiño, por tenerme paciencia, escucharme y brindarme palabras de ánimo en los momentos que más necesitaba. A mis amigos Cindy Lopera, Melissa Rúa, Alejandro Serna y Julián David Mazo por creer en mis capacidades y por ser mi herramienta contra el estrés.

A mis compañeras de maestría Cristina Vargas, Paula Villada, María Alejandra Herrera, Judith Santos y Nataly Bonilla, por acompañarnos en todas las fases de la maestría, hacer catarsis y respaldarnos mutuamente. A la antropóloga Alba Mery Upegui, por la asesoría para las actividades de taller a la comunidad y encuestas. Adicionalmente, a Laura, Valentina, Sergio y Arturo por el apoyo de las encuestas a los usuarios del acueducto. A Jéssica Arias Gaviria, Sebastián Bernal y Linda Berrío, por las asesorías que me brindaron en la ejecución del modelo.

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo determinar los impactos causados por el factor endógeno de cambio de uso del suelo y diferentes políticas de manejo relacionadas con el recurso hídrico en una microcuenca hidrográfica, sobre el sistema socio-ecológico asociado. Esta investigación se desarrolló en las veredas El Llano, El Plan, Santa Elena Central y Perico del corregimiento Santa Elena, en Medellín, Colombia, donde se ubica la microcuenca San Pedro, que abastece de agua a 1034 usuarios y en donde se realizó la reforestación ecológica por parte de la Alcaldía de Medellín. A partir de información recolectada en campo y de revisión secundaria, se realiza un análisis de las interacciones e intensidad de las redes sociales y ecológicas para identificar la estructura y comportamiento del sistema socio-ecológico en estudio. Esta investigación presenta el desarrollo de un modelo de simulación del sistema socio-ecológico en dinámica de sistemas, que tiene como fin identificar los impactos causados por las políticas de gestión del recurso hídrico y el factor de cambio endógeno crecimiento poblacional, sobre el sistema en estudio. Los resultados de la investigación muestran que el impacto más significativo generados por el factor cambio endógeno y la ejecución de políticas de gestión del recurso hídrico dentro del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, es la disminución de área dedicada a la agricultura, generando así alteraciones en las tradiciones económica de la zona. Así mismo, se evidenció que los efectos generados por la aplicación de la política de manejo del recurso hídrico son eficientes y que garantizan la oferta hídrica en la quebrada San Pedro, a pesar de que la demanda de agua doméstica aumentara.

Palabras clave: Sistema socio-ecológico, provisión de agua, crecimiento poblacional, cambio de uso del suelo, política de gestión del recurso hídrico.

Effects of land use change and management policies on the provision of water-related ecosystem services.

Case study: San Pedro micro-basin, Santa Elena district

Melissa Patiño Pérez

Research thesis submitted as a partial requirement to qualify for the degree of:

Master in Environment and Development

Director:

PhD, Clara Inés Villegas Palacio

Codirector:

PhD, Santiago Arango Aramburo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias

Medellín, Colombia

2020

Abstract

This research aims to determine the impacts caused by the endogenous change factor of land use and different policies related to water resource management in a hydrographic watershed over the socio-ecological system associated with it. This research focuses on the Santa Elena township (Medellín, Colombia) districts El Llano, El Plan, Santa Elena Central, and Perico, where the San Pedro micro-watershed is located.

San Pedro micro-watershed supplies water to 1034 users and ecological reforestation was carried out there by the Municipality of Medellín. Based on this information collected in the field and complemented documentation review, the interactions and strength of social and ecological networks are analyzed to identify the structure and behavior of the socio-ecological system of the present study. This research shows the development of the socio-ecological system in a simulation model representing the system dynamics which aims to identify the impacts caused by water resource management policies and the influence of endogenous population growth. The results demonstrate that the most important impact generated by the endogenous influence and the execution of water resource management policies within the socio-ecological system of the San Pedro micro-watershed is the reduction of the land designated to agriculture, thus generating changes in the traditional economic activities of the territory of study. Likewise, the effects generated by the application of the policy of water resource management are efficient, and that guarantees the water supply in the San Pedro stream, despite the demand increasing of domestic water.

Keywords: Socio-ecological system, water provision, population growth, land-use change, water resource management policy.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVIII
Lista de abreviaturas	XIX
Introducción	1
1. Marco Teórico	3
1.1. Sistemas socio-ecológicos (SEE).....	3
1.2. Modelos de simulación para sistemas socio-ecológicos	5
1.3. Estudios de simulación de sistemas socio-ecológicos.....	10
2. Metodología	13
2.1 Zona de estudio	13
2.2 Identificación de actores, servicios ecosistémicos, factores de cambio de uso del suelo y políticas de gestión del recurso hídrico.....	15
2.2.1 Revisión y sistematización de información secundaria.....	15
2.2.2 Taller con la comunidad	16
2.2.3 Encuestas a los usuarios del acueducto San Pedro	17
2.2.4 Identificación de usos del suelo a partir de imágenes satelitales.....	18
2.3 Identificación de los nodos que configuran las redes sociales y ecológicas, sus interacciones y su intensidad en la microcuenca San Pedro	19
2.4 Construcción modelo simulación de Dinámica de Sistemas.....	20
2.4.1 Articulación del problema	20
2.4.2 Planteamiento de hipótesis dinámica	20
2.4.3 Formulación del modelo matemático.....	20
2.4.4 Validación del modelo	21
2.4.5 Evaluación y diseño de políticas	21
3. Análisis de interacciones entre sistema social y sistema natural del sistema socioecológico San Pedro	25
3.1 Principales actores.....	25
3.2 Servicios ecosistémicos priorizados	29
3.4 Factores de cambio de uso del suelo presentes en la cuenca.....	30

3.5 Interacciones e intensidad de las redes sociales y ecológicas en la microcuenca San Pedro.....	37
4. Modelo de dinámica de sistemas para el sistema socio-ecológico microcuenca San Pedro	53
4.1 Estructura general del modelo	54
4.2 Hipótesis dinámica.....	55
4.3 Modelo formal de simulación	57
4.5 Validación del modelo	74
5. Simulación de diferentes escenarios con las políticas de gestión según el modelo planteado.....	79
5.1 Caso base.....	79
5.2 Escenario 1: No hay cumplimiento del Decreto 953 del 2013.....	82
5.3 Escenario 2: Se aplica la política por medio de adquisición, reforestación y mantenimiento de toda el área priorizada para conservación del recurso hídrico.....	85
5.4 Escenario 3: Se aplica la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA por tiempo indefinido en toda el área priorizada para la conservación del recurso hídrico	88
5.5 Escenario 4: Se aplica las dos políticas: una parte por adquisición de predios y reforestación, y la otra por medio de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA, los cuales, dentro de 5,10 y 15 años, después de que el área reforestada sea bosques, cambian a suelo agrícola.....	91
5.6 Escenario 5: Se aplica la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA y después de que el área reforestada es un bosque maduro, cambia a agricultura en diferentes porcentajes de área.	97
6. Conclusiones.....	102
A. Anexo: Lista revisión de información secundaria de la zona de estudio.....	105
B. Anexo. Formato de encuesta a los usuarios del Acueducto Veredal San Pedro.	109
C. Anexo. Datos de modelo hidrológico	129
Bibliografía.....	131

Lista de figuras

<i>Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.</i>	14
<i>Figura 2. Distribución aleatoria de usuarias a encuestar.</i>	18
<i>Figura 3. Clasificación de los actores de la zona de estudio.</i>	26
<i>Figura 4. Servicios ecosistémicos más importante para el bienestar social de la zona de estudio, según la percepción de la comunidad.</i>	30
<i>Figura 5. Estado civil de los habitantes de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia</i>	32
<i>Figura 6. Conformación de los hogares de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia</i>	32
<i>Figura 7. Lugar de origen de los habitantes de la zona</i>	33
<i>Figura 8. Frecuencia de las personas que habitan las casas ubicadas en la zona de estudio</i>	33
<i>Figura 9. El interés de las personas por vivir en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia</i>	34
<i>Figura 10. Cobertura de área priorizada antes de la ejecución de la política.</i>	36
<i>Figura 11. Cobertura de suelo en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro. Años 2010-2013 y 2016.</i>	36
<i>Figura 12. Relaciones entre los nodos de uso del suelo y servicios ecosistémico</i>	40
<i>Figura 13. Consumo de agua promedio de las veredas El Llano, El Plan y Perico</i>	41
<i>Figura 14. Relaciones entre el nodo de servicio ecosistémico y actores sociales</i>	42
<i>Figura 15. Relaciones entre los nodos de actores sociales y el servicio ecosistémico</i>	45
<i>Figura 16. Relaciones entre los actores sociales</i>	46
<i>Figura 17. Relaciones entre el nodo de crecimiento población con todos los nodos de la red</i>	48
<i>Figura 18. Vinculación entre la ejecución de política de gestión del recurso hídrico con todos los nodos de la red.</i>	50
<i>Figura 19. Red del sistema socio-ecológico microcuenca quebrada San Pedro</i>	50
<i>Figura 20. Estructura del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro</i>	51
<i>Figura 21. Diagrama causal del sistema socio-ecológico microcuenca San Pedro.</i>	56
<i>Figura 22. Diagrama de flujos y niveles de la dinámica poblacional</i>	59
<i>Figura 23. Variables no lineales para la atractividad a la inmigración de la cuenca: a. Atractividad por racionamiento y b. Atractividad por escasez de agua. (Fuente: Construcción cualitativa propia a partir de los talleres realizados en la cuenca)</i>	60
<i>Figura 24. Diagrama de flujos y niveles del cambio en el uso del suelo</i>	64
<i>Figura 25. Escasez de agua y capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro</i>	69
<i>Figura 26. Comparación del área agrícola simulada con la de referencia*</i>	76
<i>Figura 27. Comparación del área artificializada simulada con la de referencia**</i>	76
<i>Figura 28. Comparación del área boscosa simulada con la de referencia***</i>	76

<i>Figura 29. Comparación la población simulada con la de referencia****</i>	76
<i>Figura 30. Análisis de sensibilidad para área agricola</i>	77
<i>Figura 31. Análisis de sensibilidad para área artificializada</i>	77
<i>Figura 32. Análisis de sensibilidad para área bosque</i>	77
<i>Figura 33. Análisis de sensibilidad para capacidad de abastecimiento de agua</i>	77
<i>Figura 34. Análisis de sensibilidad Escasez de agua</i>	77
<i>Figura 35. Análisis de sensibilidad población total</i>	77
<i>Figura 36. Caso base: área agricola.</i>	81
<i>Figura 37. Caso base: área artificializada.</i>	81
<i>Figura 38. Caso base: área boscosa.</i>	81
<i>Figura 39. Caso base: capacidad de abastecimiento de agua.</i>	81
<i>Figura 40. Caso base: Indices de escasez de agua.</i>	81
<i>Figura 41. Caso base: Población total.</i>	82
<i>Figura 42. Escenario 1: Área agricola</i>	83
<i>Figura 43. Escenario 1: Área artificializada</i>	83
<i>Figura 44. Escenario 1: Área bosque</i>	84
<i>Figura 45. Escenario 1: Capacidad de abastecimiento de agua</i>	84
<i>Figura 46. Escenario 1: Indice de escasez de agua.</i>	84
<i>Figura 47. Escenario 1: Población total.</i>	84
<i>Figura 48. Escenario 2: Área agricola</i>	86
<i>Figura 49. Escenario 2: Área artificializada</i>	86
<i>Figura 50. Escenario 2: Área bosque.</i>	87
<i>Figura 51. Escenario 2: Capacidad de abastecimiento de agua.</i>	87
<i>Figura 52. Escenario 2: Indice de escasez de agua.</i>	87
<i>Figura 53. Escenario 2: Población total.</i>	87
<i>Figura 54. Escenario 3: Área agricola</i>	90
<i>Figura 55. Escenario 3: Área artificializada</i>	90
<i>Figura 56. Escenario 3: Área bosque</i>	90
<i>Figura 57. Escenario 3: Capacidad de abastecimiento de agua</i>	90
<i>Figura 58. Escenario 3: Indice de escasez de agua</i>	90
<i>Figura 59. Escenario 3: Población total.</i>	90
<i>Figura 60. Diagrama de flujos y niveles complementario para el escenario cuatro</i>	92
<i>Figura 61. Escenario 4: Área agricola</i>	94
<i>Figura 62 Escenario 4: Área artificializada</i>	94
<i>Figura 63. Escenario 4: Área bosque</i>	95
<i>Figura 64. Escenario 4: Capacidad de abastecimiento de agua</i>	95
<i>Figura 65. Escenarios 4: Indice de escasez de agua</i>	95
<i>Figura 66. Escenario 4: Población total.</i>	95
<i>Figura 67. Diagrama de flujos y niveles complementario para el escenario cinco</i>	97
<i>Figura 68. Escenario 5: Área agricola.</i>	99
<i>Figura 69. Escenario 5: Área artificializada.</i>	99
<i>Figura 70. Escenario 5: Área bosque.</i>	99
<i>Figura 71. Escenario 5: Capacidad de abastecimiento de agua.</i>	99

<i>Figura 72. Escenario 5: Índice de escasez de agua.</i>	100
<i>Figura 73. Escenario 5: Población total.</i>	100

Lista de tablas

	Pág.
<i>Tabla 1. Información de actores presentes en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro.</i>	27
<i>Tabla 2. Servicios ecosistémicos identificados localmente.</i>	29
<i>Tabla 3. Normas que regulan la conservación y recuperación de las áreas de importancia para el recurso hídrico.</i>	34
<i>Tabla 4. Nodos de la red social de la microcuenca San Pedro</i>	37
<i>Tabla 5. Nodos de la red ecológica de la microcuenca San Pedro.</i>	37
<i>Tabla 6. Nodos de factor de cambio endógeno y medidas de manejo.</i>	38
<i>Tabla 7. Vinculación entre nodos de usos del suelo y servicios ecosistémicos</i>	39
<i>Tabla 8. Vinculación entre el nodo de servicio ecosistémico de provisión de agua y los actores sociales</i>	41
<i>Tabla 9. Vinculación entre los nodos de actores sociales y el servicio ecosistémico</i>	44
<i>Tabla 10. Vinculación entre el nodo de crecimiento población con todos los nodos de la red</i>	47
<i>Tabla 11. Vinculación entre la ejecución de política de gestión del recurso hídrico con todos los nodos de la red</i>	49
<i>Tabla 12. Dinámica poblacional: sistema de ecuaciones y comentarios del módulo</i>	61
<i>Tabla 13. Cambio de uso del suelo: sistema de ecuaciones y comentarios del módulo</i>	65
<i>Tabla 14. Categorías e interpretación del índice de escasez</i>	70
<i>Tabla 15. Escasez de agua y capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro: sistema de ecuaciones y comentarios del módulo</i>	71
<i>Tabla 16. Porcentaje de sensibilidad para los parámetros evaluados.</i>	78
<i>Tabla 17. Caso base en el modelo de simulación.</i>	80
<i>Tabla 18. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario uno</i>	83
<i>Tabla 19. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario dos</i>	85
<i>Tabla 20. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario tres.</i>	89
<i>Tabla 21. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario cuatro.</i>	93
<i>Tabla 22. Parámetros utilizados para la modelación del escenario 5.</i>	97
<i>Tabla 23. Información secundaria de la zona de estudio.</i>	105

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AVSP</i>	Acueducto Veredal San Pedro
<i>DS</i>	Dinámica de Sistemas
<i>JAC</i>	Juntas de Acción Comunal
<i>MBM</i>	Más Bosques para Medellín
<i>PSA</i>	Pagos por Servicios Ambientales
<i>PSAH</i>	Pagos por Servicios Ambientales Hídricos
<i>SE</i>	Servicios Ecosistémicos
<i>SMA</i>	Sistemas Multi-Agente
<i>SSE</i>	Sistema Socio-ecológico

Introducción

Los servicios ecosistémicos (SE) son los beneficios que los humanos reciben de forma directa o indirecta de las funciones provenientes de los ecosistemas (Costanza et al., 1997). Para que existan dichas funciones para la provisión de los servicios, se requiere una configuración de estructura y procesos de los ecosistemas (Turner, 1999). Los beneficios están directamente relacionados con el mejoramiento del bienestar humano y para el disfrute de algunos de ellos existe la necesidad de usar otras formas de capital; por ejemplo el agua potable para consumo humano proviene del servicio de provisión hídrica pero requiere de herramientas antrópicas para convertirse en un beneficio que mejora el bienestar humano (Fisher et al, 2009).

Los sistemas ecológicos se han visto afectados por presiones y factores de cambio, tanto endógenos en el territorio donde está localizado el ecosistema (ej. demanda de agua, contaminantes) como exógenos (ej. calentamiento global, crecimiento poblacional). Como respuesta a dichos cambios y sus efectos sobre la provisión de servicios ecosistémicos, surgen diversas políticas y medidas de gestión que tienen como objetivo reducir las presiones sobre el sistema natural y, finalmente, mantener el flujo de los servicios ecosistémicos provistos por éste para garantizar el bienestar de los sistemas sociales. Es importante, entonces, comprender cómo estos factores de cambio y las diferentes acciones de manejo modifican la provisión de los servicios ecosistémicos, dadas las complejas interacciones entre los sistemas ecológicos y socio-económicos, lo cual es una tarea de alta complejidad (Dee et al., 2017). Para lograrlo, es necesario identificar y entender dichas interrelaciones para prever los posibles efectos de las políticas de gestión y así evitar que las acciones implementadas tengan consecuencias contrarias a las deseadas.

Los sistemas socio-ecológicos (SES) están conformados por las relaciones entre los sistemas sociales y naturales (Ostrom, 2009). El SES funciona por la coacción entre especies (fauna y flora) que influyen en la cantidad de oferta de Servicios Ecosistémicos (Pocock et al, 2012); por las interacciones sociales que definen cómo los seres humanos usan (demanda) los servicios ecosistémicos (Janssen et al., 2006); por las relaciones entre los ecosistemas y activos antropogénicos (Dee et al., 2017); y por las interacciones sociales que pueden influir sobre las prioridades de los administradores de recursos que inducen a crear las medidas de gestión (Alexander et al, 2016; Janssen et al., 2006). Para evitar resultados perjudiciales y adelantarse a la respuesta del sistema socio-ecológico frente a políticas de manejo y acciones de presión (como el cambio de uso de suelo), es importante y necesario considerar no sólo las funciones dentro del sistema natural sino las interacciones dentro y entre los componentes de los sistemas socio-ecológicos (Pocock et al., 2016).

La sostenibilidad de un territorio está determinada por las dinámicas económicas, políticas y culturales que, a su vez, dependen en gran medida de recursos limitados, como es el caso del agua en muchas ocasiones, y están condicionadas por la relación de oferta y demanda a escala

de cuenca, subcuenca y microcuenca hidrográfica (Mihelcic & Zimmerman, 2011). Por ello, en Colombia existen diferentes leyes, políticas y planes relacionados con la conservación y cuidado del recurso hídrico. Dentro de tales instrumentos regulatorios cabe resaltar el Artículo 111 de la Ley 93 de 1993 y el Decreto 953 del 2013 que tiene como objetivo “promover la conservación y recuperación de las áreas de importancia estratégica para la conservación del recurso hídrico que surten de agua los acueductos municipales, distritales y regionales, mediante la adquisición y mantenimiento de dichas áreas y financiación de los esquemas de pago por servicios ambientales” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013). Uno de los lugares donde se ejecutó esta política es la microcuenca Quebrada San Pedro del corregimiento de Santa Elena, Medellín, que tiene un área de 202 hectáreas y abastece las veredas El Llano y El Plan del corregimiento de Santa Elena en el Municipio de Medellín y la vereda Perico del municipio de Envigado. En dicho lugar se reforestaron 31,49 hectáreas con árboles nativos en la parte alta y media de la cuenca San Pedro, que abastece del recurso hídrico a la Corporación Acueducto Veredal San Pedro.

La finalidad de la presente investigación es determinar los impactos causados sobre el sistema socio-ecológico por el factor endógeno de cambio de uso del suelo y diferentes políticas de gestión relacionadas con el recurso hídrico, en una microcuenca hidrográfica. Para lo anterior se propone el uso de análisis de redes y un modelamiento con dinámica de sistemas. El análisis de redes es un enfoque apropiado para el estudio de los sistemas socio-ecológicos ya que implementa un procedimiento riguroso para comprender las interacciones entre funciones, servicios de los ecosistemas, actividades sociales y económicas de los seres humanos (Bohan, 2016). Los modelos de dinámica de sistemas son usados para estudiar sistemas complejos y con retroalimentaciones (Anderies et al., 2004; Forrester, 1971; Sterman, 2000). Además, permiten la detección de bucles de realimentación que implica conocer el estado del sistema y sus variables endógenas y exógenas; usan simulación computacional que utiliza ecuaciones diferenciales para el análisis cuantitativo; y emplean modelos mentales que permiten la participación de personas expertas para obtener una mejor comprensión de fenómenos sociales relevantes (Sterman, 2000)

En el Capítulo 1 de esta tesis se presenta el marco conceptual de sistemas socio-ecológicos, modelos de simulación y una revisión de los antecedentes de estudios utilizando diferentes modelos de simulación para sistemas socio-ecológicos. En el Capítulo 2 se describe en detalle la metodología que se utilizó para la identificación de los actores y los servicios ecosistémicos y sus interacciones, y el proceso de modelación de dinámica del sistema socio-ecológico. En el Capítulo 3 se presentan los actores principales de la zona de estudio, la intensidad de sus relaciones y el resultado obtenido al modelar diferentes políticas de gestión a partir del modelo de dinámica de sistemas planteado. Finalmente, en el Capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos, se concluye y se hacen algunas sugerencias para próximas investigaciones.

Capítulo 1

Marco Teórico

En este capítulo se presenta inicialmente un marco teórico sobre sistemas socio-ecológicos (SSE) que contiene: la definición de SSE, su funcionamiento y los marcos conceptuales propuestos para su estudio y entendimiento. Adicionalmente, se presenta una revisión de los modelos de simulación para SSE, haciendo énfasis en los modelos de Dinámica de Sistemas (DS). Por último, se muestran algunos estudios donde se implementan modelos de simulación para sistemas socio-ecológicos.

1.1. Sistemas socio-ecológicos (SEE)

Un sistema socio-ecológico (SSE) se define como un sistema compuesto por un sub-sistema social y un sub-sistema natural, en el que se presentan interacciones complejas y relaciones en diversas escalas espaciales y temporales (Anderies et al., 2004). Al integrar los sub-sistemas natural y social, el concepto de SSE posee un enfoque bidireccional que analiza cómo el ser humano afecta la estructura de los ecosistemas y cómo estos repercuten en el bienestar humano (Collins et al., 2011; Martín-López et al., 2009).

El funcionamiento de los SSE se basa en la coacción entre especies (fauna y flora) que influye en la oferta de servicios ecosistémicos; las interacciones sociales que son las encargadas de definir la demanda y las formas de uso de estos; las relaciones entre los ecosistemas y activos antropogénicos; y las interacciones sociales que influyen sobre las prioridades de los tomadores de decisiones que inducen a crear las diferentes medidas de gestión (Janssen et al., 2006; Pockock et al, 2012; Alexander et al, 2016; Dee et al., 2017). En cada proceso de cambio los sistemas naturales y sociales se han moldeado y adaptado conjuntamente, transformándose en un sistema integrado de humanos en la naturaleza (Ostrom, 2009).

Uno de los objetivos de analizar los sistemas socio-ecológicos es entender cómo los factores de cambio en eventos de pulso (sequías, tormentas, incendios forestales) y en eventos continuos (como cambios de uso del suelo y cambio climático) o la combinación entre ellos (Collins et al., 2011), alteran la abundancia de las especies, los enlaces existentes en la estructura biótica y el

funcionamiento de los ecosistemas (Smith et al., 2009), que al final, conlleva a implicaciones en el bienestar humano, al cambiar la cantidad y la calidad de los servicios ecosistémicos.

Los sistemas socio ecológicos se han estudiado por medio de marcos conceptuales que son utilizados para evaluar las dimensiones sociales y ecológicas, reconocer las conexiones y realimentaciones que determinan su estructura (Leslie et al., 2015). El uso de estos marcos conceptuales permite la identificación de un conjunto de variables relevantes propias de un SSE local, facilitando el diseño de instrumentos y actividades de recolección de datos para el análisis de SSE, la determinación de índices a medir y el análisis de hallazgos sobre su sostenibilidad (Ostrom, 2009). En la literatura existen variedad de marcos conceptuales que permiten estudiar los SSE, están los que ofrecen herramientas para investigar temas como la degradación ambiental, la conservación planificada y la sostenibilidad de un territorio (Kremen, 2005); también, los marcos conceptuales para comprender la respuesta y adaptación que tienen los SSE frente a factores de cambio (Collins et al., 2011); y otros, que incluyen valores intrínsecos (biocentrismo) y valores instrumentales (antropocentrismo), que se basan en el análisis del capital natural, necesario para la generación de servicios ecosistémicos y el bienestar social (Martín-López et al., 2006). Por eso, la utilidad de los marcos conceptuales para SSE varía dependiendo del objetivo del estudio.

Por ejemplo, Collins et al. (2011) propone un marco conceptual que permite entender las interacciones, a lo largo del tiempo, de las estructuras que componen los SSE y su comportamiento frente a factores de cambios provocados por la actividad antrópica o por la misma naturaleza. Estas pueden alterar el funcionamiento de la estructura biofísica que, finalmente, afecta el flujo de servicios ecosistémicos, teniendo como resultado consecuencias en la calidad de vida que afectan el comportamiento humano. En respuesta a ello, los humanos influyen en la frecuencia, magnitud o forma del régimen de los eventos de presión, volviendo de nuevo al ciclo.

Uno de los factores de cambio que se ha agudizado en los últimos años es el de cambio en las coberturas y uso de la tierra. Este ha sido constante e intenso debido a la urbanización, la mejora de la tecnología para la agricultura y el uso de la tierra para la reconstrucción y el ocio (Metzger et al., 2006). Lo anterior ha generado afectaciones en la biodiversidad, la estructura y la composición de las comunidades naturales y, por ende, en el funcionamiento de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos como la calidad del agua (Martínez et al., 2009), trayendo consecuencias al bienestar humano (MAE, 2005). En respuesta a dichos cambios y a sus efectos sobre la provisión de servicios ecosistémicos, surgen diversas políticas y medidas de gestión que tienen como objetivo reducir las presiones sobre el sistema natural y, finalmente, mantener el flujo de servicios ecosistémicos provistos por este para garantizar el bienestar de los sistemas sociales.

En Colombia existen diferentes políticas y planes enfocados a la conservación y cuidado del recurso hídrico, como la Ley 93 de 1993 y el Decreto 953 del 2013, que promueve la conservación y protección de áreas importantes para el recurso hídrico por medio de adquisición y mantenimiento de predios y/o la financiación de esquemas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA). Los PSA son un incentivo para la conservación del medio ambiente; a través de transferencia de dinero o en especie, se le otorgan a propietarios y poseedores de predios ubicados en áreas estratégica para el suministro de servicios ecosistémicos, con el fin de

conservar o recuperar ecosistemas naturales (Arriagada et al., 2012; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013). Esta propuesta de conservación puede fallar si existe una autoselección adversa y una deficiente orientación en los pagos hacia las tierras que tienen poco valor ambiental o no están amenazadas (Arriagada et al., 2012).

1.2. Modelos de simulación para sistemas socio-ecológicos

Los modelos son una representación de la realidad que permite evaluar los diferentes escenarios que proporcionan las políticas, leyes o acciones de gestión (Forrester, 1971). Según Sterman (2000), estos se clasifican dependiendo de los criterios usados y del punto de vista del modelador y se pueden diferenciar entre: modelos mentales, formales, de optimización y de simulación; también pueden ser matemáticos, físicos, estáticos, dinámicos, estocásticos y determinísticos.

Los modelos de simulación son herramientas que permiten clasificar lo que sucedería en una determinada situación. Su finalidad es predecir el comportamiento futuro de un sistema sobre unas condiciones supuestas o sobre el diseño de nuevas estrategias de toma de decisiones y tantear sus efectos sobre el comportamiento del sistema (Sterman, 1992). Este tipo de modelos se han empleado para comprender los efectos de determinados fenómenos que afectan la vida humana (Giraldo, 2013), como el proceso de cambios en el uso del suelo, que perjudica la provisión de servicios ecosistémicos y, con ello, el bienestar social.

Los modelos de simulación de SSE están emergiendo y su desarrollo es importante para el análisis de las diferentes interacciones entre las estructuras social y natural (Schlüter et al., 2014). Su utilidad reside en el hecho de que es una abstracción de la realidad y la simplifica con el objetivo de que pueda ser expresado en una forma entendible (Janssen et al., 2006). Simular los SSE, permite comprender sus dinámicas, cuantificar el grado de transformación en el tiempo y entender los efectos de la existencia de factores de cambio en la producción futura de los servicios ecosistémicos (Berrio, Villegas-Palacio, & Arango-aramburo, 2018)

Un modelo para la simulación de sistemas socio-ecológicos debe permitir la comprensión de procesos dinámicos propios de estos sistemas, tener en cuenta las interacciones no lineales entre la sociedad y la naturaleza, incluir realimentaciones de subsistemas y la heterogeneidad de los mismos. Igualmente, debe contener diferentes variables relacionadas con normas sociales, políticas de gestión del territorio y derechos de propiedad (An, 2012; Filatova et al., 2016; Liu et al., 2007).

En la literatura existen diferentes enfoques para la simulación de los SSE; la elección de un enfoque está determinado por el problema a solucionar y la finalidad del modelo (Davis et al., 2007; Kelly et al., 2013; Pidd, 2004; Sterman, 2000). Algunos de los enfoques de simulación son modelos estadísticos, teoría de juegos, sistemas multi-agentes, dinámica de sistemas y teoría de redes. A continuación, se describen cada uno de estos enfoques de modelos de simulación, haciendo énfasis en las ventajas y desventajas que tiene cada uno de ellos.

- **Modelo estadístico**

Este tipo de modelos se basa en un análisis estadístico de series de tiempo de variables dependientes e independientes que pueden detectar o predecir cambios de régimen en un SSE (Filatova et al., 2016). Tiene la capacidad de identificar los cambios dentro de un SSE y detectar automáticamente el momento en que ocurrieron, con información primaria. Su limitación es el requerimiento de grandes series de datos temporales de las variables dependientes e independientes (Möllmann et al., 2009).

- **Teoría de juegos y de la decisión**

Este tipo de enfoque se basa en el estudio de las interacciones estratégicas entre diferentes agentes o jugadores. Este método de simulación se puede usar para describir decisiones en todos los niveles del SSE. Es considerado un tipo de modelo interdisciplinario porque incluye agentes con conocimiento tanto social como ambiental. El principal beneficio que tiene la teoría de juegos es la descripción del potencial para identificar las sinergias, conflictos o dilemas entre los diferentes niveles de los sistemas humanos, así como en las interacciones entre los sistemas sociales y naturales. A pesar de las grandes ventajas, este enfoque de modelado no incluye las realimentaciones que se presentan en un sistema socio-ecológico (Berrio et al., 2018)

- **Sistemas Multi-agentes (SMA)**

El enfoque de modelación basado en sistemas multi-agentes está compuesto por un espacio con situaciones específicas que hacen que se agrupen agentes que comparten recursos, que existan al mismo tiempo y que tengan la capacidad de reaccionar a los cambios percibidos en su entorno a través de las acciones. Este tipo de enfoque de modelación tiene la capacidad de simplificar la resolución de problemas al dividirlo en subunidades de conocimientos necesarios, así mismo, asigna un agente independiente a cada una de las subunidades. (Bousquet & Le Page, 2004).

Los modelos de SMA para SSE integran varios agentes sociales (políticas, organizaciones, tomas de decisiones) y procesos naturales. Este enfoque de simulación tiene en cuenta agentes humanos y naturales. Los primeros están compuestos por actores sociales; los segundos son parte relevante del entorno y es donde interactúan los humanos (Berrío, 2018). Los resultados obtenidos se deben comparar con datos reales y así adquirir la capacidad de realizar cambios en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de los recursos naturales (An, 2012).

- **Teoría de Redes**

La simulación con teoría de redes ha sido usada en diferentes disciplinas como matemática discreta, sociología e investigación de la comunicación y, recientemente, se ha usado en física y biología (Barrat et al., 2008), con redes alimentarias (Dunne et al., 2002), redes ecológicas (Pocock et al., 2012), redes de polinizadores de plantas (Jordano et al., 2003) y para el estudio de la integración de las reacciones entre los ecosistemas y los seres humanos (Dee et al., 2017).

La teoría de redes es un enfoque de simulación que permite entender la estructura de un sistema y se basa en la teoría de grafos y estadística (Janssen et al., 2006). Proporciona un marco que permite una representación conceptual de las interacciones en sistemas complejos, que implica un mapeo de interacciones entre un gran número de individuos (Barrat et al., 2008). Este método consiste en representar en nodos a las entidades del sistema que se unen por enlaces, un tipo de interconexión entre esas entidades (Estrada, 2011).

Una de las ventajas de estudiar los sistemas socio-ecológicos con teoría de redes es que esta tiene en cuenta procedimientos rigurosos para comprender las interacciones entre funciones, servicios de los ecosistemas, actividades sociales y económicas de los seres humanos. Además, para el análisis de redes más complejas, se puede complementar este enfoque con otros modelos de sistemas dinámicos donde se utilicen ecuaciones diferenciales que describan las interacciones entre nodos (Dee et al., 2017), como los modelos de dinámica de sistemas.

Según el manual realizado por Palacio (2015), la teoría de redes tiene la capacidad de rastrear la acción humana desde los actores y sus relaciones con los ecosistemas de una forma tanto cuantitativa como cualitativa. A continuación, se presentan las fases requeridas en la aplicación de teorías de redes:

Fase 1: Identificación de los actores directos o indirectos que se relacionan con el ecosistema y sus atributos

En esta fase se identifican los actores con sus atributos a partir de la revisión de fuentes secundarias, haciendo un rastreo sobre los participantes en la formulación de documentos de planeación participativa o de los actores caracterizados y reconocidos en los mismos documentos de planeación. Estos son seleccionados por su vínculo directo o indirecto con el servicio ecosistémicos en estudio, ya sea por las prácticas productivas de la zona, los habitantes y organizaciones que los representan y su actuación dentro del ecosistema.

Fase 2: Definir periodos de tiempos

Definir la interacción entre los actores y los servicios ecosistémicos o el medio natural en una escala de tiempo con referencia a eventos o situaciones. Puede ser a partir de hitos relacionados con una aplicación de política de gestión, con cambio climático o intervenciones urbanas.

Fase 3: Identificación de las relaciones entre actores y los servicios ecosistémicos existentes en la zona de estudio

El análisis de las relaciones se hace para un conjunto de actores, de eventos y de afiliaciones entre ellos, los recursos y servicios ecosistémicos. Para identificar las variables relacionales se puede hacer un taller o entrevistas a cada actor o conjuntos de actores.

Fase 4: Sistematización de Matrices y Análisis de las relaciones entre actores

Este paso se realiza cuando la teoría de redes es de tipo cuantitativo. Una vez obtenida la información, se procede a sistematizar las matrices realizadas por los actores (nodos) de la zona en un archivo de Excel. Se pondera y analiza por medio del software UNICET. Después de procesar los datos de las matrices se obtienen los gráficos de las redes y los resultados de los indicadores de centralidad.

Fase 5: Análisis de las redes

Esta fase es solo para el enfoque de teoría de redes cualitativas. Se trata de describir las afinidades o problemáticas entre los actores y los nodos que representan los factores de cambio, los ecosistemas y los servicios ecosistémicos.

- **Dinámica de Sistemas (DS)**

Dinámica de Sistemas es un enfoque de simulación que representa un conjunto de métodos conceptuales y numéricos que se utilizan para comprender la estructura y el comportamiento de sistemas complejos (Forrester, 1971). Estos modelos son representados en ecuaciones diferenciales que se formulan a partir de hipótesis y que cumplen la función de la conceptualización de relaciones causales, retroalimentaciones, retardos y políticas. Sus variables son representadas en diagramas de “niveles y flujos” (Sterman, 2000). La finalidad de los modelos de DS es anticipar posibles comportamientos de un sistema en respuesta a unas perturbaciones; explicar las tendencias observadas y así encontrar soluciones a patrones de conductas problemáticas (Stave & Kopainsky, 2017).

Los modelos de simulación de DS son los que se adecúan mejor para la modelación de los sistemas socio-ecológicos, ya que tienen la capacidad de modelar sistemas complejos como lo son los SSE (Anderies et al. 2004; Sterman, 2000). Adicionalmente, capturan los bucles de realimentación que existen en los SSE generados por las variables endógenas y exógenas; usan simulación computacional que utiliza ecuaciones diferenciales para el análisis cuantitativo; y emplean modelos mentales que permiten la participación de personas expertas para obtener una mejor comprensión de fenómenos sociales relevantes (J.D Sterman, 2000). También, los modelos de DS, poseen la capacidad de enfocarse en niveles estratégicos y macros, haciéndolos eficaces en el tratamiento de problemas (Giraldo, 2013; Meadows, 1969; Sterman, 2002). Las desventajas que tiene este tipo de modelos son la falta de análisis detallado de uno o más componentes del sistema y la poca inclusión y cuantificación de la incertidumbre (Berrio et al., 2018)

Según, Sterman (2000), el proceso de modelación de Dinámica de Sistemas requiere cinco fases secuenciales, las cuales hacen parte de un ciclo y, por lo tanto, no constituyen una secuencia de pasos lineales:

Paso 1: La articulación del problema

En esta fase se define el propósito de la investigación, donde se comienza con el reconocimiento de los patrones de comportamiento existentes en un sistema y que se prolongan en el tiempo. Para evidenciar dichos patrones es necesario poseer soportes o evidencias gráficas denominadas “modos de referencia”, que se definen como datos dinámicos y gráficas que evidencian la evolución de los problemas a lo largo del tiempo. En esta fase, también se identifican las variables del sistema a modelar, el horizonte temporal, el nivel de análisis, y el ámbito de aplicación (Morecroft & Wolstenholme, 2007)

Paso 2: Planteamiento de hipótesis dinámica

La hipótesis dinámica es una representación gráfica de las interacciones y ciclos de realimentación que explican los patrones de comportamiento dentro de un sistema. Para este paso es necesario identificar los diferentes elementos que describen el sistema y sus relaciones, además de determinar la frontera del sistema y con ello, las variables que son consideradas endógenas y exógenas.

Durante la modelación, esta fase está constantemente sujeta a revisiones que implican cambios ya que, paralelamente, se analiza la misma y se observa el mundo real. Para esta fase, se utiliza el Diagrama Causal, herramienta útil que permite observar las relaciones existentes entre variables, de manera gráfica, e indica los retardos y los ciclos que explican el comportamiento del sistema estudiado (Sterman, 2000).

Paso 3: Formulación del modelo matemático

Esta fase consiste en incorporar la hipótesis dinámica a diagramas de flujos y niveles, donde se formulan las expresiones matemáticas que describen las relaciones entre variables. Además, se definen y estiman los parámetros que serán los valores iniciales y los que son considerados constantes, se realiza la calibración del modelo para representar correctamente el modo de referencia y, por último, se hace un análisis de sensibilidad para mejorar el entendimiento del modelo y para localizar los parámetros sensibles del mismo (Morecroft & Wolstenholme, 2007; Sterman, 2000).

Paso 4: Validación del modelo

La fase de validación del modelo se basa en comparar el comportamiento simulado del modelo con el comportamiento real del sistema. Asimismo, cada variable debe corresponder a un concepto del mundo real y cada ecuación debe ser comprobada por la consistencia dimensional. En esta fase se garantiza, primero, que la estructura del modelo represente de la mejor forma posible el sistema real y, segundo, que el comportamiento del modelo represente las dinámicas del sistema real en estudio (Barlas, 1996).

El proceso de validación de un modelo en DS se compone de tres tipos de pruebas que permiten: evaluar la validez de la estructura, el comportamiento de la estructura y el patrón del comportamiento (Barlas, 1996). Las primeras pruebas tratan de comparar la estructura del modelo con la estructura del sistema real. Estas pruebas se clasifican en: empíricas, que revisan la correlación del modelo con información cuantitativa y cualitativa obtenida en el sistema real; y teóricas, que consisten en hacer una relación entre la estructura del modelo e información existente de la literatura (Forrester, 1989). Algunos de los métodos para evaluar la estructura del modelo de DS son: confirmación de la estructura y parámetros, prueba de límites adecuados, pruebas de condiciones extremas, prueba de consistencia adimensional.

Las segundas pruebas evalúan el comportamiento de la estructura del modelo indirectamente mediante la aplicación de ensayos de comportamiento de los patrones generados por el modelo; algunos de estos son: condiciones extremas, sensibilidad del comportamiento y predicciones del comportamiento (Forrester, 1989).

Las terceras pruebas determinan el comportamiento del modelo, el cual enfatiza en la predicción de la conducta en vez de en la predicción de un punto en el tiempo. Algunas pruebas

utilizadas son: la reproducción del modelo, reconocimiento de anomalías, verificación de comportamientos inesperados, análisis de los límites adecuados, sensibilidad en el comportamiento (Forrester, 1989) y uso de estadística descriptiva que evalúa punto por punto el error entre la serie de datos arrojados por el modelo (J.D Sterman, 2000).

Paso 5: Evaluación y diseño de políticas

El diseño de políticas es la creación de estrategias, estructuras y nuevas reglas de decisión, que se evalúan por medio del cambio de valores de parámetros o cambio en la estructura del modelo, tales como: eliminación de retardos, rediseño de niveles y flujo (Sterman, 2000). El objetivo final de esta fase, es hallar las políticas que generan una estabilidad en el sistema (Giraldo, 2013).

Para la evaluación de políticas se debe tener en cuenta su solidez y su sensibilidad a la incertidumbre en los parámetros, la estructura del modelo y el desempeño de los diferentes escenarios alternativos. Por otra parte, las relaciones de diferentes políticas también deben considerarse, debido a que los sistemas reales no son lineales y los efectos de diferentes políticas interfieren entre sí, en ocasiones se refuerzan mutuamente y generan sinergias sustanciales (Sterman, 2000).

1.3. Estudios de simulación de sistemas socio-ecológicos

Las investigaciones realizadas usando los enfoques de modelos de simulación ya mencionados, van desde estudios de la estructura de un SSE hasta las consecuencias a que conlleva un factor de cambio en un SSE determinado. Möllmann et al., (2009), usó un modelo estadístico (estadística multivariada) para el análisis del estado y desarrollo del ecosistema marítimo del Mar Báltico, frente a cambios climáticos y factores de cambios antrópicos, como la sobrepesca. Este estudio se basó en datos históricos de la hidrología de la zona, de nutrientes, -fito y zooplancton, y de pesca. Se evidenciaron los diferentes cambios que ha tenido este ecosistema marino en el tiempo y su capacidad de mantener la resiliencia frente a estos factores.

Otras investigaciones han usado los modelos de simulación para comprobar la eficacia de las diferentes acciones de gestión ambiental direccionadas a la conservación de los ecosistemas, como el realizado por Bousquet & Le Page (2004) que analizó, por medio de una modelación de sistemas multi-agentes (SMA), diferentes documentos dedicados al manejo de ecosistemas y la relación sociedad-naturaleza. Este estudio resalta la capacidad que tiene la modelación SMA de hacer una comprensión con mayor profundidad y efectividad de las diferentes formas de organización (espacial, redes, jerarquías) e interacciones entre diferentes niveles organizacionales.

Se han desarrollado metodologías basadas en modelos de teoría de redes para evaluar las decisiones de gestión encaminadas a garantizar la generación de varios servicios ecosistémicos, en donde se involucren las ciencias sociales y naturales (Bohan, 2016); ejemplo de ello han sido los marcos de redes propuestos por Dee et al. (2017) para evaluar los factores

de cambio y las acciones de gestión que podrían alterar de forma directa o indirecta los servicios ecosistémicos; se unen las redes ecológicas, sociales y económicas, para establecer multi-redes.

Del mismo modo, se han empleado las teorías de redes para realizar análisis de las características estructurales de la gestión de los servicios ecosistémicos, como es el caso de Cardona & Peña Rojas (2018) que, por medio de análisis de redes, lograron describir aspectos de la complejidad social de la gobernanza de los recursos hídricos en la Cuenca Río Grande, en Antioquia Colombia. Con este estudio se encontró que en la zona, a pesar de que existe un gran número de actores interactuando entre sí, su articulación es baja, lo que hace que las acciones de los actores no tengan un impacto significativo. Igualmente, el alto grado de centralidad que hay en la relación entre actores, hace que la información entre estos sea reducida, afectando la gobernanza en la zona.

Así mismo, las teorías de redes se han empleado para crear un modelo participativo a partir de un marco de Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) basándose en servicios ecosistémicos. Dicho marco contó con tres pasos: la identificación de los servicios de ecosistemas relacionados con el agua; análisis de la compensación y sinergia entre usuarios de agua; e implementación de la GIRH basada en ES utilizando el modelo participativo de teoría de redes. El estudio se realizó en el área del oasis de Qira, noroeste de China y los resultados obtenidos demuestran que el modelo desarrollado proporciona una integración efectiva de servicios ecosistémicos en un marco cuantitativo de gestión del recurso hídrico. Además, las evaluaciones de sensibilidad de los escenarios de gestión son aceptadas por el grupo de actores que participaron en la investigación, concluyendo así que cualquier medida de gestión del agua sigue siendo incapaz de mantener la salud del ecosistema en ES relacionados con el agua (Zhang et al., 2015).

Por otro lado, los modelos de Dinámica de Sistemas se han usado para simular la disponibilidad de agua del Río Colorado y la demanda de agua en el Valle de Las Vegas donde, en los últimos años se han evidenciado un crecimiento poblacional acelerado y cambios drásticos en el clima. En este modelo de DS se incluyó la evaluación de diferentes políticas de uso eficiente del agua para el sector doméstico. Esta investigación demostró que la combinación de la reducción de la tasa de crecimiento de la población y las políticas de conservación del agua, podrían ayudar a mantener el caudal superficial del Río Colorado, y así garantizar la entrega del recurso hídrico a la comunidad de Las Vegas (Dawadi & Ahmad, 2013).

Otro objetivo de implementar el modelo de simulación de Dinámica de Sistemas (DS) es evaluar los cambios dinámicos del recurso hídrico y los impactos de medidas y políticas en cuencas hidrográficas. Así como el estudio realizado en la cuenca Weihe en China por Song et al. (2018), que permitió, por medio de un modelo DS, comprender su comportamiento, para proporcionar apoyo en la toma de decisiones y promover el uso sostenible de los recursos hídricos, teniendo en cuenta los factores socioeconómico y del medio ambiente.

Igualmente, los modelos de dinámica de sistemas se han implementado para generar herramientas de evaluación de la relación entre oferta hídrica y la gestión institucional en cuencas rurales. Un ejemplo de lo anterior es el caso del estudio en la quebrada Piedras Blancas, ubicada en el municipio de Guarne, Antioquia que por medio un modelo de DS evaluó la oferta hídrica y la gestión realizada por Empresas Públicas de Medellín - EPM. Como resultado, se

muestra la posibilidad de que en dicha fuente se presente una situación de escasez de agua en el mediano plazo; como medida de mitigación a esta situación, se deberán crear políticas públicas que garanticen la sustentabilidad del recurso hídrico (Zuluaga, 2011).

Otro uso que se les ha dado a los modelos de simulación con Dinámica de Sistemas es la evaluación de políticas diseñadas para la preservación y restauración de ecosistemas estratégicos. El estudio realizado por Pérez-Maqueo et al. (2005) consiste en la propuesta de un marco conceptual para evaluar los Programas de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en México, que permite simular la provisión de los servicios ambientales hidrológicos. Finalmente, este estudio reconoce que el PSAH es un avance en las políticas ambientales mexicanas, debido a que retribuye un beneficio a los poseedores de las tierras donde se generan servicios ambientales.

Capítulo 2

Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, se ejecutaron varias etapas: la primera consistió en la revisión de literatura e informes para el análisis de la estructura del sistema socio-ecológicos de la microcuenca San Pedro. En la segunda fase, se realizó un diagnóstico de la zona de estudio a partir del trabajo de campo, en donde se efectuaron talleres con la comunidad y encuestas a los usuarios del acueducto San Pedro. En la tercera fase, con base en la información obtenida en las dos actividades mencionadas, se identificaron las relaciones entre actores y el servicio ecosistémico de provisión de agua. En la cuarta etapa, se elaboró el modelo de dinámica de sistemas basado en la información obtenida en los puntos anteriores. En la última fase se evaluaron los escenarios que propone la política colombiana para la gestión de la conservación del recurso hídrico. A continuación, se presenta de una forma detallada cada una de estas etapas.

2.1 Zona de estudio

La microcuenca de la Quebrada San Pedro está ubicada en el corregimiento de Santa Elena del Municipio de Medellín (ver Figura 1), en el departamento de Antioquia, entre la cota 2.725 m s.n.m (punto más alto) hasta los 2.530 m s.n.m, punto donde desemboca en la quebrada Santa Elena que se encuentra a su vez en la cuenca del Río Aburrá. La microcuenca San Pedro tiene un área de 202 hectáreas y provee del recurso hídrico a la Corporación de Acueducto Veredal San Pedro, que cuenta aproximadamente con 1034 suscriptores ubicados en las veredas El Plan, El Llano, parte de Santa Elena Central (pertenecientes al municipio de Medellín) y Perico (del municipio de Envigado) (Alcaldía de Medellín, 2005).

Las veredas El Plan, el Llano, Perico y Santa Elena Central, se caracterizan por tener actividades económicas procedentes de la agricultura con cultivos de tomate, flores, fresas, mora, papa y plantas aromáticas, que ocupan pequeñas áreas de suelo y son destinados para el autoconsumo

o comercializados en Medellín, en el corregimiento de Santa Elena y/o en las mismas veredas (Alcaldía de Medellín, 2015). También hay actividades pecuarias en baja proporción con porcinos y aves productoras de huevos (Contraloría Municipal de Envigado, 2015); y existen las actividades económicas de recreación y turismo, comerciales y de servicios (Alcaldía de Medellín, 2015).

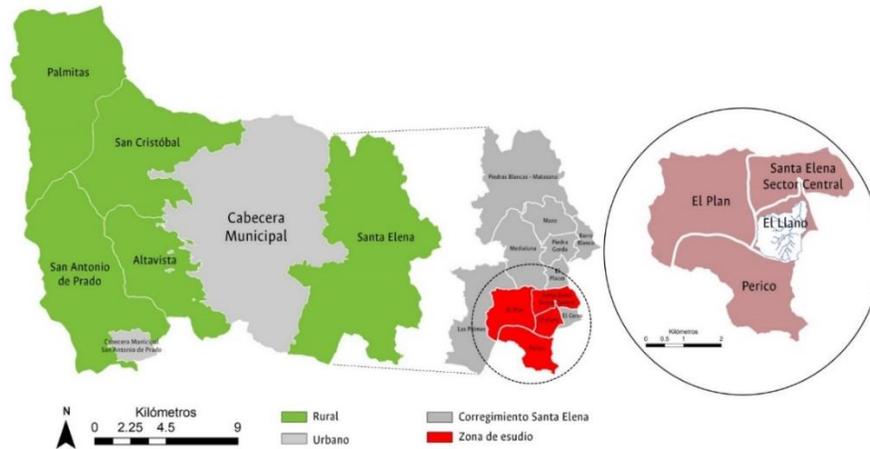


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio¹.
Fuente: Elaboración propia

Las veredas El Plan, Perico y Santa Elena Central se encuentran fuera de la delimitación de la cuenca, pero se incluyen en el estudio porque hacen parte del SSE debido a que en ellas habitan los usuarios del acueducto San Pedro. En las cuatro veredas, habitan aproximadamente 4.487 personas (Urbam, 2018) que se dedican al comercio o agricultura y trabajan por un jornal en cultivos ubicados en otras veredas de Santa Elena o en Medellín; así mismo, se localizan algunas viviendas de personas jubiladas. Esta población está representada por cuatro Juntas de Acción Comunal (JAC) que llevan el nombre de cada vereda. Adicionalmente, existe la asociación de usuarios del Acueducto San Pedro, que se encarga de velar por los derechos y deberes de los consumidores del agua proveniente de la quebrada del mismo nombre (Alcaldía de Medellín, 2015).

En cuanto al bienestar social, en la zona de estudio se encuentran dos escuelas ubicadas en las veredas El Plan y Perico, también está la Institución Educativa Santa Elena, ubicada en la parte central del corregimiento, que cuenta con el nivel de preescolar, grados de transición, básica primaria, básica secundaria, media académica y técnica. Igualmente, el corregimiento cuenta

¹En la figura se encuentra la zona urbana del municipio de Medellín de color gris y la parte rural de color verde. El corregimiento de Santa Elena, ubicado en el margen derecho, está representada de color gris y las veredas en estudio rojo.

con el Centro de Salud Metrosalud, que presta servicios a las personas de estratos I, II y III del SISBEN y a todos los que quieran acceder al servicio de forma particular (Alcaldía de Medellín, 2015). Así mismo, se cuenta con diferentes sitios de encuentro para las actividades sociales y comunitarias como son: las sedes de las Juntas de Acción Comunal, la capilla, tienda El Chispero y el parque principal de Santa Elena. Por otro lado, está el mirador La Paloma, sitio con un gran valor paisajístico regional, desde donde se divisa todo el municipio de Medellín y que posee un valor histórico por ser el camino viejo de la ciudad (Alcaldía de Medellín & Universidad Nacional de Colombia, 2010)

En la parte ecológica, la zona de estudio pertenece a la zona de vida de Bosque muy húmedo montano-bajo (bmh-MB), caracterizado por temperaturas entre los 12 y los 18°C y una precipitación media anual de 2.000 a 4.000 mm. La cobertura del suelo, se caracteriza por tener bosque fragmentado con un área de 692 hectáreas, ubicado en las márgenes del drenaje principal de la quebrada San Pedro y de algunas corrientes; mosaico de cultivo con poca extensión, con un área de 889 hectáreas (RIA, 2017b). En la vereda El Llano se presenta una riqueza hídrica, conformada por las quebradas: El Paraíso, Santa Elena, San Porfin y San Pedro (Alcaldía de Medellín & Universidad Nacional de Colombia, 2010).

2.2 Identificación de actores, servicios ecosistémicos, factores de cambio de uso del suelo y políticas de gestión del recurso hídrico.

En esta sección se describe la metodología empleada para identificar los principales actores (Stakeholders) existentes del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, los servicios ecosistémicos, los factores de cambio y las políticas de gestión del recurso hídrico. La metodología para esta fase se basó en tres actividades: búsqueda de información secundaria, talleres con la comunidad y encuestas a usuarios del acueducto San Pedro².

2.2.1 Revisión y sistematización de información secundaria

La revisión de información secundaria permitió entender las dinámicas territoriales propias del corregimiento de Santa Elena y los conflictos socio ambientales presentes. Adicionalmente, se identificaron los actores con vínculos directos o indirectos con el recurso hídrico y sus atributos. Los actores fueron clasificados como actores sociales y comunitarios, actores institucionales que son los vinculados a organizaciones públicas y actores privados relacionados con entidades privadas.

²Para la realización del taller con la comunidad y la ejecución de las encuestas a los usuarios del acueducto San Pedro, se contó con la asesoría de antropólogas.

Adicionalmente se revisaron documentos de planeación, información demográfica, social, económica y ambiental de la zona de estudio. Se consultaron investigaciones basadas en los efectos de intervenciones forestales de restauración ecológica sobre la regulación hídrica, estudios de las dinámicas territoriales del corregimiento de Santa Elena y modelos de dinámica de sistemas para sistemas socio-ecológicos. En el Anexo A se encuentra la clasificación de los documentos revisados.

2.2.2 Taller con la comunidad

Para el desarrollo del taller se contó con la participación de habitantes de las veredas El Plan, El Llano y Perico. Durante el taller los participantes identificaron, localizaron y priorizaron los servicios ecosistémicos generados y demandados en la zona de estudio. Asimismo, reconocieron las relaciones entre actores y el servicio ecosistémico de provisión de agua.

- **Definición de los servicios ecosistémicos de la cuenca**

Por medio de lluvia de ideas se construyó, con los habitantes que asistieron al taller, el concepto de servicios ecosistémicos. La dinámica consistió en realizar preguntas tales como: ¿qué es un servicio?, ¿qué es un servicio ecosistémico?, ¿sabemos qué es un ecosistema? Las respuestas fueron anotadas y tenidas en cuenta para la construcción de un significado colectivo de SE y así se garantizó el buen desarrollo de las otras actividades propuestas en el taller.

- **Identificación y priorización de los servicios ecosistémicos que poseen las veredas en estudio y la microcuenca San Pedro**

Después de llegar a un consenso grupal del significado de servicios ecosistémicos, se conformaron dos grupos para facilitar la participación de todos en el taller. Cada grupo identificó los SE provenientes de la microcuenca quebrada San Pedro y de zonas boscosas presentes en las veredas, los beneficiarios regionales y locales de dichos SE. Para la recolección de la información y para facilidad de análisis se empleó la siguiente matriz:

Concepto servicio ecosistémico	¿Cuáles tenemos en nuestra vereda/cuenca?	¿Quiénes los usan? (actores)

Para la priorización, los asistentes al taller ponderaron los SE de zonas boscosas existentes en las veredas, de acuerdo con la importancia que tienen estos para: *la vida en las tres veredas*, para *el desarrollo de las actividades diarias de los habitantes* y *los SE trascendentales para las personas y la misma naturaleza*.

- **Identificación de los actores y relaciones**

La identificación de actores existentes en la microcuenca Quebrada San Pedro se basó en la información secundaria recolectada al inicio de la investigación, verificada y complementada por las personas que asistieron al taller.

Esta actividad se ejecutó en plenaria, donde se le preguntó al grupo sobre las instituciones públicas, organizaciones comunitarias y entidades privadas que están relacionadas con los SE identificados y priorizados en el territorio.

Para esta actividad se ejecutaron los siguientes pasos:

- Se clasificaron los actores en tarjetas de colores. Un color para cada uno de los actores: rosado para las instituciones privadas, azul para las públicas y verde para las comunitarias.
- Se identificaron las relaciones que tienen los actores con el servicio ecosistémico de provisión de agua, ubicando las tarjetas que representan los actores, cerca o lejos del SE ubicado en el centro del tablero. Entre más lejos del SE ubicaban las tarjetas que representan los actores, menores las acciones que desarrollan estos actores para la mejora en la provisión del SE.
- Se reconocieron las relaciones entre actores representadas por los participantes con colores de acuerdo con la siguiente clasificación:

Verde: relaciones de apoyo, buena comunicación y articulación para acciones.

Rojo: no hay articulación ni buena comunicación, percepción de falta de presencia, conflictividad o desinterés en los problemas del grupo que analiza la relación.

Azul: no hay comunicación o interacción positiva o negativa entre actores, no aplica, o no se percibe de importancia.

2.2.3 Encuestas a los usuarios del acueducto San Pedro

Las encuestas se realizaron con el objetivo de conocer el uso y la relación que tienen los usuarios del acueducto San Pedro con el recurso hídrico. Constaban de 67 preguntas de tipo binomial, numéricas y abiertas, divididas en seis secciones: en la primera, se hicieron preguntas relacionadas con las características demográficas; en la segunda, se preguntó por la infraestructura para el consumo de agua en el hogar; en la tercera, sobre acciones orientadas a la conservación; en la cuarta, las preguntas fueron sobre el conocimiento, actitudes y percepciones con respecto al uso del agua; en la quinta, las preguntas eran acerca de redes sociales, capital social y confianza; y en la sexta, se abordaron preguntas relacionadas con los servicios ecosistémicos existentes en la zona y los beneficios e importancia que estos traen al desarrollo local; igualmente, se elaboraron preguntas sobre la vulnerabilidad que estos tienen a las acciones antrópicas presentes en la zona (ver Anexo B). Para la evaluación y validación de las preguntas, se llevó a cabo una pre-encuesta donde participaron los guardabosques y empleados del acueducto San Pedro.

Para la estimación de la cantidad de usuarios a encuestar se tuvo en cuenta el número de usuarios del acueducto -1034 para el 2018-, el porcentaje de error de 5% y el número máximo de categorías de respuesta -12-.

Los encuestadores fueron cuatro estudiantes de último semestre del pregrado en Ingeniería Ambiental y cuatro guardabosques de la Reserva Forestal San Pedro, que se capacitaron por medio de un taller realizado en el Aula Ambiental de la vereda Perico, donde se les indicó qué hacer en diferentes casos y la finalidad de cada pregunta. Paralelamente, se realizó la divulgación de la actividad de las encuestas por medio de volantes que fueron adheridos a las facturas del agua y entregados a los usuarios del acueducto San Pedro; así mismo, se ubicaron afiches con información de la encuesta y del proyecto en la Casa de Gobierno de Santa Elena, la Oficina del Acueducto San Pedro y en tiendas de las veredas Perico, El Llano y El Plan.

Se encuestaron 260 usuarios del acueducto San Pedro, distribuidos en las veredas El Plan, El Llano, Perico y parte de Santa Elena Central (ver Figura 2). Se tabularon las encuestas, se analizaron y se emplearon para el modelo de Dinámica de Sistemas y en el análisis de resultados.

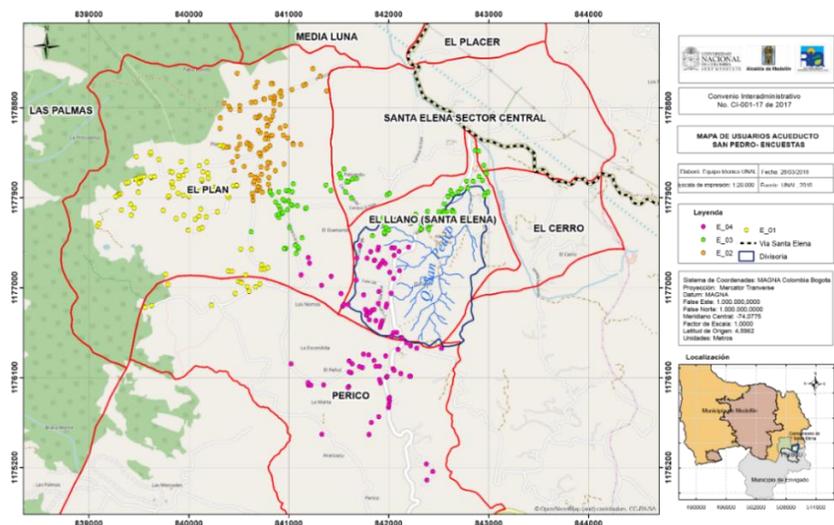


Figura 2. Distribución aleatoria de usuarias a encuestar.

Fuente: Universidad Nacional de Colombia y RIA, 2017

2.2.4 Identificación de usos del suelo a partir de imágenes satelitales.

Se realizó una clasificación de las coberturas del suelo usando imágenes satelitales de DigitalGlobe para los años 2010, 2013 y 2016. Se empleó la metodología de Corine Land Cover adaptada a Colombia para la clasificación de las coberturas (Ministerio del Medio Ambiente, 2010). El uso del suelo se catalogó en tres categorías: territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales.

- **Los territorios artificializados:** están conformados por tejido urbano continuo o discontinuo y áreas verdes artificializadas cuyo uso es diferente al agrícola. Este tipo de territorio incluye centros poblados o ciudades y sus áreas periféricas, las cuales se transforman en un proceso gradual de urbanización o cambio de uso de suelo hacia fines recreativos, industriales o comerciales (Ministerio del Medio Ambiente, 2010).
- **Los territorios boscosos y áreas seminaturales:** son zonas con coberturas arbustiva y herbácea, los bosques densos, abiertos, fragmentados, riparios y plantaciones forestales, así como vegetación secundaria o en transición (Ministerio del Medio Ambiente, 2010).
- **Los territorios agrícolas:** son aquellas zonas que están dedicadas principalmente a la producción de alimentos u otros productos agrícolas. También se incluyen zonas con cultivos permanentes y transitorios, pastos en rotación o en barbecho (Ministerio del Medio Ambiente, 2010)

2.3 Identificación de los nodos que configuran las redes sociales y ecológicas, sus interacciones y su intensidad en la microcuenca San Pedro

Esta etapa tuvo como finalidad conocer las interacciones de los actores de la zona con el servicio ecosistémico provisión de agua, interacciones entre actores, las medidas de manejo de los SE y los factores de cambio que potencialmente afectan su oferta. Su desarrollo se basó en la metodología propuesta por Bodin & Tengö, (2012) y Dee et al., (2017), que consiste en el análisis de las relaciones directas o indirectas que tienen los diferentes nodos con el servicio ecosistémico de provisión de agua. Estas relaciones se caracterizan de la siguiente manera:

- **Uso del suelo–servicio ecosistémico:** consiste en la relación e incidencia que tienen diferentes coberturas y usos del suelo sobre la provisión de agua.
- **Actores–servicio ecosistémico:** este tipo de relación se basa en el análisis de las siguientes interacciones:

Cómo los actores sociales del sistema socio-ecológico bajo estudio se benefician del servicio ecosistémico analizado;

Las incidencias que tienen las acciones o actividades que realizan los diferentes actores en la gestión del recurso hídrico;

Las relaciones existentes entre los actores sociales.

- **Factores de cambio y medidas de manejo–nodos del sistema socio-ecológico:** en este punto se analizó la incidencia que tiene el crecimiento poblacional y la ejecución de políticas de gestión del recurso hídrico en los nodos que componen el sistema socio-ecológico.

Por medio de un diagrama de influencia se representa el sistema para ser cuantificado posteriormente. Dicho diagrama representa visualmente la estructura del sistema socio-ecológico en estudio y fue construido a partir de las relaciones más directas que unen los subsistemas naturales y sociales. A partir de este y la información de recogida en campo, se construye un diagrama causal utilizado para crear la hipótesis de comportamiento del sistema. Con base en estos dos diagramas, se hace un análisis cuantitativo por medio de un modelo de DS, en donde un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias describe las interacciones entre nodos.

2.4 Construcción modelo simulación de Dinámica de Sistemas

La metodología de simulación de Dinámica de Sistemas está basada en modelado de flujos continuos de información que constituyen ecuaciones diferenciales (Stermán, 1992). En los modelos de dinámica de sistemas se usan niveles, que son las variables de estado y representan las cantidades de información acumulada; y flujos, que son los que inciden en la acumulación o agotamiento de los niveles (Morecroft & Wolstenholme, 2007). Para su formulación, fue necesario seguir un proceso iterativo de cinco fases que se describen a continuación:

2.4.1 Articulación del problema

En este paso de la modelación con dinámica de sistemas, se identifica el problema y sus comportamientos, que tienen una variación a lo largo del tiempo. Estos pueden ser representados en el tiempo mediante gráficas denominadas “modos de referencia”. También, se revisa el marco temporal del problema, el nivel de análisis, el ámbito de aplicación y los aspectos que involucran el problema (Morecroft & Wolstenholme, 2007).

2.4.2 Planteamiento de hipótesis dinámica

Para el planteamiento de la hipótesis dinámica se identifican las variables endógenas y exógenas propias del problema a modelar y las relaciones causales existentes entre ellas, para la construcción del Diagrama Causal. A partir del diagrama se reconocen los ciclos de realimentación que se forman a partir de las relaciones causa-efecto que permiten explicar el comportamiento del sistema dinámico (Morecroft & Wolstenholme, 2007).

2.4.3 Formulación del modelo matemático

En este paso se elabora un diagrama de flujos, se pasa el modelo conceptual (Diagrama Causal) a un modelo matemático, para proceder a realizar experimentos de simulación (Morecroft & Wolstenholme, 2007). Para esta investigación, se implementó el software Powersim, en el que se simuló: la dinámica poblacional, el cambio de uso del suelo, la capacidad de abastecimiento del Acueducto Verdal San Pedro y la disponibilidad de agua.

2.4.4 Validación del modelo

La validación de un modelo de DS consiste en evaluar su comportamiento con base en la realidad y así demostrar que el modelo puede replicar el comportamiento del sistema real, para luego simular cambios en algunas de las variables y poder evaluar las políticas. El proceso de validación se ejecuta formalmente después de la construcción del modelo y antes de la fase de evaluación de políticas (Ramírez, 2013).

La validación del modelo de DS incluyó dos componentes; el primero valida la estructura del modelo y, el segundo, valida el comportamiento de los resultados del modelo de tal forma que se obtenga un comportamiento igual al del sistema real.

- **Validación de la estructura del modelo**

Esta prueba tiene como objetivo evaluar si el modelo se comporta parecido a la estructura del sistema real (Barlas, 1996). Para el modelo de DS del sistema socio-ecológico microcuenca San Pedro, se implementaron las pruebas de confirmación de la estructura y parámetros, las condiciones extremas y pruebas de consistencia dimensional.

- **Validación del comportamiento del modelo**

Para la validación del comportamiento del modelo se emplearon ciertas pruebas que evalúan el comportamiento del modelo simulado con los patrones del sistema real. Para esta investigación, se emplearon las pruebas de predicción del comportamiento y condiciones extremas.

2.4.5 Evaluación y diseño de políticas

Una vez realizado y validado el modelo, se procedió a usarlo evaluando los escenarios propuestos. Para esto se hicieron cambios paramétricos que permitieron evaluar diferentes políticas de gestión del recurso hídrico.

Para determinar los escenarios a evaluar, se tuvieron en cuenta las dos opciones existentes para la ejecución del Decreto 953 del 2013: conservar áreas priorizadas para la provisión del recurso hídrico, mediante la adquisición y mantenimiento de dichas áreas y/o financiación de los esquemas de Pago por Servicios Ambientales.

Para el diseño de las políticas basadas en estos esquemas, es importante tener en cuenta el Decreto Ley 870 del 2017 “Por el cual se establece el Pago por Servicios Ambientales - PSA y otros incentivos a la conservación”, que define los PSA como

incentivos económicos en dinero o en especie que reconocen los interesados de servicios ambientales a los propietarios, poseedores u ocupantes de buena fe exenta de culpa por las acciones de preservación y restauración en áreas y ecosistemas estratégicos, mediante la celebración de acuerdos voluntarios entre los interesados de los servicios ambientales y beneficiarios del incentivo.

Los PSA funcionan mediante un acuerdo entre los proveedores y los usuarios; se establece un mecanismo de compensación, monitoreo y control de los acuerdos pactados. Según el Decreto 1007 del 2018, este acuerdo podría ser hasta por cinco años, prorrogables de manera sucesiva, según la evolución del proyecto y los recursos disponibles para cumplimiento del objetivo del incentivo.

Para los tiempos de la modelación de los escenarios relacionadas con PSA, se tuvieron en cuenta, en forma de retardo, los pasos que conforman los procesos de diseño y ejecución de proyectos de pagos por servicios ambientales en Colombia según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Departamento Nacional de Planeación, (2018), estos pasos son: (I) focalización de las áreas y ecosistemas estratégicos, selección y priorización de predios, (II) selección y priorización de los beneficiarios del incentivo, (III) visita a los predios y verificación de coberturas, (IV) estimación del valor del incentivo de Pago por Servicios Ambientales, (V) formalización de acuerdos.

El estudio realizado por la Alcaldía de Medellín, denominando “Compra de tierras para la protección del ecosistema estratégico de regulación hídrica para el consumo humano de la cuenca hidrográfica de la quebrada San Pedro (corregimiento de Santa Elena)”, suministró la información de los valores de área de los usos del suelo de las áreas a reforestar por Pagos por Servicios Ambientales - PSA y por adquisición y mantenimiento de predios, y el valor del área priorizada, la cual fue necesaria para la modelación de las políticas.

En este estudio se priorizaron 94,9 hectáreas compuestas de 36,43 hectáreas de área boscosa y 59,25 hectáreas de suelo agrícola. Solo se adquirieron 54,11 hectáreas y se reforestaron 32,86 hectáreas ubicadas en la parte alta y media de la microcuenca Quebrada San Pedro, por medio del programa Más Bosques para Medellín (MBM), a partir del cual se sembraron árboles nativos tales como: *Cedrela montana*, *Citharexylum subflavescens*, *Podocarpus rospigliosii*; pasando de tener una cobertura de suelos dedicados a la agricultura y ganadería, a tener plantaciones mixtas para la conservación (RIA, 2017b).

En cuanto a los pasos para el diseño y ejecución de esquemas de pagos por servicios ambientales, la Alcaldía de Medellín identificó los predios en donde se encuentran las áreas de importancia para conservar por PSA, de las cuales se reportó que se encuentran fragmentadas, haciendo que el proceso de pago se dificulte. Igualmente, se estipuló un incentivo de 1.14 salarios mínimos mensuales vigentes (SMMLV) por hectárea al año, para predios con bosque natural existente y 2.78 SMMLV por hectárea al año, para predios con áreas a restaurar por el propietario.

Con el modelo de simulación de Dinámica de Sistemas construido y validado, se evalúan los posibles efectos de los siguientes escenarios de política:

Escenario 1: No se aplica la política, es decir, no se cumple con el Decreto 953 del 2013

Este escenario se evaluó con el objetivo de observar las consecuencias dentro del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, de no ejecutarse la política de gestión del recurso hídrico. También se analizó para evaluar los efectos del factor de

cambio de uso del suelo y crecimiento poblacional en la oferta y demanda de agua del sistema socio-ecológico.

Escenario 2: Se aplica la política por medio de adquisición, reforestación y mantenimiento de toda el área priorizada para conservación del recurso hídrico

La finalidad de modelar este escenario es analizar el comportamiento del sistema socio-ecológico al reforestar, mantener y conservar toda el área priorizada. Así mismo, para observar la eficacia de este tipo de medidas de gestión como control en la dinámica poblacional y el comportamiento de la demanda de agua y la oferta hídrica, al restringir área que puede ser artificializada.

Escenario 3: Se aplica la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA por tiempo indefinido en toda el área priorizada para la conservación del recurso hídrico

Este escenario se simula con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la política de adquisición, reforestación y mantenimiento, con los resultados obtenidos a través de un esquema de PSA. Adicionalmente, para evidenciar la eficacia y los efectos que tienen los esquemas de PSA en la zona de estudio, al ser ejecutados exitosamente, garantizando el cumplimiento de los acuerdos financieros y los plazos entre los municipios y los dueños de los predios de importancia hídrica.

Escenario 4: Una parte por adquisición de predios y reforestación, y la otra por medio de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA (Se modelan 3 casos para PSA en que 5, 10 y 15 años después de que el área reforestada sea bosques, cambian a suelo agrícola).

Con esta simulación se quieren evaluar los impactos que se pueden tener en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro al ejecutar la combinación de las dos políticas: adquisición, reforestación y mantenimiento de predios de importancia hídrica, junto con la aplicación de esquemas de PSA. Además, se agregó una discontinuación de la política después de 5, 10 y 15 años, ya sea por incumpliendo de acuerdos entre los municipios y los dueños de predios o por falta de supervisión técnica por parte de los municipios y entidades gubernamentales, después de que esta área reforestada se convierta en bosque maduro.

Los tiempos en los cuales se simulan los cambios de suelo boscoso a agrícola están relacionados con las condiciones de duración de los acuerdos entre el gobierno y los propietarios o poseedores de los predios a incentivar, ya que estos pueden tener vigencia de 5 años o ser prorrogados dependiendo de los recursos económicos disponibles en el municipio, así como de la evolución del proyecto.

Escenario 5: Se aplica la política por medio de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA y después de que el área reforestada sea un bosque, se modela el cambio de área boscosa para agricultura en diferentes porcentajes.

Se simularon diferentes escenarios de fracaso de la política de Pagos por Servicios Ambientales. Para ello, se modelaron los cambios de uso de suelo de bosque reforestado a suelos agrícolas en porcentajes de 80% (47,40 hectáreas), 50% (29,63 hectáreas), 30% (17,75 hectáreas) y 10% (5,926) del área reforestada por este tipo de políticas, después de 5 años. Esta cantidad de años se define, suponiendo que los acuerdos entre el gobierno y los propietarios o poseedores de los predios a incentivar, finalicen por cambio de administración municipal y, con ello, se dé una reducción de incentivos monetarios para el sostenimiento de dichos bosques destinados a la conservación.

La finalidad de modelar esta política es analizar la consecuencia generada por el fracaso de la política de PSA en diferentes escenarios, reflejado en la dinámica poblacional, los impactos en la demanda y oferta de agua y el uso de suelo en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro.

Capítulo 3

Análisis de interacciones entre sistema social y sistema natural del sistema socio-ecológico San Pedro

Los resultados presentados en esta sección sobre los actores, los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso hídrico, los factores de cambio presentes en la microcuenca y las políticas asociadas a la gestión del agua, fueron identificados a partir de la revisión bibliográfica, los talleres a la comunidad y las encuestas a los usuarios del acueducto San Pedro. A continuación, se detallan los resultados.

3.1 Principales actores

Se identificaron dieciséis actores que desarrollan actividades relacionadas con el medio ambiente, en especial con el recurso hídrico en la zona (ver Tabla 1). Estos actores se clasificaron dependiendo de sus funciones en tres sectores: institucional, social y comunitario, sector privados.

- **Sector social y comunitario**

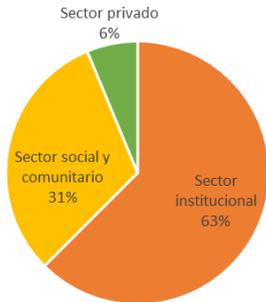


Figura 3. Clasificación de los actores de la zona de estudio.

Los actores que componen este sector están agremiados en organizaciones sociales y comunitarias o aquellos que, sin pertenecer a una organización social específica, tienen interés en el cuidado del medio ambiente y la gestión del territorio de la cuenca San Pedro. Como se muestra en la Figura 3, el 31% de actores de la zona de estudio representan este sector y está integrado por: la comunidad de Perico, la comunidad El Plan, la comunidad El Llano y el acueducto San Pedro.

- **Sector institucional**

El 63% de los actores identificados por la comunidad de la zona de estudio pertenecen a este sector (ver Figura 3). Son actores que hacen parte del sector público y sus funciones son las de promover, ejecutar, apoyar, acompañar y articular o articularse a los procesos de gestión de los recursos naturales. De igual forma, conforman este sector aquellos actores que tienen entre sus funciones las de ser generadores del conocimiento a través de procesos de formación e investigación. Se presentan prestadores del servicio público de la enseñanza y la educación desde el nivel inicial, la básica primaria hasta la secundaria, del sistema de educación colombiano (Ministerio de Educación, 2010). Adicionalmente, hacen parte de este sector algunos actores de conformación mixta (público-privado) que tienen entre sus objetivos el de promover y velar por el bienestar comunitario.

Los actores pertenecientes al sector institucional son: secretarías de Medio Ambiente de Medellín y de Envigado, Casa de Gobierno del Corregimiento de Santa Elena, Corantioquia, Finca Paysandú de la Universidad Nacional de Colombia, Institución Educativa Santa Elena, Escuelas El Plan y Perico y Corporación Parque Arví.

- **Sector privado**

El sector privado está conformado por actores que están asociados de forma autónoma y voluntaria a través de cooperativas u otras formas de organización y que están en función de satisfacer sus necesidades y aspiraciones económicas, sociales y culturales comunes, a través de una empresa de propiedad conjunta y democráticamente controlada. Entre sus acciones tienen algunas veces la promoción de actividades o disponen recursos para temas ambientales. Se mencionaron para este grupo la Cooperativa Coopasana, los turistas y finqueros. Solo el 6% de los actores de la zona pertenecen a este sector (ver Figura 3).

Tabla 1. Información de actores presentes en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro.

Nombre Completo	Tipo De Actor	Ubicación	Objetivo
Acueducto San Pedro	Social y comunitario	Vereda El Llano, Santa Elena	Distribuir el recurso hídrico presente en el cauce superficial de la quebrada San Pedro a los diferentes usuarios ubicados en las veredas El Plan, El Llano y Perico.
Comunidad de El Plan	Social y comunitario	Vereda EL Plan, Santa Elena	Comunidad beneficiaria del servicios de provisión de agua de la quebrada San Pedro
Comunidad de El Llano	Social y comunitario	Vereda El Llano, Santa Elena	Comunidad beneficiaria del servicios de provisión de agua de la quebrada San Pedro
Comunidad de Perico	Social y comunitario	Vereda Perico, Santa Elena	Comunidad beneficiaria del servicios de provisión de agua de la quebrada San Pedro
Casa de Gobierno	Institucional	Santa Elena	Espacios ubicados en la zona rural de Medellín, donde la comunidad encuentra todos los programas y servicios que ofrece la Administración Municipal y sus entidades descentralizadas, con lo que se facilita a las personas el acceso a la oferta institucional.
Secretaria de Medio Ambiente de Medellín	Institucional	Medellín	Garantizar el cumplimiento de la oferta, demanda y las directrices ambientales del Municipio de Medellín a través de la recuperación, protección y conservación de cuencas hidrográficas y ecosistemas estratégicos para contribuir a la sustentabilidad de los habitantes presentes y futuros. Además de se encarga de definir las políticas de Medio Ambiente, así como la planeación, diseño, coordinación, ejecución y evaluación de estrategias de carácter informativo, corporativo, institucional y de movilización de la Administración Municipal
Secretaria de Medio Ambiente de Envigado	Institucional	Envigado	Planificar el uso del suelo municipal, orientando su ocupación y manejo sostenible a partir de sus potencialidades, asegurando su ordenación ambiental, la optimización de su productividad y la prevención y mitigación de los riesgos.
CORANTIOQUIA	Institucional	Medellín	Ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre el medio ambiente y recursos naturales renovables. Dar cumplimiento y oportuna aplicación a la normatividad vigente sobre su disposición, manejo y aprovechamiento, conforme a las regulaciones, pautas y directrices expedidas por el Ministerio del Medio Ambiente
Institución Educativa de Santa Elena	Institucional	Santa Elena	Entidad prestadora del servicio público de la enseñanza y la educación desde el nivel inicial, la básica primaria hasta secundaria del sistema de educación nacional colombiano.

Escuelas de Vereda El Plan	Institucional	Santa Elena	Entidad prestadora del servicio público de la enseñanza y la educación desde el nivel inicial, la básica primaria hasta secundaria del sistema de educación nacional colombiano.
Escuelas de Vereda Perico	Institucional	Santa Elena	Entidad prestadora del servicio público de la enseñanza y la educación desde el nivel inicial, la básica primaria, secundaria hasta el nivel superior del sistema de educación nacional colombiano.
Corporación Parque Arví	Institucional	Santa Elena	Promover y orientar el turismo organizado en el ámbito del Parque Arví para fortalecerlo como destino de naturaleza sostenible. Se encarga de la conservación de la riqueza ambiental, cultural y arqueológica,
UNAL Finca Paysandú	Institucional	Vereda El Llano, Santa Elena	Estación agraria perteneciente a la Universidad Nacional de Colombia donde se realiza docencia, investigación y extensión en los servicios de manejo integral de ganadería de leche, manejo ambiental, mejoramiento genético de papa
Cooperativa Coopasana	Privado	Santa Elena	Prestación de diversos servicios tendientes a satisfacer las necesidades personales y familiares de los asociados y la comunidad en general
Finqueros y turistas	Privado	Medellín y otros municipios aledaños al corregimiento	Propietarios que vienen el fin de semana o que alquilan y prestan sus propiedades con fines recreativos

3.2 Servicios ecosistémicos priorizados

Para la priorización, se definieron los servicios ecosistémicos como los beneficios que los humanos reciben de forma directa o indirecta de las funciones provenientes de los ecosistemas (Costanza et al., 1997). Adicionalmente, los SE identificados por la comunidad se clasificaron de acuerdo con la clasificación propuesta por De Groot et al. (2002), que agrupa los SE en cuatro categorías principales: los que cumplen funciones de regulación, de provisión, de hábitat y de información (ver Tabla 2).

Tabla 2. Servicios ecosistémicos identificados localmente.

Función ecosistémica	Servicios ecosistémicos identificados localmente
(De Groot et al., 2002)	
Función de Hábitat	1. Hábitat de especies
Función de Regulación	2. Calidad del aire 3. Regulación climática
Función de Provisión	4. Provisión de agua dulce 5. Acceso a madera 6. Alimentos
Función de Información	7. Espacio de tranquilidad – paz 8. Recreación y turismo 9. Estético

De las encuestas a la comunidad, se evidenció que el servicio más importante para el bienestar social de la región es la provisión de agua, seguido por la calidad del agua y del aire. En el eje horizontal de la Figura 4 se muestra el número de personas encuestadas que seleccionaron los servicios ecosistémicos como prioritarios para el desarrollo social de la zona.

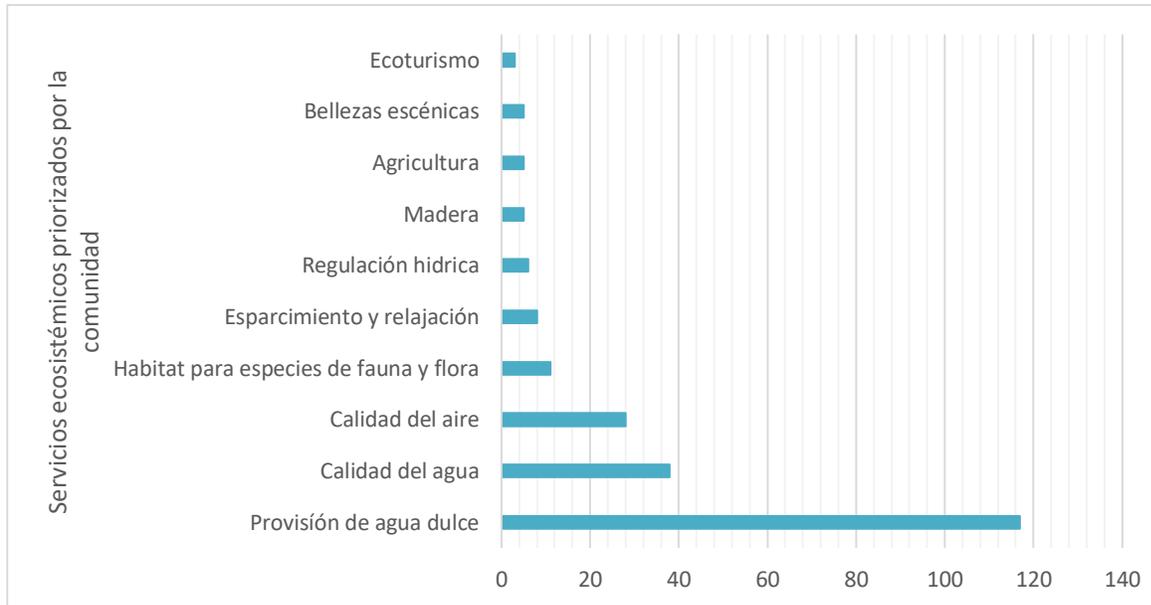


Figura 4. Servicios ecosistémicos más importante para el bienestar social de la zona de estudio, según la percepción de la comunidad.

3.4 Factores de cambio de uso del suelo presentes en la cuenca

A partir de la revisión bibliográfica realizada, las dinámicas territoriales del corregimiento de Santa Elena y las encuestas realizadas en campo, se identificaron dos factores de cambio de uso del suelo: el crecimiento poblacional que es impulsado por personas migrantes de otras ciudades y la ejecución de la política para la gestión del recurso hídrico.

Los factores de cambio de uso del suelo provocados por el crecimiento poblacional están impulsados por diferentes componentes que afectan tanto el tamaño como la composición de la población y los hogares (Zondag & Borsboom, 2009) que, a su vez, generan cambios en el uso del suelo, en cuanto a la decisión de la ubicación y del tamaño de las viviendas (Vélez, 2016). En el sistema socio-ecológico de la microcuenca Quebrada San Pedro, el crecimiento demográfico es influenciado por la formación y disolución de nuevos hogares, que causa la fragmentación de grandes predios, sumado a la migración de personas pertenecientes a los municipios de Medellín, Envigado o municipios del Oriente Antioqueño, que compran o alquilan una residencia para vivir en ella o para habitarla solo los fines de semana, como forma de esparcimiento y/o descanso (Vélez, 2016). Como consecuencia se tiene la reducción de tierras empleadas para la agricultura y ganadería, lo cual indica que se han cambiado las actividades económicas propias de los habitantes nativos de la región.

- **La formación de nuevos hogares**

La fragmentación de los grandes predios destinados a nuevas construcciones se da por fenómenos culturales propios de la población nativa de la zona. Esta población divide los grandes predios para garantizar así que su descendencia tenga una vivienda propia, pasando de tener latifundios a minifundios. Adicionalmente están las dinámicas relacionadas con las tierras heredadas, en las cuales se construyen nuevas viviendas para suplir la demanda de los nuevos habitantes que llegan a la zona o son vendidas para el mismo fin (Zuluaga, 2005).

Los resultados de las encuestas realizadas evidencian también el proceso de formación de nuevos hogares en la zona, lo que provoca un aumento de área artificializada para suplir la necesidad de viviendas. De las encuestas se identifica que el 43% de las personas de la zona son casadas, el 21% solteras, el 19% están en unión libre, el 10% son divorciados y el 7% viudas (ver Figura 5). Igualmente, la formación de nuevos hogares se muestra en la estructura de los hogares, se observa que la mayoría de los hogares del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro tienen una estructura nuclear³ (59%), seguido por hogares sin núcleo⁴ (15%), hogares amplios y extensos⁵ (12%), hogares unipersonales⁶ (11%) y en más poca proporción los hogares amplios y complejos⁷ y los hogares no familiares y sin núcleo⁸ (2%) (Ver Figura 6).

Según el DNP (2014) los hogares colombianos se pueden clasificar según su estructura como:

³ hogares nucleares son familia compuestas por la pareja con o sin hijos que viven en el mismo hogar.

⁴ hogares sin núcleo son aquellos cuyos miembros no tienen ninguna relación por núcleo conyugal primario o una relación padre/madre-hijo/hija, pero sí hay otras relaciones de parentesco de primer o segundo grado de consanguinidad.

⁵ hogares amplios y extensos son aquellas familias conformadas por un hogar nuclear más otros parientes.

⁶ hogares unipersonales conformados por una sola persona.

⁷ hogares amplios y complejos son aquellos conformados por un hogar nuclear (con o sin otros parientes) más otros no parientes

⁸ hogares no familiares y sin núcleo son los conformados por hogares en los cuales no existe ninguna relación o parentesco

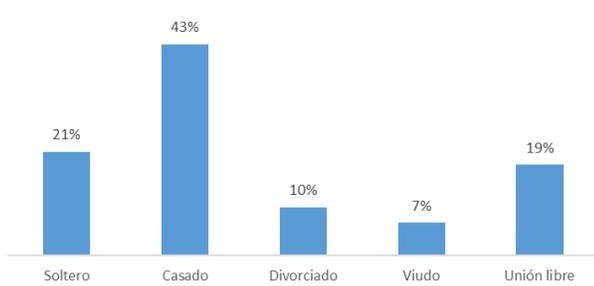


Figura 5. Estado civil de los habitantes de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

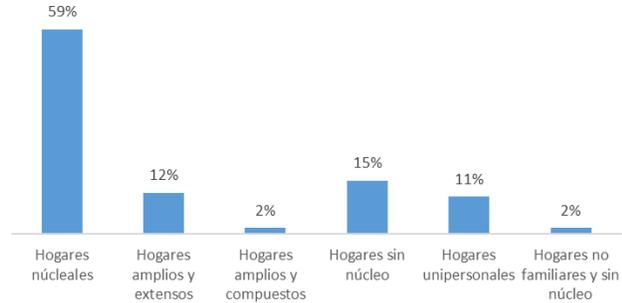


Figura 6. Conformación de los hogares de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

• Proceso de migración

El corregimiento de Santa Elena es una zona de interés para las personas que desean vivir en un lugar tranquilo, pero cerca de la urbanización. Esta zona se encuentra entre los valles de San Nicolás y del Aburrá, dos áreas metropolitanas con la mayor concentración de población del departamento de Antioquia, donde se encuentra una gran parte de las industrias y servicios. Adicionalmente, el corregimiento de Santa Elena está atravesado por la vía que comunica a los dos valles y a estos con el Aeropuerto Internacional José María Córdova, convirtiéndola en una zona de articulación y limítrofe en expansión urbana entre los dos sistemas urbanos (Zuluaga, 2005). En cuanto a la oferta de transporte público, la zona cuenta con el sistema de transporte ofrecido por la empresa Trasancoop que ofrece los trayectos de Santa Elena–Medellín–Santa Elena y opera los siete días de la semana de 4:00 am a 10:00 pm; para el transporte entre veredas hay automóviles que prestan el servicio de taxi o colectivo. En los servicios públicos, la zona de estudio cuenta con agua potable suministrada por el acueducto San Pedro, energía, internet y telefonía.

Los resultados de las encuestas evidencian que el 29% de las personas que habitan en la zona son procedentes de Medellín, seguidas por el 11% de personas provenientes de otras veredas de Santa Elena, de otros lugares (como el exterior del país u otras ciudades del país) el 9%, de municipios del oriente antioqueño el 5% y de Envigado el 3% (Ver Figura 7). Este fenómeno de migración se presenta por el bienestar que ofrece la zona, ya que tiene una infraestructura vial en buen estado, existen entidades que prestan servicios públicos y transporte público de calidad, además del factor evidente de huida del caos de las ciudades. (Zuluaga, 2005).

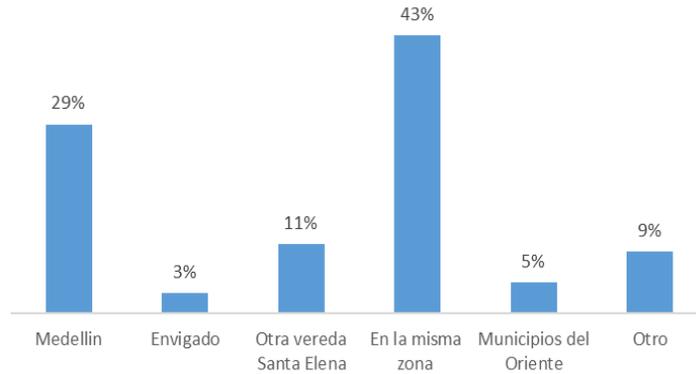


Figura 7. Lugar de origen de los habitantes de la zona

En la zona de estudio solo el 5% de las personas encuestadas corresponde a población flotante, esto es, poseen una vivienda en la zona destinada para su descanso y recreación y la habitan desde 2 veces por semana hasta una vez cada tres meses (ver Figura 8). Estas dinámicas de habitar el territorio generan cambios en los valores sociales y culturales que se traducen en cambios de uso del suelo.

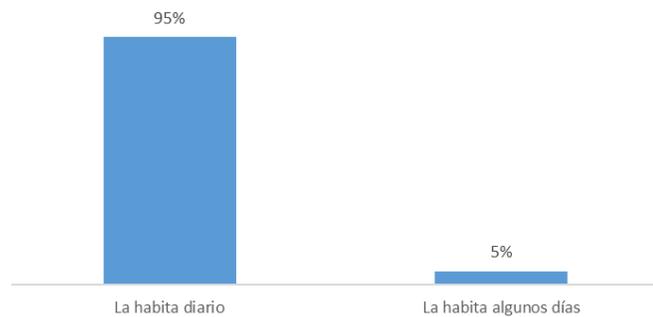


Figura 8. Frecuencia de las personas que habitan las casas ubicadas en la zona de estudio

Las preferencias que tienen las personas que decidieron habitar o poseer una segunda vivienda en la zona de estudio están basadas en su comodidad y calidad de vida, ya que muchos lo hicieron como una forma de huir del caos de las ciudades en búsqueda de tranquilidad (52%), otros por la contaminación de las ciudad o calidad ambiental (20%). Asimismo, existen personas que toman la decisión por factores más sociales y culturales tales como: la tradición porque llevan toda la vida viviendo allí (17%), trabajo, seguridad social o porque tiene un gusto especial por el campo (ver Figura 9).

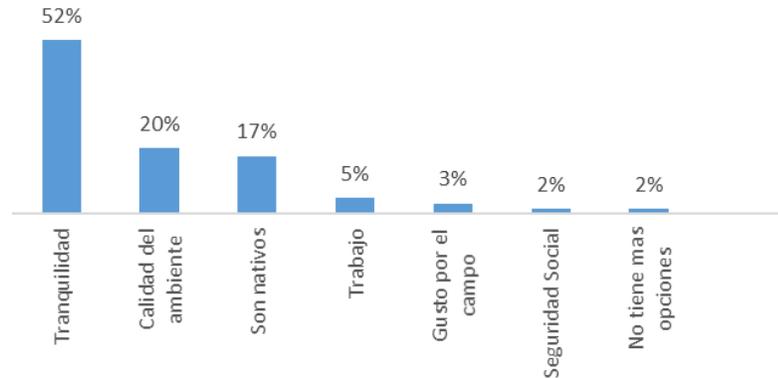


Figura 9. El interés de las personas por vivir en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

- **Políticas asociadas a la gestión del recurso hídrico**

La política para la gestión del recurso hídrico ejecutada en el sistema socio-ecológico de la microcuenca Quebrada San Pedro, es la dictada por el artículo 111 de la Ley 93 de 1993 y el Decreto 953 del 2013, que se enfoca en conservar y recuperar áreas de importancia para el recurso hídrico por medio de la adquisición y mantenimiento de predios o de la financiación de esquemas de pago por servicios ambientales – PSA. Los dos métodos propuestos para conservar parten de la priorización de áreas importantes para la conservación o restauración del recurso hídrico, pero se diferencian en que la primera compra los predios priorizados que son reforestados generando un área boscosa permanente. En cambio, en la segunda se realiza un convenio entre las autoridades ambientales o municipios y los dueños de predios ubicados en el área priorizada, que en algunos casos tienen que ser reforestadas por los mismos dueños; el convenio se hace por un estímulo monetario u otros incentivos como la exoneración del 100% del pago del impuesto predial. Esta opción tiene el riesgo de no ser cumplido completamente, ya que depende de la continuidad de los contratos o acuerdos, de que el incentivo sí sea rentable para los dueños de los predios y de la vigilancia del convenio o contrato para garantizar su cumplimiento y la vigencia de la ley.

La ejecución de estas normas se ha complementado con otras leyes y decretos a nivel nacional y regional, que dan lineamientos a los municipios y a las autoridades ambientales para la adquisición de predios o para el desarrollo de esquemas de pagos por servicios ambientales. La Tabla 3 presenta una síntesis de cada una de estas.

Tabla 3. Normas que regulan la conservación y recuperación de las áreas de importancia para el recurso hídrico.

Política	Artículo	Declaración	Eje De Importancia
Ley 99 del 1993	Artículo 111	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema	Para la conservación del recurso hídrico que surte de agua a los acueductos municipales y serán los municipios los que dedicarán el 1% de sus ingresos totales para la adquisición y mantenimiento de

		Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. Adquisición de áreas de interés para acueductos municipales.	las áreas o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales
Ley 1450 de 2011	Artículo 210	Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. Artículo 210 sobre adquisición de áreas de interés para acueductos municipales.	Las directrices a las Autoridades Ambientales para la realización de priorización de las áreas estratégicas para la conversación del recurso hídrico.
Decreto 953 2013	Todos los artículos	Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 y el artículo 210 de la Ley 1450 de 2010”	Se reglamentan las dos anteriores leyes, se dan los lineamientos para: <ul style="list-style-type: none"> • La identificación, delimitación y priorización de áreas de importancia estratégica para la conservación del recurso hídrico. • La selección de predios para la ejecución de proyectos de pago por servicios ambientales.
Decreto 870 del 2017	Todos los artículos	Por el cual se establece el Pago por Servicios Ambientales y otros incentivos a la conservación.	Se elimina la obligatoriedad de compra a los 5 años y se dispone de un acuerdo por tiempo definido con cada municipio determinará.
Decreto 1910 del 2016 y Decreto 602 del 2018	Todos los artículos	“Por el cual se reglamenta el pago por servicios ambientales hídricos, en el municipio de Medellín y se dictan otras disposiciones”.	Reglamentan los pagos por servicios ambientales. Se dan los criterios de priorización para la aplicación del instrumento en los predios elegibles para la aplicación de pagos por servicios ambientales, para la determinación del incentivo y de su valor, los desembolsos de los recursos.

Para el caso de la microcuenca Quebrada San Pedro, la Alcaldía de Medellín, por medio del Programa Más Bosques para Medellín (MBM), se priorizaron 95,68 hectáreas. Esta área, antes de la ejecución de la política, estaba compuesta por: 15% de bosque natural, 8% plantaciones, 2% rastrojos alto y 8%bajo, 20% cultivos y 47% pastos (ver Figura 10).

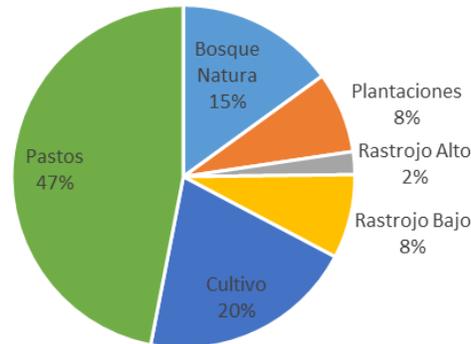


Figura 10. Cobertura de área priorizada antes de la ejecución de la política.

Para el cumplimiento de la política de gestión del recurso hídrico, la Alcaldía de Medellín adquirió 54,11 hectáreas ubicadas en la parte alta y media de la microcuenca San Pedro; de estas se reforestaron 32,86 hectáreas que eran dedicadas a cultivos y pastos de ganadería con árboles nativos. Como lo muestra la Figura 11, con la ejecución de esta política se evidencia un crecimiento en la cobertura boscosa en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, ya que se pasó de tener 661 hectáreas de bosque en 2010 a tener 694 hectáreas en 2013; se redujeron las coberturas agrícolas, pasando de un área de 986 hectáreas en 2010 a 889 en 2016 y un aumento en las coberturas artificializadas, pasando de tener un área de 151 hectáreas en 2010 a 215 para el 2016.

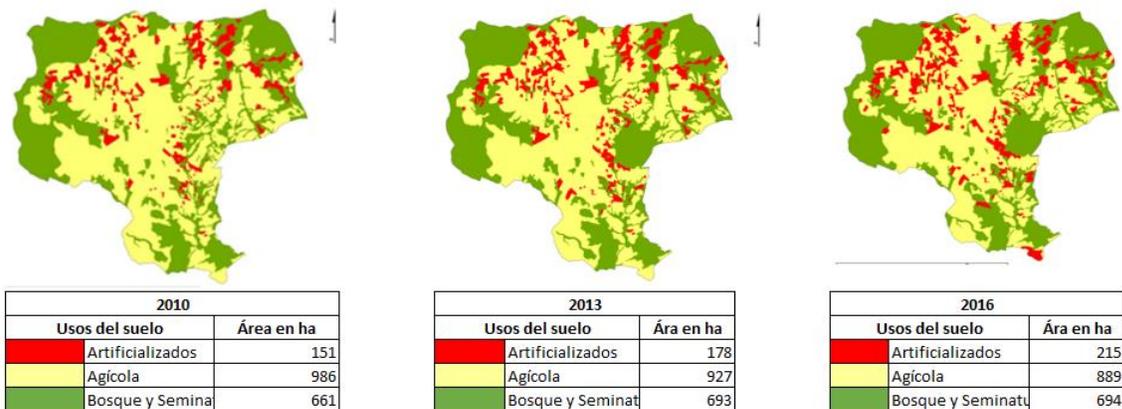


Figura 11. Cobertura de suelo en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro. Años 2010-2013 y 2016.

Por otro lado, 41.57 hectáreas restantes del área priorizada quedaron incluidas para el proceso de financiamiento de Pagos por Servicios Ambientales, de las cuales 15.18 hectáreas están destinadas a bosque y 26.39 a cultivos y pastos para ganadería (HOLOS; Alcaldía de Medellín, 2005).

3.5 Interacciones e intensidad de las redes sociales y ecológicas en la microcuenca San Pedro

La teoría de redes es una herramienta de evaluación que implementa un procedimiento que puede ser usado para comprender las interacciones entre funciones, servicios de los ecosistemas, actividades sociales y económicas de los seres humanos. Las redes están compuestas por nodos que representan los actores (especies de las redes ecológicas e individuos u organizaciones en redes sociales) que están unidos por enlaces que muestran las diferentes interrelaciones entre los nodos (Bodin & Tengö, 2012; Dee et al., 2017).

La red social del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro está conformada por los diferentes actores identificados en la actividad del taller con la comunidad (ver Figura 3.1 Principales actores y Tabla 4). En la red del sistema socio-ecológico los tipos de actor están representados en círculos de colores: amarillo, actores sociales y comunitario; rojo, actores institucionales; morados, actores privados (ver Tabla 4).

Tabla 4. Nodos de la red social de la microcuenca San Pedro

Representación de la red	Tipo de actor
	Actores sociales y comunitario
	Actores institucionales
	Actores privados

En cuanto a los nodos que conforman la red ecológica, se tienen en cuenta las coberturas de los suelos de cultivos, bosques y pastos, que tienen una oferta potencial de servicios ecosistémicos y están representados en la red en cuadros de color verde. Del mismo modo, está el servicio ecosistémico priorizado por la comunidad, provisión de agua, representado con triángulos azules en la red. En la Tabla 5 se muestran los nodos de la red ecológica y su representación en la red.

Tabla 5. Nodos de la red ecológica de la microcuenca San Pedro

Representación En La Red	Nombre De Nodo
	Uso de suelo de pasto
	Uso de suelo cultivo
	Uso de suelo bosque
	Servicio ecosistémico disponibilidad de agua

Adicionalmente, se tiene en cuenta el factor de cambio endógeno de crecimiento poblacional (representado en la red con un rombo color gris) que genera afectaciones tanto en el sistema social como natural; y la ejecución de la política de gestión del recurso como medida para mitigar y frenar los impactos ocasionados por el crecimiento demográfico al sistema hídrico de la zona de estudio (representado con un pentágono naranja). Tanto el factor de cambio endógeno como la medida ocasionan cambio de uso del suelo, modificando la estructura inicial del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro (ver Tabla 6).

Tabla 6. Nodos de factor de cambio endógeno y medidas de manejo

Representación En La Red	Nombre De Nodo
	Factores de cambio: crecimiento poblacional
	Ejecución de Políticas gestión del recurso hídrico

Redes ecológicas y redes sociales

Este tipo de relaciones se analizan a partir de las conexiones existentes entre los diferentes nodos que componen la red. Puede ser directa (color gris) o indirecta (color azul).

La relación es directa cuando las acciones de un nodo impactan directamente de forma positiva o negativa a otros nodos; y es indirecta, cuando las acciones de un nodo afectan indirectamente a otro, por ejemplo: la comunidad se beneficia indirectamente del servicio de provisión de agua porque se requiere de un intermediario como el acueducto San Pedro.

Por su parte, la intensidad se refiere al tipo de impacto o incidencia que genera un nodo sobre otros. Para la elaboración de la red del sistema socio-ecológico se definen tres tipos de intensidad: la baja (flechas delgadas) indica que el tipo de incidencia es de bajo impacto; la media (flecha punteada) que muestra que el tipo de incidencia tiene un impacto medio, ya sea positivo o negativo en el nodo, y alta (flechas gruesas) hace referencia a la fuerte o alta incidencia, impacto o beneficio que hay en la relación entre un nodo y otro.

Red ecológica

- **Usos del suelo – Servicios ecosistémicos**

La relación entre los usos del suelo y el servicio ecosistémico de provisión de agua se basa en los procesos y componentes de la filtración, retención y almacenamiento, riego natural y

drenaje y regulación del cauce (De Groot et al., 2002) que brinda cada tipo de cobertura vegetal terrestre (Brauman et al., 2007),

En Tabla 7 y en la Figura 12 se muestra que el uso de suelo boscoso tiene una relación directa de mayor intensidad con el servicio ecosistémico de provisión de agua, debido a que este tipo de cobertura es más eficiente en la función de regulación hídrica y, con ello, aumenta la probabilidad de provisión de agua en cualquier periodo del año, atenuando los picos en el caudal de agua superficial. Los otros tipos de suelo, cultivos y pasto, también tienen participación como reguladores hidrológicos, pero su incidencia es menor ya que su capacidad de regulación hídrica es menor (Suescún et al., 2017).

Tabla 7. Vinculación entre nodos de usos del suelo y servicios ecosistémicos

Vínculo	Tipo de relación		Intensidad
	Directa	Indirecta	
Cobertura de suelo boscoso-provisión de agua			
Cobertura de suelo cultivo-provisión de agua			
Cobertura de suelo pasto-provisión de agua			

Para tipo de relación:

Color gris: indica el vínculo entre la cobertura y el servicio ecosistémico de provisión de agua es directa.

Para Intensidad:

Flecha gris gruesa: muestra que el tipo de relación entre la cobertura de suelo y el servicio ecosistémico provisión de agua es directo y con un mayor impacto. Flecha gris delgada: muestra que la relación es directa, pero con poca incidencia.

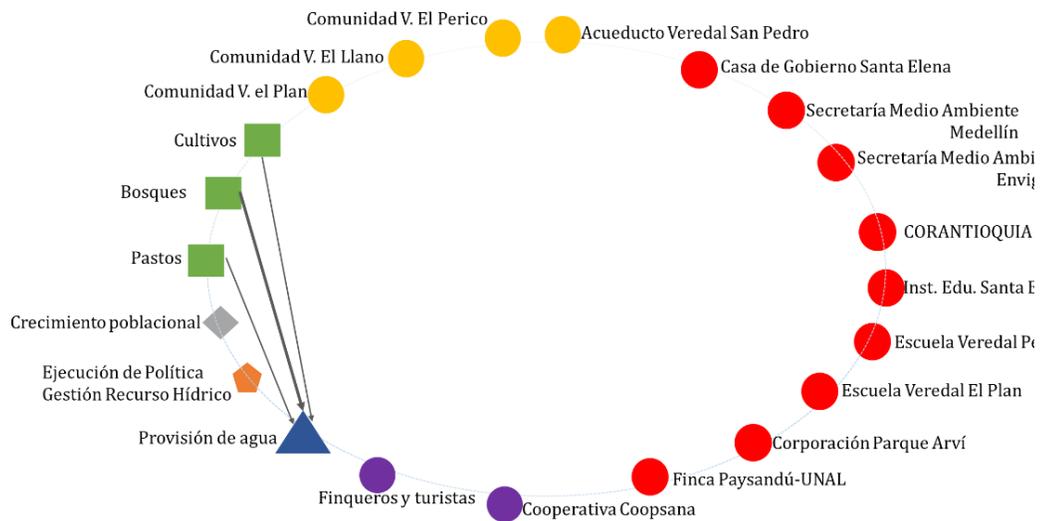


Figura 12. Relaciones entre los nodos de uso del suelo y servicios ecosistémico

Red social

- **Servicios ecosistémicos – tipo de actores**

El primer tipo de vínculo de esta relación se basa en los beneficiados por el servicio ecosistémico de provisión de agua y la intensidad se asigna dependiendo del consumo de agua.

Como se muestra en la La Casa de Gobierno Santa Elena, la Institución Educativa Santa Elena, Cooperativa Copsana, la Corporación Parque Arví, las secretarías de Medio Ambiente de los municipios de Medellín y Envigado y CORANTIOQUIA no se benefician del servicio ecosistémicos de provisión de agua, proveniente de la microcuenca San Pedro, debido a que son usuarios de otro acueducto, están ubicados en otras veredas de Santa Elena o en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Tabla 8 y en la Figura 14, el actor que tiene una relación directa y tiene mayor beneficio del servicio ecosistémicos de provisión de agua es el Acueducto San Pedro. Este actor comunal y social es el encargado de potabilizar y distribuir el agua proveniente de la quebrada San Pedro a la comunidad de las veredas El Plan, El Llano y Perico. Estas usan directamente el agua de la quebrada San Pedro que en conjunto con el Acueducto veredal desarrollan una co-producción del servicio ecosistémico de disponibilidad de agua potable para consumo humano. En cuanto a la incidencia, es menor para las comunidades de las veredas El Llano y Perico que, como se muestran en la Figura 13, no consumen tanta agua como la comunidad de la vereda El Plan (6.699 m³/mes).

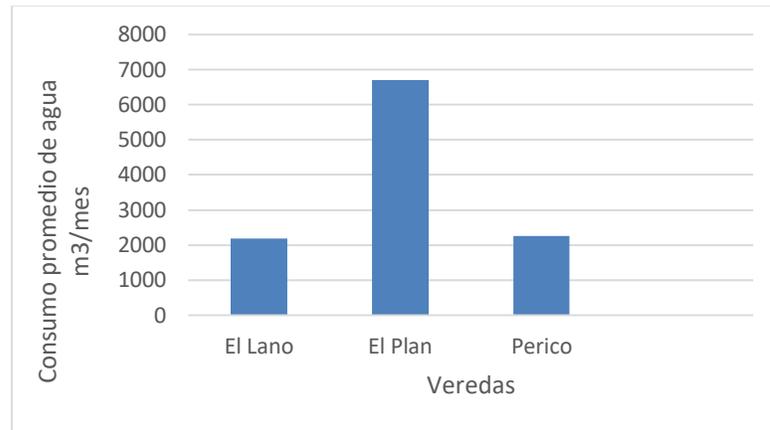


Figura 13. Consumo de agua promedio de las veredas El Llano, El Plan y Perico

Los finqueros (grandes agricultores) y turistas hacen parte de la comunidad de las tres Veredas, por ello usan el agua suministrada por el acueducto San Pedro para actividades domésticas y según lo expresado en las actividades de campo, utilizan otro tipo de fuentes hídricas para desarrollar sus actividades como recolección de agua lluvia y compra de agua embotellada. Por lo anterior, la relación que estos tienen con el servicio ecosistémico de provisión de agua de quebrada San Pedro, es indirecta y de poca incidencia⁹. De esta misma forma, las escuelas de Perico y El Plan utilizan el agua de la quebrada San Pedro por medio del acueducto San Pedro, que se encarga de abastecerlos; así, la relación de estos actores con el servicio ecosistémico de provisión de agua es indirecta y de incidencia baja.

La Casa de Gobierno Santa Elena, la Institución Educativa Santa Elena, Cooperativa Copsana, la Corporación Parque Arví, las secretarías de Medio Ambiente de los municipios de Medellín y Envigado y CORANTIOQUIA no se benefician del servicio ecosistémicos de provisión de agua, proveniente de la microcuena San Pedro, debido a que son usuarios de otro acueducto, están ubicados en otras veredas de Santa Elena o en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Tabla 8. Vinculación entre el nodo de servicio ecosistémico de provisión de agua y los actores sociales

Vínculo	Tipo de relación		Intensidad
	Directo	Indirecto	
Servicio ecosistémico-Comunidad vereda El Plan			↘

⁹ Es pertinente recordar que se definió como una relación indirecta porque se requiere la co-producción del servicio a través de un intermediario: el Acueducto San Pedro.

Vínculo	Tipo de relación		Intensidad
	Directo	Indirecto	
Servicio ecosistémico-Comunidad vereda Perico			→
Servicio ecosistémico-Comunidad vereda El Llano			→
Servicio ecosistémico-Acueducto veredal San Pedro			→
Servicio ecosistémico-Escuela veredal Perico			→
Servicio ecosistémico-Escuela veredal El Plan			→
Servicio ecosistémico-Finqueros y turistas			→

Para tipo de relación:

El color gris: indica que el vínculo entre el servicio ecosistémico y los actores sociales es directo.

El color azul: hace referencia a los vínculos indirectos entre estos dos tipos de nodos.

Para Intensidad:

La flecha gruesa gris: muestra que el tipo de relación entre el servicio ecosistémico y los actores es directo y que presenta un mayor beneficio.

La flecha azul gruesa: indica que el servicio ecosistémico y el actor tienen una vinculación indirecta y con mayor beneficio.

La flecha azul delgada: evidencia una relación indirecta y con poco beneficio.

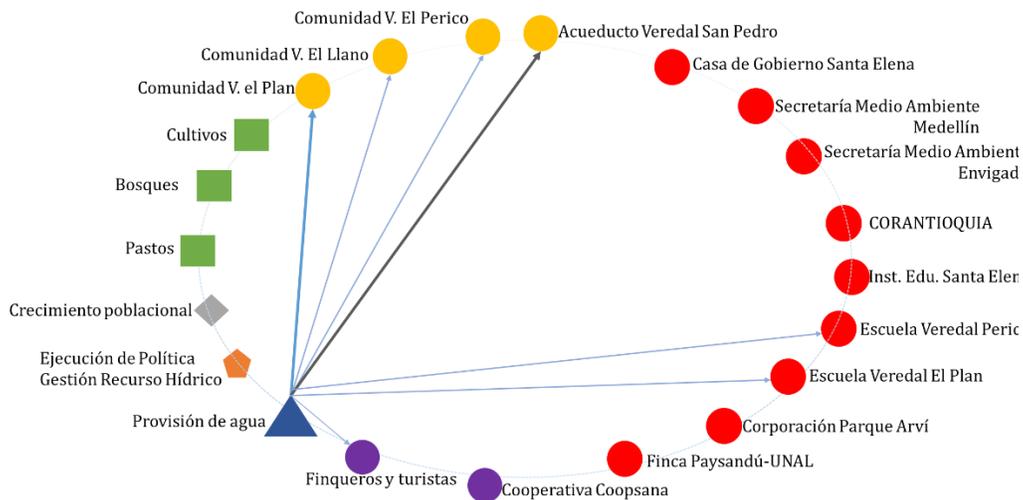


Figura 14. Relaciones entre el nodo de servicio ecosistémico y actores sociales

• **Actores-Servicios ecosistémicos**

El segundo tipo de vínculo entre el servicio ecosistémico de provisión de agua y los actores del sistema socio-ecológico, consiste en las incidencias que tienen las acciones o actividades que realizan los diferentes actores en la gestión del recurso hídrico. Para hallar este tipo de vínculos fue necesaria la revisión de información secundaria, en donde se estudió la misión de cada actor institucional. Además, se revisó la información suministrada por la comunidad sobre las actividades que estos actores realizan en la zona.

Como se muestra en la Figura 15 y en la Tabla 9 el actor que tiene una relación directa y una intensidad mayor con el servicio ecosistémico de provisión de agua es el acueducto veredal San Pedro, debido a que es el actor que realiza continuas acciones de gestión, como supervisar que no haya fugas o daños en el sistema del acueducto y si hay, solucionarlo; realizar tratamiento químico del agua proveniente de la quebrada San Pedro para garantizar la calidad del recurso; igualmente, garantizar el suministro de agua potable a sus usuarios ubicados en las veredas El Plan, El Llano, Perico y parte de Santa Elena Central.

Otro actor cuyas acciones tienen incidencia directa en la provisión de agua es CORANTIOQUIA, ya que por medio del programa PIRAGUA realiza mediciones de precipitación e impulsa la gobernanza del agua. Adicionalmente, la comunidad afirma que esta entidad instaló pozos sépticos de aguas negras y los capacitó para el correcto uso los mismos, evitando que la quebrada San Pedro presente contaminación. La Secretaría de Medio Ambiente de Medellín es un actor que ha realizado acciones en pro de la conservación del agua de una forma indirecta, pero con un impacto significativo. Este actor fue el encargado de ejecutar el Decreto 953 de 2013 ya mencionado, que consistió en la siembra de árboles nativos y la realización del mantenimiento del proyecto de reforestación ecológica.

Los actores con una relación indirecta y cuyas actividades tienen incidencia media en el recurso hídrico, son: la Institución Educativa Santa Elena, la Escuela Veredal Perico y la Escuela Veredal El Plan, en las que, según la comunidad, se promueve el cuidado del medio ambiente y ejecutan acciones en pro de este, como la recolección de basura, reciclaje, entre otros, que son importantes para el recurso hídrico que impacta la provisión de agua directamente.

De igual forma, el actor Corporación Parque Arví, tiene una relación indirecta con la provisión de agua y la incidencia de sus acciones es media, debido a que este actor solo brinda asesoría a la comunidad que quiera sembrar árboles en sus predios y, en ocasiones, dona semillas de árboles nativos.

Los actores comunitarios y sociales faltantes (comunidades de la vereda El Plan, El Llano y Perico) y los actores Finca Paysandú-UNAL, Cooperativa Coopsana y Finqueros y turistas, no tienen relación con el servicio ecosistémico, debido a que no se identificó ninguna acción a favor de la provisión de agua.

Tabla 9. Vinculación entre los nodos de actores sociales y el servicio ecosistémico

Vínculo	Tipo de relación		Intensidad
	Directo	Indirecto	
Acueducto Veredal San Pedro-servicio ecosistémico			
Secretaría Medio Ambiente Medellín-servicio ecosistémico			
CORANTIOQUIA-servicio ecosistémico			
Institución Educativa Santa Elena-servicio ecosistémico			
Escuela Veredal Perico-servicio ecosistémico			
Escuela Veredal El Plan-servicio ecosistémico			
Corporación Parque Arví-servicio ecosistémico			

Para tipo de relación:

El color gris: indica que el vínculo entre los actores y el servicio ecosistémico es directo.

El color azul: hace referencia a los vínculos indirectos.

Para Intensidad:

La flecha gruesa gris: muestra que el tipo de relación entre los actores y el servicio ecosistémico es directo y que presenta un mayor impacto.

La flecha azul y gruesa: indica que los actores - servicio ecosistémico tienen una vinculación indirecta y con mayor impacto.

La flecha azul y punteada: evidencia una relación indirecta y con un impacto medio

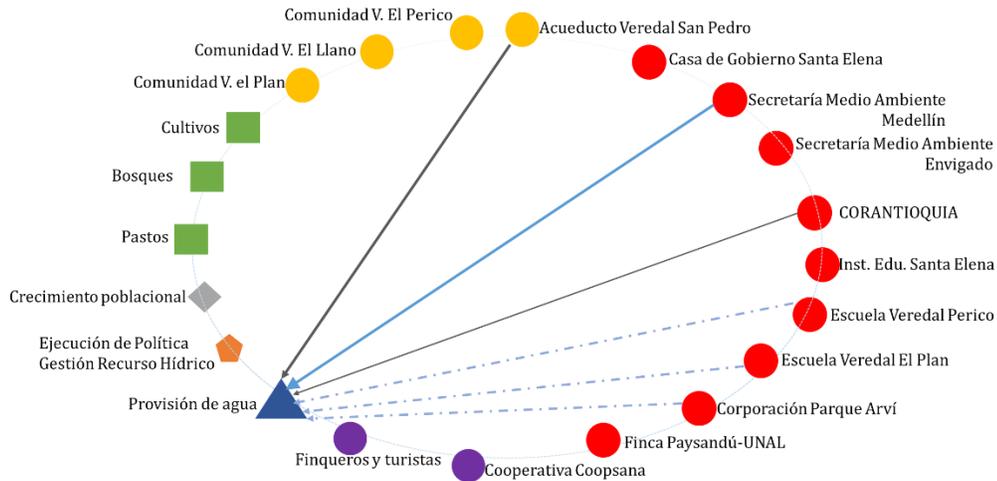


Figura 15. Relaciones entre los nodos de actores sociales y el servicio ecosistémico

- **Actores-actores**

Este tipo de relación se basa en los resultados del taller realizado con la comunidad, donde se levantó información sobre la percepción que esta tiene con respecto a los actores que realizan alguna acción en la gestión del recurso hídrico y el tipo de relación que se tiene entre los actores. Es necesario aclarar que solo se hizo un taller con comunidad de las veredas El Plan, El Llano, Perico y Santa Elena Central, donde se conocieron las relaciones que ellos tienen con los actores de la cuenca. No se hizo otra actividad para conocer las relaciones de los otros tipos de actores (institucionales, privados). La representación de la relación entre actores se evidencia en la cercanía entre estos y se define como relación directa o indirecta, el tipo de relación (asertiva o conflictiva) y el tipo de intensidad.

Como puede evidenciarse en la Figura 16, los actores de la comunidad de las veredas El Plan, El Llano, Perico y Santa Elena Central, establecen o presentan una mayor relación de apoyo con los actores del sector institucional como CORANTIOQUIA y la Corporación Parque Arví, ya que poseen buena comunicación y permiten la articulación para las acciones que se emprenden en función de la provisión de agua. Por otra parte, se identifican relaciones conflictivas y de desinterés, así como la no existencia de articulación ni buena comunicación, entre los actores del sector social y comunitario con los actores institucionales, como la Casa de Gobierno de Santa Elena y la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín. Adicionalmente, entre los actores comunitarios y actores privados como los finqueros y los turistas no se cuenta con una buena relación debido a que sus acciones contribuyen al deterioro de recurso hídrico.

En cuanto a las relaciones con poca o nula interacción y total falta de comunicación, son entre los actores del sector comunitario con los del sector institucional, principalmente con el municipio de Envigado, las instituciones educativas, y la finca Paysandú.

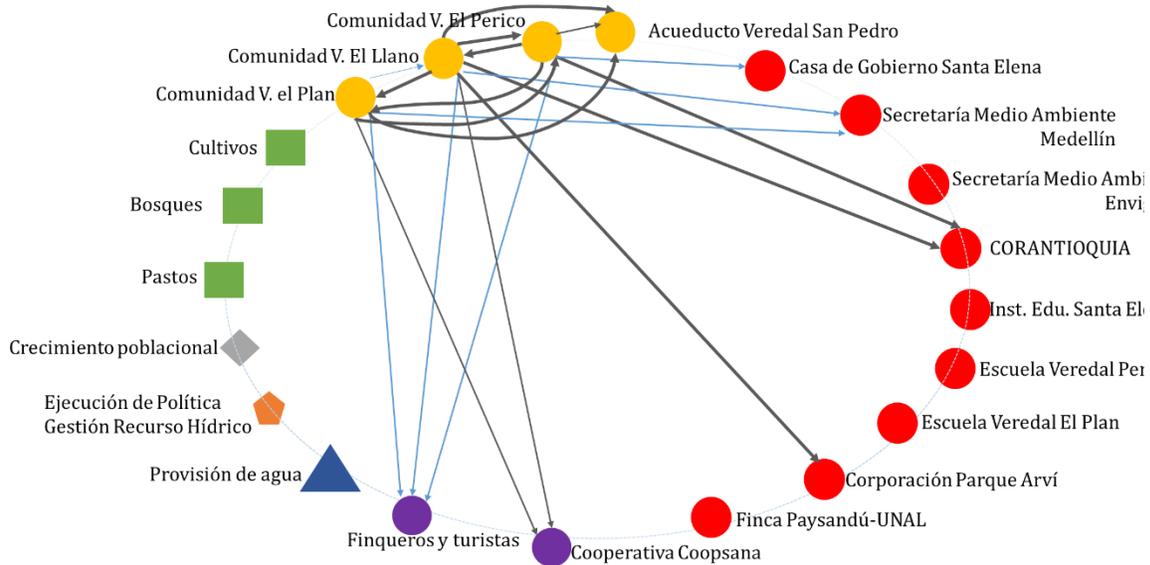


Figura 16. Relaciones entre los actores sociales

• Factor de cambio - nodos ecológicos y sociales

Para este tipo de vínculo se tuvieron en cuenta las afectaciones que el factor de cambio de crecimiento poblacional puede provocar en todos los nodos que componen la red. Este impacto puede ser directo (flecha gris) o indirecto (flecha azul) y su incidencia puede ser de mayor gravedad o de menor (ver Tabla 10 y Figura 17).

El crecimiento poblacional genera una necesidad de expansión urbana, requiriendo así más área para la construcción de viviendas, provocando un impacto directo y con mayor intensidad sobre los tipos de uso de suelo naturales. Adicionalmente, este factor de cambio ha inducido de forma directa cambios culturales, sociales y económicos (Zuluaga, 2005) dentro de las comunidades de las veredas El Plan, El Llano y Perico, transformando el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro.

El otro actor que se ve afectado por el crecimiento poblacional es el acueducto veredal San Pedro, debido a que su capacidad de abastecimiento de agua es limitada para proporcionarla a una población en crecimiento. Los finqueros y las actividades de turismo también se ven afectados por el factor de cambio de crecimiento poblacional de forma directa y con alta incidencia, debido a que se presenta un cambio de área de suelo dedicada a cultivos propios de la zona por la construcción de nuevas viviendas. Así mismo, la migración ha generado cambios en la actividad económica propia de la zona y en factores socioculturales favoreciendo al gremio que trabaja con turismo.

El servicio ecosistémico de provisión de agua se ve afectado de forma indirecta, pero con una mayor incidencia, debido al cambio de uso de suelo natural a artificializado y por el exceso de consumo de agua que puede generar escasez en la zona si no se toman las medidas pertinentes. Otra consecuencia en que deriva este factor de cambio de uso del suelo es la generación de conflictos, afectando indirectamente a la Casa de Gobierno de Santa Elena que cumple el papel

de ente administrador municipal, facilitando a las personas el acceso a servicios básicos que puedes ofrecer la alcaldía de Medellín, sin necesidad de desplazarse.

Tabla 10. Vinculación entre el nodo de crecimiento población con todos los nodos de la red

Vínculo	Tipo de relación		Intensidad
	Directo	Indirecto	
Crecimiento poblacional-Bosque			
Crecimiento poblacional-Cultivo			
Crecimiento poblacional-Pastos			
Crecimiento poblacional-Comunidad V. El Plan			
Crecimiento poblacional-Comunidad V. Perico			
Crecimiento poblacional-Comunidad V. El Llano			
Crecimiento poblacional-Acueducto Veredal San Pedro			
Crecimiento poblacional-Casa de Gobierno Santa Elena			
Crecimiento poblacional-Finqueros y turismo			
Crecimiento poblacional-Provisión de agua			

El color gris de las casillas de relaciones indica que el vínculo entre el crecimiento poblacional y los nodos existentes en red del sistema socio-ecológico es directo y el color azul hace referencia a los vínculos indirectos. La flecha gruesa gris ubicada en la casilla de intensidad, muestra que el tipo de relación entre crecimiento poblacional y los nodos existentes en el sistema socio-ecológico es directo y que presenta un mayor impacto. La flecha azul y gruesa, indica que el crecimiento poblacional y los nodos del SSE, tienen una vinculación indirecta, pero con mayor impacto. Por último, la flecha azul y delgada, evidencia una relación indirecta y con poco impacto.

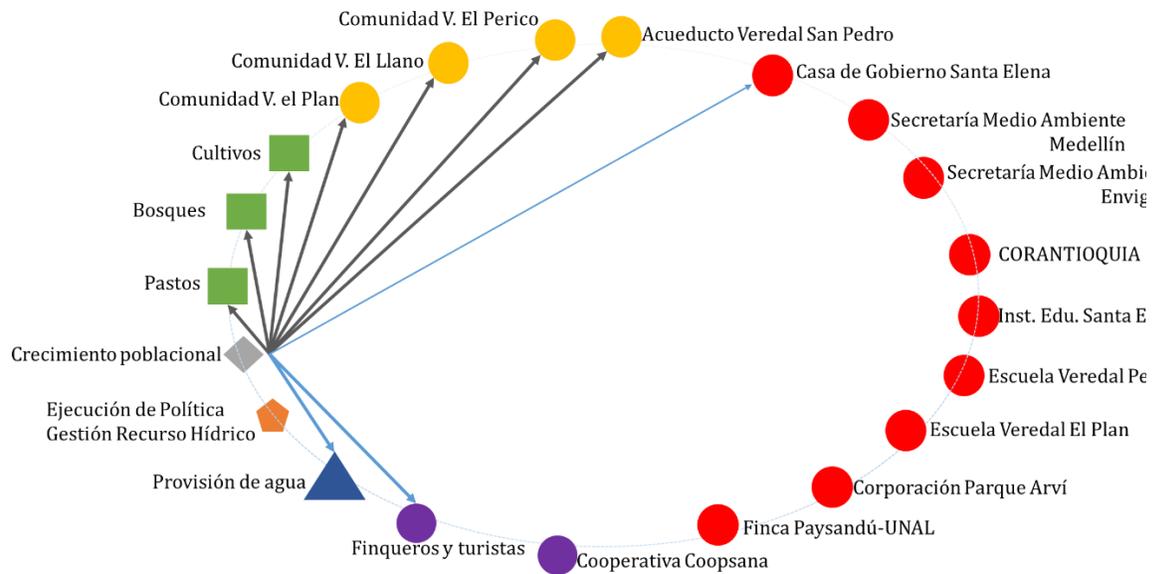


Figura 17. Relaciones entre el nodo de crecimiento población con todos los nodos de la red

- **Medidas de manejo –Servicios ecosistémicos**

Para la definición de este tipo de vínculo se analiza la mitigación que hacen las medidas de manejo de los efectos que ocasionan los factores de cambio (Dee et al., 2017). La ejecución de la política de gestión del recurso hídrico en la microcuenca San Pedro ha sido una manera de contrarrestar los efectos que genera el crecimiento poblacional ocasionado en el sistema socio-ecológico estudiado, puesto que su finalidad es aumentar el área de bosque para así garantizar la regulación hídrica y la disponibilidad del agua y frenar el cambio de uso de suelo boscoso a artificializado.

Por lo anterior, se observa en la Tabla 11 y en la Figura 18, que los nodos impactados de una forma directa y con una mayor incidencia son los usos de suelo de pasto, cultivo y bosque, ya que la medida de manejo hace que aumente el área boscosa y disminuyan las áreas de pasto y cultivo.

En cuanto a los nodos de la comunidad e institucionales como las escuelas de la vereda El Plan, El Llano y Perico, y finqueros y turistas, tienen una relación indirecta con la medida de manejo debido a que la ejecución de la medida conlleva a proveer de servicios ecosistémicos que generan bienestar y aumentan la calidad de vida. De igual forma, la ejecución de la política tiene una relación indirecta y con incidencia fuerte con el nodo del acueducto veredal San Pedro, porque con la reforestación se garantiza mayor área boscosa; como se mencionó anteriormente, este uso de suelo garantiza mayor regulación de agua y con ello la provisión de agua en cualquier temporada del año.

Tabla 11. Vinculación entre la ejecución de política de gestión del recurso hídrico con todos los nodos de la red

Vínculo	Tipo de relación		Intensidad
	Directo	Indirecto	
Medida de manejo-Bosque			
Medida de manejo-Cultivo			
Medida de manejo-Pasto			
Medida de manejo-Comunidad V. El Plan			
Medida de manejo-Comunidad V. Perico			
Medida de manejo-Comunidad V. El Llano			
Medida de manejo-Acueducto Veredal San Pedro			
Medida de manejo-Escuela Veredal Perico			
Medida de manejo-Escuela Veredal El Plan			
Medida de manejo-Finqueros y turistas			
Medida de manejo-Provisión de agua			

El color gris de las casillas de relaciones indica que el vínculo entre la medida de manejo y los nodos existentes en el sistema socio-ecológico es directo y el color azul hace referencia a los vínculos indirectos. La flecha gruesa gris ubicada en la casilla de intensidad, muestra que el tipo de relación entre la medida de manejo y los nodos existentes en el sistema socio-ecológico es directo y que presenta un mayor impacto. La flecha azul y gruesa, indica que medida de manejo y los diferentes nodos del SSE, tienen una vinculación indirecta y con mayor impacto.

A partir de las relaciones directas e indirectas con mayor intensidad y de los lineamientos del marco conceptual de SSE propuesto por Collins et al., (2011), se logró comprender y plasmar la estructura del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, representada en un diagrama (Figura 20).

La estructura del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro está compuesta por un sistema natural y un sistema social que están integrados por los servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y servicios de coproducción, con el acueducto San Pedro que provee de agua para consumo humano. Además, estos son impactados por un factor endógeno de crecimiento poblacional y un factor exógeno comprendido a través de los efectos de la ejecución de la política de gestión del recurso hídrico.

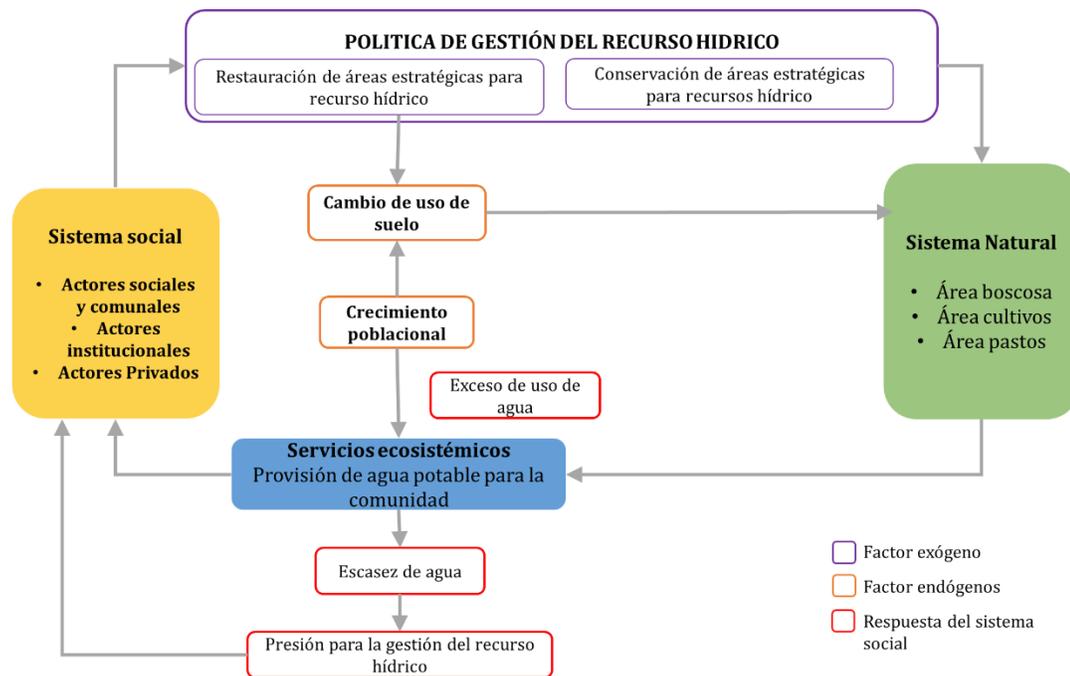


Figura 20. Estructura del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro

Como puede apreciarse en las redes, el uso del suelo boscoso que hace parte del sistema natural, es la cobertura más eficiente en la función de regulación hídrica, haciendo que el caudal de la quebrada no varíe en épocas extremas, elevando la probabilidad de provisión de agua en meses de sequía. Este servicio ecosistémico, junto a la función que realiza el acueducto veredal San Pedro, hace que exista un servicio de coproducción que es la disponibilidad de agua, del cual se benefician en primera medida los actores sociales y comunales: comunidades de las veredas El Plan, El Llano, Perico y Santa Elena Central y las instituciones educativas de Perico y El Plan, pertenecientes al sistema social.

Los diferentes actores que componen el sistema social implementan distintas acciones de gestión para garantizar el flujo permanente del recurso hídrico y su buena calidad. Para el caso de estudio, los trabajos con mayor impacto son los que hacen el acueducto San Pedro y la Alcaldía de Medellín, que ejecutó la política del recurso hídrico, presentada en secciones anteriores. Esta medida de manejo propone dos formas de conservar el recurso hídrico: una

es la conservación de área boscosa y la otra es por medio de restauración ecológica. Ambas maneras benefician al sistema natural y social al aumentar el área de bosque, favoreciendo la oferta potencial de servicios ecosistémicos. La ejecución también provoca cambios de uso del suelo, transformando suelos con dedicación agrícola a suelos de protección y conservación; adicionalmente, reduce la expansión del área de suelos artificializados.

En cuanto al factor endógeno crecimiento poblacional, impacta de forma negativa tanto al sistema natural como al sistema social, al generar cambios de cobertura del suelo de bosque y agrícola a artificializado. En cuanto a los impactos sociales, van encaminados al exceso de uso del agua que provoca racionamiento de agua por la poca capacidad de abastecimiento del acueducto veredal San Pedro y la probabilidad de escasez de agua, generando que los actores del sistema social ejerzan presión exigiendo el derecho al agua.

Capítulo 4

Modelo de dinámica de sistemas para el sistema socio-ecológico microcuenca San Pedro

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo de dinámica de sistemas, partiendo de una descripción de la estructura general del modelo y la hipótesis dinámica; se empleó el análisis de interacciones entre el sistema social y natural para su construcción. También, se encuentra la descripción del modelo formal de dinámica de sistemas del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, donde se describen las ecuaciones empleadas. Por último, se muestra la validación del modelo, donde se realizaron tanto pruebas de estructura como de comportamiento.

La estructura y el comportamiento del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro es representada y simulada usando la metodología de dinámica de sistemas (DS) (J. a Y. W. Forrester, 1995), en el software especializado Powersim Studio 10 ®. Siguiendo los lineamientos metodológicos estándar de esta metodología, en primer lugar, se realiza la articulación del problema y se especifica el tiempo de simulación. Segundo, se plantea la hipótesis dinámica planeada a través del diagrama causal, para explicar las relaciones de aumento o disminución entre las variables. Por último, se realiza un diagrama de flujos y niveles, que incluye ecuaciones matemáticas. Este último permite realizar una proyección del comportamiento del sistema haciendo uso de los flujos como representación de las tasas de cambio en el sistema y de los niveles que acumulan el cambio en el tiempo. Finalmente se hacen diferentes pruebas para comprobar la validez del modelo y proceder con la implementación de diferentes políticas en el sistema.

4.1 Estructura general del modelo

El propósito del modelo de dinámica de sistemas es comprender el comportamiento resultante de la estructura subyacente del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, además de obtener una visión holística del sistema y evaluar los impactos ocasionados por el cambio de uso del suelo y la implementación de diferentes políticas de gestión del recurso hídrico en el sistema, así como su tendencia en el tiempo. Esto, para aprovechar las ventajas de los modelos de simulación en hallar la política más efectiva para la conservación del agua y la posibilidad de tomar decisiones de diferente índole.

La estructura y el comportamiento del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro se muestra en un diagrama de flujos y niveles, el cual forma objetos matemáticos completos que permiten realizar experimentos de simulación ante diferentes escenarios o políticas. El modelo está conformado por tres módulos principales, que son:

- Población: permite el modelamiento de las dinámicas de la población que dependen de la disponibilidad del agua.
- Uso del suelo: permite el modelamiento de cambio de uso del suelo debido a las diferentes fuerzas de cambio tales como el crecimiento poblacional y la implementación de política sobre gestión del agua.
- Gestión del agua: módulo que modela la capacidad de abastecimiento del acueducto, la disponibilidad de agua de la quebrada San Pedro y otros elementos asociados.

El modelo fue construido considerando información de diferentes fuentes: información primaria a partir de los talleres realizados e información secundaria a partir de los diferentes proyectos de investigación y otros documentos disponibles. Las entradas del modelo requieren información relacionada con datos de la población foránea y nativa, el consumo per cápita de agua anual, el tamaño promedio del hogar, la cobertura de uso del suelo y la relación entre el área boscosa y el caudal. Esta información se obtuvo a partir de la revisión de estudios demográficos, datos de consumo de agua registrados por el Acueducto San Pedro, Planes de Desarrollo Local de Santa Elena, procesamiento de imágenes satelitales, información primaria obtenida en el taller con la comunidad y encuestas. Algunas de las variables claves a observar, que son endógenas en el modelo, son el cambio en el área de las coberturas del suelo (agrícola, boscosa, artificializada), la disponibilidad del agua, la capacidad de abastecimiento de agua y la necesidad de ampliación de la capacidad de abastecimiento del Acueducto San Pedro.

El horizonte de tiempo de simulación del modelo es de treinta (30) años, este tiempo permite observar los bosques conformados y visualizar los impactos positivos y negativos que se generen en el sistema socio-ecológico al implementar diferentes políticas. El paso de tiempo de simulación se establece en un año, ya que se considera pertinente este nivel de agregación para el nivel de decisiones que tiene el sistema y facilita el hecho de que los datos de entrada existentes tienen una frecuencia anual. Con estos datos de entrada se obtienen los resultados de las variables de salida que se comparan con datos reales del modo de referencia, para verificar y validar que el modelo es capaz de replicar el comportamiento del pasado. El periodo de inicio de la simulación es el 2010, año en el que se empezó a ejecutar el proyecto de reforestación en la microcuenca San Pedro y, a partir de ese punto, se cuenta con la

información para comparar los cambios en el uso del suelo en el sistema socio-ecológico. Para esta fecha se tienen registros del consumo de agua y datos del caudal de la quebrada San Pedro.

4.2 Hipótesis dinámica

Para la construcción de la hipótesis dinámica se parte del conocimiento de las causalidades existentes en la cuenca, que se consolidó en el Capítulo 3 con la estructuración de los vínculos de la red socio-ecológica. A partir de esta red, se lograron identificar los límites del sistema, los retardos, las interacciones y las realimentaciones entre las diferentes variables que componen los sistemas natural y social en relación con el recurso hídrico, estos factores se representan por medio de un diagrama causal. Esta herramienta, permite explicar de forma simple la dinámica de la microcuenca y proporciona una visión general del modelo sin que se pierdan los detalles.

El diagrama causal parte de las relaciones de causa-efecto pareado entre variables, para que luego las interacciones entre sus componentes formen ciclos o bucles de realimentación negativos (balance: B) y positivos (refuerzo: R) que producen el comportamiento dinámico del sistema (Sterman, 2000). El diagrama causal consolidado se muestra en la Figura 21, el cual describe de manera holística el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro. Cabe resaltar que este diagrama constituye la versión final después de un proceso de iteración y revisión, que consideró no sólo discusiones amplias sino también la información cuantitativa y cualitativa de la cuenca.

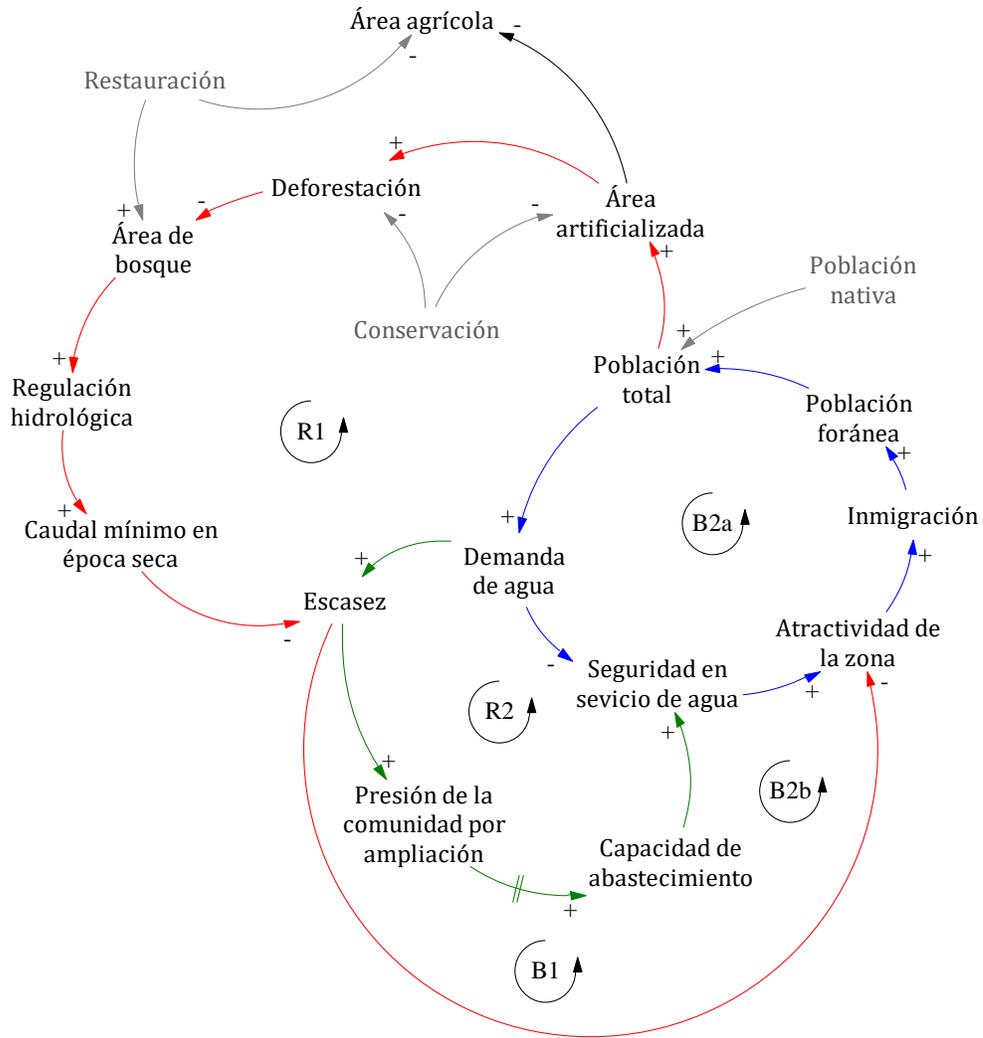


Figura 21. Diagrama causal del sistema socio-ecológico microcuenca San Pedro.
 AVSP: Acueducto Veredal San Pedro.
 RH: Recurso Hídrico

La Figura 21 muestra el diagrama causal del sistema socio-ecológico San Pedro, el cual presenta la estructura del sistema con cinco ciclos de realimentación. El ciclo B1, denominado ciclo de afectación del sistema natural, muestra el factor de cambio endógeno de la dinámica poblacional, que es causado por la inmigración de las personas de otros lugares debida a la atractividad de la zona¹⁰. El crecimiento poblacional genera la necesidad de aumentar el área para la construcción de viviendas; esta área se denomina área artificializada. Con la necesidad de una mayor área artificializada, se promueve la reducción del área agrícola y la deforestación y, por ende, el área de bosque disminuye. El bosque contribuye a la regulación hidrológica del sistema, en consecuencia, no se genera escasez del recurso. La abundancia del recurso hídrico, y otras condiciones sociales mencionadas más adelante en el ciclo R1, convierten la zona en atractiva para foráneos. Una alternativa para mitigar el impacto de la deforestación sobre la escasez, es la ejecución de una política de gestión del recurso hídrico que tiene como objetivo conservar las áreas de bosque ubicadas en la parte alta de la microcuenca San Pedro, cercanas a la ribera de la quebrada, y reforestar áreas dedicadas a la agricultura y ganadería, con el fin de garantizar el aumento de la regulación hidrológica y con ello los caudales mínimos en épocas secas, con lo cual se conseguiría reducir los riesgos de escasez.

El ciclo de refuerzo R1, denominado ciclo de afectación del sistema natural por el efecto en la población, complementa el ciclo de balance B1. En este caso, la escasez del recurso hídrico genera que la población presione a sus líderes para ampliar el almacenamiento de agua y mitigar el problema, lo que en principio genera una mayor seguridad en el servicio de agua e incrementa la atractividad de la zona. Sin embargo, la respuesta en la capacidad de almacenamiento no es inmediata, tiene un retardo en el sistema, por lo tanto, la dinámica de inmigración de foráneos a la zona se da de forma lenta, por el retardo de generación de seguridad de agua en el sistema socio-ecológico.

El ciclo de balance B2a, describe el aumento en la demanda de agua debido a la población total de la zona, ya sean nativos o foráneos, y el ciclo B2b permite observar que la alta demanda genera que la zona sea más propensa a la escasez por el incremento en el consumo. A partir de este modelo conceptual se procede a la formalización del modelo en la siguiente sección.

4.3 Modelo formal de simulación

Para representar el comportamiento del sistema a partir de su estructura, se realiza el diagrama de flujos y niveles dividido en varias partes que se relacionan entre sí. El modelo se plantea por medio de diagramas de flujos y niveles para modelar la población total de la zona, incluyendo a la población nativa y la población foránea. En estos diagramas, los niveles son las variables de estado (se presentan por rectángulos) que cambian con las variables de flujos (se

¹⁰ Para esta investigación se entiende la “atractividad de la zona” como el grado en el cual las personas de Medellín, Envigado, del Oriente antioqueño se interesan en la zona para migrar hacia ella solo por la disponibilidad de agua y la capacidad que tiene el acueducto en abastecer de agua a los usuarios, que hace parte de la variedad de servicios ecosistémicos que existe en la zona de estudio y garantizan el bienestar de la comunidad.

representan por válvulas de flujo) que son las tasas de cambio; los niveles se modifican en el tiempo por los flujos.

La estructura del modelo se conforma de 3 componentes o módulos principales: *i.* Dinámica poblacional, *ii.* uso del suelo y *iii.* gestión del agua. Estos módulos están interconectados, con la visión holista propia de la metodología de dinámica de sistemas. A continuación, se describen cada uno de los módulos, donde se presenta, el diagrama de niveles y flujos y la tabla resumen de las ecuaciones y comentarios complementarios a la descripción.

Parte 1: Dinámica poblacional

Esta parte del modelo se enfoca en evaluar la dinámica poblacional de la zona, donde la población total aumenta con la población nativa y la población foránea; esta última se ve atraída a la zona por la disponibilidad de agua y la capacidad de abastecimiento del acueducto. Como se muestra en la Figura 22. *Diagrama de flujos y niveles de la dinámica poblacional* Figura 22; con sus correspondientes tasas netas de cambio, las cuales son crecimiento de la población foránea (*Crecimiento P. Foránea*) y crecimiento de la población nativa (*Crecimiento P. Nativa*). El crecimiento de la población nativa se desarrolla con la forma tradicional de la tasa de crecimiento por el nivel, para el caso sería la tasa neta de crecimiento de la población nativa (TN crecimiento población nativa multiplicada por la Población Nativa)

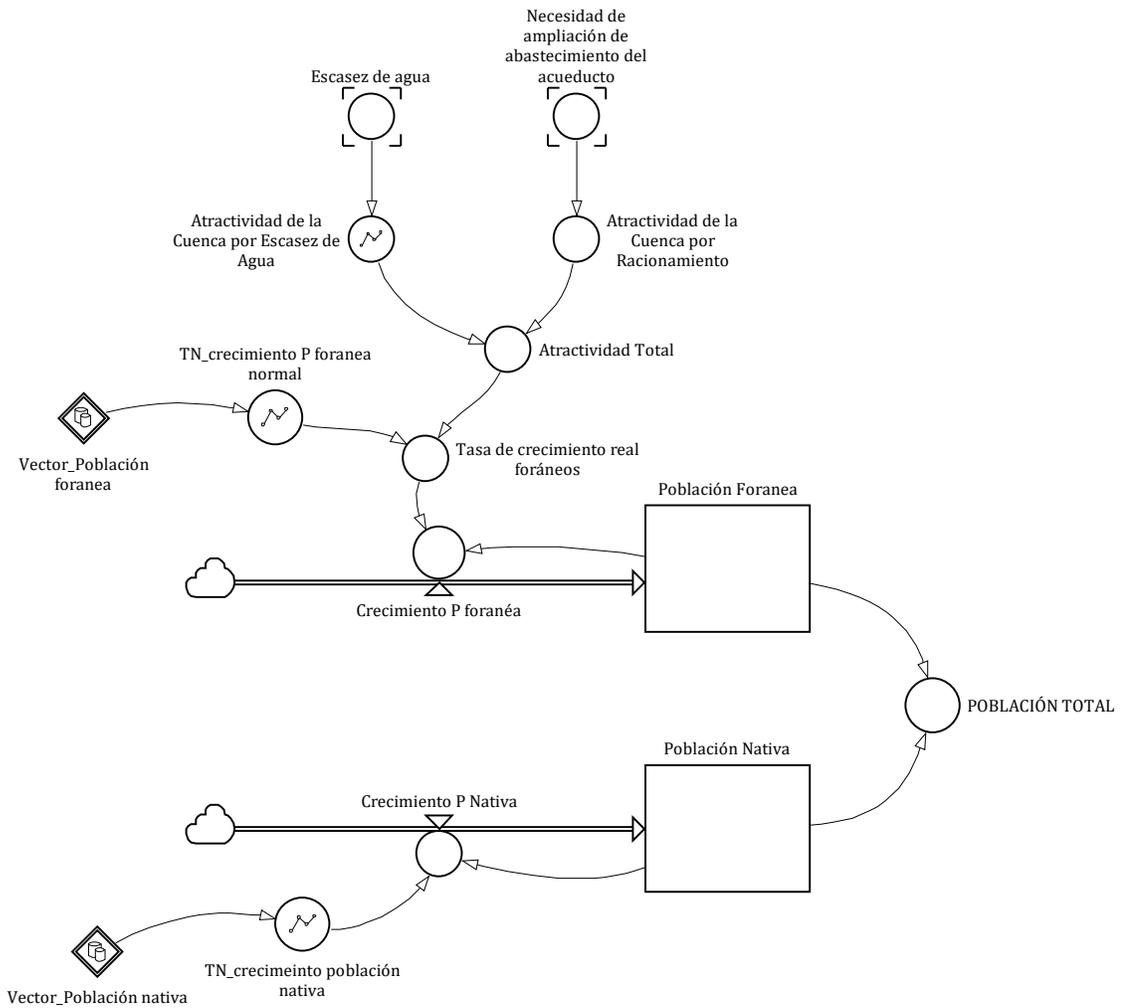


Figura 22. Diagrama de flujos y niveles de la dinámica poblacional

Para el caso del crecimiento de la población foránea será la *Tasa de crecimiento real* por la *Población Foránea*. Sin embargo, la *Tasa de crecimiento real* es variable ya que se ve afectada por la atractividad de la cuenca. A medida que la zona sea más atractiva para los foráneos, la tasa de crecimiento neta (*TN crecimiento P foránea normal*) cambia según el factor de atractividad que está en función de la disponibilidad de agua y la capacidad de abastecimiento, como se puede observar en las Figura 23a y Figura 23b. Si la atractividad aumenta, el crecimiento normal se potencia o, en caso contrario, si la atractividad disminuye, el crecimiento normal disminuye.

La *Atractividad total*¹¹ representa la afectación de la atractividad de la cuenca para la inmigración debido a dos factores multiplicativos: *Atractividad por escasez* de agua y *Atractividad por racionamiento*. Estas atractividades se modelan según funciones no lineales como se puede observar en las Figura 23a y Figura 23b; en conjunto estas funciones siguen las buenas prácticas de modelamiento de funciones no lineales planteadas por Sterman (2000).

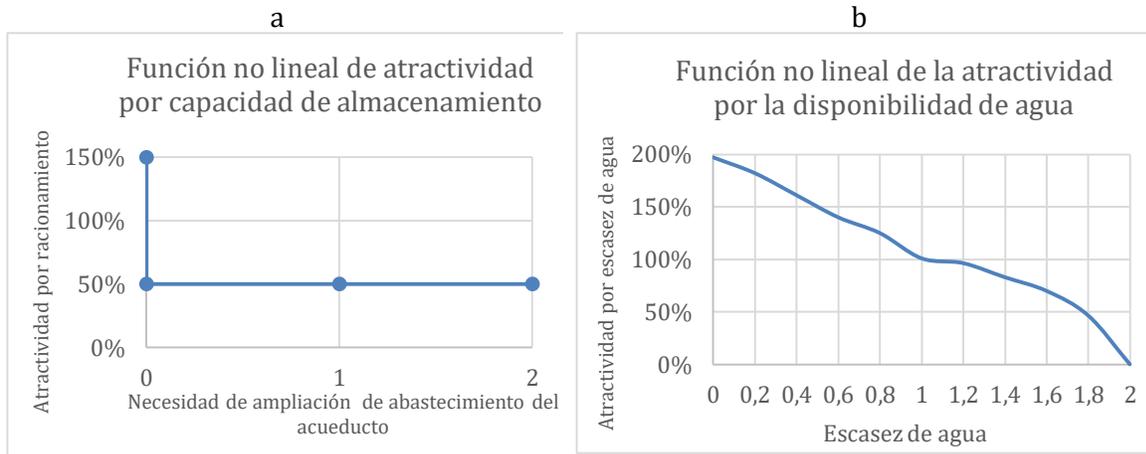


Figura 23. Variables no lineales para la atractividad a la inmigración de la cuenca: a. Atractividad por racionamiento y b. Atractividad por escasez de agua. (Fuente: Construcción cualitativa propia a partir de los talleres realizados en la cuenca)

La Figura 23a representa la función no lineal de la *Atractividad por racionamiento*, en donde, si existe una *Necesidad de ampliación de abastecimiento del acueducto* de la cuenca, la atractividad toma el valor de 50%. Por el contrario, si la cuenca no necesita una ampliación del abastecimiento del acueducto, se hace más atractiva tomando el valor de 150%. Por otro lado, la Figura 23b, muestra la función de la *Atractividad por la escasez del agua*; cuando no existe escasez, la atractividad es muy grande (200%), pero a medida que haya más escasez en la cuenca, la atractividad disminuye hasta no tener ningún atractivo.

Para la simulación del crecimiento poblacional, se usó la información demográfica de las cuatro veredas: Perico, El Llano, El Plan y Santa Elena Central suministradas por URBAM-EAFIT, (2018). En la Tabla 12, se muestran las ecuaciones utilizadas para la modelación de la dinámica de la población, con una descripción de las variables utilizadas.

¹¹ Hace referencia a la atractividad que genera tanto la disponibilidad de agua como la capacidad de abastecimiento de agua a la población que decide migrar a la zona de estudio.

Tabla 12. Dinámica poblacional: sistema de ecuaciones y comentarios del módulo

VARIABLES PARÁMETRO			
Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Vector_Población nativa	(VN)	Vector de valores de la tasa de crecimiento anual de la población nativa	$\frac{1}{\text{año}}$
Vector_Población foránea	(VF)	Vector de valores de la tasa de crecimiento normal de la población foránea	$\frac{1}{\text{año}}$
VARIABLES AUXILIARES			
Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
TN_crecimiento población nativa	(TCN)	Tasa de crecimiento anual de la población nativa expresada como una serie de tiempo. En Powersim Studio 10 ®: $TCN = Graphlinas(TIME; STARTTIME; 1 \ll yr \gg; VN)$	$\frac{1}{\text{año}}$
TN_crecimiento P foránea normal	(TCFn)	Tasa de crecimiento normal anual de la población foránea expresada como una serie de tiempo. En Powersim Studio 10 ®: $TCNn = Graphlinas(TIME; STARTTIME; 1 \ll yr \gg; VF)$	$\frac{1}{\text{año}}$
Atractividad de la cuenca por escasez de agua	(AE)	Función no lineal de la Escasez de agua (EA) (Figura 23b) En Powersim Studio 10 ®: $AE = GRAPH(AE; 0; 0,2; \{1,97; 1,82; 1,61; 1,4; 1,25; 1,01; 0,964; 0,83; 0,7; 0,466; 0,002 // Min: 0; Max: 2 // \})$	<i>Adimensional</i>
Atractividad de la cuenca por racionamiento	(AR)	Función no lineal de la necesidad de ampliación del abastecimiento de agua (NA) (Figura 23a). $AR(NA) = \begin{cases} 1,5, & NA \geq 0 \\ 0,5, & NA < 0 \end{cases}$ En Powersim Studio 10 ®: $AR = IF(NA \geq 0 \frac{m^3}{año}; 0,5; 1,5)$	<i>Adimensional</i>
Atractividad total	(AT)	Factor multiplicativo de ambos efectos de atractividad. $AT = AE \times AR$	<i>Adimensional</i>
Tasa de crecimiento real foráneos	(TCFr)	Factor multiplicativo de la tasa de crecimiento de foráneos normal (TCFn) y la atractividad total (AT). $TCFr = TCFn \times AT$	$\frac{1}{\text{año}}$

Población total	(PT)	Variable que suma la población foránea (F) y la población nativa (N) en la cuenca en cada año. $PT = F + N$	Personas
-----------------	------	--	----------

VARIABLES DE FLUJO

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Crecimiento P Nativa	(CN)	Flujo de crecimiento de la población nativa (N) anual. $CN = N \times TCN$	$\frac{Personas}{año}$
Crecimiento P foránea	(CF)	Flujo de crecimiento de la población foránea (F) anual. $CF = F \times TCFr$	$\frac{Personas}{año}$

VARIABLES DE NIVEL

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Población nativa	(N)	Variable que acumula el número de personas foráneas en la cuenca. $N_{(2010)} = 2407$ $\frac{N(t)}{dt} = CN$ El Flujo CN fue previamente definido.	Personas
Población foránea	(F)	Variable que acumula el número de personas foráneas en la cuenca. $F_{(2010)} = 1606$ $\frac{F(t)}{dt} = CF$ El Flujo CF fue previamente definido.	Personas

Parte 2: Cambio de uso del suelo

Este módulo se enfoca en evaluar la dinámica del cambio de uso del suelo en la zona, generado por la reforestación y por la migración de la ciudad hacia el campo. Con el diagrama de flujos y niveles de la Figura 24, se puede apreciar que los impactos del crecimiento poblacional son los que generan la deforestación y el cambio de uso del suelo. Los diferentes usos considerados

fueron: el suelo como *Área de bosque*, como *Área agrícola* y como *Área artificializada*¹². Estas variables fueron modeladas como acumuladoras o niveles, como es natural. Los valores iniciales se obtuvieron a partir del análisis de imágenes satelitales (ver Figura 11). Adicionalmente y como consideración del sistema particular, se adiciona otro nivel: *Bosque en crecimiento*, este nivel considera un valor inicial del *Área a reforestar adquirida o sometida*, lo cual ocurrió al inicio del año de simulación (2010); este mismo valor se reduce del valor inicial del *área agrícola*.

¹² Entiéndase el área artificializada como el área de suelo agrícola que se ha adecuado para la construcción de viviendas.

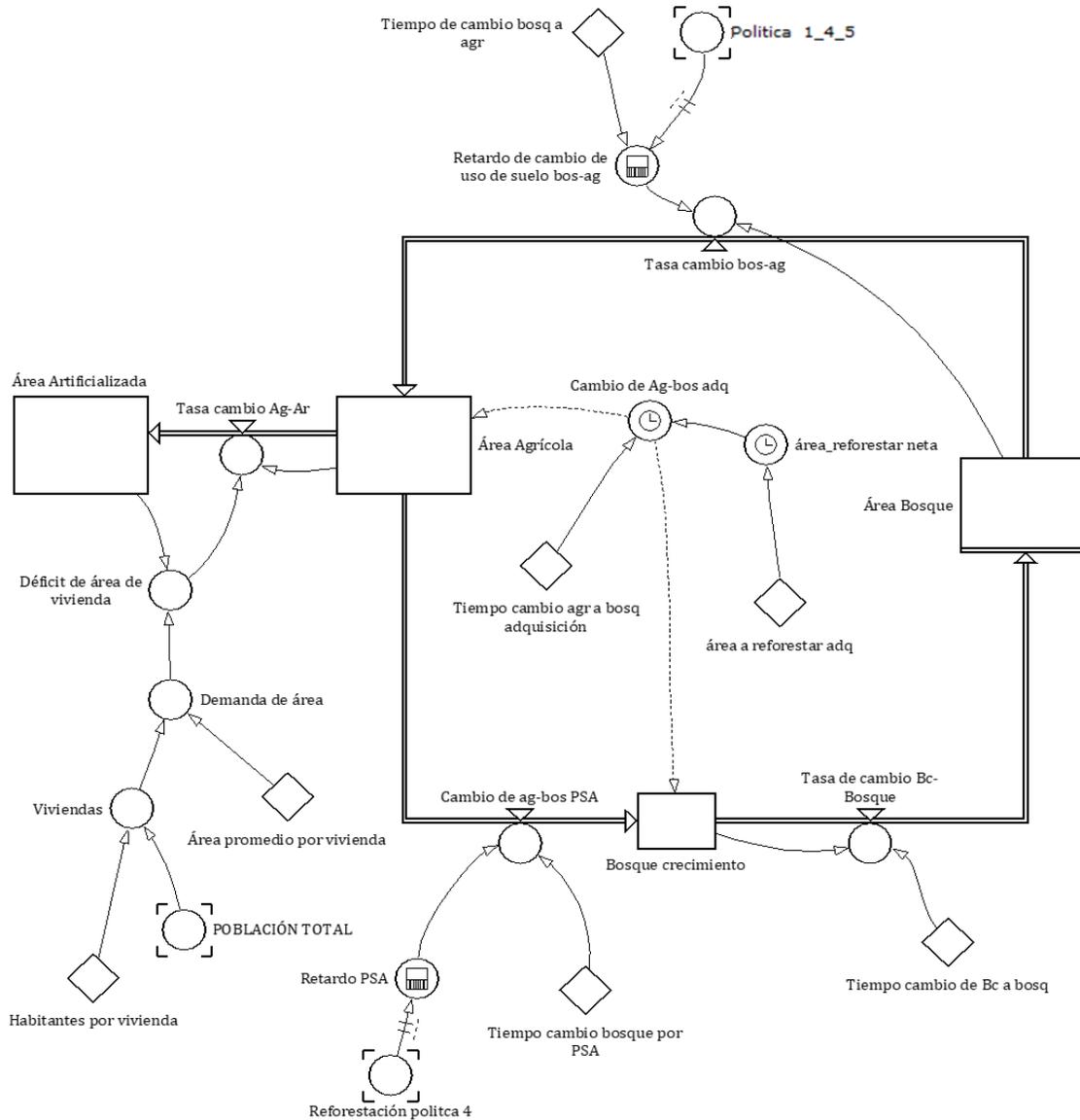


Figura 24. Diagrama de flujos y niveles del cambio en el uso del suelo

Para describir el cambio en el nivel de *área artificializada* o el área que ha sido adecuada para construir viviendas de inmigrantes, se parte de la *demanda de área* para vivienda requerida por la *población total* de la zona y se compara con la cantidad de área ya artificializada, que corresponde al lugar donde se hará la construcción. Si existe un *déficit de área de vivienda* o artificializada para cumplir con la *demanda de área*, será necesario adicionar esa cantidad de área. Sin embargo, el *área artificializada* proviene del *área agrícola* y la tasa de cambio se modela teniendo en cuenta el déficit de área artificializada y la cantidad de *área agrícola* que hay, ya que como máximo se podrá adecuar la cantidad de *área agrícola* total y con un retardo

de artificialización de diez (10) años. Para modelar la demanda se tienen en cuenta la *población total* de la zona, el *número de habitantes promedio por vivienda*, el *número total de viviendas* y el *área promedio por vivienda*; esta información fue obtenida a partir del análisis de la encuesta realizada a los usuarios del acueducto, descrita en la sección 2.2.3. Encuestas a los usuarios del acueducto San Pedro.

El área que ha sido transformada para ser *área agrícola* proviene del *área de bosque*, y cambia según la *tasa de cambio de bosque a agricultura*, la cual se estima con los valores históricos. Adicionalmente, el *área agrícola* se reduce con la *tasa de cambio de agricultura a bosque en crecimiento*, lo cual es promovido por el área adquirida para reforestación y mantenimiento y el área para la aplicación de esquema de PSA; hay un tiempo de retardo para que se ejecute el cambio de agricultura a bosque en crecimiento de 8 años¹³ para la primera y 15 años para la segunda. El bosque en crecimiento pasa a considerarse *Área de bosque* con un tiempo de retardo de 2 años.

El modelo tiene como supuesto que no se presenta cambio de uso de suelo boscoso a agrícola o artificializado, este supuesto está basado en los esfuerzos que han realizado los municipios de Medellín y Envigado en conservar los ecosistemas periurbanos, como lo son los bosques de roble de Perico y la serranía de las palmas y vertientes de la quebrada Santa Elena. Dichas áreas poseen alto grado de biodiversidad y prestan diferentes servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humana (Hurtado, 2013; Municipio de Envigado, 2017). Igualmente, la suposición se reforzó con el resultado de las encuestas: los habitantes de las viviendas que poseían bosque natural no están interesados en cambiarlos para otros usos, algunos hasta manifestaron el interés por reforestar y poseer bosque.

A partir del modelo formal de niveles y flujos, se plantea el sistema correspondiente de ecuaciones. En la Tabla 13, se muestran las ecuaciones utilizadas para la modelación de la dinámica del cambio de uso del suelo, con una descripción de las variables utilizadas.

Tabla 13. Cambio de uso del suelo: sistema de ecuaciones y comentarios del módulo

VARIABLES PARÁMETRO			
Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tiempo de cambio bosq a agr PSA	(TCba)	Tiempo necesario para que el área de bosque pase a ser área de agricultura por PSA. $TCba = 15$	Años

¹³Tiempo en que se considera que un bosque reforestado puede proveer de servicios de ecosistémico de regulación hídrica (García-Leoz et al., 2018)

Tiempo de cambio agr a bosq adquisición	(TCab)	Tiempo necesario para que el área agricultura pase a ser área de adquisición. $TCab = 8$	Años
Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 32,86$	Hectáreas
Área promedio por vivienda	(APV)	$APV = 0,2$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{vivienda}}$
Habitantes por vivienda	(HV)	$HV = 3,25$	$\frac{\text{Personas}}{\text{Vivienda}}$
Tiempo de cambio Bc a bosq	(TCbb)	Tiempo necesario para que el área de bosque en crecimiento pase a ser área de bosque. $TCbb = 2$ Este valor se obtuvo a partir de la calibración del modelo	Años
Tiempo de cambio bosque por PSA	(TCbp)	Tiempo necesario para que el área agrícola pase a ser bosque en crecimiento por los PSA. $TCbp = 5$	Años

VARIABLES AUXILIARES

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Viviendas	(V)	Número de casas necesarias para la población total. $V = \frac{PT}{HV}$	Casas
Demanda de área	(D)	Área necesaria para la construcción de las viviendas. $D = V * APV$	Hectáreas
Déficit de área de vivienda	(DV)	Diferencia entre la demanda y el área artificializada, la cual será necesaria para cumplir con el área artificializada requerida para la construcción de viviendas. En caso de que este valor dé menor a 0, no será necesaria más área artificializada. $DV = D - AAr$	Hectáreas
Retardo PSA	(Rpsa)	Hectáreas que serán reforestadas gracias a los PSA en el escenario 4 (P4) que será explicada en el capítulo a continuación, teniendo en cuenta que el tiempo que toma la implementación de la política es de 13 años. En Powersim Studio 10 ®: $Rpsa = Delayinf (P4; 13 \text{ años}; 1)$	Hectáreas
Área_reforestar neta	(ARN)	Área adquirida que debe ser reforestada, incluida al inicio de la simulación. $ARN (\text{año}) = \{ARef, \text{ Año} \geq 2010$	Hectáreas

En Powersim Studio 10 ®:

$$ARN = STEP(ARef; STARTTIME)$$

Cambio de Ag-bos adq	(Cab)	<p>Representa las hectáreas de bosque que pasan de ser área agricultura a área adquirida, desde el inicio de la simulación hasta el tiempo necesario para considerarlo bosque -8 años, o hasta el 2018.</p> $Cab(\text{año}) = \begin{cases} ARN, & 2010 \leq \text{Año} \leq 2010 + TCab \\ -ARN, & eoc \end{cases}$ <p>En Powersim Studio 10 ®:</p> $Cab = STEP(ARN; STARTTIME) - STEP('ARN; STARTTIME + TCab)$	Hectáreas
----------------------	-------	---	-----------

Retardo de cambio de uso de suelo bos-ag	(RCba)	<p>Número de hectáreas por año que pasan de ser área de bosque a área agrícola, debido a la ejecución de los escenarios 1 (P1), 4 y 5 explicadas en el siguiente capítulo, teniendo en cuenta el tiempo de cambio de área de bosque a área agrícola de 1 año.</p> <p>En Powersim Studio 10 ®:</p> $RCba = Delayinf (P1; TCba; 1)$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
--	--------	---	---------------------------------------

VARIABLES DE FLUJO

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio Ag-Ar	(Faa)	<p>Área que pasa de ser agrícola a artificializada por año. Calculada como el valor mínimo entre el total del área agrícola y el máximo entre la demanda de viviendas y 0. Resultando en el área necesaria para vivienda que efectivamente puede ser artificializada.</p> <p>En Powersim Studio 10 ®:</p> $Faa = MIN \left(MAX \left(\frac{DV}{10 \text{ años}} ; 0 \frac{\text{hectareas}}{\text{año}} \right); \frac{AAg}{1 \text{ año}} \right)$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Cambio de ag-bos PSA	(Fabp)	<p>Área que pasa de ser agrícola a ser de bosque en crecimiento por PSA, entiéndase como las hectáreas que se reforestan aplicando PSA entre el tiempo que tardan en ser reforestadas.</p> $Fabp = \frac{Rpsa}{TCbp}$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Tasa de cambio Bc-Bosque	(Fbb)	<p>Área que pasa de ser bosque en crecimiento a ser bosque, dependiendo del tiempo de crecimiento del bosque (TCbb).</p> $Fbb = \frac{BC}{TCbb}$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	<p>Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, dada a las políticas 1, 4 y 5, cuando se cuente con terreno de bosque para ejecutar el cambio.</p> $Fba(AB) = \begin{cases} 0, & AB \leq 0 \\ RCba, & AB > 0 \end{cases}$ <p>En Powersim Studio 10 ®:</p>	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$

$$Fba = IF \left(AB \leq 0 \text{ hectáreas}; 0 \frac{\text{hectáreas}}{\text{año}}; RCba \right)$$

VARIABLES DE NIVEL

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Área bosque	(AB)	Variable que acumula las hectáreas de bosque. $AB_{(2010)} = 661$ $\frac{AB(t)}{dt} = Fbb - Fba$	Hectáreas
Bosque crecimiento	(BC)	Variable que acumula el bosque en crecimiento. $BC_{(2010)} = Cab$ $\frac{BC(t)}{dt} = Fabp - Fbb$	Hectáreas
Área agrícola	(AAG)	Variable que acumula el área agrícola. $AAG_{(2010)} = 986 - Cab$ $\frac{AAG(t)}{dt} = Fba - Fabp - Faa$	Hectáreas
Área artificializada	(AAR)	Variable que acumula el área artificializada. $AAR_{(2010)} = 151$ $\frac{AAR(t)}{dt} = Faa$	Hectáreas

Parte 3: Escasez de agua y capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro

Por último, la Figura 25 representa la modelación de la escasez de agua y el cambio en la capacidad de almacenamiento del Acueducto Veredal San Pedro (AVSP). La simulación de esta parte permite evidenciar el impacto sobre la escasez de agua y la capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro, generado por el crecimiento poblacional y la modelación de las políticas de gestión del recurso hídrico explicada en el siguiente capítulo. A su vez, los resultados de escasez de agua y necesidad de ampliación de abastecimiento del acueducto obtenidos en este módulo afectan la dinámica poblacional del sistema socio-ecológico en estudio, presentado en el módulo 1.

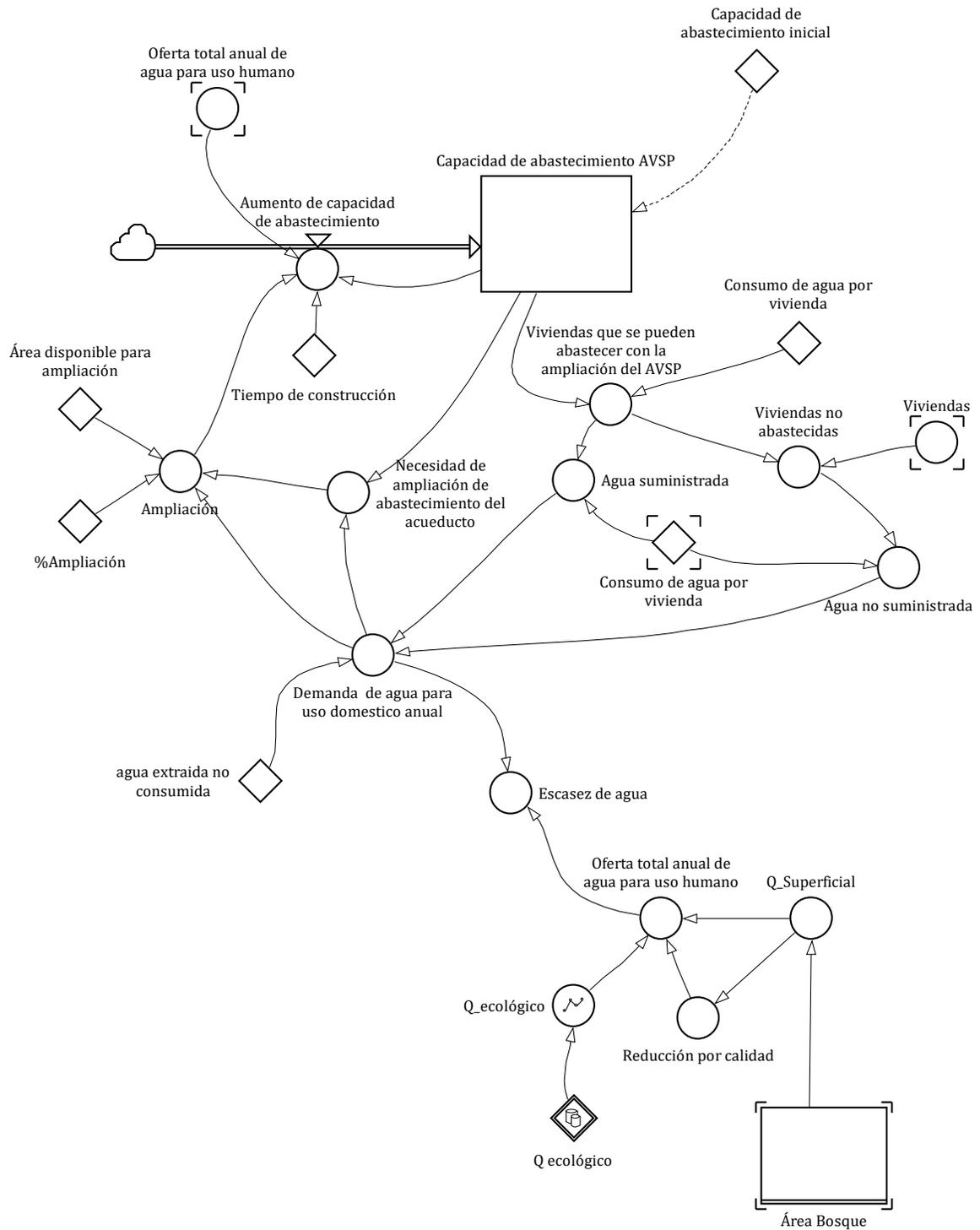


Figura 25. Escasez de agua y capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro

La modelación de la *escasez de agua* se basa en la fórmula propuesta por la Resolución 865 del 2004, la cual se define como la relación porcentual de la *demanda de agua para uso doméstico* y la *oferta total de agua para uso humano*, después de aplicar factores de reducción a la oferta

por calidad de agua (*Reducción por calidad*) y caudal ecológico ($Q_{ecológico}$) al caudal superficial ($Q_{superficial}$) (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004). El caudal superficial es el resultado del caudal por unidad de área, por el área de bosque resultante del módulo 2: Cambio de uso del suelo. La reducción por calidad se modela como un 25% del caudal superficial y la reducción por caudal ecológico es una serie de tiempo obtenida desde el 2010 al 2017. La identificación del índice de escasez de agua se basó en categorías e interpretación del índice de escasez que dicta la norma (ver tabla 14).

Tabla 14. Categorías e interpretación del índice de escasez

Categoría	Rango	Explicación
Alto	> 50%	Demanda alta
Medio alto	21-50%	Demanda apreciable
Medio	11-20%	Demanda baja
Mínimo	1-10%	Demanda muy baja
No significativo	<1%	Demanda no significativa

Fuente: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004

Para la modelación de la demanda de agua se tuvo en cuenta solo la *demanda de agua para uso doméstico*, debido a que no se encontraron captaciones adicionales a las del acueducto en el recorrido del cauce de la quebrada. Esta demanda se calcula como la suma del consumo de *agua suministrada*, del *agua no suministrada* y del *agua extraída no consumida*. El *agua suministrada* es el producto entre las *viviendas que se pueden abastecer de agua con la ampliación del AVSP* y el *consumo de agua por vivienda*, y el *agua no suministrada*, es el producto entre las *viviendas no abastecidas* y el *consumo de agua por vivienda*. Para obtener las viviendas abastecidas y no abastecidas se utilizó la relación entre la *capacidad de almacenamiento de AVSP*, el *consumo de agua por vivienda* y el número de *viviendas* obtenido en el módulo 2, con lo cual se puede abastecer el consumo de las viviendas hasta llegar al límite de la capacidad de abastecimiento de AVSP. El *agua extraída no consumida* es un factor obtenido de restar las viviendas existentes en la zona y las viviendas que se pueden abastecer con la ampliación del Acueducto Veredal San Pedro (AVSP).

La ampliación de *capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro* parte de la *necesidad de ampliación de abastecimiento del acueducto*. Para saber si existe la necesidad de ampliación se compara la capacidad de almacenamiento, con la demanda de agua. Si existe la necesidad, entonces se procede con la ampliación del acueducto teniendo en cuenta las siguientes restricciones: si la demanda es menor *al área disponible para ampliación* del acueducto, entonces se amplían 150000 m³ por año, de lo contrario se amplía el volumen anual necesario por el porcentaje máximo de ampliación (*% ampliación*). Estos valores fueron estimados de manera empírica en los talleres de trabajo, con alta incertidumbre, por lo que se hace necesario un análisis de sensibilidad.

Finalmente, para considerar si la ampliación determinada se adiciona a la *capacidad de abastecimiento de AVSP*, por medio del flujo de *aumento de la capacidad de abastecimiento*, se compara la *oferta total anual de agua para uso humano* con la *capacidad de abastecimiento*. Si la capacidad es mayor que la oferta, entonces no se amplía; en caso contrario, se ejecuta la ampliación determinada, que dependerá del *tiempo de construcción*.

En la Tabla 15 se muestran las ecuaciones utilizadas para la modelación de la dinámica de la escasez de agua y la capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro, con una descripción de las variables utilizadas.

Tabla 15. Escasez de agua y capacidad de abastecimiento del acueducto San Pedro: sistema de ecuaciones y comentarios del módulo

VARIABLES PARÁMETRO			
Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Capacidad de abastecimiento inicial	(CAi)	Valor inicial para el nivel de la capacidad de abastecimiento AVSP. $CA_i = 150755$	$\frac{m^3}{año}$
Tiempo de construcción	(TC)	Tiempo necesario para la ampliación del abastecimiento de AVSP. $TC = 3$	Años
Área disponible para ampliación	(AA)	Área disponible para la ampliación del abastecimiento. $AA = 14000$	$\frac{m^3}{año}$
% Ampliación	(%A)	Porcentaje que puede ser ampliado de la capacidad de abastecimiento. $\%A = 30\%$	%
Agua extraída no consumida	(AnC)	Volumen de agua que se extrae del sistema hídrico y que no es utilizada efectivamente en ningún tipo de uso o consumo, que retorna al sistema con variaciones en las condiciones de calidad originales. $AnC = 2,606 \times 10^{-9}$	$\frac{m^3}{año}$
Consumo de agua por vivienda	(CAV)	Volumen de agua consumido por casa. $CAV = 120$	$\frac{m^3}{año \times casa}$
Q ecológico	(VQe)	Vector de valores del volumen del caudal ecológico anual, que es necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas. Representa el 25% del caudal superficial del cuerpo de agua.	$\frac{m^3}{año}$

VARIABLES AUXILIARES

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Q_superficial	(Qs)	Volumen de caudal superficial del área de bosque más el caudal superficial inicial de la cuenca, obtenido con el modelo hidrológico WEAP. $Qs = \left(16496 \frac{m^3}{año} \times AB\right) + 281973 \frac{m^3}{año}$	$\frac{m^3}{año}$
Reducción por calidad	(RC)	Representa el 25% del caudal superficial del cuerpo de agua. $RC = Qs \times 25\%$	$\frac{m^3}{año}$
Q_ecológico	(Qe)	Volumen de caudal ecológico anual de la cuenca expresado como una serie de tiempo. En Powersim Studio 10 ®: <i>Graphlinas(Time, Starttime; 1año; VQe)</i>	$\frac{m^3}{año}$
Oferta total anual de agua para uso humano	(OA)	Oferta proveniente del caudal superficial menos el caudal ecológico y la reducción por calidad. $OA = Qs - Qe - RC$	$\frac{m^3}{año}$
Viviendas que se pueden abastecer con la ampliación AVSP	(VA)	Número de viviendas que pueden ser abastecidas con la capacidad de abastecimiento del AVSP. $VA = \frac{CA}{CAV}$	viviendas
Viviendas no abastecidas	(VnA)	Si la cantidad de casas que pueden ser abastecidas son mayores a la cantidad de viviendas de la cuenca, entonces no habrá viviendas desabastecidas; en caso contrario, las viviendas no abastecidas serán su diferencia. $VnA(VA) = \begin{cases} 0, & VA \geq V \\ V - VA, & VA < V \end{cases}$ En Powersim Studio 10 ®: <i>VnA = IF(V ≤ -VA casas; 0 Casas; V - VA)</i>	viviendas
Agua suministrada	(AS)	Equivale al consumo de todas las viviendas abastecidas. $AS = CAV \times VA$	$\frac{m^3}{año}$
Agua no suministrada	(AnS)	Equivale al consumo de agua que tendrían las viviendas no abastecidas. $AnS = VnA \times CAV$	$\frac{m^3}{año}$

Demanda de agua para uso doméstico	(DAD)	Demanda de agua ya sea que se suministre o no adicionando el agua que se extrae, pero no se consume. $DAD = AnC + AS + AnS$	$\frac{m^3}{año}$
Escasez de agua	(EA)	Proporción de la demanda que se suple con la oferta, cuando el porcentaje es menor al 100% significa que hay escasez. $EA = \frac{DAD}{OA} \times 100\%$	%
Necesidad de ampliación de abastecimiento del acueducto	(NAAb)	El volumen anual de agua que hace falta para a la capacidad de abastecimiento del AVSP para cumplir con la demanda. $NAAb = DAD - CA$	$\frac{m^3}{año}$
Ampliación	(A)	Volumen anual de agua que debe ser adicionada a la capacidad de abastecimiento del AVSP, el cual depende de la existencia de necesidad de ampliación y de la demanda. $A(DAD) = \begin{cases} 150000, & DAD \leq AA \\ NAAb * \%A, & DAD > AA \end{cases}$ En Powersim Studio 10 ®: $A = IF(DAD \leq AA; 150000 \frac{m^3}{año}; NAAb * \%A)$	$\frac{m^3}{año}$

VARIABLES DE FLUJO

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Aumento de capacidad de abastecimiento	(FCA)	Volumen de ampliación anual que entra a la capacidad de abastecimiento de AVSP, en el caso de que la capacidad sea mayor a la oferta de agua, no será necesario ampliar la capacidad de abastecimiento, en caso contrario se ampliará. $FCA(CA) = \begin{cases} 0, & CA \geq OA \\ \frac{A}{TC}, & CA < OA \end{cases}$ En Powersim Studio 10 ®: $FCA = IF(CA \geq OA; 0 \frac{m^3}{año^2}; \frac{A}{TC})$	$\frac{m^3}{año^2}$

VARIABLES DE NIVEL

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Capacidad de abastecimiento AVSP	(CA)	Variable que acumula la capacidad de abastecimiento del AVSP. $CA_{(2010)} = CAi$ $\frac{CA(t)}{dt} = FCA$	$\frac{m^3}{año}$

Finalmente, para la simulación de la oferta de agua superficial se usó el volumen de agua superficial de la quebrada San Pedro simulado por RIA (2017a), el cual se hizo por medio del modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation and Planning System). Este modelo utiliza el método lluvia-escorrentía mediante un modelo de tanques semi-distribuido, que genera las series de caudales como variable respuesta a la altura del punto de control de la microcuenca, a partir de los registros de precipitación disponibles y de otros datos de entrada requeridos. La modelación hídrica con el WEAP tiene en cuenta los componentes de uso del suelo de la microcuenca San Pedro, balance hidrológico, evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial y flujo base. Los datos de entrada para la modelación de la oferta hídrica son la relación entre área boscosa, caudal medio y factores climáticos, tales como precipitación y temperatura. Es importante aclarar que la modelación de oferta de agua superficial con el modelo WEAP hace parte de otra investigación realizada en el marco del proyecto *“Evaluación de la efectividad ambiental de intervenciones forestales de restauración ecológica sobre la regulación hídrica de la microcuenca San Pedro, corregimiento de Santa Elena, Medellín, Colombia”*. En el Anexo C, se presentan los datos del caudal superficial simulados para los valores de cambio de uso de suelo de las políticas a evaluar.

4.5 Validación del modelo

La validación de un modelo de Dinámica de Sistemas permite verificar los resultados obtenidos, más allá de la capacidad de replicar datos históricos del sistema real. En la validación comprobamos que el modelo arroje los resultados correctos y lo haga por las razones correctas. La validación consta de las pruebas de verificación de la estructura, que permiten crear confianza en el modelo y en los resultados obtenidos por este. Este proceso de verificación se realiza a partir de dos pruebas: validación de la estructura y pruebas de comportamiento (Barlas, 1996). La validación de la estructura evalúa la consistencia de la estructura del modelo mediante la comparación directa con el conocimiento del sistema real. Esta parte se compone de pruebas directas que evalúan la validez a través de una confirmación de la estructura del modelo e indirectas, orientadas al comportamiento, utilizando la simulación como una herramienta para verificar la coherencia entre el modelo y la realidad (Barlas, 1996).

Para la validación de la estructura del modelo de sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro se realizó la prueba de verificación de la estructura, lo cual se hizo a partir de la información plasmada en la fase anterior, que permitió capturar la estructura del modelo. El modelo se construyó con un proceso iterativo de verificación y discusión hasta esta última versión. Además, todas las variables tienen un significado en la vida real e incluyen el conocimiento empírico del sistema. También se realizaron pruebas directas de confirmación

de parámetros usados en el modelo, mediante la revisión constante de los datos arrojados por las partes del modelo con el conocimiento obtenido en el sistema real (Barlas, 1996). Por ejemplo, la aproximación del año en el cual se empezó a necesitar la ampliación del acueducto San Pedro coincidió con lo expresado por la comunidad; al igual que la capacidad de ampliación del acueducto, que está relacionada con el crecimiento de la demanda de agua y el crecimiento poblacional. Igualmente, durante el desarrollo del modelo se evaluaron las unidades de cada variable del modelo con el fin de verificar la consistencia dimensional, como se muestra en la descripción de las ecuaciones del modelo.

Como parte de la validación de la estructura, se hicieron simulaciones parciales para verificar que cada parte de la modelo funcionaba de forma individual. Adicionalmente, se realizaron pruebas de condiciones extremas en donde se evaluó el comportamiento del modelo cuando éste era sometido a valores mínimos y máximos en variables, por ejemplo: si no hay migración en la zona no debe incrementar la población foránea, pero con una alta atractividad en la zona, la inmigración debe aumentar y, por ende, la población foránea. Con esta prueba se percibe que los resultados de la simulación se comportan como se espera, bajo condiciones extremas en el sistema socio-ecológico real.

Para la validación del comportamiento, se evaluó la capacidad del modelo de replicar el comportamiento histórico; pero considerando información limitada con la que se cuenta. En este caso, sólo se tienen tres (3) puntos históricos que, si bien no permiten un análisis completo, sirven como valores de referencia para la prueba de comportamiento de acuerdo con el sistema real. De esta manera, se evaluó la precisión de los valores numéricos de la simulación de las áreas de uso del suelo y población con los datos del sistema real. En las figuras 26 a la 29 se evidencia que los datos de la modelación coinciden y se comportan de forma similar a los datos reales, los cuales fueron suministrados por el Acueducto Veredal San Pedro, al igual que con los datos del análisis de las imágenes satelitales. Resalta que, si bien no es suficiente para una calibración, se observa que el modelo resulta en patrones de comportamiento similares.

Como parte del proceso de validación de la estructura, orientada al comportamiento, se realizó un análisis de sensibilidad para observar la incertidumbre asociada a la construcción del modelo. Para el análisis de sensibilidad del modelo del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, se realizó un análisis de Montecarlo mediante la herramienta de "Risk Assessment" disponible en el software Powersim Studio 10 ®. Se analizaron las variables de salida de área artificializada, área agrícola, área boscosa, capacidad de abastecimiento de AVSP, la población total y la escasez de agua (Figura 30 a 35).

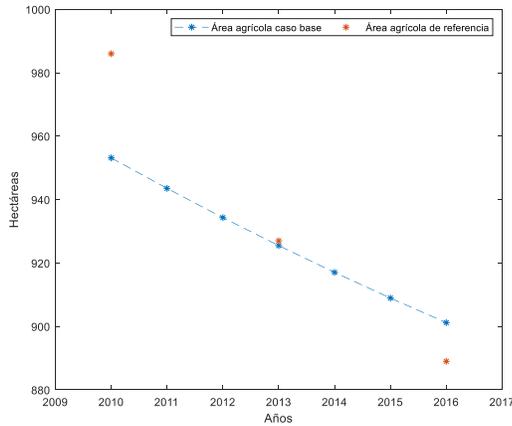


Figura 26. Comparación del área agrícola simulada con la de referencia*

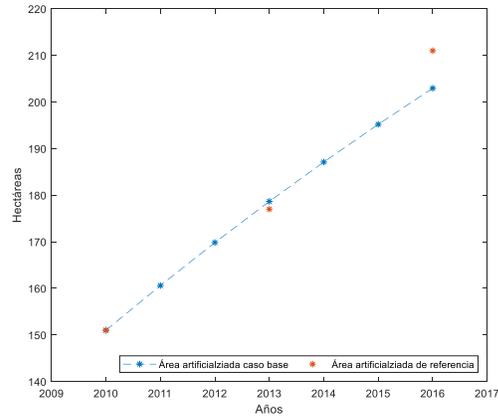


Figura 27. Comparación del área artificializada simulada con la de referencia**

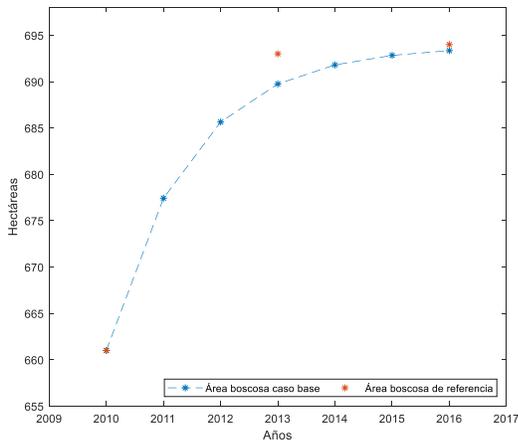


Figura 28. Comparación del área boscosa simulada con la de referencia***

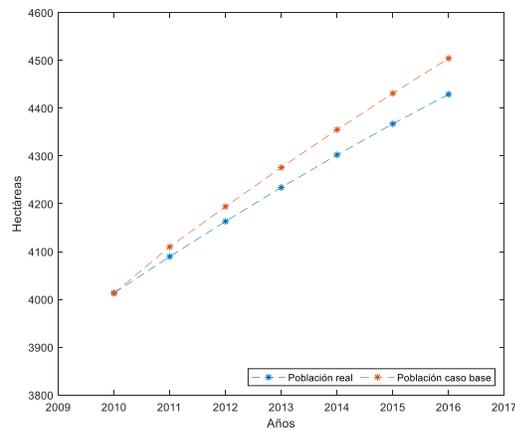


Figura 29. Comparación la población simulada con la de referencia****

- * El porcentaje de error entre los datos de área agrícola de referencia y los simulados van desde el 0% al 3%
- ** El porcentaje de error entre los datos de área artificializada de referencia y los simulados van desde el 0% a 4%
- *** El porcentaje de error entre los datos de área boscosa de referencia y los simulados van desde 0% al 1%
- **** El porcentaje de error entre los datos de la población total de referencia y los simulados va desde 0% al 5%.

Las variables de salida donde se refleja el análisis de sensibilidad son: el cambio de uso de suelo (áreas artificializada, agrícola y boscosa), capacidad de abastecimiento, población total y escasez de agua, y se realizaron cambios en los parámetros de: *área a reforestar por*

adquisición, tiempo de cambio de bosque de crecimiento, tasa ampliación de capacidad de abastecimiento, tiempo de Construcción, porcentaje de ampliación de capacidad de abastecimiento de agua.

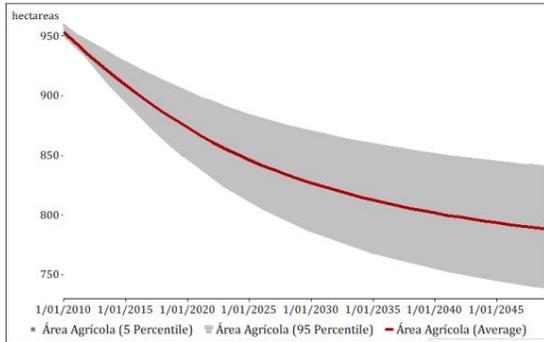


Figura 30. Análisis de sensibilidad para área agrícola

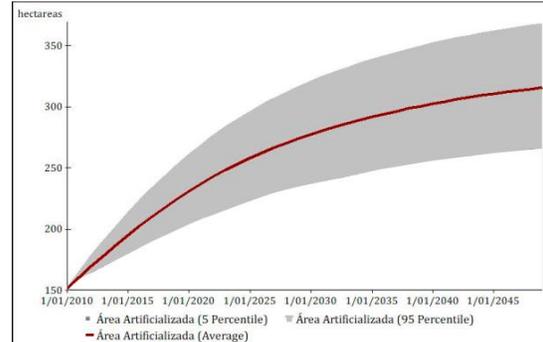


Figura 31. Análisis de sensibilidad para área artificializada

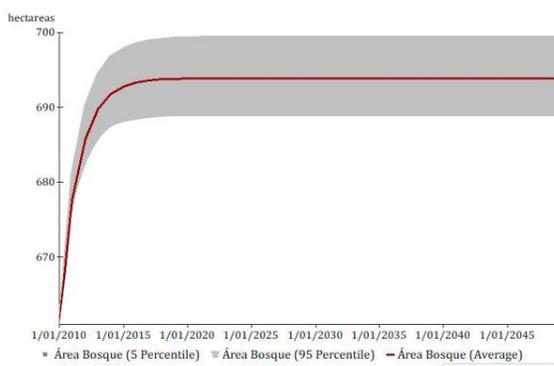


Figura 32. Análisis de sensibilidad para área bosque

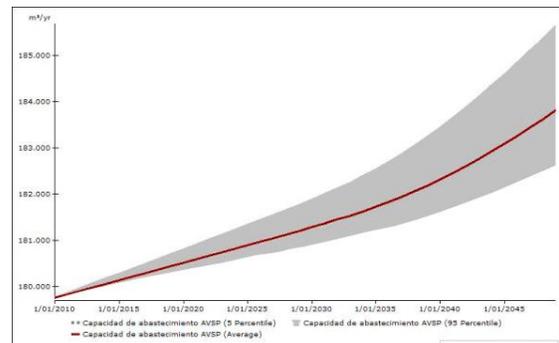


Figura 33. Análisis de sensibilidad para capacidad de abastecimiento de agua

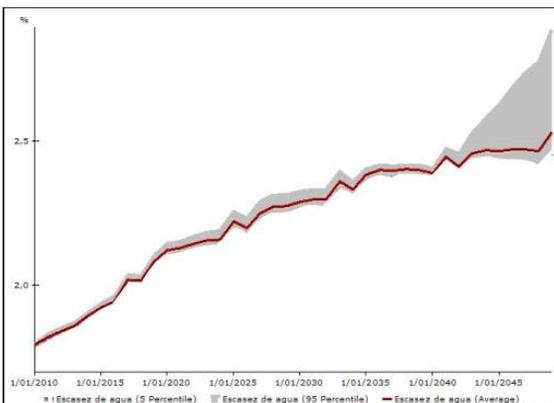


Figura 34. Análisis de sensibilidad Escasez de agua

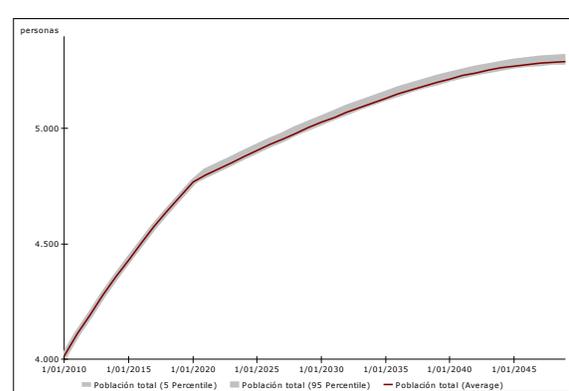


Figura 35. Análisis de sensibilidad población total

Como se muestra en la Tabla 16, se obtuvo un rango de sensibilidad de 0 a 20%, para las variables: *área para reforestar por adquisición*, *tiempo de cambio de bosque de crecimiento*, *tasa ampliación de capacidad de abastecimiento*, *tiempo de Construcción* y *%ampliación de capacidad de abastecimiento de agua*. Mientras que las variables de *área promedio de vivienda* y *tope ampliación de capacidad de abastecimiento* tienen un rango de variación de entre el 20 y 40%. Según se observa en las figuras anteriores y en la Tabla 16, para el tiempo simulado, los parámetros seleccionados generan una sensibilidad en el comportamiento de las variables de salida que se encuentra en un rango aceptable de confiabilidad.

Tabla 16. Porcentaje de sensibilidad para los parámetros evaluados

PARÁMETRO	FUENTE DEL DATO INICIAL	SENSIBILIDAD		
		0%-20%	20%-40%	40%-60%
Área para reforestar por adquisición	Alcaldía de Medellín, 2017	X		
Área promedio por vivienda	Encuestas de los usuarios del Acueducto Veredal San Pedro		X	
Tiempo de cambio de bosque de crecimiento	Información brindada por bióloga del proyecto RIA	X		
Tasa ampliación de capacidad de abastecimiento	Acueducto Veredal San Pedro	X		
Tiempo de Construcción	Se supuso a partir de lo relatado por los usuarios en el taller y las encuestas	X		
%Ampliación de capacidad de abastecimiento de agua	Dato supuesto	X		
Tope de ampliación de capacidad de abastecimiento	Dato supuesto		X	

Capítulo 5

Simulación de diferentes escenarios con las políticas de gestión según el modelo planteado

En este capítulo se presenta la simulación de cinco políticas, acompañadas por el diagrama de flujos y niveles, las ecuaciones y parámetros utilizados, los resultados y análisis de cada uno de los resultados de las políticas. Al finalizar este capítulo se concluye sobre lo observado en todos los resultados de la simulación de las políticas.

El objetivo del modelo de dinámica de sistemas del sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro es evaluar, a nivel de tendencias, los impactos que generan las políticas de gestión del recurso hídrico y el cambio de uso del suelo en el SSE. Para la evaluación de las políticas se siguió el objetivo del Decreto 958 del 2013, en el cual se establece que, para conservar el recurso hídrico, se deben adquirir y mantener áreas de importancia para este y/o financiar esquemas de pago por servicios ambientales (PSA) para su conservación o reforestación.

Los escenarios simulados se basan en el Decreto 958 de 2013 y están relacionados con la ejecución de esquemas de PSA, la compra de predios y una combinación de compra y PSA.

5.1 Caso base

El caso base modela la situación actual de la cuenca de estudio en donde se implementó la política de adquisición, reforestación y mantenimiento de predios de importancia para el recurso hídrico (Ver Figura 24 y Tabla 17). El área de reforestación por medio de la política de adquisición, reforestación y mantenimiento de predios es de (*Área a reforestar adq*) 32,86 hectáreas. Como se indicó en el capítulo anterior, se considera que el tiempo de crecimiento de la vegetación necesario para recuperar las funciones hidrológicas es de 8 años. En este caso no

se consideran transiciones de bosque a agricultura ya que las alcaldías de Medellín y Envigado cuentan con diferentes políticas de conservación de ecosistemas periurbanos, con lo cual el flujo de cambio bosque-agrícola (*Tasa cambio bos-agr*) es igual a cero (0). Para el 2019 no se había presentado una ejecución de la política por medio de esquemas por PSA, por lo que en el modelo el cambio de área de agricultura a bosque por PSA es cero (*Cambio de ag-bos PSA = 0*).

A continuación, se presentan los resultados de la modelación del caso base (ver Figura 36 a Figura 40). En las figuras se evidencia una disminución en el área agrícola, la cual se presenta porque cede el área para el crecimiento de bosque y para conversión a área artificializada, que está influenciada por el aumento de la población total.

Así mismo se observa crecimiento en la capacidad de abastecimiento de agua, que puede indicar un aumento de la demanda de agua doméstica y que da lugar a la necesidad de ampliar el acueducto para garantizar el abastecimiento de la población de las veredas en estudio.

Igualmente, los efectos de aumento del área artificializada y de la población total, se observa en el índice de escasez de agua el cual, a pesar de que no sobrepasa los índices que indican escasez en la zona, presenta un aumento.

Tabla 17. Caso base en el modelo de simulación

VARIABLES DEL MÓDULO DE CAMBIO DE USO DEL SUELO QUE SE MODIFICAN EN LA POLÍTICA 1

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, dada a las políticas 1, 4 y 5, cuando se cuente con terreno de bosque para ejecutar el cambio. Para esta política el valor es de: $Fba = 0$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 32,86$	Hectáreas
Cambio de ag-bos PSA	(Fabp)	Área que pasa de ser agrícola a ser de bosque en crecimiento por PSA, entiéndase como las hectáreas que se reforestan aplicando PSA entre el tiempo que tardan en ser reforestadas. $Fabp = 0$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$

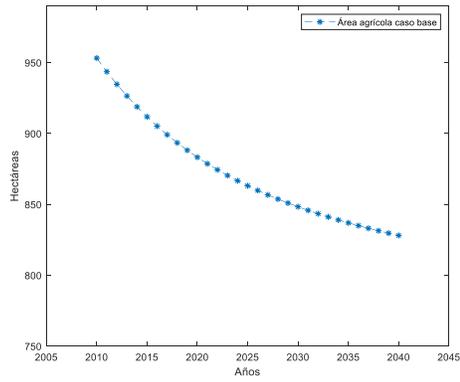


Figura 36. Caso base: área agrícola.

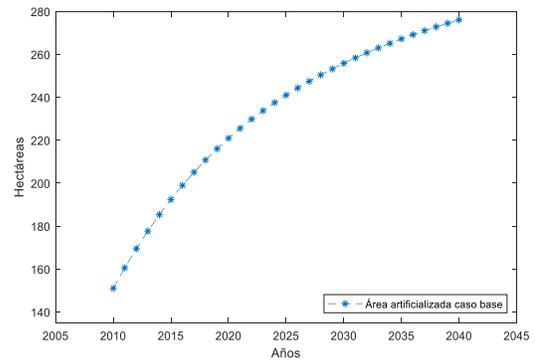


Figura 37. Caso base: área artificializada.

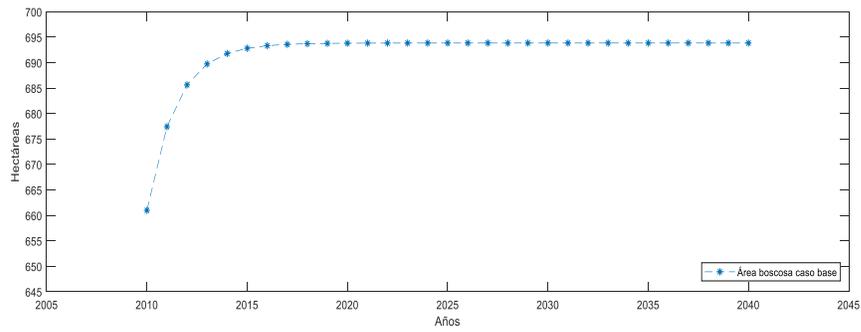


Figura 38. Caso base: área boscosa.

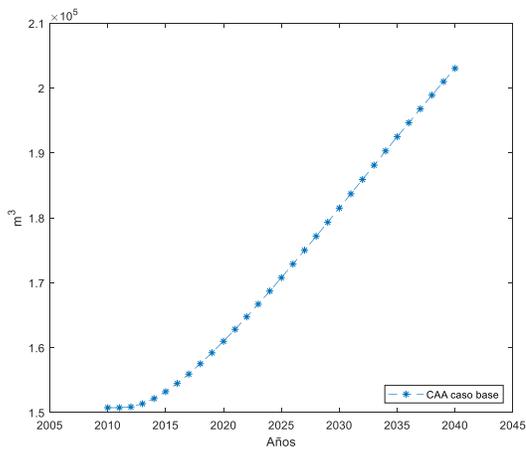


Figura 39. Caso base: capacidad de abastecimiento de agua.

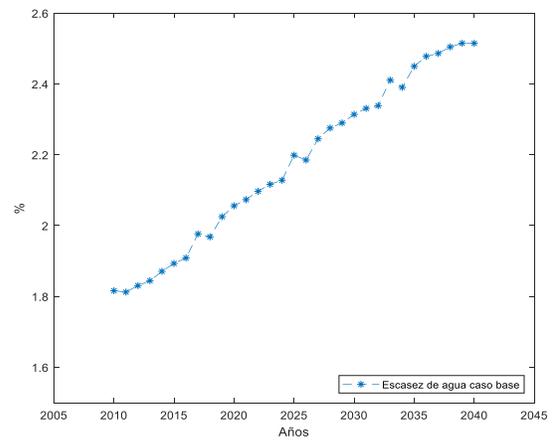


Figura 40. Caso base: Indices de escasez de agua.

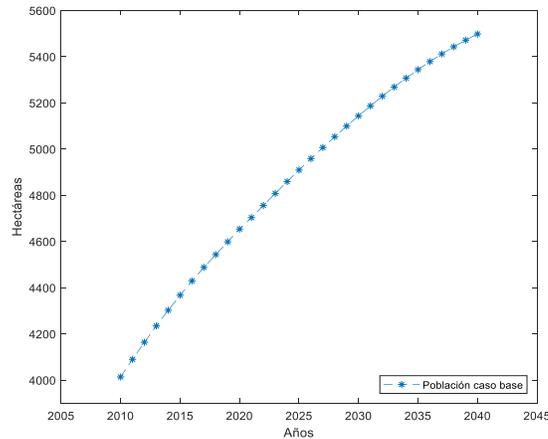


Figura 41. Caso base: Población total.

5.2 Escenario 1: No hay cumplimiento del Decreto 953 del 2013.

Como se mencionó en la sección 2.4.5 Evaluación y diseño de políticas, este escenario tiene la finalidad de observar las consecuencias de no ejecutar ninguna política de gestión del recurso hídrico. Los parámetros de estrategias de conservación como la adquisición para la reforestación, programas de reforestación, mantenimiento e incentivos con PSA no tienen valor, ya que el supuesto es que no se aplicará ninguna medida para la gestión del recurso hídrico.

Para la simulación de este escenario, se parte del modelo de flujos y niveles del cambio en el uso del suelo presentado en la Figura 24, en donde se asumió una *tasa de cambio de área boscosa a agrícola* de 0,9612 hectáreas por año de acuerdo a las áreas de bosque disponibles para el establecimiento de áreas para producción agrícola; asimismo, del valor obtenido a partir de la tasa de crecimiento del área artificializada. Este valor es implementado en la modelación debido a que, según lo observado en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, las coberturas de los suelos agrícolas y áreas de bosque son remplazadas por áreas para la construcción y establecimiento de viviendas en alquiler a corto plazo, con lo cual se pueden presentar altos niveles de deforestación. En la Tabla 18, se muestran los parámetros adicionales del modelo para la simulación del Escenario 1.

Tabla 18. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario uno

VARIABLES DEL MÓDULO DE CAMBIO DE USO DEL SUELO QUE SE MODIFICAN EN EL ESCENARIO 1

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, dadas las políticas 1, 4 y 5, cuando se cuente con terreno de bosque para ejecutar el cambio. Para esta política el valor es de: $Fba = 0,9612$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 0$	Hectáreas
Área a reforestar PSA	(ArefPSA)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ArefPSA = 0$	Hectáreas

En las siguientes figuras se evidencian los resultados de la modelación frente al no cumplimiento del Decreto 953 del 2013 (línea punteada naranja) y la comparación con el caso base (línea punteada azul) del área agrícola (Figura 432), artificializada (Figura 43), bosque (Figura 44), capacidad de abastecimiento de agua (Figura 45), Índice de Escasez de agua (Figura 46) y población total (Figura 47).

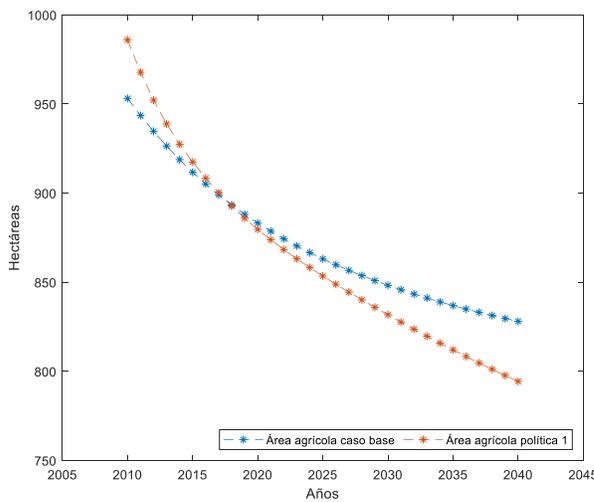


Figura 42. Escenario 1: Área agrícola

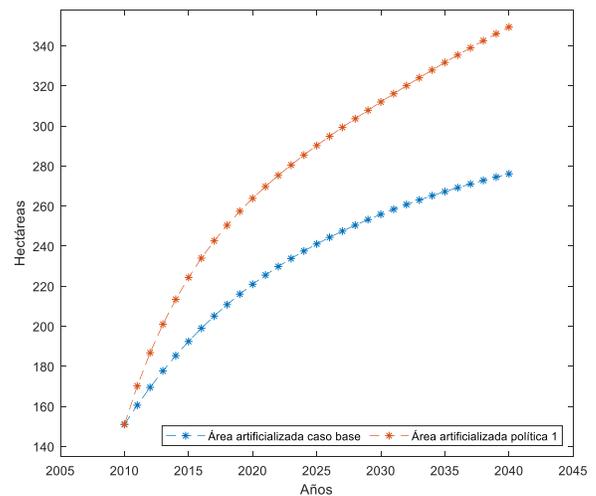


Figura 43. Escenario 1: Área artificializada

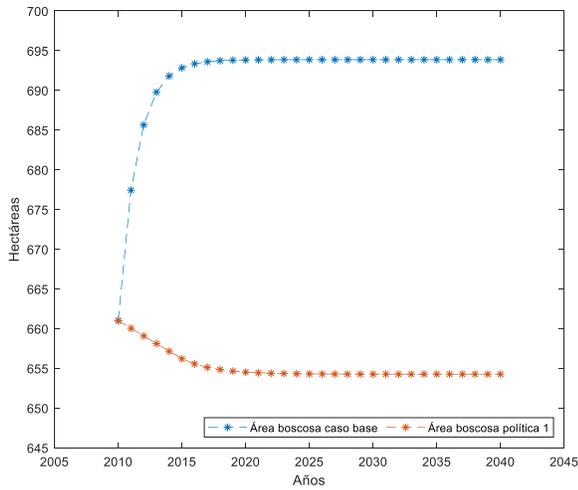


Figura 44. Escenario 1: Área boscosa

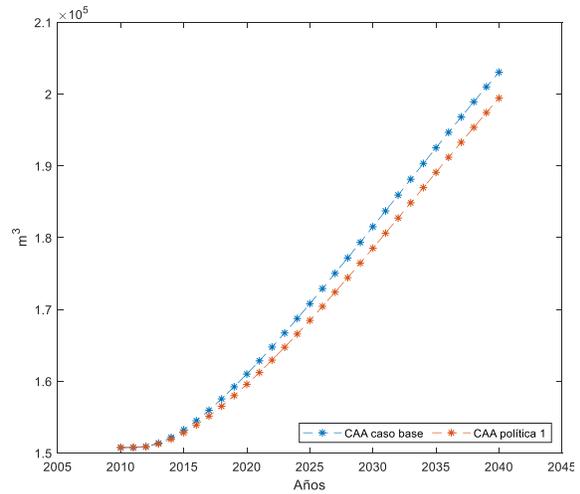


Figura 45. Escenario 1: Capacidad de abastecimiento de agua

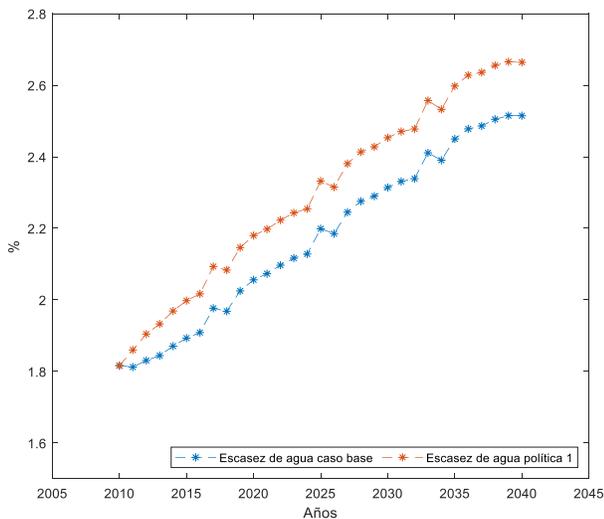


Figura 46. Escenario 1: Índice de escasez de agua.

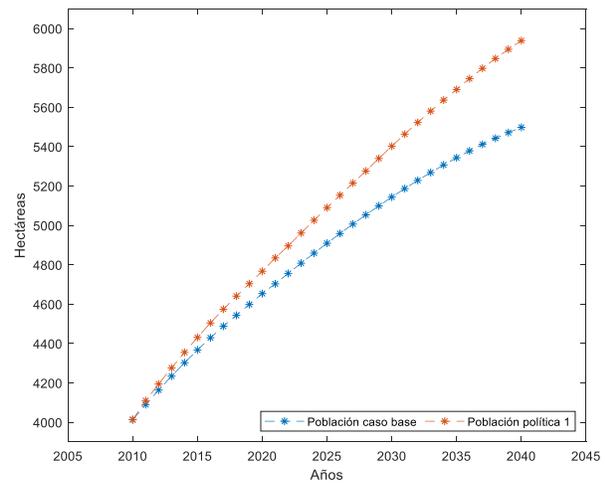


Figura 47. Escenario 1: Población total.

Como se muestra en la Figura 44, de acuerdo con los resultados de la modelación de escenario 1, el área de bosque disminuye con respecto al caso base, trayendo como consecuencia un aumento en el índice de escasez de agua (Figura 46) que, probablemente, se debe a los efectos de la reducción de áreas de bosque y por el aumento del área artificializada (ver Figura 45), la cual se ve influenciada por el aumento en la población total (ver Figura 47). En cuanto al área agrícola (ver Figura 42) se observa que al inicio es mayor que en el caso base y luego decrece, esto se debe a que al inicio de la simulación hay más área para cultivar proveniente del área de bosque disponibles, sin embargo, la fuerza de cambio que ejerce la demanda de área para la construcción de viviendas hace que sigan disminuyendo las áreas agrícolas. En cuanto a la

capacidad de abastecimiento de agua (ver Figura 45) se observa que crece menos en comparación con el caso base; esto se debe a que se presenta un crecimiento poblacional y, con ello, una mayor demanda de agua, sumándole el retardo en realizar la ampliación y garantizar el servicio de agua a sus usuarios.

5.3 Escenario 2: Se aplica la política por medio de adquisición, reforestación y mantenimiento de toda el área priorizada para conservación del recurso hídrico.

En este escenario se simula la implementación de una política rígida que se establece de acuerdo a la priorización de zonas por su importancia ambiental para el recurso hídrico. En este escenario se aplica la adquisición de todas las áreas agrícolas que se encuentren en dicha zona de importancia, con el fin de reforestar e implementar actividades de mantenimiento para la conservación del recurso hídrico. Con la modelación de este escenario se pretende analizar el comportamiento del sistema socio-ecológico al conservar y mantener toda el área de importancia para el recurso hídrico; asimismo, observar el impacto de este tipo de medida en la tendencia del índice de escasez de agua y cómo varía la población total al aumentar el área boscosa. Cabe aclarar que en este escenario se aplica la política de adquisición, reforestación de toda el área de uso agrícola perteneciente al área de importancia para el recurso hídrico (59,25 hectáreas), a diferencia del caso base en donde solo se adquiere y reforesta una parte (32,86 hectáreas).

Para la simulación de esta política se asume que *la tasa de cambio de uso de suelo bosque a agrícola* es cero (0) debido a que toda el área boscosa del sistema socio-ecológico se convierte en suelo de protección y conservación por los esfuerzos realizados por los municipios de Medellín y Envigado en conservar los ecosistemas periurbanos y por el interés de muchos habitantes en conservar el bosque de sus predios. Por lo tanto, para esta política el *área agrícola a reforestar por adquisición* es de 59,25 hectáreas (es el total del suelo agrícola en la zona priorizada) y *el cambio de uso de suelo agrícola a bosque por PSA* es igual a cero (0). En la Tabla 19, se muestran los parámetros que fueron cambiados dentro del modelo para la simulación de la política dos.

Tabla 19. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario dos

VARIABLES DEL MÓDULO DE CAMBIO DE USO DEL SUELO QUE SE MODIFICAN EN EL ESCENARIO 2

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, dada a las políticas 1, 4 y 5, cuando se cuente con terreno de bosque para ejecutar el cambio. Para esta política el valor es de: $Fba = 0$	Hectáreas año

Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 59,25$	Hectáreas
Tiempo de cambio agr a bosq adquisición	(TCab)	Tiempo necesario para que el área agricultura pase a ser área de adquisición. $TCab = 8$	Años
Área a reforestar PSA	(ArefPSA)	Área a reforestada por PSA. $ArefPSA = 0$	Hectáreas

En las siguientes figuras se evidencian los resultados de la modelación de la política de adquisición, reforestación y mantenimiento de toda el área priorizada para conservación del recurso hídrico (línea punteada naranja) y la comparación con el caso base (línea punteada azul) del área agrícola (Figura 48), artificializada (Figura 49), bosque (Figura 50), Índice de Escasez de agua (Figura 52) y población total (Figura 53).

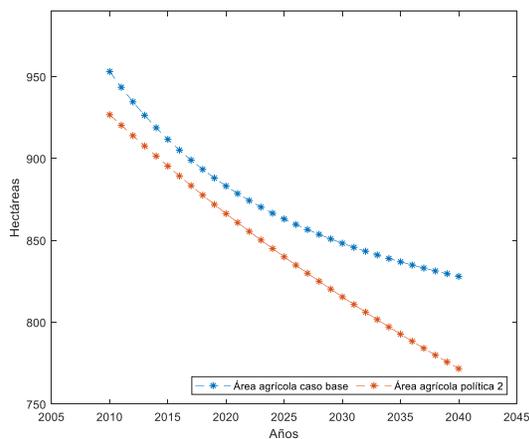


Figura 48. Escenario 2: Área agrícola

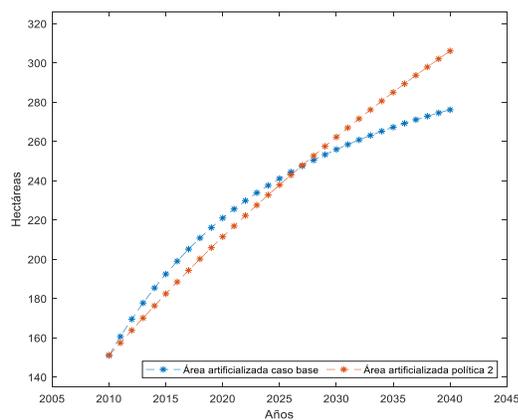


Figura 49. Escenario 2: Área artificializada

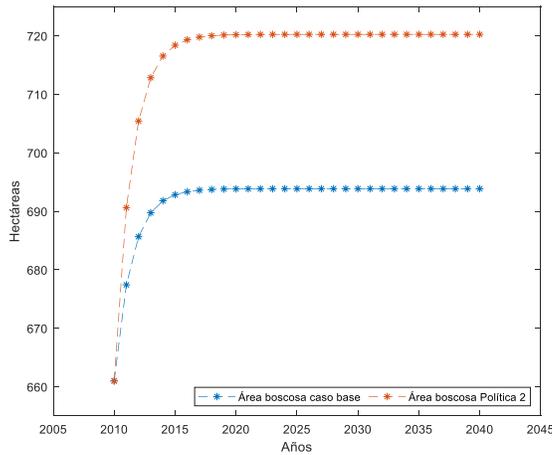


Figura 50. Escenario 2: Área bosque.

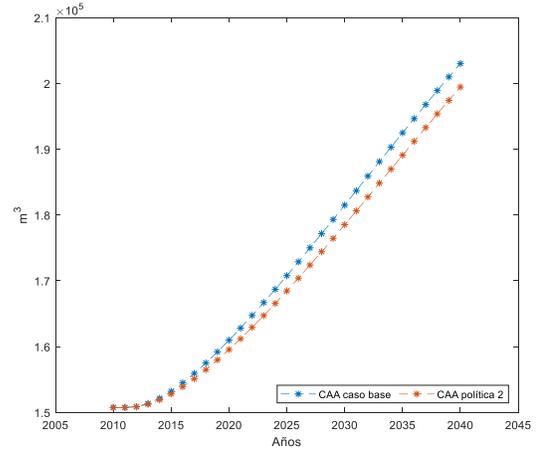


Figura 51. Escenario 2: Capacidad de abastecimiento de agua.

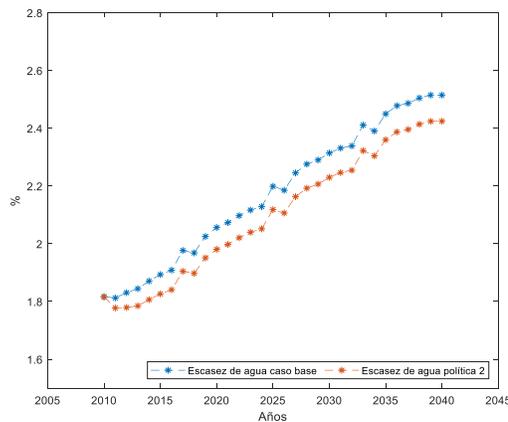


Figura 52. Escenario 2: Índice de escasez de agua.

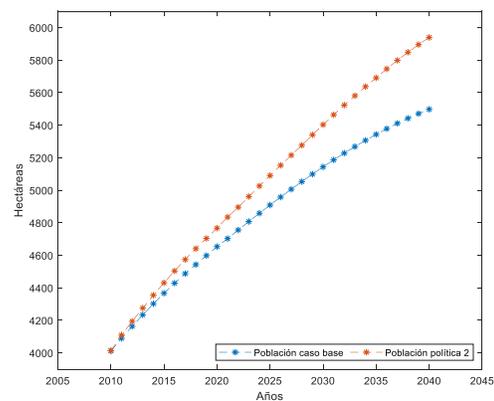


Figura 53. Escenario 2: Población total.

Como se puede evidenciar en las anteriores figuras, al crecer el área boscosa (Figura 50) se presenta una disminución en el índice de escasez de agua (Figura 52), que probablemente sea por el aumento en la regulación hídrica y, con ello, en la oferta hídrica, gracias al establecimiento y conservación de áreas de bosque. Adicionalmente, se presenta una disminución del área agrícola (ver Figura 48) debido a la adquisición de las áreas agrícolas pertenecientes a la zona de importancia ambiental para el recurso hídrico. De igual manera, disminuye debido al cambio de áreas agrícolas de la cuenca por áreas artificializadas; como se ha mencionado anteriormente, se dispone de áreas agrícolas para el establecimiento de viviendas. En cuanto al comportamiento del área artificializada (Figura 49), se observa que al principio es menor que en el caso base, pero crece rápidamente llegando a superarlo. Esto puede deberse a que inicialmente hay menor demanda de área para vivienda porque no hay un mayor crecimiento poblacional; también, porque hay una menor disponibilidad de área agrícola ya que es usada para la reforestación.

Con respecto a la capacidad de abastecimiento de agua (ver Figura 51) se observa que al inicio crece igual al caso base, pero luego aumenta a menor velocidad; esto se puede asociar al crecimiento que tiene la población total y, con ello, el área artificializada. También influye el retardo para llevar a cabo la construcción de la capacidad de abastecimiento de agua.

La ejecución de esta política tiene impactos positivos sobre la regulación hídrica y para la oferta hídrica. Caso contrario sucede como medida para frenar el aumento de área artificializada y crecimiento poblacional. Se puede llegar a deducir con lo anterior que, probablemente en un futuro, se presente en el sistema socio-ecológico de microcuenca San Pedro un conflicto por uso del suelo entre bosque de conservación y área artificializada.

5.4 Escenario 3: Se aplica la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA por tiempo indefinido en toda el área priorizada para la conservación del recurso hídrico

Para este escenario se modela la ejecución de la política de PSA en el área que era de uso agrícola y estaba dentro de la zona priorizada por su importancia para el recurso hídrico dentro de la zona de estudio. La diferencia de este escenario con respecto al anterior es que la variable *tiempo de crecimiento de bosque por PSA* es de 15 años, con un tiempo de crecimiento del bosque de 15 años, tiempo en que se considera que un bosque, por su estructura, puede proveer de servicio de regulación hídrica (García-Leoz et al., 2018), más los tiempo de retardo que se requieren para llevar a cabo el proceso de proyectos de PSA en Colombia, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Departamento Nacional de Planeación, (2018) .

A partir de ello, al simular este escenario se busca evidenciar, a nivel de tendencias, los efectos que tiene el retardo de la implementación de los esquemas de PSA en la zona de estudio. Así mismo, se observarán los impactos de la ejecución de este tipo de política con continuidad en el tiempo, al garantizar económicamente y técnicamente los acuerdos entre los municipios y los dueños de predios que se encuentran en la zona de importancia ambiental para el recurso hídrico.

Para esta modelación se tuvo en cuenta el modelo de flujos y niveles en el cambio de uso del suelo presentado en la Figura 24; se observa que el área que *cambia de agrícola a bosque por PSA* es de 59,25 hectáreas, que es el total del suelo agrícola en la zona priorizada por importancia ambiental para el recurso hídrico. Así mismo, la *tasa de cambio de bosque a agrícola* es cero (0) porque se sigue suponiendo que no se presenta deforestación debido a que en la zona se presentan ecosistemas periurbanos, conservados por las alcaldías de Medellín y

Envigado. Es una política enfocada a los PSA, el cual es un instrumento económico que, a través de acuerdos voluntarios, otorga incentivos en dinero o en especie a los productores que realicen acciones de conservación en sus predios ubicados en ecosistemas estratégicos, por lo tanto no hay un *cambio de uso de suelo agrícola a bosque por adquisición* (ver Tabla 20).

Tabla 20. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario tres

VARIABLES DEL MÓDULO DE CAMBIO DE USO DEL SUELO QUE SE MODIFICAN EN EL ESCENARIO 3

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, dada a las políticas 1, 4 y 5, cuando se cuente con terreno de bosque para ejecutar el cambio. Para esta política el valor es de: $Fba = 0$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 0$	Hectáreas
Tiempo de cambio bosq a agr PSA	(TCba)	Tiempo necesario para que el área de bosque pase a ser área de agricultura por PSA. $TCba = 15$	Años
Área a reforestar PSA	(ArefPSA)	Área a reforestada por PSA. $ArefPSA = 59,25$	Hectáreas

En las siguientes figuras se evidencian los resultados de la modelación de la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA por tiempo indefinido en toda el área priorizada para la conservación del recurso hídrico y la comparación con el caso base del área agrícola (Figura 54), artificializada (Figura 55), bosque (Figura 56), capacidad de abastecimiento de agua (Figura 57), Índice de Escasez de agua (Figura 58) y población total (Figura 59).

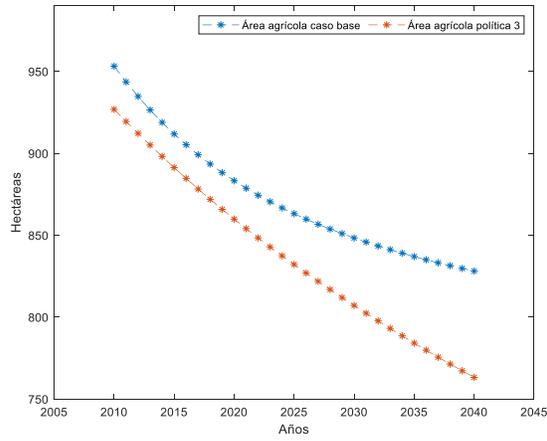


Figura 54. Escenario 3: Área agrícola

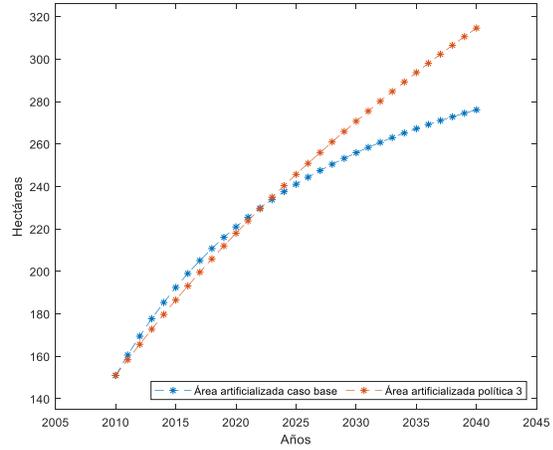


Figura 55. Escenario 3: Área artificializada

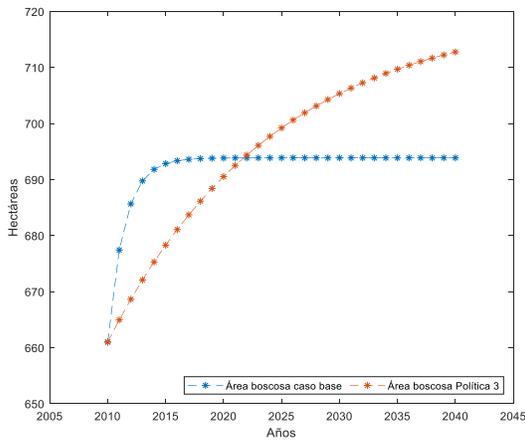


Figura 56. Escenario 3: Área bosque

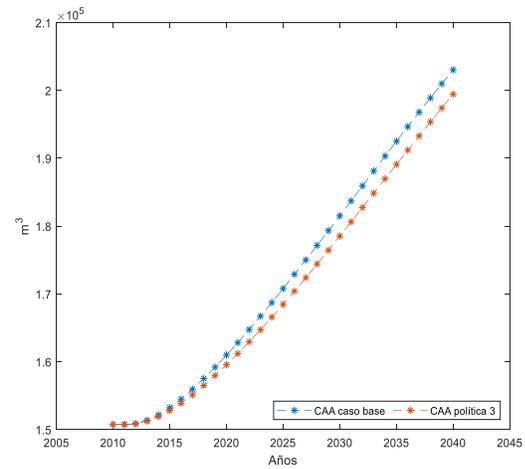


Figura 57. Escenario 3: Capacidad de abastecimiento de agua

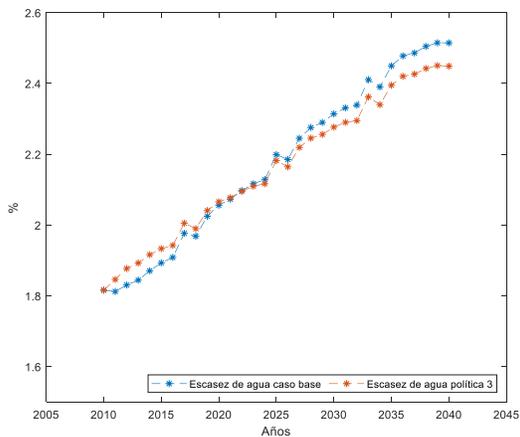


Figura 58. Escenario 3: Índice de escasez de agua

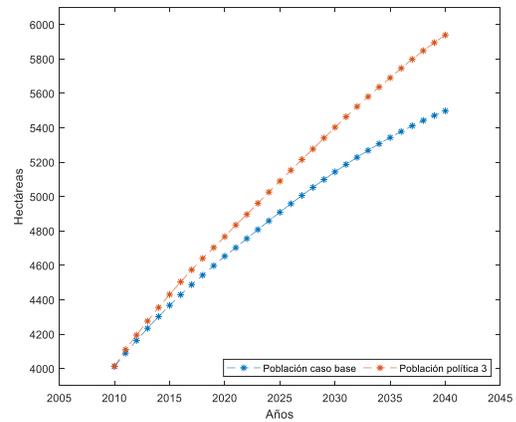


Figura 59. Escenario 3: Población total.

Como se puede observar en la Figura 56, el crecimiento del área de bosque se da de una forma paulatina debido al tiempo que requiere para ser parte del proyecto PSA (15) contando con el tiempo de crecimiento del bosque (8 años) y el retardo en tiempo para la ejecución del proceso de proyectos de PSA en Colombia, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Departamento Nacional de Planeación, (2018). El comportamiento de esta área afecta el índice de escasez (Figura 58); en los primeros años presenta un aumento y va disminuyendo a medida que el área de bosque aumenta.

En cuanto al área artificializada (Figura 55) se observa que tiene un comportamiento similar al Escenario 2, de la política de adquisición, reforestación y mantenimiento de toda el área priorizada para conservación del recurso hídrico; sin embargo, la diferencia radica en que en el escenario de PSA el crecimiento inicial es un poco mayor; esto puede deberse a que al principio de la simulación el área agrícola podía suplir la demanda de área para vivienda, la cual aumenta a medida que la población total también lo hace (Figura 59).

El área agrícola (Figura 54) presenta un comportamiento similar al Escenario 2; esto es porque esta área tiene dos fuerzas de cambio: el cambio a artificializado, que aumenta a medida que aumenta la población total de la zona, y el cambio a bosque, que lo hace a partir de la ejecución de la política. Igualmente sucede con la capacidad de abastecimiento de agua (Figura 57), la cual tiene un comportamiento de crecimiento por el aumento del área artificializada y la población total, y junto a estas dos variables, también repercute en la necesidad de ampliación del acueducto debido a la demanda de agua doméstica, sumándole a esto el retardo que tiene la construcción de la ampliación del acueducto veredal.

5.5 Escenario 4: Se aplican las dos políticas: una parte por adquisición de predios y reforestación y la otra por medio de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA (Se modelan 3 casos para PSA que 5, 10 y 15 años después de que el área reforestada sea bosques, cambian a suelo agrícola)

Con la simulación de esta política se quieren evaluar los impactos que puede tener el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro al ejecutar la combinación de las dos políticas: adquisición, reforestación y mantenimiento de predios de importancia hídrica y la aplicación de esquemas de PSA. Además, se agregó la condición de que después de 5, 10 y 15 años de que el área reforestada se convirtiera en bosque, no habría continuidad de la política por esquemas de PSA.

Esta política tiene dos partes, la primera desarrollada en el modelo de flujos y niveles en el cambio de uso del suelo presentado en la Figura 24, en donde el *cambio del área agrícola a*

bosque por medio de adquisición de predios tiene un valor de 32,86 hectáreas y será suelo usado únicamente para conservación y protección del recurso hídrico¹⁴. En la segunda parte se tiene en cuenta la ejecución de la política de PSA, donde el *cambio de uso de suelo agrícola a boscosa por medio de PSA*, tiene un valor de 26,39 hectáreas¹⁵ (ver la variable en la Figura 24). De acuerdo con el diagrama de flujos y niveles complementario presentado en la Figura 60, los años que se deja de implementar la política de PSA, para que se modele el cambio de uso de suelo boscosa a agrícola, son: 5 años (2025), 10 (2030) y 15 (2035); el área que cambia de boscosa a agrícola es de 0,9612 hectáreas. Este valor es obtenido a partir de la tasa de crecimiento del área artificializada y es implementado en la modelación debido a que, según lo observado en el sistema socio-ecológico de la microcuenca San Pedro, los suelos agrícolas son pocos y la mayoría son remplazados por viviendas en alquiler a corto plazo, con lo cual, si se llegaran a presentar altos niveles de deforestación, es probable que fuera para construcción de viviendas (ver

Tabla 21).

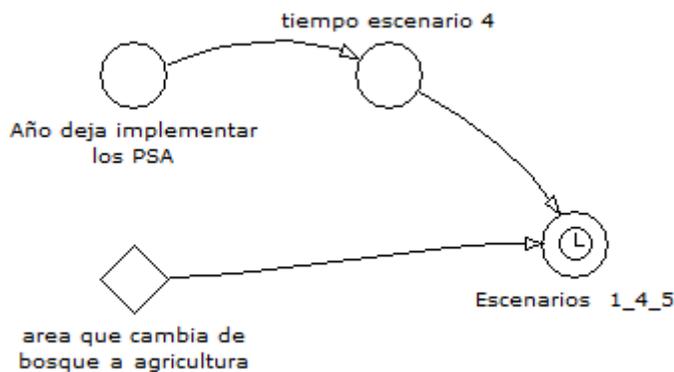


Figura 60. Diagrama de flujos y niveles complementario para el escenario cuatro

¹⁴ Este valor es el área agrícola de la zona priorizada y seleccionada para priorización, el cual ya se mencionó en la sección 0 3.4 Factores de cambio de uso del suelo presentes en la cuenca

¹⁵ Este valor es el área agrícola de la zona priorizada y seleccionada para priorización, el cual ya se mencionó en la sección 0 3.4 Factores de cambio de uso del suelo presentes en la cuenca

Tabla 21. Parámetros utilizados para la modelación en el escenario cuatro

VARIABLES ADICIONALES DEL ESCENARIO 4			
Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Año en que se deja de implementar la política	(AIP)	Año en que se deja de implementa la política de PSA $AIP = 2025, 2030, 2035$ Esta variable cambia dependiendo de los años en que se deja de implementar la política, suponiendo que en el año 2020 el área que fue reforestada es considerado un bosque maduro. Entonces: 5 años=2025; 10 años= 2030; 15 años=2035	Adimensional
Área que cambia de bosque a agricultura	(AcBosqAgr)	Número de hectáreas de área a reforestar. $AcBosqAgr = 0,9612$	Hectáreas
Tiempo escenario 4	(TP4)	Variable de operación matemática para operar el año en el que se implementa el escenario 4. En Powersim Studio 10 ®: $TP4 = (AIP - YEAR(STARTTIME)) * 1 \text{ año}$	Años
escenario 4	(E4)	Número de hectáreas que se deforestan. En Powersim Studio 10 ®: $E4 = STEP(AcBosqAgri; STARTTIME + TP4)$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$

VARIABLES DEL MÓDULO DE CAMBIO DE USO DEL SUELO QUE SE MODIFICAN EN EL ESCENARIO 4

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, de acuerdo con la disponibilidad de bosque para la transición a áreas agrícolas. $Fba(AB) = \begin{cases} 0, & AB \leq 0 \\ RCba, & AB > 0 \end{cases}$ En Powersim Studio 10 ®: $Fba = IF\left(AB \leq 0 \text{ hectáreas}; 0 \frac{\text{hectáreas}}{\text{año}}; RCba\right)$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Tiempo de cambio agr a bosq adquisición	(TCab)	Tiempo necesario para que el área agricultura pase a ser área de adquisición. $TCab = 8$	Años
Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 34,86$	Hectáreas
Tiempo de cambio bosq a agr PSA	(TCba)	Tiempo necesario para que el área de bosque pase a ser área de agricultura por PSA. $TCba = 15$	Años

Área a reforestar PSA (ArefPSA) Área a reforestada por PSA.
 $ArefPSA = 26,39$ Hectáreas

Los años en que se deja de implementar la política de PSA (2025, 2030 y 2035), son supuestos por si se llegan a modificar o incumplir los acuerdos entre entes gubernamentales y los dueños de los predios por pagos por servicios ambientales, debido a cambios gubernamentales. La consecuencia de esto sería un aumento del riesgo de deforestación en la zona por la variación en los incentivos económicos o por detener su ejecución.

En las siguientes figuras se evidencian los resultados de la modelación de la aplicación de las dos políticas: una parte por adquisición de predios y reforestación, y la otra por medio de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA donde, dentro de 5, 10 y 15 años después de que el área reforestada sea bosque, cambia a suelo agrícola (Figura 61) y área artificializada (Figura 62); también se muestran en el área de bosque (Figura 63), población total (Figura 64), demanda de agua doméstica (Figura 65) y capacidad de abastecimiento de agua (Figura 66).

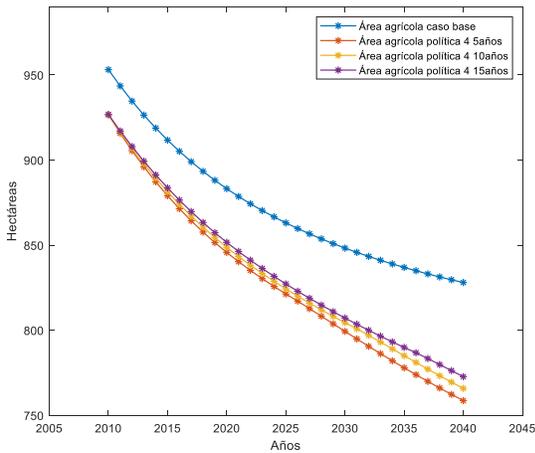


Figura 61. Escenario 4: Área agrícola

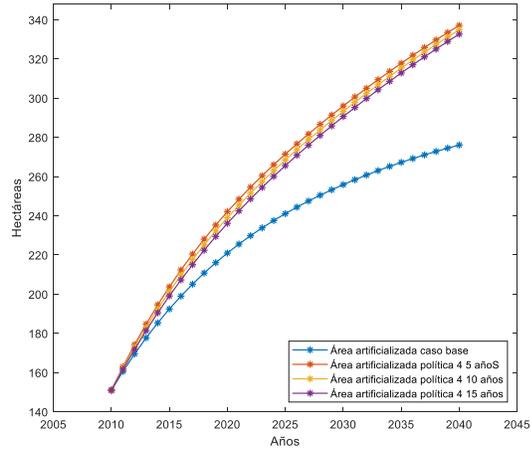


Figura 62 Escenario 4: Área artificializada

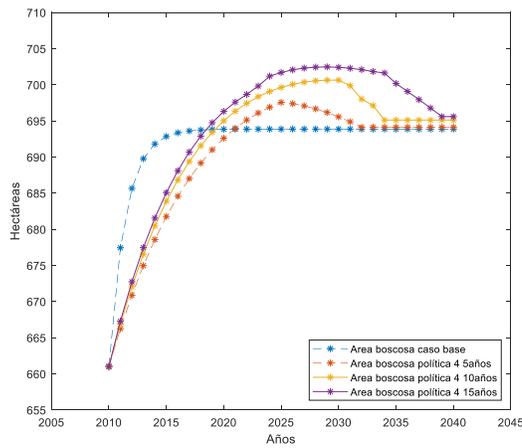


Figura 63. Escenario 4: Área bosque

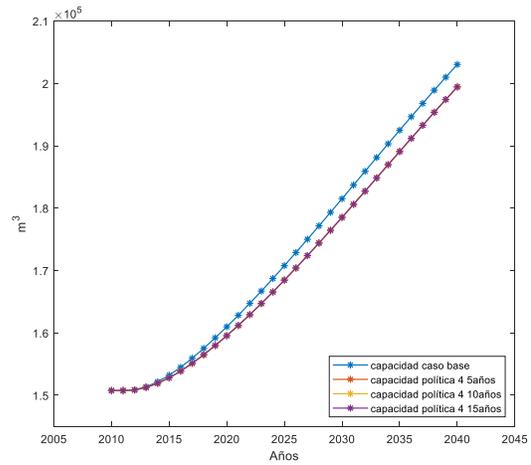


Figura 64. Escenario 4: Capacidad de abastecimiento de agua

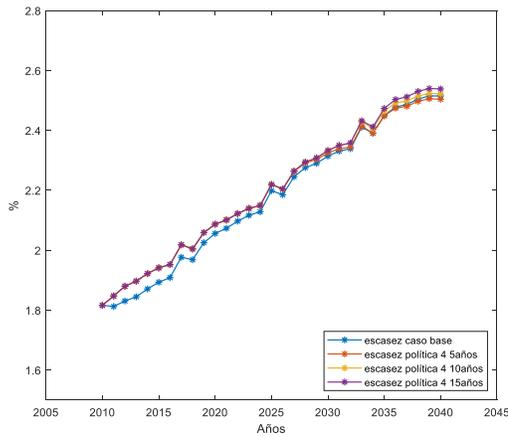


Figura 65. Escenarios 4: Índice de escasez de agua

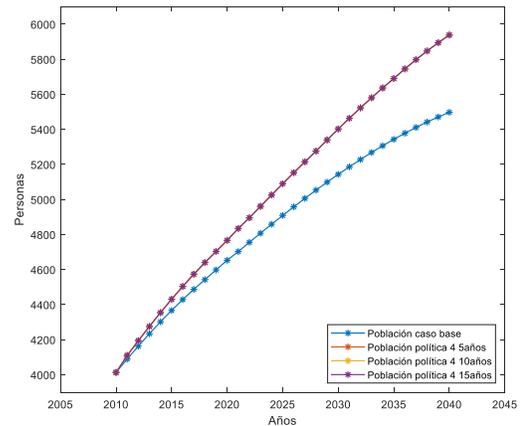


Figura 66. Escenario 4: Población total

Como se puede observar en la Figura 61, con la simulación de esta política el área agrícola decrece gradualmente, debido a que se requiere este tipo de suelo para atender la demanda tanto de las viviendas que se ve reflejada en el crecimiento del área artificializada como para la ejecución de la política, en donde se toma las áreas agrícolas para la reforestación. Para el área artificializada (ver Figura 62) en general presenta un crecimiento, pero es menor con el escenario de 15 años; esto puede deberse a que el área boscosa obtiene más área del suelo agrícola para la reforestación. En cuanto a la población total (Figura 66) aumenta en comparación con el caso base, pero también se muestra que no hay una diferencia significativa en los años en los que se deja de implementar la política de PSA.

En cuanto a la capacidad de abastecimiento de agua (ver Figura 64) tiene un crecimiento menor que el caso base debido a que tanto la población total como el área artificializada crecen, generando así un posible aumento en la demanda de agua doméstica y, con ello, la

necesidad de ampliar el acueducto, lo cual es difícil de contrarrestar por el retardo que tiene la construcción de dicha ampliación.

El área boscosa (ver Figura 63) es la variable en donde se pueden apreciar mayores cambios con la simulación de este escenario, debido a que se observa el aumento parcial del área de bosque de acuerdo a la adquisición de áreas agrícolas a partir de 2010 (34,86 hectáreas) y los incentivos de PSA a áreas agrícolas que se encuentran en la zona de importancia ambiental para el recurso hídrico que se fueron implementando a partir de 2010, sumado al retardo por su tasa de crecimiento: el establecimiento del bosque tarda unos 15 años (descrito en el Escenario 3). De esta forma, se observa que, a partir de los años 2025, 2030 y 2035 llega el crecimiento de áreas de bosques gracias a la implementación de las políticas de adquisición y PSA. Sin embargo, en cada uno de esos años respectivamente se dejó de implementar la política de PSA y por ende disminuye el área de bosque, ya que vuelven a ser deforestados para establecer áreas agrícolas o artificializada para la obtención de recursos económicos. La disminución del área de bosque en cada uno de los años en que se deja de implementar la política de PSA no es menor al área de bosque del caso base ya que la adquisición de predio en este escenario continua en el tiempo al igual que se expone en el caso base. Con estos resultados se deduce la importancia de implementar ambas políticas con continuidad en el tiempo para conservar y proteger la zona de importancia ambiental para el recurso hídrico de la cuenca, ya que pueden servir como forma de mitigar la disminución del área de bosque por el establecimiento de áreas agrícolas o áreas para la construcción de viviendas.

Con respecto al índice escasez de agua (ver Figura 65) se muestra que al inicio, en los tres cortes de años, aumenta en comparación con el caso base y a medida que va creciendo el área boscosa, este va disminuyendo hasta igualar el caso base. Solo cuando se simulan los años de discontinuidad de la política de pagos por servicios ambientales, este vuelve a aumentar. Esto se debe a que a medida que aumenta el área boscosa por la ejecución de las dos políticas el índice de escasez disminuye y cuando empieza a haber una discontinuidad de la política de PSA se ve reflejado en el aumento de la disponibilidad de agua. De igual forma, su aumento se debe a las diferentes presiones existentes en el sistema socio-ecológico en estudio, como es el crecimiento poblacional y, con ello, el área artificializada, que pueden aumentar la demanda de agua doméstica.

5.6 Escenario 5: Se aplica la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA y después de que el área reforestada es un bosque maduro, diferentes porcentajes del área vuelven a agricultura

Con la simulación de este escenario se quieren observar los impactos a que conlleva la suspensión de la política de PSA en el sistema socioecológico en estudio. Es decir, después de que el área reforestada por medio de esquemas de Pagos por Servicios Ambientales se convierte en bosque, este cambia a área agrícola en diferentes porcentajes de 80%, 50%, 30% y 10% del área reforestada para conservación del recurso hídricos. La suspensión de la implementación de dicha política puede ocurrir al incumplirse los acuerdos entre entes gubernamentales y dueños de predios de importancia hídrica o por decisión de personas tomadoras de decisiones.

Para la simulación de esta política se usaron los diagramas de flujos y niveles de la Figura 24 y la Figura 67, en los cuales el cambio de área agrícola a bosque por PSA es de 59,25 hectáreas. Luego de que la zona reforestada y conservada es bosque, esta empieza a pasar a suelo de uso agrícola, en diferentes porcentajes (área que cambia de bosque a agrícola): de 80% (47,40 ha), 50% (29,6 ha), 30% (17,75 ha) y 10% (5,26 ha) del área reforestada por esta política, dentro de 5 años (año en que se deja de implementar la política de PSA), suponiendo que los acuerdos entre el gobierno y los propietarios o poseedores de los predios de incentivar la reforestación, finalice por cambio de administración municipal y entonces se dé la reducción de incentivos monetarios para el sostenimiento de dichos bosques destinados a la conservación. En la Tabla 22 se muestran los parámetros utilizados para la modelación de esta política.

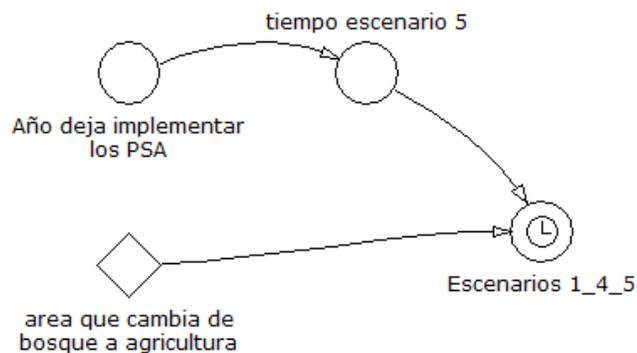


Figura 67. Diagrama de flujos y niveles complementario para el escenario cinco

Tabla 22. Parámetros utilizados para la modelación del escenario 5

VARIABLES ADICIONALES DEL ESCENARIO 5

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Año en que se deja de implementar la política	(AIP)	Año en que se deja de implementar la política de PSA $AIP = 2025$	Adimensional
Área que cambia de bosque a agricultura	(AcBosqAgr)	Número de hectáreas de área a dereforestar. $AcBosqAgr = 47,40; 29,6; 17,75; 5,926$ Esta área cambia dependiendo del porcentaje de área reforestada que se cambia de bosque a agricultura, si es de 80%=47,40 ha, 50%=29,6ha, 30% 17,75 ha, 10%5,926	Hectáreas
Tiempo escenario 5	(TP5)	Variable de operación matemática para operar el año en el que se implementa el escenario5. En Powersim Studio 10 @: $TP5 = (AIP - YEAR(STARTTIME)) * 1 \text{ año}$	Años
escenario 5	(P5)	Número de hectáreas que se deforestan. En Powersim Studio 10 @: $P5 = STEP(AcBosqAgri; STARTTIME + TP5)$	Hectáreas

VARIABLES DEL MÓDULO DE CAMBIO DE USO DEL SUELO QUE SE MODIFICAN EN EL ESCENARIO 5

Nombre	ID	Ecuación y/o comentario	Unidades
Tasa cambio bos-ag	(Fba)	Área que pasa de ser bosque a ser agrícola, cuando se cuente con terreno de bosque para ejecutar el cambio $Fba(AB) = \begin{cases} 0, & AB \leq 0 \\ RCba, & AB > 0 \end{cases}$ En Powersim Studio 10 @: $Fba = IF\left(AB \leq 0 \text{ hectáreas}; 0 \frac{\text{hectáreas}}{\text{año}}; RCba\right)$	$\frac{\text{Hectáreas}}{\text{año}}$
Área a reforestar adq	(ARef)	Área adquirida que debe ser reforestada. $ARef = 0$	Hectáreas
Tiempo de cambio bosq a agr PSA	(TCba)	Tiempo necesario para que el área de bosque pase a ser área de agricultura por PSA. $TCba = 15$	Años
Área a reforestar PSA	(ArefPSA)	Área a reforestada por PSA. $ArefPSA = 59,26$	Hectáreas

En las siguientes figuras se evidencian los resultados de la modelación de la política de esquemas de Pago de Servicios Ambientales PSA con interrupción de esta en diferentes

tiempos, y la comparación con el caso base del área agrícola (Figura 68), artificializada (Figura 69), bosque (Figura 70), capacidad de abastecimiento de agua (Figura 71), Índice de Escasez de agua (Figura 72) y población total (Figura 73).

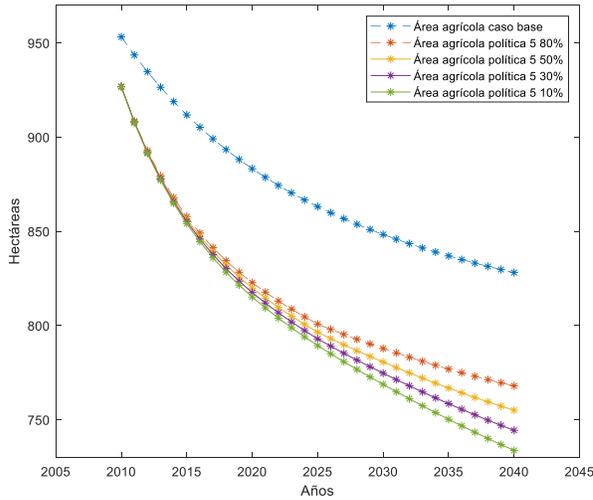


Figura 68. Escenario 5: Área agrícola.

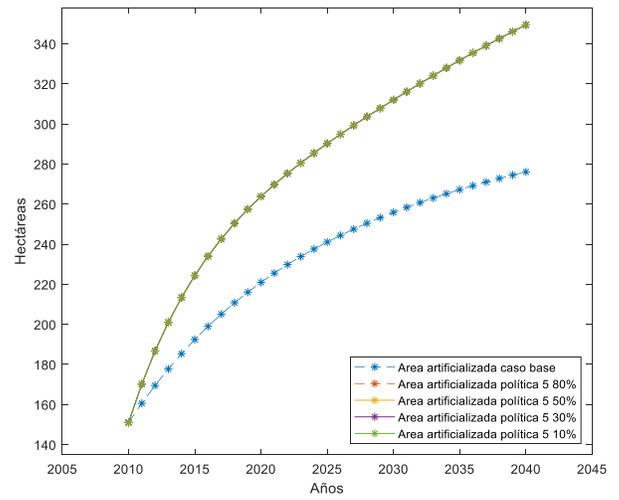


Figura 69. Escenario 5: Área artificializada.

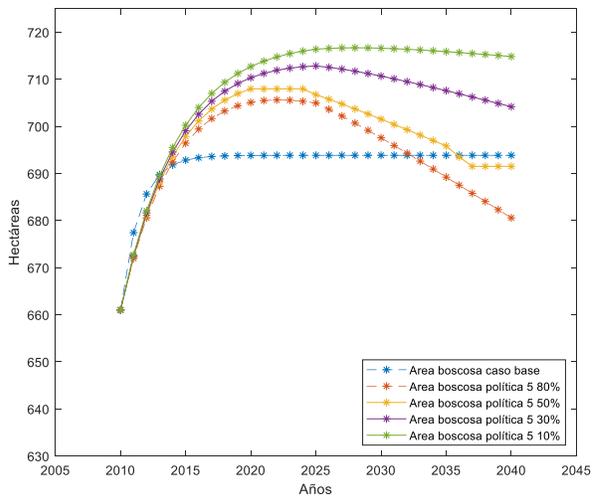


Figura 70. Escenario 5: Área bosque.

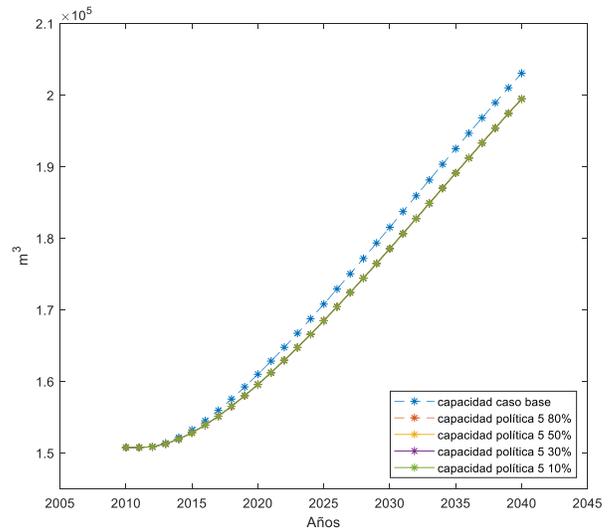


Figura 71. Escenario 5: Capacidad de abastecimiento de agua.

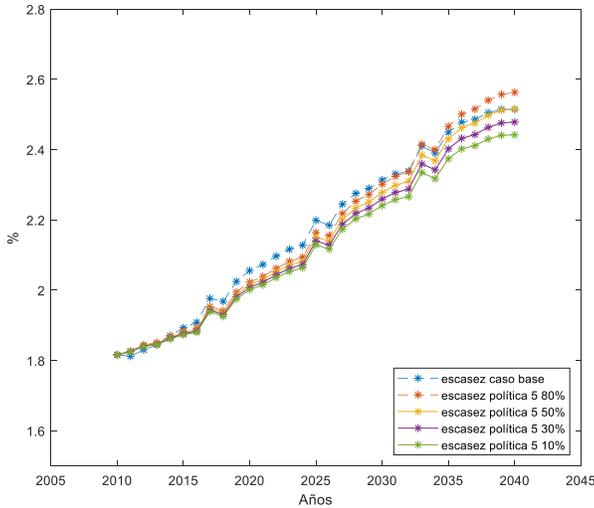


Figura 72. Escenario 5: Indice de escasez de agua.

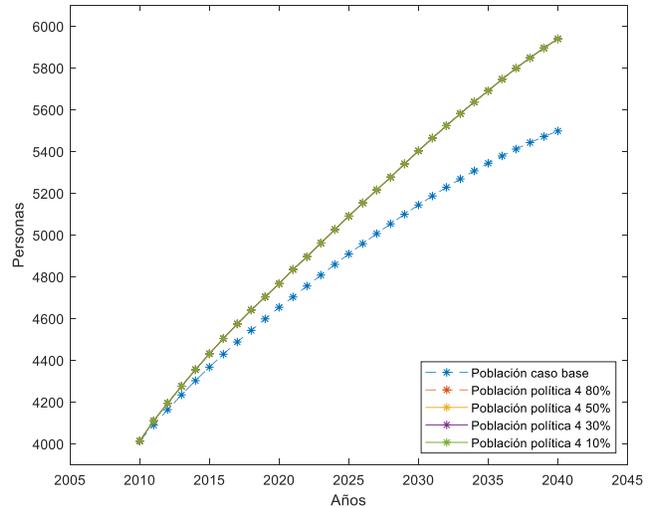


Figura 73. Escenario 5: Población total.

Como se observa en la Figura 68, el área agrícola en todos los porcentajes de cambio de uso de suelo de bosque a agrícola es menor con respecto al caso base, debido a que esta área tiene dos fuerzas de cambio que hace que se disminuya, como lo son la demanda de área para la construcción de viviendas y el área requerida para la ejecución de la política de esquemas de PSA que, a pesar de que disminuye en distintos tiempos, no hace la diferencia en el área agrícola.

Con respecto al área boscosa (ver Figura 70), se evidencian diferentes cambios dependiendo del porcentaje de cambio de área boscosa a agricultura. Con la modelación del cambio de un 80% y 50% del área priorizada que cambia de área bosque a agricultura, se muestra que el área de uso de bosque aumenta hasta sobrepasar el caso base, pero empieza a disminuir significativamente, hasta llegar a un valor un poco menor a este. Con la simulación del 30% y 10% del cambio de suelo bosque a agrícola sucede lo mismo que en las anteriores, con la diferencia de que, al momento de disminuir, no llegan al caso base.

En cuanto a los resultados arrojados con la capacidad de abastecimiento (Figura 71) tiene un comportamiento de crecimiento por el aumento del área artificializada y la población total, que hace que crezca la demanda de agua doméstica y con ello la necesidad de ampliación del acueducto, sumándole a esto el retardo que tiene la construcción de la ampliación del acueducto veredal.

Con respecto a los resultados arrojados del índice de escasez de agua (ver Figura 72), se evidencia un efecto en los diferentes porcentajes de cambio de bosque a agrícola, que se comportan de forma contraria al área boscosa. Se presenta, inicialmente un crecimiento menor que el caso base, pero que en el caso de 80% va a aumentando hasta superarlo y en el de 50% lo iguala; para los otros dos casos se presenta un crecimiento menor que este. Igualmente, hay que tener en cuenta que esta variable también depende de la demanda de agua doméstica que, con el crecimiento poblacional y el área artificializada, puede afectar para que esta no disminuya más que en el caso base.

Se observó que durante la modelación de las dos políticas de adquisición, reforestación y mantenimiento de predios de importancia para el recurso hídrico y ejecución de esquemas de Pagos por Servicios Ambientales, se presentó un crecimiento poblacional y de área artificializada, a pesar de que el área de bosque creciera o que el índice de escasez fuera alto; esto puede deberse a que las personas que deciden migrar o vivir en la zona lo hacen por otras motivaciones diferentes a la disponibilidad o acceso del recurso hídrico, como las expresadas durante la encuesta realizada a usuarios del acueducto veredal San Pedro, las cuales son: la calidad de aire, tranquilidad, el clima y entre otros. Además, como lo explica Zuluaga (2005), el corregimiento de Santa Elena está ubicado en un lugar estratégico, ya que se encuentra entre dos valles: el del Aburrá y el de San Nicolás, queda cerca al Aeropuerto Internacional José María Córdoba y entre dos de las ciudades más industrializadas e importantes del departamento como son Medellín y Rionegro. También, se garantiza a los habitantes de la zona de estudio un buen servicio de transporte, energía, internet, telefonía y lugares para comprar alimentos.

En cuanto al área agrícola, en todas las políticas simuladas disminuye, esto coincide con lo dicho por Zuluaga (2005) la cual afirma que las actividades tradicionales del corregimiento de Santa Elena y de las tres veredas en estudio está cambiando rápidamente y ya se ofrecen actividades comerciales diferentes a las labores del campo, Entre las actividades que llegan a las veredas en estudio se encuentran el comercio, el transporte o el arrendamiento de viviendas.

En cuanto a la capacidad de agua se observa en todos los escenarios un crecimiento menor, comparado con el caso base. Esto nos da a entender que la capacidad de abastecimiento de agua no aumenta acorde con las necesidades de abastamiento en la zona, lo cual genera déficit en el abastecimiento de agua, ya que no llegaría a todos sus usuarios y más si presenta un aumento de la población total y área artificializada, sumándole a esto el retardo de la construcción de la ampliación del acueducto, que concuerda con lo expresado con los usuarios del acueducto en el taller, encuestas y algunas reuniones que se realizaron, con respecto al tiempo de diseño y construcción de la ampliación del acueducto, hecha antes del inicio de esta investigación.

Conclusiones

Al implementar los dos métodos de simulación con teoría de redes y dinámica de sistemas se puede concluir que la primera fue de utilidad para conocer y entender el comportamiento del sistema socioecológico y, con ello, poder elaborar con facilidad y precisión la hipótesis dinámica y el diagrama causal, importantes para el desarrollo del modelo de Dinámica de sistemas

En cuanto al análisis de la microcuenca por medio de teoría de redes se logró evidenciar que los principales beneficiarios del servicio ecosistémico de provisión de agua son los actores sociales y comunitarios (las comunidades de las veredas El Plan, El Llano, Perico y Santa Elena Central). De igual forma, se prueba que estos actores no realizan actividades directas de gestión en pro al cuidado del recurso hídrico. Estas acciones son desarrolladas por actores institucionales como: la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín, con la reforestación y mantenimiento del área boscosa de la microcuenca San Pedro, y CORANTIOQUIA con el programa PIRAGUA y pozos sépticos. La falta de participación de la comunidad en la protección y conservación del recurso hídrico puede generar que dichas acciones hechas por actores externos al sistema socio-ecológico no tengan impactos significativos en el SSE y que no sean efectivas a largo plazo. Como señalan Calvvet-Mir et al, (2015), la gobernanza hídrica en los procesos de manejo de los recursos naturales es crucial para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

Por otra parte, el actor social más reconocido dentro del sistema socio-ecológico en estudio es el Acueducto Veredal San Pedro. Esto indica que es el actor que puede facilitar el proceso de resolución de conflictos y entregar información relevante a los diferentes actores sociales del sistema social de las veredas El Plan, El Llano, Perico y Santa Elena Central. Sin embargo, este reconocimiento puede ser contraproducente debido a que la toma de decisiones frente al recurso hídrico puede ser centralizada, lo que disminuye el acceso a la información de los usuarios del acueducto y entorpece la gobernanza (Cardona & Peña Rojas, 2018).

Con la simulación de los escenarios se puede concluir que las estrategias de gestión del recurso hídrico como la adquisición, reforestación y mantenimiento de predios de importancia para el recurso hídrico y la ejecución de esquemas de Pagos por Servicios Ambientales, pueden ser eficientes para garantizar el servicio ecosistémico de regulación hídrico y la provisión de agua en climas extremos, pero no es útil como barrera para el crecimiento de la población y del área artificializada. Por ello es necesario unir esfuerzos con políticas de planeación territorial y de educación ambiental, para garantizar una mejor forma de gestionar el territorio y los recursos naturales. Dichas políticas o estrategias de planeación territorial pueden también garantizar una mejor forma de gestión del agua, al disminuir la demanda y tener una menor necesidad de ampliar la capacidad de abastecimiento del sistema.

Para próximas investigaciones se recomienda incluir aspectos económicos como el costo de oportunidad de tener suelo agrícola, boscoso y de tener viviendas; esto con el fin de tener presente el factor de toma de decisiones de los propietarios de predios de importancia para el recurso hídrico y saber si les es más rentable implementar políticas relacionadas con esquemas de pago por servicios ambientales, adquisición, reforestación y manejo de predios importantes para la regulación hídrica, o tener alguna actividad económica. Igualmente, modelar factores que pueden llevar a decidir si hace un acuerdo diferente al económico para la aplicación de esquemas por pagos por servicios ambientales. Así mismo, es recomendable que para este tipo de investigaciones se tengan datos en un periodo de tiempo mayor para así realizar una adecuada validación del comportamiento del modelo y, con ello, resultados más confiables.

A. Anexo: Lista revisión de información secundaria de la zona de estudio.

Tabla 23. Información secundaria de la zona de estudio

N	AÑO	TÍTULO DEL ESTUDIO	AUTORES	TIPO DE ESTUDIO	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
1	2005	Dinámicas territoriales en frontera rural-urbana en corregimiento de Santa Elena, Medellín	Gloria Patricia Zuluaga Sánchez	Tesis maestría Universidad Nacional de Colombia	Identificar y analizar las dinámicas territoriales en frontera rural-urbana, a través de la apropiación, los usos y las expresiones culturales, sociales y económicas en el Corregimiento de Santa Elena, zona rural de la ciudad de Medellín
2	2007	Santa Elena 2008-2020. Planeando entre todos y todas el presente y futuro de nuestro corregimiento	Alcaldía de Medellín, Corporación Arcoíris	Informe investigativo	Analizar y comprender las nuevas formas de relacionamiento en el territorio como posibilidad para transformar, crear y recrear modos de vida desde los cuales es posible vivir en comunión con la naturaleza y el cuidado de la vida.
3	2009	Coberturas Vegetales, Uso Actual del Suelo	Alcaldía de Medellín,	Informe	Actualizar las coberturas y los usos del suelo de cuatro de los corregimientos de Medellín, Santa Elena, San Cristóbal, San Sebastián de Palmitas y San Antonio de Prado en el 2008

N	AÑO	TÍTULO DEL ESTUDIO	AUTORES	TIPO DE ESTUDIO	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
		y Determinación de Conflictos de Uso del Suelo con base en el POT de la Zona Rural del Municipio de Medellín	Universidad Nacional de Colombia		
4	2010	Atlas Veredales de Medellín	Alcaldía de Medellín Universidad Nacional de Colombia	Libro	Construir, con la participación de líderes de las comunidades rurales, un instrumento de planeación que, en manos de entidades públicas y privadas, instituciones académicas y de quienes quieran participar, contribuya a la construcción de una ciudad sostenible y equitativa.
5	2011	Informe sobre el estado de los recursos naturales y el ambiente del Municipio	Contraloría Municipal de envigado	Informe	Presentar y evaluar el estado de los recursos naturales del municipio a partir de las diferentes actuaciones y estudios realizados durante el año en cada uno de los componentes del ambiente
6	2011	Plan de Desarrollo rural Sostenible y reconocimiento y valoración de la cultura en la ruralidad de Medellín	Alcaldía de Medellín, Universidad Nacional de Colombia	Informe	
6	2015	Plan de Desarrollo Local, Corregimiento de Santa Elena	Alcaldía de Medellín	Informe	Consignar el proceso de revisión y actualización del Plan de Desarrollo Local (PDL) de la Comuna 90 - Corregimiento de Santa Elena, realizado en el 2007 y ajustado en el 2011, con resultados desde el ejercicio de la participación ciudadana.

N	AÑO	TÍTULO DEL ESTUDIO	AUTORES	TIPO DE ESTUDIO	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
7	2015	Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente 2008-2011	Contraloría Municipal de Envigado	Informe	Analizar y evaluar la problemática ambiental y el estado de los Recursos Naturales del Municipio, a partir de la compilación y revisión de los diferentes proyectos de inversión y estudios realizados durante esta vigencia para los componentes ambientales: Físico (recurso hídrico, suelo y aire), Biótico (flora, fauna y ecosistemas) y Social (población, educación y calidad de vida), como parte de la gestión adelantada por la Administración Municipal en sus diferentes Secretarías y demás entes públicos y privados, locales o regionales, que explícita o implícitamente tienen entre sus funciones la protección, conservación, regulación y/o aprovechamiento de los recursos naturales al interior del Municipio de Envigado.
8	2016	Patrimonio cultural y desarrollo en el corregimiento de Santa Elena (Medellín)	Sandra Marcela Vélez Granda	Tesis maestría Universidad Pontificia Bolivariana	Estudiar la tensión que se presenta en la manera como el Estado, las empresas privadas y las organizaciones ciudadanas asumen la relación entre el Patrimonio cultural y el Desarrollo
9	2016	Perfil Demográfico 2016 - 2020 Corregimiento 90. Santa Elena	Alcaldía de Medellín	Informe	Brindar información demográfica del corregimiento de Santa Elena, municipio de Medellín
10	2016	Plan de Desarrollo Municipio de Envigado 2016-2019	Alcaldía de Envigado	informe	Realizar un diagnóstico del estado del municipio de Envigado para así realizar el Plan de Desarrollo del Municipio de Envigado para los años 2017 a 2019

N	AÑO	TÍTULO DEL ESTUDIO	AUTORES	TIPO DE ESTUDIO	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
11	2018	Datos generales del municipio de Envigado	Alcaldía de Envigado	Página web ¹⁶	Información general del municipio de Envigado. https://www.envigado.gov.co/nuestro-municipio
12	2018	Datos generales de Medellín	Alcaldía de Medellín	Página web ¹⁷	Información general del municipio de Medellín

¹⁶ Página web del municipio de Envigado <https://www.envigado.gov.co/nuestro-municipio#/ubicacion/ubicacion-geografica>

¹⁷ Página Web del municipio de Medellín:
<https://www.medellin.gov.co/irj/portal/medellin?NavigationTarget=navurl://6488ef50a6787e1fdb4e42e62a46a67>

B. Anexo. Formato de encuesta a los usuarios del Acueducto Veredal San Pedro.



ENCUESTA No. _____ Fecha: ____ / ____ /2018

Encuestador: _____

Coordenada GPS: _____

Dirección: _____

Buenos días, mi nombre es _____, soy estudiante en _____. Actualmente trabajamos para un proyecto de investigación con la Universidad Nacional de Colombia con el fin de conocer sobre el uso del agua y el medio ambiente en la vereda, para así poder mejorar la calidad y cantidad del recurso hídrico. En esta etapa estamos encuestando a los hogares de las Veredas El Plan, El Llano y Perico. Su participación es muy importante para nosotros. Sus respuestas permanecerán anónimas. Todo lo que usted exprese será confidencial, y sólo será utilizado para el propósito de esta investigación. Esta encuesta no ha sido contratada por el Municipio ni por el acueducto, su principal objetivo es académico. Sin embargo, los resultados de la encuesta serán compartidos con la comunidad y con el acueducto, pero sin mencionar nombres ni direcciones ni nada que permita identificar a nadie. Los resultados serán compartidos porque a partir de ellos pueden tomarse acciones de mejoramiento del ambiente y del agua.

Por favor tome esta encuesta como una oportunidad para expresar sus opiniones. La encuesta dura aproximadamente 40 minutos.

- ¿Podría contestar la encuesta en este momento? Si ____ No ____

[Si la respuesta es SI, comenzar la encuesta. Si la respuesta es NO, pasar a la siguiente pregunta]

- ¿Podría responder la encuesta a otra hora? Si, ¿A qué horas? [Acordar hora]
_____ No ____

[Si la respuesta es SI, acordar nueva hora. Si la respuesta es NO, pasar a la siguiente pregunta]

- ¿Podría responder a las preguntas de la encuesta otro día? Si, ¿cuándo? [Acordar fecha y hora]
_____ No____

[Si la respuesta es SI, acordar nueva fecha y hora. Si la respuesta es NO, pasar a la siguiente pregunta y terminar la encuesta]

- ¿Podría decirnos por qué no desea responder la encuesta?
_____ **[CERRAR LA ENCUESTA]**

[EMPEZAR ENCUESTA]: La encuesta está dividida en varias partes, en las cuales vamos a solicitarle alguna información sobre usted y su familia. Luego le haremos algunas preguntas para conocer algunas características de su casa, el servicio de agua que tiene y algunos usos. Y por último le preguntaremos algunas opiniones generales sobre el medio ambiente. **Recuerde:** No hay respuestas “buenas”, “malas”, “correctas” o “incorrectas”. Sólo nos interesa saber su opinión. De la sinceridad en sus respuestas depende la calidad de nuestra investigación y la calidad de la información sobre el agua y la naturaleza que podremos compartir posteriormente. Recuerde que TODAS sus respuestas son anónimas y en ningún momento preguntaremos su nombre, su identificación o nada que nos permita señalarlo a usted o su familia.

LOCALIZACIÓN DEL PREDIO: (Se puede llenar antes porque ya se tiene georreferenciado el predio)

Municipio:

Coordenadas:

Corregimiento/vereda:

Sector:

PARTE I: CARACTERÍSTICAS SOCIODEMOGRÁFICAS

1. ¿Usted es?:

a. ___ hombre b. ___ Mujer

2. ¿En qué año nació? _____
3. ¿Qué nivel de educación tiene? [En caso de no haber estudiado, marque con una x en la opción "ninguno". En caso de sólo haber recibido educación no formal, indique el número de cursos realizados y su duración aproximada]:

	Completo	Incompleto	No. Años
a. Ninguno			
b. Educación no formal (<i>Cursos, talleres, etc.</i>)			
c. Primaria			
d. Bachillerato			
e. Educación técnica (<i>Tecnólogo</i>)			
f. Educación universitaria (<i>Profesional</i>)			
g. Posgrado (<i>Especialización, maestría, doctorado</i>)			

4. ¿Usted actualmente a qué se dedica?

- a. Empleado de tiempo completo
 b. Empleado tiempo parcial
 c. Jubilado
 d. Estudiante
 e. Desempleado/Busca trabajo
 f. Independiente (¿qué actividad realiza (_____))
 g. Ama de casa
 h. Otra ____ ¿Cuál? _____

5. ¿Cuál es su estado civil?

- a. Soltero
 b. Casado
 c. Divorciado
 d. Viudo
 e. Unión libre
 f. Otro ¿Cuál? _____

6. ¿Usted con quién vive?

- a. Mamá
 b. Papá
 c. Hijo/hija
 d. Solo
 e. Otros _____

7. Con respecto al número de personas que viven en su casa:

	Hombre	Mujer
Niños menores de 5 años		
Entre 6 y 10 años		
Entre 11 y 15		
Entre 16 y 20		
Entre 20 y 25 años		
Entre 26 y 30 años		
Entre 31 y 35 años		
Entre 36 y 40 años		
Entre 41 y 45 años		
Entre 46 y 50 años		
Entre 51 y 55 años		
Mayores de 55 años		
Total		

8. ¿Cuántas personas en su hogar (mayores de 18 años) están trabajando y aportan al hogar?

9. ¿Cuántas personas en su hogar (mayores de 18 años) están desempleadas? _____

-
10. ¿Cuántas personas en su hogar están jubiladas o pensionadas? ____
11. ¿Quién tiene la responsabilidad en el hogar (*pago de facturas de servicios públicos, compras de supermercado, etc.*)?
- a. Usted tiene la responsabilidad principal del cumplimiento de estas responsabilidades
 - b. Usted comparte estas responsabilidades con otras personas
 - c. Usted no tiene esta responsabilidad [**En este caso:** (1) preguntar si es posible hablar con la persona que tiene la responsabilidad y hacerle la encuesta a esa persona, (2) si no es posible, continuar]
12. ¿Cuáles son los ingresos mensuales del jefe del hogar antes de pagar pensión, salud e impuestos? [*Si es el caso, considere también los subsidios y otros ingresos que usted recibe además de su salario. Por ejemplo: arrendamiento de propiedades, etc.*]
- a. 0-350.000
 - b. 350.000 - 750.000
 - c. 750.000 - 1'500.000
 - d. 1'500.000 - 2'200.000
 - e. 2'200.000 - 4'400.000
 - f. Más de los valores
13. ¿A cuánto asciende el aporte mensual de los demás miembros de la familia diferentes al jefe de hogar? [*Recuerde: esta pregunta excluye al jefe del hogar, ya que su ingreso se preguntó anteriormente*]
- a. 0-350.000
 - b. 350.000 - 750.000
 - c. 750.000 - 1'500.000
 - d. 1'500.000 - 2'200.000
 - e. 2'200.000 - 4'400.000
 - f. Más de los valores
14. ¿Su casa o predio es?
- a. Propio
 - b. Arrendado
 - c. Otro ¿Cuál? _____

Usos del suelo en el predio:

15. ¿Sabe usted el área (o los metros cuadrados) de su predio?
- a. Sí
 - b. No

De ser SI ¿Cuántos? _____

16. Para esta pregunta, necesito que piense que su predio está dividido en 10 partes e indique que porcentaje de uso del suelo tiene su predio a partir de la siguiente lista que se menciona a continuación:

Usos del suelo en el predio	Señale con una x	En caso de bosque y plantaciones especifique el tipo de usos	
		Uso	Porcentaje
a) Agricultura de subsistencia		Uso	Porcentaje
b) Agricultura comercial		Productor	
c) Ganadería		Protector - productor	
d) Porcicultura		Protector – Conservación	
e) Avícola			
f) Recreativo			
g) Construcciones (incluyendo galpones, porquerizas; construcción de vivienda y bodegas)			
h) Plantación forestal			
i) Bosques			
j) Minería			
TOTAL			

17. ¿Qué tecnologías usa en las actividades que desarrolla en su predio?

- a. Agroquímicos
- b. Recolección de lluvias
- c. Reciclaje
- d. Biodigestores, lombricultura, pilas de compost

18. ¿Dónde se comercializan los productos que se producen en su predio?:

- a. La misma vereda
- b. Corregimiento
- c. Municipio de Medellín
- d. Otros municipios ___ ¿Dónde? _____
- e. Ninguno

19. Con respecto al tipo y número de cuartos en la vivienda que usted habita:

	# que la vivienda tiene
a. Alcobas	
b. Sala-comedor	
c. Cocina	
d. Baño	
e. Patio	
f. Balcón	
g. Terraza	
h. Jardín	
TOTAL	

20. Tipo de vivienda:

- a. Casa (varios pisos)
- b. Casa (un piso)
- c. Apartamento en edificio (<12 aptos en total)
- d. Apartamento interior
- e. Otra ¿Cuál? _____

21. ¿Hace cuánto tiempo aproximadamente fue construida su vivienda?

- a. Menos de 5 años
- b. Entre 5 y 15 años
- c. Entre 16 y 30 años
- d. Entre 31 y 50 años
- e. Más de 50 años
- d. No sabe

22. ¿Hace cuánto tiempo usted y su familia habitan esta zona o sector?

- a. Menos de 5 años
- b. Entre 5 y 15 años
- c. Entre 16 y 30 años
- d. Entre 31 y 50 años
- e. Más de 50 años

23. ¿Dónde vivían antes? _____.

24. ¿Usted habita todos los días esta vivienda?

- a. SÍ
- b. NO

¿Cada cuánto viene y cuánto se queda? _____

25. ¿Por qué le gusta vivir aquí? _____

PARTE II: INFRAESTRUCTURA PARA EL CONSUMO DE AGUA EN EL HOGAR

26. ¿Comparte su conexión del acueducto con otros hogares? (*Por ejemplo, llega una factura para varios hogares y se la dividen para pagarla*).

- a. No la comparte [*Pase a la pregunta 28*]
- b. Sí, ¿con cuántos hogares? _____

27. ¿Cómo se dividen el pago de la factura?

- a. Por partes iguales
- b. Todos aportan en la medida de sus posibilidades
- c. El dueño paga
- d. ¿Otra? _____

28. A continuación le voy a mencionar algunos accesorios y/o electrodomésticos asociados al consumo de agua. Por favor indique cuál de ellos tiene en su hogar [*Defina "ahorrador de agua" a todo aquello que permite controlar el volumen de agua al realizar una actividad en el hogar*]:

	# de accesorios que tiene su hogar
a. Sanitarios tradicionales	
b. Sanitarios ahorradores de agua (<i>Doble descarga</i>)	
c. Duchas tradicionales	
d. Duchas ahorradoras de agua (<i>Perilla</i>)	
e. Lavamanos	

f. Lavaplatos tradicionales	
g. Lavamanos ahorradores de agua (<i>Perilla</i>)	
h. Lavaplatos ahorradores de agua	
i. Máquina lavadora	
j. Máquina lavadora ahorradora de agua	
k. Tanque de almacenamiento de agua	

29. ¿Ha invertido en alguno de los siguientes accesorios y/o electrodomésticos asociados al consumo de agua durante el año 2017 o durante el 2016?

	Sí	No	Instalado antes de 2016	No es posible ¿Por qué? (<i>La casa es alquilada, tuberías muy viejas, etc.</i>)
a. Sanitarios ahorradores de agua				
b. Grifos ahorradores de agua				
c. Duchas ahorradoras de agua				
d. Lavadora ahorradora de agua				
e. Tanque recogedor de agua-lluvia				

PARTE III: ACCIONES ORIENTADAS A LA CONSERVACIÓN

30. ¿Qué tan a menudo, usted y los demás miembros de su hogar, realizan las siguientes acciones para ahorrar agua en su vida diaria? [*Trate de explicar claramente las diferencias en frecuencias a través de un ejemplo*]

	Nunca	A veces	Siempre	N/A	Si responde, nunca preguntar por qué
a. Cerrar el grifo mientras me lavo los dientes					
b. Cerrar el grifo mientras me enjabono en la ducha					
c. Cerrar el grifo mientras lavo los platos					
d. Cerrar el grifo mientras lavo la ropa					

e. Regar el jardín y plantas por la noche					
f. Reutilizar el agua y/o recoger agua lluvia					

31. ¿Tiene dentro del tanque del sanitario algún elemento que reduce la cantidad de agua en el tanque? (*Por ejemplo, bolsas con arena o botellas*)

a. Sí

b. No

32. ¿Tiene conocimiento de otras prácticas para disminuir el consumo de agua en su hogar?

a. Sí

b. No

¿Cuáles?

33. ¿Cuántas veces a la semana usa la lavadora? (*En caso de no tener lavadora, cuántas veces a la semana lava la ropa*) _____

34. Al momento de usar la lavadora ¿Espera a que esté la carga llena?

a. Sí

b. No

PARTE IV: CONOCIMIENTO, ACTITUDES Y PERCEPCIONES CON RESPECTO AL USO DEL AGUA

34. ¿Sabe a cuántos m³ corresponde el consumo básico de agua en su hogar?

a. Sí. ¿Cuántos? _____

b. No

36. ¿Considera que lo que paga por su factura de agua es caro con relación a lo que se consume en su hogar?

a. Sí es caro

b. No es caro

c. No sé/no estoy seguro(a)

37. En mes cualquiera, ¿cuánto paga aproximadamente por concepto de agua? _____

38. ¿Realiza un seguimiento de su consumo mensual al momento de recibir la factura?

- a. Sí _____
- b. No _____
- c. A veces _____

39. ¿Qué lo motiva a controlar la cantidad de agua que usa en su hogar? Ordene los siguientes aspectos del más importante al menos importante [Asigne 1 a la opción que sea más importante, y 4 para la opción menos importante]

a. Controlo la cantidad de agua que uso en mi casa porque es un deber ciudadano	
b. Controlo la cantidad de agua que uso en mi casa porque es importante al medio ambiente	
c. Controlo la cantidad de agua que uso en mi casa para pagar menos en la factura mensual	
d. Controlo la cantidad de agua que uso en mi casa para que los demás me vean como una persona responsable	

40. ¿Considera usted que el agua es escasa en la Quebrada San Pedro?

- a. Sí
- b. No

41. ¿Considera usted que la escasez de agua para consumo humano en el acueducto San Pedro podría ser un problema en el futuro (5 años)?

- a. Sí
- b. No

42. ¿Ha observado las fuentes de agua o quebradas secas?

- a. Sí ¿En qué año lo experimentó por última vez? _____
- b. No

43. De acuerdo a su opinión, ¿en su región se han venido experimentando cambios en la de lluvia y temperatura en los últimos 5 años?

- a. Sí, drásticamente
- b. Sí, levemente
- c. No

44. Considere a sus vecinos y otros hogares donde viven más o menos la misma cantidad de gente y que se surten del acueducto San Pedro, ¿Cómo es su consumo de agua con respecto a los demás hogares? [*Elija solo una alternativa*]

- a. Nuestro consumo es inferior al de los demás hogares en la zona
- b. Nuestro consumo es más o menos igual al de los demás hogares en la zona
- c. Nuestro consumo es superior al de los demás hogares en la zona
- d. No sé

45. Indique su grado de acuerdo/desacuerdo con cada una de las siguientes afirmaciones

	Completamente en desacuerdo	En desacuerdo	Indiferente	De Acuerdo	Completamente de acuerdo
a. Todos los hogares que se surten del acueducto San Pedro están haciendo su mejor esfuerzo para conservar las fuentes de agua					
b. El acueducto está haciendo su mejor esfuerzo para proveer agua de buena calidad , así como para promover su conservación					

46. ¿Sabe usted si alguno de sus vecinos y/o amigos realizan acciones para ahorrar agua?

- a. Sí
- b. No

En caso de haber seleccionado sí, ¿cuáles?

PARTE V: REDES SOCIALES, CAPITAL SOCIAL Y CONFIANZA

47. Le voy a leer una lista de organizaciones, por favor, indique si su relación es cercana o tiene algunas dificultades. También, indique otro(s) tipo(s) de organizaciones que no están en la lista

	Relación cercana/lejana	Dificultades/afinidades/beneficios
a. Junta de Acción Comunal		
b. Acueducto San Pedro		
c. Casa de Gobierno Santa Elena		
d. Alcaldía de Medellín		
e. Alcaldía de Envigado		
f. Secretaría de Medio Ambiente de Medellín		
g. CORANTIOQUIA		
h. Institución Educativa Santa Elena		
i. Escuela de su vereda		
j. Corporación Parque Arví		
k. EPM Vivero		
l. UNAL Paisandú		
Otros		

48. ¿Pertenece o simpatiza con algún partido político?

a. Sí

b. No

49. ¿Practican alguna religión o creencia? _____

50. ¿Qué festividades se celebran en la vereda? _____

51. ¿Dónde se reúnen o cuales son los sitios de encuentro? _____

PARTE VI: SERVICIOS ECOSISTÉMICOS, BENEFICIOS, IMPORTANCIA Y VULNERABILIDAD

52. ¿Ustedes salen a caminar por las zonas de bosque, parte alta de la microcuenca, etc, de la quebrada San Pedro?

a. Sí

b. No

53. ¿Qué elementos de la quebrada o el terreno cerca de ella recoge para usar en su casa?

a. Leña para cocinar

b. Musgo

c. Tierra

d. Otros. Cuáles _____

e. Ninguno

54. En su opinión, de la lista de la tarjeta que le voy a leer, ¿cuál de los beneficios que hay en la tabla están más en riesgo de desaparecer, ser dañados o deteriorados y por qué?

<i>Beneficios</i>	<i>Calificación</i>
a. Disponibilidad de Aguas	
b. Madera	
c. Agricultura	
d. Regulación climática	
e. Calidad del agua	
f. Calidad del aire	
g. Hábitat para especies de fauna y flora	

h. Regulación hídrica	
i. Esparcimiento y relajación	
j. Ecoturismo	
k. Bellezas escénicas	

55. En la siguiente lista de la tarjeta que le voy a leer, ¿podría elegir 4 que en su opinión son los más importantes en el área para el bienestar social.

<i>Beneficios</i>	<i>Calificación</i>
a. Disponibilidad de Aguas	
b. Madera	
c. Agricultura	
d. Regulación climática	
e. Calidad del agua	
f. Calidad del aire	
g. Hábitat para especies de fauna y flora	
h. Regulación hídrica	
i. Esparcimiento y relajación	
j. Ecoturismo	
k. Bellezas escénicas	

56. Seleccione de 1 a 4 (4=Completamente en desacuerdo; 3=desacuerdo, 2=De acuerdo, 1=Completamente de acuerdo) su nivel de acuerdo con las siguientes frases acerca de su vida aquí.

a. Este es un lugar seguro para vivir

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

b. Tengo acceso suficiente a comida

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

c. Tengo acceso suficiente a agua para consumo

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

d. Tengo suficiente acceso a agua para agricultura

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

e. Tengo suficiente acceso a agua para las tareas del hogar

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

f. Tengo suficiente acceso a educación

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

g. Tengo suficiente acceso al sistema de salud

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

h. En general en esta zona tengo todo lo que necesito para vivir feliz

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

i. El agua y el aire están libres de contaminación aquí

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

j. Los vecinos respetan a los demás

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

k. Hay buenas relaciones entre los vecinos

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

l. Todos en la zona trabajamos para mejorar las condiciones de vida

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

m. Los líderes y gobernantes de la zona tienen en cuenta nuestras opiniones

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

n. Participo de las reuniones acerca de cosas de la región cuando se me convoca

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

o. Yo trabajo de voluntario o contribuyo en actividades para beneficio de la región

4. Completamente en desacuerdo. 3. Desacuerdo. 2. De acuerdo. 1. Completamente de acuerdo

57. ¿Conoce el proyecto de reforestación que se realizó en la cuenca de la Quebrada San Pedro?

- a. Sí
- b. No

58. ¿Le gustaría enterarse o recibir información sobre el mismo?

- a. Sí
- b. No

59. ¿Cree que es importante sembrar árboles para proteger la Q. San Pedro?

- a. Sí
- b. No

¿Por qué? _____

- c. No Sabe____

60. ¿A través de qué medio se enteró del proyecto Reforestación de la cuenca Quebrada San Pedro?

- a. Talleres socialización
- b. Vallas publicitarias
- c. Reuniones Juntas de Acción Local

- d. Difusión por parte del acueducto Corporación San Pedro
- e. Amigo
- f. Familiar
- g. Hijo(s)
- h. Otro medio. ¿Cuál? _____

61. ¿Tiene otros predios en la zona?

- a. Sí
 - b. No
- ¿Dónde? _____

62. ¿Qué uso del suelo tiene el otro predio, **actualmente**?

- a. Viviendas
- b. Bosque Natural
- c. Agricultura
- d. Industria
- e. Otros. ¿Cuál? _____

63. ¿A qué tipo de uso del suelo estaría dispuesto a **cambiar** por el que tiene actualmente?

- a. Viviendas
 - b. Bosque Natural
 - c. Agricultura
 - d. Industria
 - e. Ninguno
- ¿Por qué? _____

64. ¿Qué uso se **le daba** a su finca o sus predios hace 8 años?

- a. Bosque Natural
- b. Ganadería
- c. Agrícola
- d. Industria
- e. Otros. ¿Cuál? _____

65. ¿Cree que ha mejorado la cantidad de agua desde que sembraron árboles en los predios cercanos a la Quebrada San Pedro?

- a. Sí
 - b. No
- ¿Por qué? _____

C. Anexo. Datos de modelo hidrológico

- **Parámetros de entrada para el modelo hidrológico**

tipo de politica	Año	área bosque (ha)	área agrícola (ha)	área artificializada (ha)
Caso base	2010	661	986	151,00
	2015	680,34	863	240,99
	2020	689,35	804,04	300,21
	2025	692,31	764,25	340,00
	2030	693,28	736,46	367,79
	2035	693,6	716,28	387,97
	2040	693,7	701,28	402,97

- **Datos de salida**

Año	Qm3/año
2010	1613066,4
2011	1545986,7
2012	1423456,2
2013	1476738,9
2014	1374575,4
2015	1033263,9
2016	1595196
2017	1787499,9
2018	1,22095E+12
2019	1533151,309
2020	1433884,582
2021	1541465,345
2022	1376403,055
2023	1031370,545
2024	1688107,745

2025	1832886,655
2026	3,01184E+12
2027	1465635,6
2028	1457313,6
2029	1622614,8
2030	1475359,2
2031	1048396,8
2032	1867807,2
2033	1983964,8
2034	3,97617E+12
2035	1369338,171
2036	1511024,914
2037	1501676,743
2038	1259074,8
2039	1002281,657
2040	1925385,429

Bibliografía

- Alain Barrat, Marc Barthélemy, A. V. (2008). *Dynamical Processes on complex networks* (Cambridge). The Edingburgo Bulding.
- Alcaldía de Medellín. (2015). *Plan de Desarrollo Local, Corregimiento de Santa Elena*.
- Alcaldía de Medellín, & Universidad Nacional de Colombia. (2010). *Atlas Veredales de Medellín* (Universida). Medellín.
- Alexander, S. M., Andrachuk, M., & Armitage, D. (2016). Navigating governance networks for community-based conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(3), 155–164. <https://doi.org/10.1002/fee.1251>
- An, L. (2012). Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>
- Anderies, J. M., Janssen, M. A., & Ostrom, E. (2004). A Framework to Analyze the Robustness of Social-ecological Systems from an Institutional Perspective. *Ecology & Society*, 9(1), 18. <https://doi.org/18>
- Arango-aramburo, S., Jaramillo, P., Olaya, Y., Smith, R., Arias-gaviria, J., Parra, J. F., ... Castellanos-ni, L. Y. (2017). *Socio-Economic Planning Sciences Simulating mining policies in developing countries : The case of Colombia*. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.04.002>
- Arriagada, R. A., Ferraro, P. J., Sills, E. O., Pattanayak, S. K., & Cordero, S. (2012). Do payments for environmental services reduce deforestation ? A farm level evaluation from Costa Rica. *Public Policy*, 1–36. <https://doi.org/10.1353/lde.2012.0019>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.3.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.3.CO;2-W)
- Berrio, L., Villegas-Palacio, C., & Arango-aramburo, S. (2018). *Evaluación de las interacciones endógenas de un sistema socio-ecológico en la modelación de los cambios de uso del suelo: Un enfoque metodológico*.
- Bodin, Ö., & Tengö, M. (2012). Disentangling intangible social-ecological systems. *Global Environmental Change*, 22(2), 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.005>

-
- Bohan, D. A. (2016). Networking Our Way to Better Ecosystem Service Provision. *Trends in Ecology and Evolution*, 31(2), 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.12.003>
- Bousquet, F., & Le Page, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management: A review. *Ecological Modelling*, 176(3–4), 313–332. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011>
- Calvvet-Mir, L., Maestre-Andres., Molina.J.L., van B. J. (2015). Participation in protected areas : a social network case study in Catalonia . *Ecology and Society*, 20(4), 45. <https://doi.org/10.5751/es-07989-200445>
- Cardona, H., & Peña Rojas, E. (2018). *Análisis de redes sociales para la gobernanza del agua: caso cuenca Río Grande, Norte de Antioquia*. 1–43.
- Collins, S. L., Carpenter, S. R., Swinton, S. M., Orenstein, D. E., Childers, D. L., Gragson, T. L., ... Whitmer, A. C. (2011). An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(6), 351–357. <https://doi.org/10.1890/100068>
- Collins, S. L., Carpenter, S. R., Swinton, S. M., Orenstein, D. E., Childers, D. L., Gragson, T. L., ... Whitmer, A. C. (2011). An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(6), 351–357. <https://doi.org/10.1890/100068>
- Contraloría Municipal de Envigado. (2015). *Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente 2008-2011*. 1–57.
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 25, 3–15. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Davis, J. P., Eisenhardt, K. M., & Bingham, C. B. (2007). Developing theory through simulation methods. *Acad. Manag. Rev*, 32, 480–499.
- Dawadi, S., & Ahmad, S. (2013). Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. *Journal of Environmental Management*, 114, 261–275. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.015>
- De Groot, R. S. De, Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A TYPOLOGY FOR THE CLASSIFICATION , DESCRIPTION AND VALUATION OF ECOSYSTEM FUNCTIONS , GOODS AND SERVICES Figure 1 : Framework for Integrated Assessment and Valuation of Ecosystem Functions , Goods and Services. *Ecological Economics*, 41(May), 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)

- Dee, L. E., Allesina, S., Bonn, A., Eklöf, A., Gaines, S. D., Hines, J., ... Thompson, R. M. (2017). Operationalizing Network Theory for Ecosystem Service Assessments. *Trends in Ecology and Evolution*, 32(2), 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.011>
- Dunne, J. A., Williams, R. J., & Martinez, N. D. (2002). Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increase with connectance. *Ecology Letters*, 5, 558–567. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00354.x>
- Estrada, E. (2011). *The structure of complex networks: theory and applications*. 465. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199591756.001.0001>
- Filatova, T., Polhill, J. G., & van Ewijk, S. (2016). Regime shifts in coupled socio-environmental systems: Review of modelling challenges and approaches. *Environmental Modelling and Software*, 75, 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.04.003>
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Forrester, J. a Y. W. (1995). *Counterintuitive behavior of social systems 1*. 1–29. <https://doi.org/10.1177/003754977101600202>
- Forrester, J. W. (1971). Counterintuitive Behavior of Social Systems. *Simulation*, 16, 61–76. <https://doi.org/10.1177/003754977101600202>
- Forrester, Jay W. (1989). The Beginning of System Dynamics. *Massachusetts Institute of Technology*, 1–16.
- García-Leoz, V., Villegas, J. C., Suescún, D., Flórez, C. P., Merino-Martín, L., Betancur, T., & León, J. D. (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1117–1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>
- Giraldo Ramirez, D. P. (2013). *Análisis De La Dinámica De La Seguridad Alimentaria En Un País En Desarrollo -Caso Colombiano-*.
- HOLOS; Alcaldía de Medellín. (2005). *AISLAMIENTO DE LOS RETIROS A CORRIENTES DE AGUA EN LAS ÁREAS NO DEFINIDAS PARA LA CONSERVACIÓN AMBIENTAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DE LA QUEBRADA SAN PEDRO, CORREGIMIENTO DE SANTA ELENA*. Medellín.
- Hurtado Gómez, J. P. (2013). La biodiversidad como soporte para la toma de decisiones en el territorio de la ciudad de Medellín: Anfibios y Reptiles. In *Propuesta para la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en Medellín. Síntesis del*

documento técnico de soporte.

- Janssen, M. A., Bodin, Ö., Anderies, J. M., Elmqvist, T., Ernstson, H., Mcallister, R. R. J., ... Ryan, P. (2006). Toward a network perspective of the study of resilience in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 11(1), 15.
- Jordano, P., Bascompte, J., & Olesen, M. J. (2003). Invariant Properties in Coevolutionary Networks of Plant – Animal Interactions. *Ecology Letters*, 6(Jordano 1987), 69–81. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00403.x>
- Kelly, R. A. . B., Jakeman, A. J. ., Barreteau, O. ., Borsuk, M. E. ., ElSawah, S. ., Hamilton, S. H. ., ... Voinov, A. A. . (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling and Software*, 47, 159–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- Kremen, C. (2005). Managing ecosystem services: What do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 8(5), 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>
- Leslie, H. M., Basurto, X., Nenadovic, M., Sievanen, L., Cavanaugh, K. C., Cota-Nieto, J. J., ... Aburto-Oropeza, O. (2015). Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5979–5984. <https://doi.org/10.1073/pnas.1414640112>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., ... Taylor, W. W. (2007). Review: Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317(September), 1513–1516.
- MAE. (2005). Los Ecosistemas y el Bienestar Humano : Humedales y Agua. In *Director*.
- Martín-López, B., Gómez-Baggethun, E., & Montes, C. (2009). *Un marco conceptual para la gestión de las interacciones naturaleza- sociedad en un mundo cambiante*. 229–258. Retrieved from <http://www.publicacionescajamar.es/pdf/publicaciones-periodicas/cuaderno-interdisciplinar-de-desarrollo-sostenible-cuides/3/3-478.pdf>
- Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehlreter, K., ... Landgrave, R. (2009). Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 1856–1863. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.023>
- Meadows, D. (1969). *The dynamics of commodity production cycles: A dynamic cobweb theorem*. Massachusetts Institute of Technology.
- Metzger, M. J., Rounsevell, M. D. A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., & Schröter, D. (2006). The

- vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(1), 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.025>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución Numero 865. *Por La Cual Se Adopta La Metodología Para El Cálculo Del Índice de Escasez Para Aguas Superficiales a Que Se Refiere El Decreto 155 de 2004 y Se Adoptan Otras Disposiciones*, 33. Retrieved from https://www.cvc.gov.co/cvc/RecursoHidrico/aplicativos/ie_mejorado/documentos/Resolucion865-04.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Decreto 953 del 2013* (p. 8). p. 8.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Pagos por Servicios Ambientales Versión 2.0*. Retrieved from <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/PSA-NOV2018.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra*.
- Möllmann, C., Diekmann, R., Müller-karulis, B., Kornilovs, G., Plikshs, M., & Axe, P. (2009). Reorganization of a large marine ecosystem due to atmospheric and anthropogenic pressure: A discontinuous regime shift in the Central Baltic Sea. *Global Change Biology*, 15(6), 1377–1393. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01814.x>
- Morecroft, J., & Wolstenholme, E. (2007). *System dynamics in the U. K.: a journey from Stirling to Oxford and beyond*. 205, 205–214. <https://doi.org/10.1002/sdr>
- Municipio de Envigado. (2017). SILAP DE ENVIGADO. *Revista Científica de Ciencias de La Salud*, 10(1). <https://doi.org/10.17162/rccs.v10i1.878>
- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Ostrom, Elinor. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(July), 419–422.
- Palacio, D. (2015). Redes, actores y gobernanza desde un enfoque relacional. In *Hojas de ruta. Guías para el estudio socioecológico de la alta montaña en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Pérez-Maqueo, O., Delfín, C., Fregoso, A., Cotler, H., & Equihua, M. (2005). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 76, 47–66.
- Pidd, M. (2004). *Systems Modelling: Theory and Practice*. Wiley & Sons, Inc.
- Pocock, M. J. O., Evans, D. M., & Memmott, J. (2012). The Robustness and Restoration of a

-
- Network of Ecological Networks. *Science*, 335(6071), 973–977.
<https://doi.org/10.1126/science.1214915>
- Pocock, Michael J.O., Evans, D. M., Fontaine, C., Harvey, M., Julliard, R., McLaughlin, Ó., ... Bohan, D. A. (2016). The Visualisation of Ecological Networks, and Their Use as a Tool for Engagement, Advocacy and Management. In *Advances in Ecological Research* (1st ed., Vol. 54). <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2015.10.006>
- RIA, U. N. D. C. S. M. (2017a). *MEDELLIN , SOBRE LA REGULACIÓN HÍDRICA DE DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA REALIZADAS CON EL PROYECTO MAS BOSQUES PARA MEDELLIN , SOBRE LA.*
- RIA, U. N. D. C. S. M. (2017b). *PRIMERA FASE DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD AMBIENTAL DE INTERVENCIONES FORESTALES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA SOBRE LA REGULACIÓN HÍDRICA DE MICROCUENCAS EN ÁREAS RURALES DE MEDELLÍN, COLOMBIA.*
- Schlüter, M., Hinkel, J., Bots, P. W. G., & Arlinghaus, R. (2014). Application of the SES framework for model-based analysis of the dynamics of social-ecological systems. *Ecology and Society*, 19(1). <https://doi.org/10.5751/ES-05782-190136>
- Smith, M. D., Knapp, A. K., & Collins, S. L. (2009). A framework for assessing ecosystem dynamics in response to chronic resource alterations induced by global change. *Ecology*, 90(12), 3279–3289. <https://doi.org/10.1890/08-1815.1>
- Song, J., Tang, B., Zhang, J., Dou, X., Liu, Q., & Shen, W. (2018). System dynamics simulation for optimal stream flow regulations under consideration of coordinated development of ecology and socio-economy in the Weihe River Basin, China. *Ecological Engineering*, 124(January), 51–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.024>
- Stave, K., & Kopainsky, B. (2017). *Social and Ecological System Dynamics*. 25–36. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45755-0>
- Sterman, J.D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* (McGraw-Hil). Boston, USA.
- Sterman, John D. (2002). All models are wrong: Reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 18(4), 501–531. <https://doi.org/10.1002/sdr.261>
- Sterman, John D. (1992). System Dynamics Modeling for Project Management. *Unpublished Manuscript*, 1951, 286–294. <https://doi.org/10.1109/SOCA.2007.45>
- Suescún, D., Flores, C. P., Villegas, C., León, J. D., Garcia, V., & Correa, G. (2017). *Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian*

-
- Andes*. 827–839. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1071-7>
- Vélez Granda, S. M. (2016). *Patrimonio cultural y desarrollo en el corregimiento de Santa Elena (Medellín)*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Zhang, L., Nan, Z., Yu, W., & Ge, Y. (2015). Modeling Land-Use and Land-Cover Change and Hydrological Responses under Consistent Climate Change Scenarios in the Heihe River Basin, China. *Water Resources Management*, 29(13), 4701–4717. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1085-9>
- Zondag, B., & Borsboom, J. (2009). Driving forces of land-use change. *49th ERSA Conference*, (August), 1–16. Retrieved from <http://www.significance.nl/papers/2009-ERSA-Driving-forces-of-land-use-change.pdf>
- Zuluaga, L. (2011). *Simulador piloto de la oferta y la demanda hídrica en una microcuenca rural para la validación de metodologías y la evaluación de políticas de manejo sostenible del recurso agua*.
- Zuluaga Sánchez, G. P. (2005). Dinámicas territoriales en frontera rural-urbana en corregimiento de Santa Elena, Medellín. *Tesis UNAL*, 197. <https://doi.org/5019>