

Modelo matemático que integra principios de gobernanza, bienestar y sostenibilidad en dos paisajes colombianos

Línea de Investigación Institucional: 11. Laboratorio de modelamiento, simulación y análisis de sistemas complejos

Meta 11.1 Métodos y modelos estadísticos y matemáticos para la gestión de sistemas socioecológicos

Autores

Johan Manuel Redondo, Jorge Amador Moncada y Diego Randolph Pérez

Redondo, J.M., Amador-Moncada, J y Pérez, D.

Modelo matemático que integra principios de gobernanza, bienestar y sostenibilidad en dos paisajes colombianos - Bogotá:

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt,

2019.

25p.: il.; 28 x 21.5 cm. + 1 CD ROM

Incluye tablas, figuras, mapas, bibliografía (25p.)

2. Informes técnicos. – 8. Estudio de caso. I. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt II. Considerations for the development of an information policy in relation to the Final Technical Report.

Catalogación en la fuente – Biblioteca Instituto Humboldt

Cómo citar este documento:

Redondo, J.M., A. Amador, Jorge y Pérez, D. (2019). Modelo matemático que integra principios de gobernanza, bienestar y sostenibilidad en dos paisajes colombianos. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Contenido

Resumen ejecutivo.....	3
1. Artículo sometido con los métodos y modelos matemáticos para la representación de dos tipos de paisajes distintos y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad, que permita la posterior implementación de escenarios de intervención	4
1.1. Selección de la unidad espacial del paisaje ¹ y de sus tipologías para llevar a cabo el análisis del sistema socioecológico	5
1.2. Modelado con dinámica de sistemas de la trama del paisaje.....	5
1.3. Principios e Indicadores de sostenibilidad.....	5
1.4. Recolección de datos para alimentar el modelo matemático.....	6
1.5. Evaluación del modelo matemático.....	6
1.6. Análisis del sistema dinámico	6
1.7. Análisis del comportamiento tendencial de los escenarios definidos.....	7
2. Base de datos que soporta la realización de ejercicios en un simulador.....	8
3. Simulador de dos tipos de paisajes distintos y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad.....	9
3.1. Modelo matemático basado en Dinámica de Sistemas	10
3.2. El algoritmo para simular el modelo en cada paisaje	13
3.3. Simulaciones para el análisis del modelo matemático obtenido	15
3.4. Simulaciones	19
4. Conclusiones.....	22
5. Referencias.....	22

PRODUCTO: Modelo matemático que integra principios de gobernanza, bienestar y sostenibilidad en dos paisajes colombianos

Resumen ejecutivo

De acuerdo con lo presupuestado para 2019, se realizó la publicación en Journal of Physics indexado en Scopus Q3, de un artículo en el que se definen los métodos y modelos matemáticos para la representación de paisajes y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad, para la posterior implementación de escenarios de intervención hacia la sostenibilidad del sistema socioecológico. El modelo matemático que se propone, debe construirse con la metodología de la Dinámica de Sistemas, para la obtención de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden en dependencia del tiempo, en el que se represente la compleja trama del sistema socioecológico del paisaje que se estudia, en términos de interdependencias, interacciones e interretroacciones de todas sus partes (sociales, ambientales, económicas, etc.). Se concluye que los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza no pueden ser representados con las mismas técnicas porque se representan objetos distintos, que la gobernanza debe ser analizada conjuntamente con la gobernabilidad, dado que no son lo mismo, y que el bienestar condiciona los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza y gobernabilidad.

La base de datos que soportó la realización de los ejercicios en el simulador incluyó información del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), de la Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y de Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN).

El simulador que se construyó sobre la base metodológica publicada en el artículo y los datos de la base permitió el análisis de un área de estudio en el piedemonte andino – amazónico del putumayo, constituida por 545 unidades de paisaje, mucho más de lo que fue estimado inicialmente en números de paisajes, para atender a preguntas de la sostenibilidad de este polígono en el marco del convenio establecido entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos y el Instituto Humboldt. Los indicadores utilizados incluyeron aspectos de la gobernanza, el bienestar y la sostenibilidad, aunque la gobernanza fue revisada a través de las actividades desarrolladas por los actores del paisaje, por la diferencia en las técnicas de modelado ya mencionada. Se concluye que los casos en los que la actividad petrolera podría traer consecuencias no deseables, son los casos en los que la dinamización socioeconómica que provoca es mayor a la que el paisaje es capaz de asimilar. Ahora que, mientras la oportunidad dada por el precio de los productos ilícitos sea mayor a la obtenida por las actividades agropecuarias lícitas y se carezca de una institucionalidad que salvaguarde los derechos de los ciudadanos, la tendencia del paisaje será hacia la producción de los cultivos ilícitos.

Como se puede verificar en este documento, las posibilidades de un simulador para la toma de decisiones basado en el modelamiento matemático permite, por ejemplo, visualizar los resultados obtenidos para un amplio número de unidades de paisaje sobre cada una de las variables del modelo, escalando el esfuerzo en la comprensión del comportamiento tendencial de la dinámica socioecológica de un área de estudio.

1. Artículo sometido con los métodos y modelos matemáticos para la representación de dos tipos de paisajes distintos y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad, que permita la posterior implementación de escenarios de intervención

Para el sometimiento de un artículo con los métodos y modelos matemáticos para la representación de dos tipos de paisajes distintos y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad, que permita la posterior implementación de escenarios de intervención, se realizó una revisión de los conceptos de gobernanza, bienestar y sostenibilidad, con los grupos de trabajo encargados de estos temas al interior del Instituto Humboldt, orientando la discusión a las transiciones de sistemas socioecológicos hacia la sostenibilidad.

Una de las conclusiones tempranas que se obtienen es que el modelamiento matemático de la sostenibilidad y de la gobernanza se orienta a objetos distintos. Mientras la sostenibilidad tiene como objetos de modelado características, la gobernanza tiene a los actores. Esto nos permitió entender que el modelado con ecuaciones diferenciales era ideal para la representación matemática de la sostenibilidad y que la gobernanza podría utilizar teoría de juegos y simulación basada en agentes, como sugiere Ostrom (2009a, 2009b), o redes complejas como proponen otros autores (Étienne, 2013).

La implicación que tiene esta primera conclusión es que los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza deben realizarse por separado y, dado que son condiciones necesarias para una transición socioecológica hacia la sostenibilidad, se espera que los resultados que se obtengan sean complementarios para la toma de decisiones en escenarios de transición.

Con respecto al bienestar, se encontró que éste es un determinante de la organización que tienen los diferentes actores de un paisaje y de los arreglos que se organizan en los paisajes entre la actividad socioeconómica y los ecosistemas, pero también, que el bienestar es la consecuencia de los sistemas de conocimiento locales.

De este modo, se concluye que los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza son condiciones necesarias para la realización de transiciones hacia la sostenibilidad y que los sistemas de conocimiento locales determinan la noción de bienestar del paisaje, mientras el bienestar determina la existencia de gobernanza y sostenibilidad.

En este sentido, debe quedar claro que la sostenibilidad y la gobernanza son conjuntos de estados deseables de un paisaje, por lo que no se puede garantizar a priori su existencia (valor no nulo). Por esta razón, en el caso particular de la gobernanza, los análisis deben ser de gobernanza y gobernabilidad, que son condiciones probables de los paisajes y que no se implican la una a la otra.

En la publicación se presenta, entonces, los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza, como se muestra a continuación.

La metodología para la realización de un análisis de sostenibilidad consiste de tres grupos de actividades. En el primero, se considera la selección de la unidad espacial de paisaje y de sus tipologías, para llevar a cabo el análisis del sistema socioecológico. En el segundo, se elabora el modelo matemático, que involucra el modelado con dinámica de sistemas de la trama del paisaje, la recolección de datos para alimentar el modelo matemático y la evaluación del modelo matemático. En el último grupo se realiza el análisis tendencial, que consta del análisis de bifurcaciones del sistema dinámico, el análisis del comportamiento transitorio de los escenarios definidos y la definición de lineamientos para la gestión de la sostenibilidad del paisaje.

A continuación, se realiza la explicación de cada una de estas actividades, de acuerdo a como fue publicado por el equipo de sostenibilidad del Instituto Humboldt en Redondo et al. (2019).

1.1. Selección de la unidad espacial del paisaje¹ y de sus tipologías para llevar a cabo el análisis del sistema socioecológico

Operacionalmente un paisaje L se entiende como una partición del espacio S bajo diferentes criterios c_i , es decir, $L = S / \{c_1, \dots, c_n\}$. Los paisajes que pertenecen a la misma clase en la partición constituyen un tipo de paisaje, lo cual es útil para definir los lineamientos de gestión de sostenibilidad de cada una de estas unidades.

1.2. Modelado con dinámica de sistemas de la trama del paisaje

La Dinámica de Sistemas es una técnica sistémica y determinista que permite obtener un sistema de ecuaciones diferenciales al que se le denomina el modelo matemático del sistema. Su elección para el modelamiento en el análisis de sostenibilidad de un paisaje proviene de su capacidad para capturar el conjunto de todas las interacciones socioeconómicas y ambientales, de modo que permite ver cómo está todo tejido junto, distinto a ver conjuntos de montones aislados.

En particular, el modelo que se elabora de la trama del paisaje desde Dinámica de Sistemas consiste en la revisión de tres principios de los paisajes sostenibles: multifuncionalidad, productividad y bienestar, cada uno de los cuales tiene un conjunto de indicadores que nos permite hablar de cómo se encuentran o se podrían encontrar estos principios en el paisaje.

En este sentido, llama la atención que la sostenibilidad es una expresión emergente de las interacciones entre todos los aspectos del paisaje y una simetría del paisaje.

1.3. Principios e Indicadores de sostenibilidad

En esta metodología se propone que la aproximación hacia la sostenibilidad para la toma de decisiones se haga desde principios e indicadores, entendiéndose que un principio es una ley intrínseca de un sistema que, desde una perspectiva operativa, es un conjunto de indicadores en los que se ha definido una restricción o umbral de viabilidad, mientras que los indicadores son variables (magnitud que cambia con el tiempo) que sirve para conocer el estado y la dinámica de un principio y se limita por un restrictor, que es una norma conforme a la cual se establece un juicio sobre el indicador.

Como ya fue mencionado líneas arriba, se han definido tres principios de los paisajes sostenibles: multifuncionalidad, productividad y bienestar. Los principios son las reglas básicas que orientan el razonamiento o la acción hacia la sostenibilidad de los paisajes y pueden contener, en su redacción, unos descriptores de los requisitos específicos para su cumplimiento.

¹ "Los paisajes son unidades estructural-funcionales y temporales de espacios geográficos, las cuales se diferencian espacialmente como resultado de la interacción compleja entre los factores ecológicos que las forman (clima, relieve, litología/material parental, suelos, agua, vegetación, fauna, actividades humanas, entre otros)" (Teoría Ecológica del Paisaje - TEP).

1.4. Recolección de datos para alimentar el modelo matemático

A partir del modelo y siguiendo el doble bucle de gestión del conocimiento (Redondo, 2018), al obtenerse el modelo matemático se obtiene una lista de los datos que son requeridos para la realización de las simulaciones que conduzcan a la consecución de los comportamientos tendenciales.

De esta manera, el ejercicio de modelado también es útil para la identificación de las bases de datos que la autoridad competente debe monitorear para la sostenibilidad en el paisaje y, por lo tanto, podría conducir a un programa de monitoreo hacia la sostenibilidad del paisaje.

1.5. Evaluación del modelo matemático

La evaluación del modelo matemático involucra dos actividades: calibración y validación del modelo. La calibración está relacionada con la inclusión de los datos recopilados y la definición de factores de conversión adecuados entre las diferentes magnitudes que se manejan en el modelo. La validación incluye actividades destinadas a generar confianza en los resultados que se obtendrían del modelo, en lugar de una dualidad entre aceptar o rechazar el modelo (Barlas 1996).

De esta manera, en el momento de la calibración, es importante llevar a cabo una verificación de la coherencia entre las unidades utilizadas en el modelado y utilizar los factores de conversión apropiados.

Por otro lado, en la evaluación del modelo desarrollado con la dinámica del sistema, se debe verificar que el modelo genera el comportamiento de salida correcto por las razones correctas (Barlas, 1996). En este sentido, debe hacerse una validación de la estructura del modelo y una validación de la precisión de su comportamiento.

La validación de la estructura del modelo implica un análisis directo de la estructura y un análisis de la estructura orientado al comportamiento. En el análisis directo de la estructura, se realiza una evaluación empírica y teórica de las relaciones que constituyen la estructura sistémica del modelo.

En el análisis de la estructura orientado al comportamiento se llevan a cabo pruebas de condiciones extremas, pruebas de sensibilidad del comportamiento, predicción de comportamiento modificado y pruebas de adecuación de límites, entre otros.

Después que la validación de la estructura ha generado suficiente confianza, es posible comenzar a aplicar diferentes evaluaciones orientadas a medir la precisión que tiene el modelo para reproducir el comportamiento del sistema real, involucrando mediciones del período, frecuencia, tendencias, retrasos de fase, amplitudes, etc.

1.6. Análisis del sistema dinámico

Este momento de la metodología es muy técnico. Es el momento en el que se estudia cualitativamente la estructura de las órbitas generadas por el sistema de ecuaciones diferenciales que se ha denominado el modelo matemático con la teoría de los sistemas dinámicos no lineales para obtener conjuntos invariantes y sus posibles parámetros de bifurcación.

En palabras gruesas, se pretende buscar con este análisis tres cosas: 1) la existencia de sostenibilidades, 2) la existencia de puntos de apalancamiento del sistema y 3) el mapa de todos los escenarios posibles del sistema.

Cuando se desarrolló la metodología presentada por Redondo et al (2019), se identificó que la sostenibilidad de un paisaje no era un estado único del sistema, sino que podrían ser múltiples estados, como lo habían citado otros expertos empíricamente y a través de publicaciones, dando lugar al reconocimiento que un paisaje puede tener algún tipo de sostenibilidad, es decir, la sostenibilidad no es única y, por lo tanto, no se puede imponer el mismo tipo de sostenibilidad a todos los paisajes, porque podría conducir a su insostenibilidad.

Por otro lado, los sistemas pueden poseer puntos de apalancamiento, es decir, acciones que conducen a una eficiente transición del sistema socioecológico, lo que hace deseable identificar cuál es la acción o conjunto de acciones que podrían conducir a que tipos de transiciones del sistema socioecológico, siempre teniendo en mente que la transición sea hacia la sostenibilidad.

El otro elemento de este análisis son los diagramas de bifurcaciones, en los que se obtiene el mencionado mapa de todos los escenarios posibles del sistema. Este mapa es un diagrama matemático que permite conocer todas las posibilidades de un paisaje bajo todos los tipos de acciones que podrían considerarse, dando claras luces de los alcances y riesgos del paisaje. Sin embargo, aunque un mapa de este estilo es muy deseable para la toma de decisiones, su obtención no es trivial, razón por la cual podría implementarse un análisis desde la teoría de la viabilidad, buscando la satisfacción de unos umbrales en un periodo específico de tiempo, de modo que pueda verse las consecuencias sistémicas de un conjunto limitado de acciones en el periodo de tiempo específico definido.

1.7. Análisis del comportamiento tendencial de los escenarios definidos

Este momento de la metodología consiste en el ejercicio de simulación para la obtención del comportamiento tendencial de escenarios a partir del modelo matemático elaborado en los momentos previos de la metodología.

Aquí se estudia el comportamiento tendencial del escenario ¿qué pasaría si el sistema sigue como ahora?, conocido como escenario Business As Usual BAU, para lo cual se alimentará el modelo con los datos del estado actual que se obtengan. Debe aclararse que debido a que muchos de los datos que serán demandados por el modelo no existen actualmente, se realizarán aproximaciones adecuadamente justificadas para la simulación de los escenarios.

Otros escenarios también podrían evaluarse, pero parte del propósito de la técnica de modelamiento empleada es que estos escenarios puedan ser revisados sin previa preparación por parte de los usuarios.

Genéricamente, la gestión se lleva a cabo en función de la verificación de los objetivos de algunos indicadores definidos para conocer el estado del sistema. Entonces, la gestión se convierte en la definición de estrategias para cumplir los objetivos de los indicadores, involucrando actividades de planificación, ejecución y control.

Sin embargo, la implementación de las estrategias conduce a la obtención de resultados en los indicadores gestionados, pero a pesar del deterioro de otros de ellos. Esto ocurre porque se considera que la gestión debe ser puntual y no sistémica, entendiendo el sistema como puntos aislados en los que debe intervenir con acciones específicas y no como un conjunto de elementos entrelazados.

La perspectiva sistémica es la que lleva al reconocimiento de los efectos globales de acciones específicas en el sistema, de modo que la definición de estrategias para la gestión se lleva a cabo en entornos de simulación controlada en los que cada estrategia es revisada por la evaluación global de los efectos en el sistema.

De esta forma, se pueden definir pautas de gestión de sostenibilidad a partir de la metodología explicada, lo que permite llevar a cabo una intervención paisajística viable, asertiva y pertinente, en la que la conservación de la biodiversidad, la inclusión social y la competitividad económica se cumplirían en un marco más general de productividad, bienestar y multifuncionalidad.

2. Base de datos que soporta la realización de ejercicios en un simulador

Para alimentar las variables biofísicas del modelo en el simulador se trabajó con datos de cobertura y uso de la tierra producidos por el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI) a escala 1:100.000 para los años 2007, 2012, 2014, 2016 y 2018. También se usó la delimitación de cuencas hidrográficas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2013), los biomas ajustados por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt para la capa del componente biótico, incorporada dentro del Mapa Nacional de Ecosistemas Terrestres, Marinos y Costeros de Colombia escala 1:100.000 (IAvH, 2016), la caracterización de cuencas sedimentarias y bloques para hidrocarburos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2010, 2019) y el modelo digital de elevaciones de 12.5 metros del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2017).

Los datos socioeconómicos fueron tomados principalmente del Censo Nacional Agropecuario (CNA) levantado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2014), del cual se usaron las variables listadas en la tabla (1). También se retomó el índice de Gini propuesto en el atlas de la distribución de la propiedad rural en Colombia (IGAC, 2012), el mapa de resguardos indígenas (IGAC, 2018), el mapa de tierras de comunidades negras (IGAC, 2018), los datos de monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos de la Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, 2018) y el mapa del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP) producido por Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN, 2019).

Cada uno de los anteriores insumos fue integrado en una *geodatabase* de ArcGIS 10.3 en la que además se incluyó la base cartográfica y catastral del IGAC a escalas 1:100.000 y 1:500.000. Marco de referencia que permitió delimitar, caracterizar y analizar el contexto geográfico de interés para el modelamiento y las simulaciones.

En la Tabla 1 se presentan, además, las preguntas del Censo Nacional Agropecuario que fueron utilizadas para alimentar el modelo.

Tabla 1: Preguntas del Censo Nacional Agropecuario usadas en el modelamiento y la simulación. DANE (2014).

P_S11P138:	¿En total cuántas personas trabajaron de manera permanente para realizar las actividades agropecuarias en los últimos 30 días?
P_S11P140:	¿Cuántos jornales adicionales contrató directamente para realizar las actividades agropecuarias durante los últimos 30 días?
P_S14P157_ SP1, SP2, SP4, SP5, SP6, SP8, SP11, SP12, SP13, SP14, SP15:	¿Qué OTRAS ACTIVIDADES se desarrollan en esta UPA? Apoyo a la agricultura cultivos agrícolas y forrajes, Apoyo a la ganadería bovinos- bufalino- equinos- ovino- caprino- porcino- aves- etc., Extracción de aceite, Fabricación de azúcar, Molinería de arroz, Elaboración de panela y mieles, Sacrificio de animales, Procesamiento de leche, Producción de alimentos para consumo humano, Elaboración de alimentos preparados para animales, Destilación de bebidas alcohólicas o fermentadas
P_S14P157 A, B, D, E, F, H, K, L, M, N, O	En los últimos 30 días ¿cuántos trabajadores tuvo ocupados?
P_S14P157_ SP30, SP33	¿Qué OTRAS ACTIVIDADES se desarrollan en esta UPA? Petróleo, Gas- generación y transmisión de energía
P_S14P157 AD, AG	En los últimos 30 días ¿cuántos trabajadores tuvo ocupados?
P_S14P157_ SP9:	¿Qué OTRAS ACTIVIDADES se desarrollan en esta UPA? Procesamiento y transformación de productos de la flora: tubérculos- frutas- flores- hojas- corteza y resinas
P_S14P157I	En los últimos 30 días ¿cuántos trabajadores tuvo ocupados?

3. Simulador de dos tipos de paisajes distintos y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad

De acuerdo con la metodología publicada (Redondo et al., 2019), que ha sido presentada en la primera sección de este documento, el simulador de paisajes consiste en un modelo de Dinámica de Sistemas en el que se expresan elementos de la complejidad socioecológica del paisaje estudiado para reconocer su sostenibilidad.

El simulador desarrollado para estudiar dos paisajes distintos y sus indicadores de gobernanza, bienestar y sostenibilidad fue elaborado alrededor del convenio realizado entre el Instituto Humboldt IavH y la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, en el departamento del Putumayo.

El modelo matemático basado en Dinámica de Sistemas que se utilizó para las simulaciones es presentado en la Sección 3.1., los argumentos del simulador utilizado se presentan en la Sección 3.2. y algunos de los resultados para dos paisajes son discutidos en la Sección 3.3.

3.1. Modelo matemático basado en Dinámica de Sistemas

El modelo matemático para el análisis de sostenibilidad basado en Dinámica de Sistemas tiene como diagrama de niveles y flujos la Figura 1. En éste se han tomado como variables de estado las coberturas de áreas naturales, las coberturas agropecuarias, las coberturas de cultivos ilícitos, las coberturas urbanas, el personal contratado para la producción de alimentos, el personal contratado en bienes y servicios, el personal contratado en los cultivos ilegales, el personal contratado para la exploración de hidrocarburos y la población local. De este modo, el sistema diferencial obtenido es de dimensión nueve.

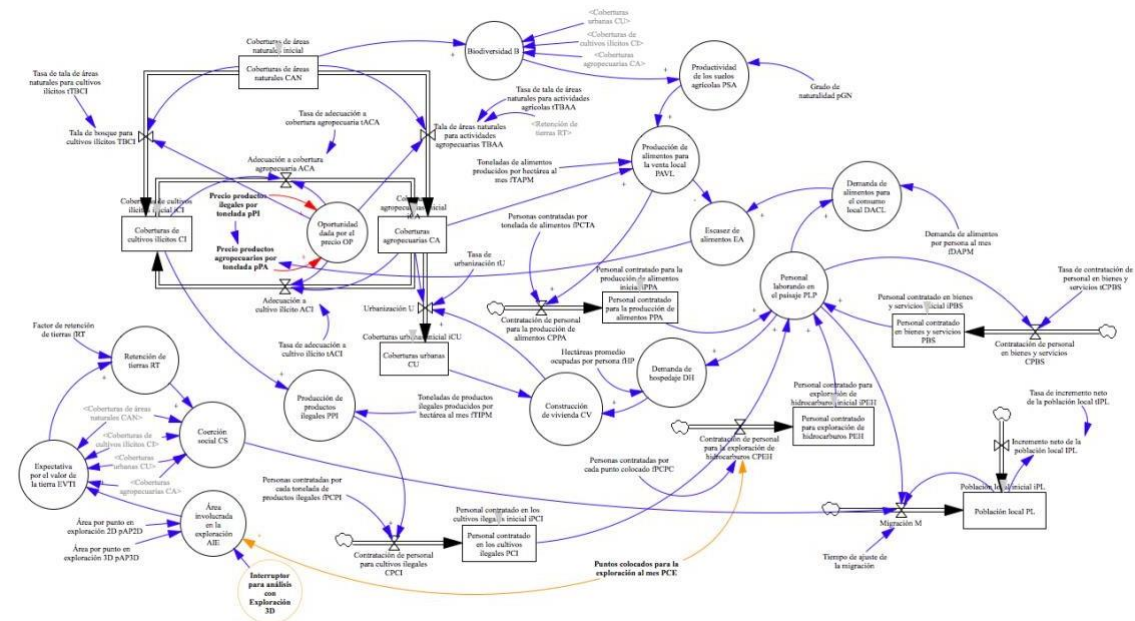


Figura 1: Diagrama de niveles y flujos.

En la Figura 1 se ven elementos de la gobernanza como la retención de tierras y la coerción social, aunque no se hacen explícitos sus actores. Desde la perspectiva del bienestar se ha considerado el flujo “migración”, que ha venido siendo considerada la variable clave en la comprensión del bienestar de un paisaje. Desde la sostenibilidad, elementos sociales, como los mencionados en la gobernanza y el bienestar, elementos económicos, como la oportunidad dada por el precio de los productos agropecuarios e ilícitos obtenidos del suelo y las ofertas y demandas de las actividades económicas del paisaje, y elementos ambientales, como la biodiversidad y la productividad del suelo basada en las coberturas de áreas naturales, han sido considerados.

De este modo, se ha obtenido un modelo matemático que cumple con las expectativas de integración de principios de gobernanza, bienestar y sostenibilidad.

La representación formal del diagrama de niveles y flujos de la Figura 1 es el sistema de ecuaciones diferenciales que se presenta a continuación:

$$\frac{d}{dt}CAN = \begin{cases} -tTBCI \cdot CAN & OP < 0, RT \leq 0 \\ -tTBCI \cdot CAN - tTBAA \cdot CAN & OP < 0, RT > 0. \\ -tTBAA \cdot CAN & OP \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt}CA = \begin{cases} -tACI \cdot CA - tU \cdot CA \cdot \frac{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI) - CU}{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI)} & OP < 0, RT \leq 0 \\ tTBAA \cdot CAN - tACI \cdot CA - tU \cdot CA \cdot \frac{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI) - CU}{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI)} & OP < 0, RT > 0. \\ \left\{ \begin{array}{l} tTBAA \cdot CAN + tACA \cdot CI - tU \cdot CA \cdot \frac{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI) - CU}{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI)} \end{array} \right. & OP \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt}CI = \begin{cases} tTBCI \cdot CAN + tACI \cdot CA & OP < 0 \\ tACA \cdot CI & OP \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt}CU = tU \cdot CA \cdot \frac{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI) - CU}{fHP \cdot (PPA+PBS+PEH+PCI)}$$

$$\frac{d}{dt}PPA = fPCTA \cdot fTAPM \cdot (1 + pGN) \cdot \frac{CA \cdot CAN}{CAN+CA+CI+CU}$$

$$\frac{d}{dt}PBS = tCPBS \cdot (PPA + PBS + PEH + PCI).$$

$$\frac{d}{dt}PCI = fPCPI \cdot fTIPM \cdot CI.$$

$$\frac{d}{dt}PEH = fPCPC \cdot PCE.$$

$$\frac{d}{dt}PL = tIPL \cdot PL + \frac{(PCI+PBS+PPA+PEH-PL)}{fTAM} \left(1 - \frac{fRT \cdot PCE \cdot PAP2D + CI}{CAN+CA+CI+CU}\right)$$

Donde d/dt denota el cambio el tiempo, teniendo como unidad de tiempo el mes y las restricciones OP y RT se definen como sigue:

$$OP = \frac{-pPI \cdot fTAPM \cdot (1+pGN) \cdot CAN \cdot CA}{fDAPM \cdot (PCI+PBS+PPA+PEH) \cdot (CAN+CA+CI+CU)}$$

$$RT = fRT \cdot \frac{PCE \cdot PAP2D}{CAN+CA+CI+CU}$$

Las siglas de variables y parámetros empleadas en el modelo se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2: Nomenclatura del modelo matemático elaborado.

Sigla	Descripción	Unidad
CAN	Coberturas de áreas naturales	Hectáreas
CA	Coberturas agropecuarias	Hectáreas
CI	Coberturas de cultivos ilícitos	Hectáreas
CU	Coberturas urbanas	Hectáreas
PPA	Personal contratado para la producción de alimentos	Personas contratadas
PBS	Personal contratado en bienes y servicios	Personas contratadas
PCI	Personal contratado en los cultivos ilegales	Personas contratadas
PEH	Personal contratado para la exploración de hidrocarburos	Personas contratadas
PL	Población local	Habitantes
tTBCI	Tasa de tala de áreas naturales para el uso en cultivos ilícitos	Mes ⁽⁻¹⁾
tTBAA	Tasa de tala de áreas naturales para el uso en cultivos agropecuarios	Mes ⁽⁻¹⁾
tACA	Tasa de adecuación a cobertura agropecuaria	Mes ⁽⁻¹⁾
tTBCI	Tasa de tala de áreas naturales para cultivos ilícitos	Mes ⁽⁻¹⁾
tACI	Tasa de adecuación a cultivos ilícitos	Mes ⁽⁻¹⁾
tU	Tasa de urbanización	Mes ⁽⁻¹⁾
tCPBS	Tasa de contratación de personal en bienes y servicios	Mes ⁽⁻¹⁾
tIPL	Tasa de incremento neto de la población local	Mes ⁽⁻¹⁾
fPCTA	Personas contratadas por tonelada de alimentos	Personas / Tonelada
fTAPM	Toneladas de alimentos producidos por hectáreas al mes	Toneladas/ (Hectárea * Mes)
fPCPI	Personas contratadas por tonelada de productos ilegales	Personas / Tonelada
fTIPM	Toneladas de productos ilegales producidos por hectárea	Toneladas/ (Hectárea * Mes)
fPCPC	Número de personas contratadas por cada punto colocado	Personas / Puntos
fHP	Hectáreas promedio ocupadas por habitante	Hectáreas / habitante
fTAM	Tiempo de ajuste de la migración	Mes
pGN	Grado de naturalidad de las áreas naturales	Adimensional
PCE	Puntos colocados para la exploración	Puntos
pPI	Precio promedio por tonelada de productos ilícitos	Pesos colombianos
fTAPM	Toneladas de alimentos producidos por hectárea al mes	Toneladas/(Hectárea * Mes)
pGN	Parámetro del grado de naturalidad de las áreas naturales	Adimensional
fDAPM	Demanda promedio mensual de alimentos por persona	Toneladas / (Persona* Mes)
fRT	Factor de retención de tierras	Adimensional
PCE	Puntos colocados para exploración al mes	Puntos / Mes
PAP2D	Área utilizada por cada uno de los puntos de exploración en hectáreas	Hectáreas / Punto

3.2. El algoritmo para simular el modelo en cada paisaje

Para simular el modelo de cada paisaje y lograr su espacialización se requieren dos momentos principales: 1) crear un archivo espacial en formato "shape file" (archivo vectorial) que contienen toda la información demandada por el modelo como primera aproximación, pues también es posible hacerlo a partir de formato raster; 2) desarrollar el algoritmo para simular y posterior especialización de los resultados. A continuación, se presenta de forma detallada el desarrollo de cada uno de estos momentos.

Momento 1: teniendo en cuenta que el modelo demanda los datos, por conveniencia el archivo "shape file" debe contener la información necesaria por unidad de paisaje que permita realizar las simulaciones, en otras palabras, los datos allí consolidados deben garantizar que se pueda solucionar el sistema de ecuaciones diferenciales (problema de valor inicial *PVI*). Matemáticamente el *PVI* se escribe como:

$$PVI = \begin{cases} \dot{x} = f(x, \mu) \\ (t_0) = x_0 \end{cases}$$

Es decir, que para solucionar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias $\dot{x} = (x, \mu)$ se requiere conocer el valor de las variables de estado en el tiempo inicial y el valor de los parámetros. El vector de estados es $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n)$ donde, por ejemplo x_1 representa el área de cobertura de bosque primario en cada instante de tiempo y x_2 podría representar la población total dentro de un paisaje. Por otro lado, los parámetros del modelo se encuentran dentro del vector $\mu = (\alpha, \beta, \gamma, \dots, \delta)$ donde α podría representar por ejemplo la tasa de reforestación y β la tasa de crecimiento poblacional. Es fundamental que la escala de tiempo manejada en cada elemento de μ sea la misma.

Generalmente existen capas geográficas que contienen los insumos (o parte de ellos) para determinar las condiciones iniciales y cálculo de los parámetros del modelo, lo que facilita la consolidación de los datos a través de geoprocésamiento en un único "shape file" en el cual cada polígono representa una unidad de paisaje.

Momento 2: Supongamos que se tienen N unidades de paisaje (polígonos) dentro de un área de estudio, y si se aplica el mismo modelo dentro de cada una de las unidades de paisajes, el modelo puede escribirse como:

$$\dot{x}_i = (x_i, \mu_i) \text{ con } i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Partiendo del archivo .dbf, cada fila de dicho archivo contiene la información consolidada para cada unidad de paisaje mientras que las columnas categorizan dicha información. Esto facilita la solución del modelo para todos los paisajes optimizando recursos computacionales. Las Figuras 2 y 3

muestran a groso modo los algoritmos implementados para la solución y posterior espacialización de los resultados que salen del modelo respectivamente.

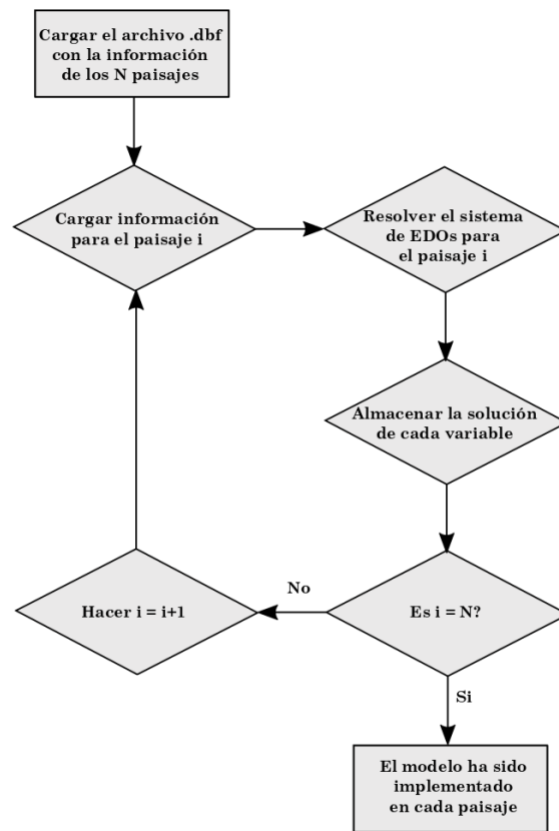


Figura 2: Algoritmo para implementación numérica del modelo en N unidades del paisaje.

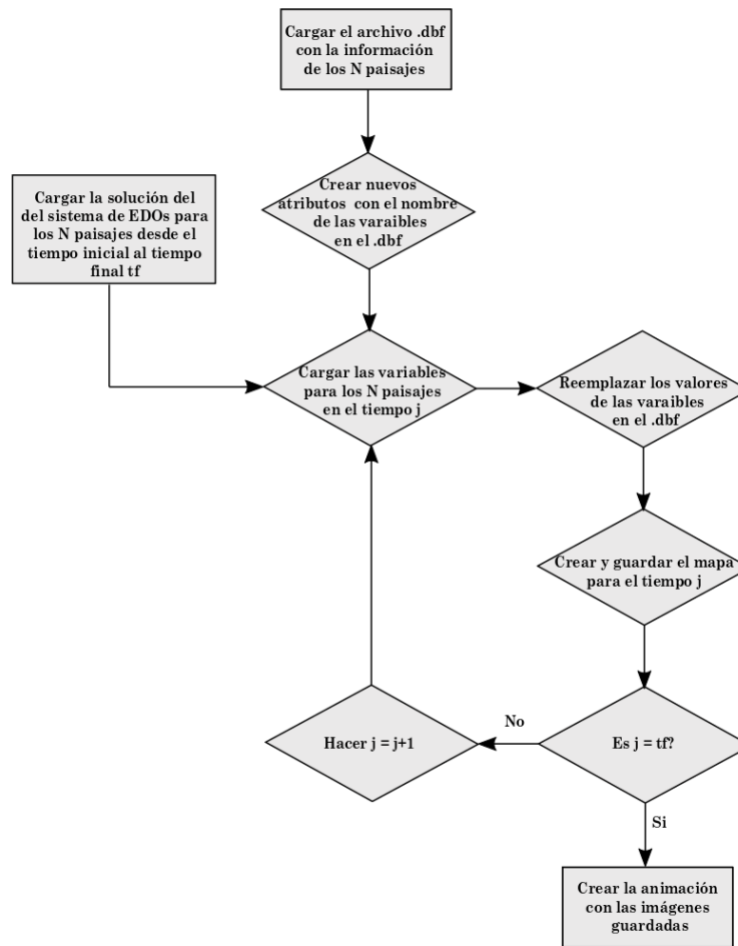


Figura 3: Algoritmo para la espacialización de los resultados por unidad de paisaje.

3.3. Simulaciones para el análisis del modelo matemático obtenido

A partir del modelo matemático obtenido se realizó un conjunto de simulaciones del comportamiento prospectivo de diferentes escenarios, para revisar el desempeño del modelo y obtener algunas conclusiones. Los escenarios considerados fueron: paisaje pristino, paisaje agropecuario y paisaje de cultivos lícitos e ilícitos. Cada uno de ellos se evalúa con la presencia y ausencia de la exploración de hidrocarburos, la cual se representa poniendo puntos de exploración en el paisaje.

- **Escenario 1: Paisaje pristino**

En este escenario ideal, se representa la completa ausencia de la dinámica socioeconómica. Este escenario fue simulado considerando que los valores iniciales de las coberturas son cero, con excepción de la cobertura de áreas naturales. Las tasas de tala de las áreas naturales también se han tomado como cero y la población local es nula.

Las simulaciones muestran una cantidad constante de las áreas naturales, incluso con exploración de hidrocarburos, vea Figura 4.

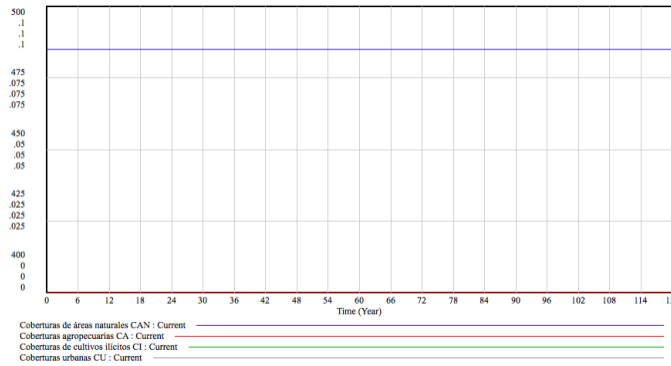


Figura 4: Comportamiento de las coberturas en el escenario pristino.

La biodiversidad simula un valor del 100% y la productividad del suelo del 125%, mientras que la producción de cultivos lícitos e ilícitos aparece en cero, vea Figura 5.

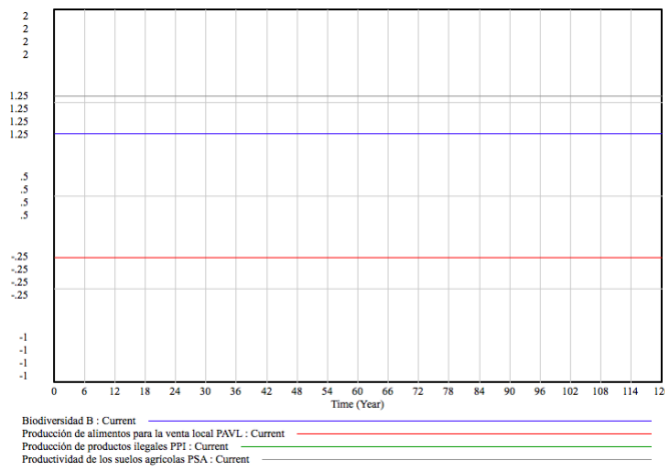


Figura 5: Comportamiento de la biodiversidad, la producción de alimentos, la producción de productos ilegales y la productividad del suelo en el escenario pristino.

Escenario 2: Paisaje agropecuario

En este escenario se representa un paisaje con áreas naturales y una dinámica socioeconómica girando alrededor de la producción agropecuaria. No hay presencia de cultivos ilícitos. Este escenario fue simulado considerando nulos los valores de cobertura de cultivos ilícitos, de tala de áreas naturales para cultivos ilícitos y de adecuación de suelos agropecuarios para cultivos ilícitos.

En el caso en el que no hay exploración de hidrocarburos hay un crecimiento menor de las áreas urbanas a partir de los suelos agropecuarios, mientras que las coberturas de áreas naturales se mantienen intactas, vea Figura 6, lado izquierdo. El efecto sobre la biodiversidad y la productividad del suelo, en este escenario, conduce a valores menores pero constantes a los presentados en el escenario pristino, vea Figura 7, lado izquierdo.

Por otro lado, con la presencia de la exploración de los hidrocarburos en el paisaje, es notoria la pérdida de las áreas naturales y su conversión a coberturas agropecuarias y urbanas, vea Figura 6, lado derecho, lo que a su vez disminuye tanto la biodiversidad como la productividad del suelo, vea Figura 7, lado derecho. Nótese también que la producción de alimentos para la venta local disminuye drásticamente en el tiempo, mostrándose así un paisaje muy dinamizado por su situación socioeconómica, vea Figura 7, lado derecho.

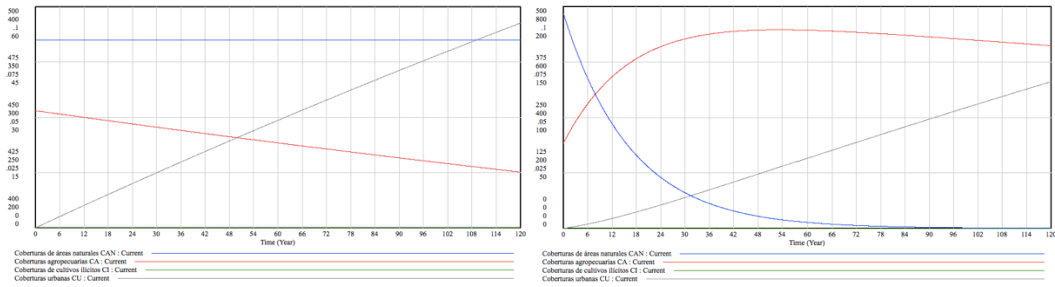


Figura 6: Comportamiento de las coberturas en el escenario de paisaje agropecuario.

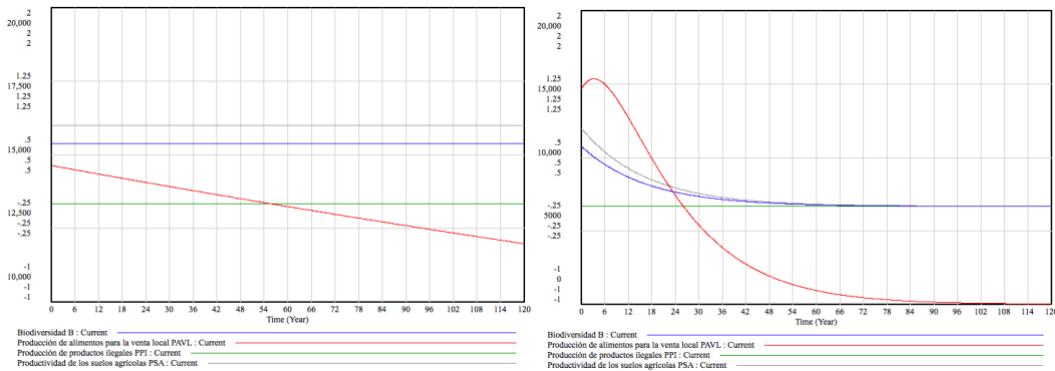


Figura 7: Comportamiento de la biodiversidad, la producción de alimentos, la producción de productos ilegales y la productividad del suelo en el escenario del paisaje agropecuario.

La situación social en este escenario muestra que la actividad económica provoca inmigración al paisaje en condiciones donde la coerción es inexistente, vea Figura 8, lado izquierdo. Sin embargo, con la presencia de la exploración de hidrocarburos, se tiene una situación de constante coerción en el paisaje que muestra una fluctuación en la migración: en primera instancia el paisaje se hace atractivo y genera inmigración, mientras que en una segunda instancia, se pierde interés en el paisaje y se produce la emigración, Figura 8, lado derecho.

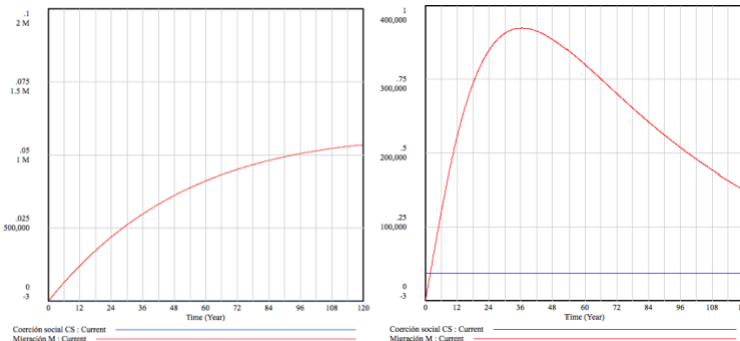


Figura 8: Situación social del paisaje en el escenario de paisaje agropecuario.

- **Escenario 3: Paisaje de cultivos lícitos e ilícitos**

En este escenario se representa un paisaje con áreas naturales, en el que la dinámica socioeconómica depende de la producción agropecuaria y de los cultivos ilícitos. Este escenario fue simulado con valores positivos de los parámetros considerados en el modelo matemático.

En el caso en el que no hay exploración de hidrocarburos, vea Figura 9, lado izquierdo, los cultivos ilícitos pueden llegar a tener un auge por encima de la actividad agropecuaria durante un cierto periodo, sin embargo, con el incremento de la dinámica urbana, la actividad agropecuaria se hace dominante y las coberturas de cultivos ilícitos tienden a desaparecer. Las áreas naturales son convertidas en coberturas de cultivos lícitos e ilícitos, que también van cediendo hacia las coberturas urbanas. De este modo, se obtiene un paisaje completamente transformado hacia lo urbano-agropecuario.

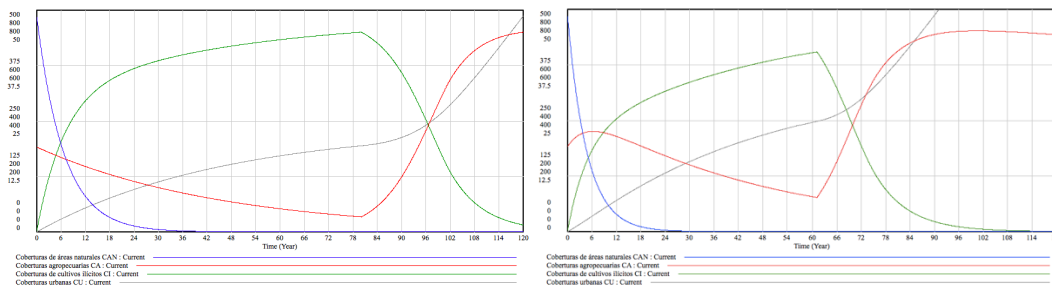


Figura 9: Comportamiento de las coberturas en el escenario de paisaje de cultivos lícitos e ilícitos.

Por otro lado, con la presencia de la exploración de los hidrocarburos en el paisaje, vea Figura 9, lado derecho, es notable que la dinámica del comportamiento ocurre antes en el tiempo, limitando la intensidad y duración de los cultivos ilícitos en el paisaje, pero acelerando su transformación hacia lo urbano agropecuario.

Sobre la situación social, es notable que la presencia de cultivos ilícitos en el paisaje incrementa drásticamente la coerción, lo que a su vez aumenta la emigración de la población del paisaje. De nuevo, se ve cómo la actividad de exploración de hidrocarburos actúa como un dinamizador social que no evita la existencia del comportamiento socioeconómico, sino que lo acelera, vea Figura 10, lado izquierdo para la ausencia de la exploración de hidrocarburos y lado derecho para su presencia.

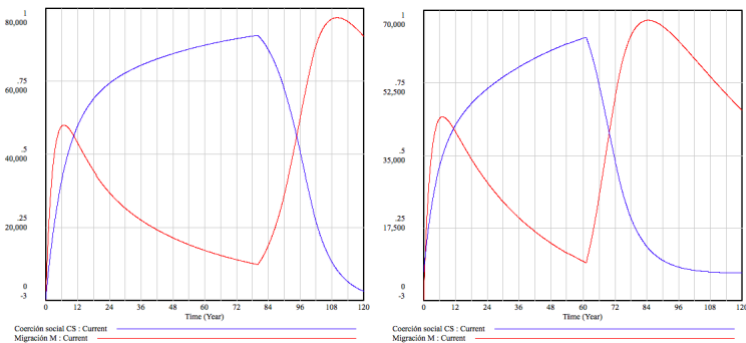


Figura 10: Situación social del paisaje en el escenario de paisaje de cultivos lícitos e ilícitos.

3.4. Simulaciones

3.4.1. Área de estudio

La simulación se realizó en el Piedemonte Andino-Amazónico del Putumayo, en donde se delimitó un polígono con presencia de pozos petroleros y poblaciones urbanas con historia de actividad petrolera, que cubre parte de las subzonas hidrográficas del alto Caquetá, San Miguel, Mecaya y del alto y medio río Putumayo, como se ve en la Figura 11.

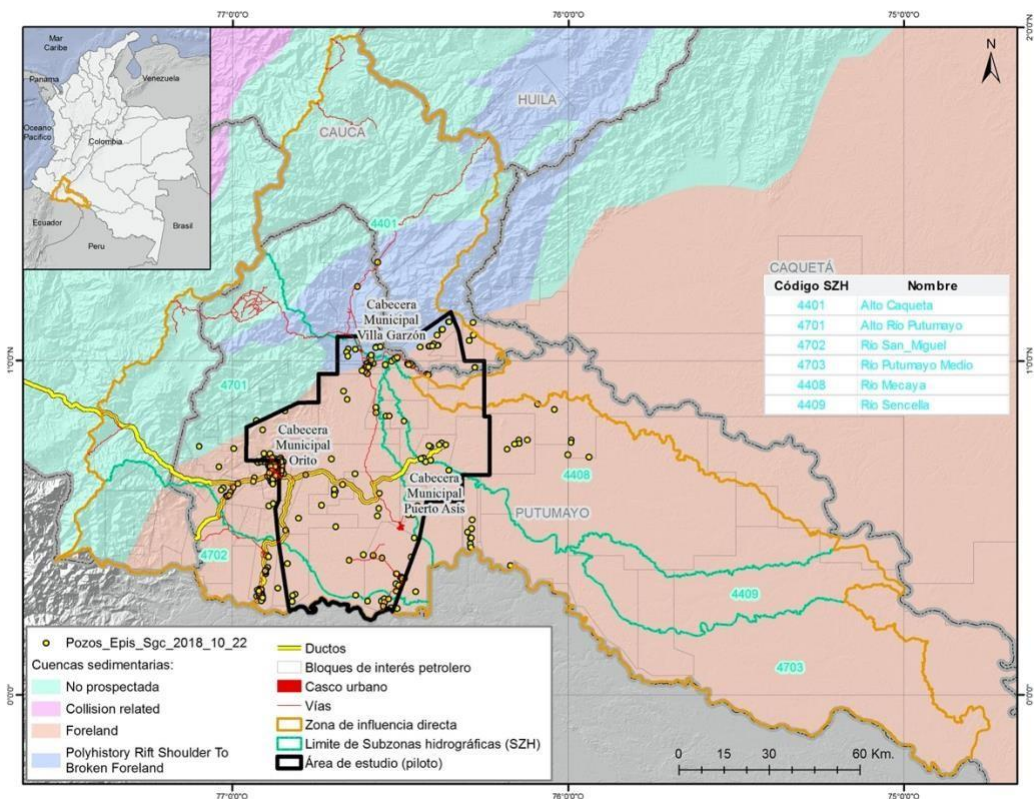


Figura 11: Localización del área de estudio para el modelamiento piloto. Fuente: elaboración propia a partir de IGAC (2017), IDEAM (2013) y ANH (2010).

Las unidades de paisaje fueron obtenidas a partir de la superposición de las microcuencas y los biomas, para obtener 545 unidades que sintetizan las características biofísicas del área de estudio. Con este resultado, se ejecutó otro proceso de superposición con las coberturas terrestres reconocidas por el Sinchi (2018), en la que se agrupan seis tipos de cobertura: agrícola, hidrocarburos, humedales, pastizales, silvestre y urbano. Con estas coberturas se establecieron las condiciones biofísicas iniciales del modelo, calculando el área que cada una de estas tiene por unidad de paisaje. Las características socioeconómicas de las unidades de paisaje fueron asignadas a partir de los datos del Censo Nacional Agropecuario – CNA, de la Gran Encuesta Integrada de Hogares Nuevos Departamentos GEIH – ND y del Censo Nacional – CN. La dinámica en las coberturas terrestres se hizo a partir de la integración de las capas reconocidas por el SINCHI en 2002, 2007, 2012, 2014 y 2016, mientras que las estructuras territoriales identificadas fueron los resguardos indígenas, las comunidades negras, las Zonas de Reserva Campesina (ZRC), el límite veredal, municipales y predial, Los Planes de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET), la condición de las coberturas naturales, las áreas protegidas y los bloques de exploración y explotación.

En la Figura 12 se presentan los mapas de tendencia en 3 instantes de tiempo: el día de hoy, en 5 años y en 10 años, que son el resultado de la simulación del modelo matemático en las 545 unidades de paisaje del polígono estudiado en el piedemonte Andino-Amazónico del Putumayo.

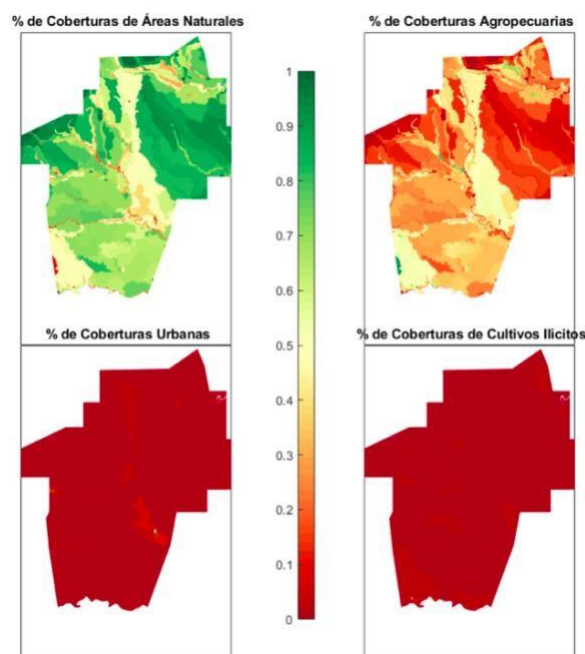


Figura 12: Estado actual de las coberturas en las 545 unidades de paisaje del área de estudio.

En la Figura 12 de estado actual de las coberturas vemos que el área de estudio está mayormente constituida por áreas naturales y áreas agropecuarias, mientras que la presencia de asentamientos urbanos y cultivos ilícitos ocupan áreas pequeñas en relación con las áreas totales de cada paisaje.

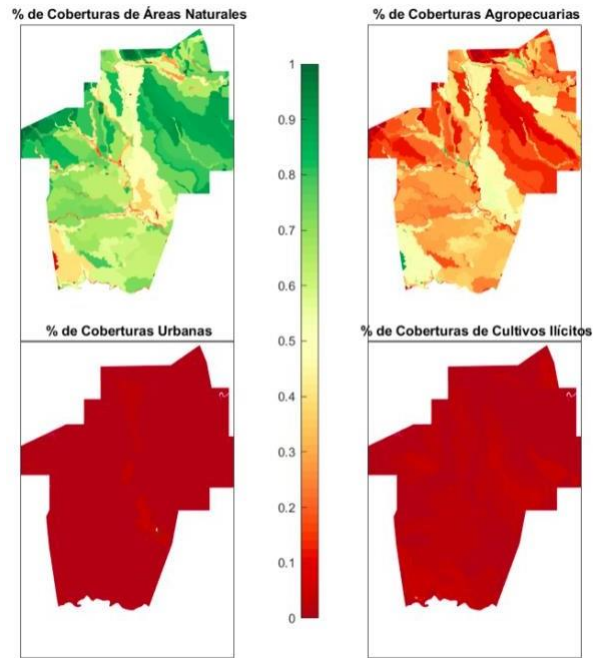


Figura 13: Tendencia a 5 años de las coberturas en las 545 unidades de paisaje del área de estudio.

En la Figura 13, para la tendencia a 5 años, es notorio el aumento de los cultivos ilícitos en diferentes unidades de paisaje, mientras que en la tendencia a 10 años, vea Figura 14, la predominancia de las coberturas de cultivos ilícitos es evidente.

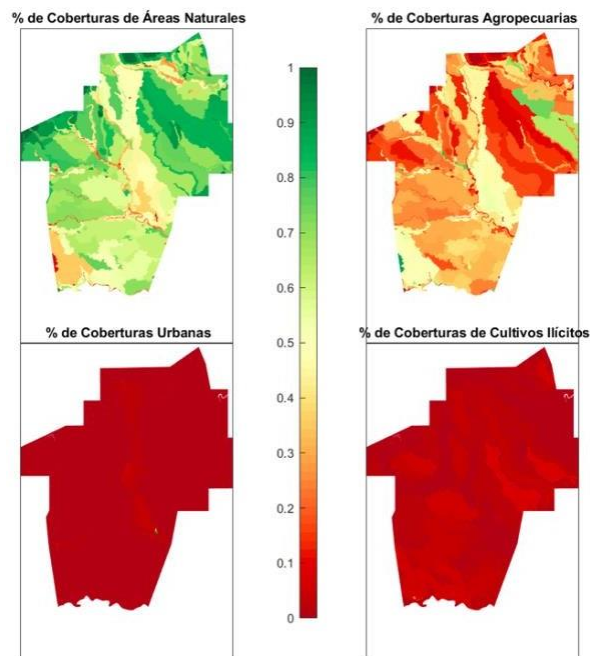


Figura 14: Tendencia a 10 años de las coberturas en las 545 unidades de paisaje del área de estudio.

4. Conclusiones

Con respecto a los modelos matemáticos para el estudio de la gobernanza, bienestar y sostenibilidad se concluye que los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza no pueden ser representados con las mismas técnicas porque se representan objetos distintos, que la gobernanza debe ser analizada conjuntamente con la gobernabilidad, dado que no son lo mismo, y que el bienestar condiciona los análisis de sostenibilidad y los análisis de gobernanza y gobernabilidad.

Desde las simulaciones realizadas se concluye que los casos en los que la actividad petrolera podría traer consecuencias no deseables, son los casos en los que la dinamización socioeconómica que provoca es mayor a la que el paisaje es capaz de asimilar. Ahora que, mientras la oportunidad dada por el precio de los productos ilícitos sea mayor a la obtenida por las actividades agropecuarias lícitas y se carezca de una institucionalidad que salvaguarde los derechos de los ciudadanos, la tendencia del paisaje será hacia la producción de los cultivos ilícitos.

Como se vió a lo largo del documento, las posibilidades del simulador para la toma de decisiones permite, por ejemplo, visualizar los resultados obtenidos para un amplio número de unidades de paisaje sobre cada una de las variables del modelo, escalando el esfuerzo en la comprensión del comportamiento tendencial de la dinámica socioecológica de un área de estudio. De este modo, se puede evaluar más que los dos paisajes que se habían propuesto en la meto POA 2019.

5. Referencias

Bustamante, C., Redondo, J., García, J.A., Amador, J., Pérez, D., y Hernández, O. (2018). Gestión Sostenible del Turismo de Naturaleza: Análisis multidimensional de la potencialidad de los recursos y atractivos naturales. En Moreno, L. A. y Andrade, G. I. (Eds.). 2019. Biodiversidad.2018. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia

Étienne, M. (Ed.). (2013). Companion modelling: a participatory approach to support sustainable development. Springer Science & Business Media.

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas –SINCHI (2007, 2012, 2014, 2016, 2018). Mapas de cobertura de la tierra de la Amazonia colombiana. Escala 1:100.000.

Ostrom, E. (2009a). Understanding institutional diversity. Princeton university press.

Ostrom, E. (2009b). El gobierno de los bienes comunes: la evolución de las instituciones de acción colectiva (No. E14-295). FCE; UNAM; CRIM; IIS.

Redondo, J.M., Bustamante-Zamudio, C., Amador-Moncada, J. & Hernandez-Manrique, O.L. (2019). Landscape sustainability analysis: Methodological approach from dynamical systems. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. Vol. 1414. <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F1414%2F1%2F012010>.