

**ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE A NIVEL
DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA: APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE
SISTEMAS AL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO YUMBO**

MABEL ANDREA ZABALA PÉREZ



**FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y ECONÓMICAS
PROGRAMA ACADÉMICO DE ECONOMÍA
SANTIAGO DE CALI
2011**

**ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE A NIVEL
DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA: APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE
SISTEMAS AL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO YUMBO**

MABEL ANDREA ZABALA PÉREZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y ECONÓMICAS
PROGRAMA ACADÉMICO DE ECONOMÍA
SANTIAGO DE CALI
2011**

**Análisis de Estrategias de Desarrollo Sostenible a Nivel de una Cuenca
Hidrográfica: Aplicación de la Dinámica de Sistemas al Caso de la Cuenca del
Río Yumbo**

Mabel Andrea Zabala Pérez

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Economista**

Director

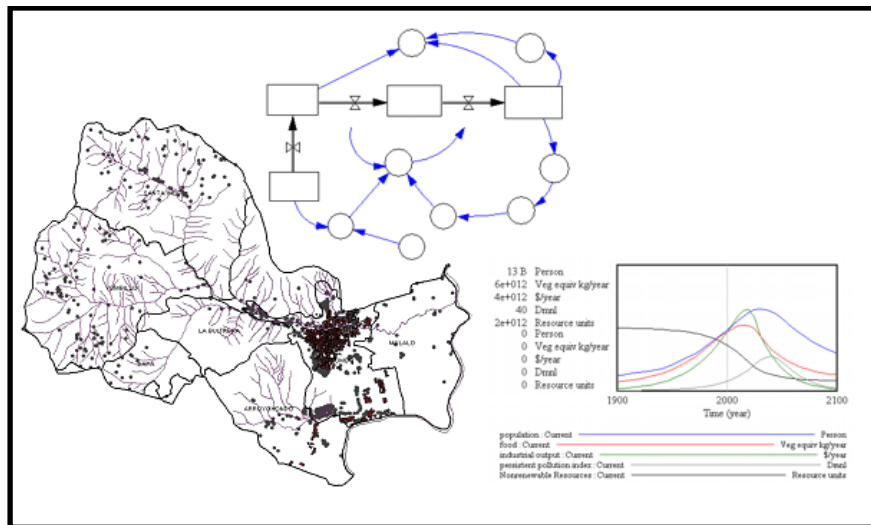
Javier Andrés Castro Heredia

Economista

**Universidad del Valle
Facultad de Ciencias Sociales y Económicas
Programa Académico de Economía
Santiago de Cali
2011**

Análisis de Estrategias de Desarrollo Sostenible a Nivel de una Cuenca Hidrográfica: Aplicación de la Dinámica de Sistemas al Caso de la Cuenca del Río Yumbo

Mabel Andrea Zabala Pérez



Descriptores:

- **Desarrollo Sostenible**
- **Planes de Ordenamiento y Manejo de cuencas hidrográficas**
- **Dinámica de Sistemas**
- **Estrategias de Desarrollo Sostenible**
- **Cuenca del río Yumbo**

Universidad del Valle
Facultad de Ciencias Sociales y Económicas
Programa Académico de Economía
Santiago de Cali
2011

DEDICATORIA

A Dios por concederme la paciencia, fuerza de voluntad y valentía para seguir hasta el final con las metas trazadas.

A mi madre y a la memoria de mi padre, por apoyarme en mis estudios y confiar plenamente en mis capacidades.

A mi abuela, a quien esta realización llena de orgullo y esperó la buena energía transmitida le ayude a sobrellevar su enfermedad.

A mis hermanos, familiares cercanos, amigos y compañeros de carrera que ansiaban el momento de escuchar una buena noticia de mí parte.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesionales con los que compartí la experiencia de los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas del Convenio 168 de 2003. Allí se gestó el deseo de querer proponer otras técnicas para sobrellevar algunas de las dificultades vistas en el desarrollo de estos Planes.

A todos los profesionales de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca que consulte y de los que tuve la oportunidad de obtener conocimientos valiosos para la realización de este trabajo de grado: al químico Germán Restrepo y el ingeniero Edgar Cifuentes de la Dirección Ambiental, al ingeniero Freddy Arevalo del Laboratorio Ambiental, al ingeniero Ramón López de Hidroclimatología, a los ingenieros Patricia Gómez, Flankin Bedoya y Alvaro Calero del Grupo de Sistemas de Información y entre otros que se me escapan, al ingeniero Héctor Fabio Aristizabal del Grupo de Recursos Hídricos.

Al profesor Javier Castro por asumir la dirección de este trabajo de grado y creer en aquellos eternos tesistas que sueñan con obtener algún día el preciado título de economista.

Al profesor Jaime Escobar por asumir la evaluación de este trabajo de grado y apreciar la contribución del mismo al tema de la planificación del desarrollo sostenible en cuencas hidrográficas de Colombia.

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito analizar diferentes estrategias de desarrollo sostenible a nivel de una cuenca hidrográfica, tomando como caso de estudio la cuenca del río Yumbo. Se parte de un estudio comprensivo de las bases conceptuales y paradigmas del desarrollo sostenible, que soporta la identificación de criterios para evaluar la sostenibilidad y el diseño de estrategias de desarrollo sostenible hipotéticas. A partir de un modelo de la cuenca derivado del análisis de su problemática y construido con dinámica de sistemas, se simulan escenarios para evaluar la sostenibilidad de la cuenca, identificar los factores que la determinan y evaluar la operatividad de las estrategias hipotéticas planteadas, para finalmente seleccionar las más apropiadas. Se concluye que las estrategias inspiradas en diferentes paradigmas del desarrollo sostenible pueden actuar de forma complementaria para dirigir a la cuenca del río Yumbo a una senda de desarrollo sostenible.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. EL DESARROLLO SOSTENIBLE	4
1.1 Concepto de Desarrollo Sostenible	4
1.2 Las Tres Dimensiones del Desarrollo Sostenible	5
1.2.1 Sostenibilidad Económica	6
1.2.2 Sostenibilidad Social	6
1.2.3 Sostenibilidad Ambiental	7
1.3 Paradigmas Económicos del Desarrollo Sostenible	7
1.3.1 Sostenibilidad muy débil: Contribución de la Economía Neoclásica	8
1.3.2 Sostenibilidad débil: Contribución de la Economía Ambiental	10
1.3.3 Sostenibilidad fuerte: Contribución de la Economía Ecológica	11
1.3.4 Sostenibilidad muy fuerte: Economía en Estado Estacionario (EEE)	12
2 PLANIFICACIÓN EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS	13
2.1 Concepto de Cuenca Hidrográfica	13
2.2 El proceso de planificación en cuencas y su evolución en Colombia	13
2.2.1 Enfoque actual: Planes de ordenamiento y manejo de cuencas	14
3 LA DINÁMICA DE SISTEMAS COMO MÉTODO PARA EL DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	15
3.1.1 Definición y Antecedentes	15
3.1.2 Elementos Básicos	15
3.1.3 Proceso de aplicación de la dinámica de sistemas	17
3.1.4 Aplicación de la dinámica de sistemas en la planificación de cuencas	18
4 METODOLOGÍA	20
5 CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL RÍO YUMBO	21
5.1 Análisis preliminar de la cuenca	21
5.1.1 Descripción general del sistema	21
5.1.2 Definición de problemas	22
5.1.3 Análisis básico de la problemática	24
5.2 Modelo de la cuenca	25
5.2.1 Subsistema ambiental	25
5.2.2 Subsistema económico	31
5.2.3 Subsistema social	35

5.3	Estimaciones preliminares	37
5.3.1	Complementación de datos	37
5.3.2	Ajuste de variables con comportamiento aleatorio	38
5.3.3	Ajuste de tendencias con regresión bootstrap	39
5.3.4	Ajuste de efectos con métodos paramétricos y no paramétricos	40
5.3.5	Ajuste de parámetros de la función de calidad de vida con ACP	41
5.4	Evaluación de la sostenibilidad	42
5.4.1	Criterios de sostenibilidad	42
5.4.2	Evaluación con base en resultados del escenario actual	42
5.5	Análisis de estrategias de desarrollos sostenible	45
5.5.1	Formulación de estrategias de desarrollo sostenible hipotéticas	45
5.5.2	Resultados de simulación de estrategias	46
5.5.3	Discusión sobre impacto de estrategias y selección de más apropiadas	49
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	ANEXOS	61
A.	Principales fuentes de información para la construcción del modelo	61
B.	Principales formulas del modelo en lenguaje VENSIM	62
C.	Otros submodelos simulados	63
D.	Información complementaria de estimaciones preliminares	67
E.	Descripción de algunas técnicas empleadas en estimaciones preliminares	69
F.	Detalles de la formulación de estrategias de desarrollo sostenible	71
G.	Más Influencias de estrategias sostenibilidad débil y fuerte	72

INDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Síntesis de los Paradigmas Económicos del Desarrollo Sostenible	8
Tabla 2. Proceso de construcción de un modelo con dinámica de sistemas	17
Tabla 3. Estimaciones a partir de información del SISBEN	37
Tabla 4. Distribuciones estimadas para simular variables ambientales	38
Tabla 5. Distribuciones estimadas para simular precios y costos de cultivos	38
Tabla 6. Resultados Regresiones Bootstrap	39
Tabla 7. Ajustes no paramétricos de algunos efectos	40
Tabla 8. Valores y Vectores propios y Calidad de representación	42
Tabla 8. Principales fuentes de información para la construcción del modelo	61
Tabla 9. Principales formulas del modelo en lenguaje VENSIM	62
Tabla 10. Evaluación de distribuciones de probabilidad en variables ambientales	67
Tabla 11. Otros ajustes para simular información de cultivos y otras variables	67
Tabla 12. Diferentes posturas de las estrategias de desarrollo sostenible	71

INDICE DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Aproximaciones de Munasinghe al Desarrollo Sostenible	6
Figura 2. Simbología y formulación de Forrester (Sterman, 2000)	16
Figura 3. Mapa de ubicación geográfica de la cuenca del río Yumbo	21
Figura 4. Diagrama causal de problemática general de la cuenca	24
Figura 5. Diagrama de Forrester Submodelo Dinámica hidrológica	26
Figura 6. Diagrama de Forrester Submodelo Contaminación del agua	28
Figura 7. Diagrama de Forrester Submodelo Contaminación atmosférica	30
Figura 8. Diagrama de Forrester Submodelo Economía agrícola zona alta	32
Figura 9. Diagrama de Forrester Submodelo Economía agrícola zona baja	32
Figura 10. Diagrama de Forrester Submodelo Economía urbana	34
Figura 11. Diagrama de Forrester Submodelo Demográfico	36
Figura 12. Diagrama de Forrester Submodelo calidad de vida	36
Figura 13. Ajustes no paramétricos de efectos en algunas variables	41
Figura 14. Indicadores sostenibilidad ambiental	43
Figura 15. Indicadores sostenibilidad económica	44
Figura 16. Indicadores sostenibilidad social	44
Figura 17. Resultados estrategia sostenibilidad muy débil	47
Figura 18. Resultados estrategias sostenibilidad débil	47
Figura 19. Resultados estrategia sostenibilidad fuerte	48
Figura 20. Resultados estrategia sostenibilidad muy fuerte	49
Figura 21. Diagrama de Forrester Submodelo Cambio de uso del suelo	63
Figura 22. Diagrama de Forrester Submodelo Erosión	65
Figura 23. Histogramas variables ambientales con densidad kernel superpuesta	67
Figura 24. Comportamiento de precios y costos de cultivos	68
Figura 25. Histograma coeficientes β bootstrap con densidad kernel superpuesta	68
Figura 26. Histograma de valores propios y círculos de correlaciones en ACP	68
Figura 27. Influencia en otros sectores estrategia sostenibilidad débil	72
Figura 28. Influencia en otros sectores estrategia sostenibilidad fuerte	72

INTRODUCCIÓN

A comienzos de la década de 1930, la cuenca hidrográfica empezó a considerarse unidad de planificación de desarrollo regional: tomarla como base para la gestión de los recursos hídricos trajo consigo el desarrollo económico y el mejoramiento de las condiciones de vida en diversas regiones de Estados Unidos (Tolley y Riggs, 1961). En Colombia, en la época que inició el despegue económico a gran escala en el Valle del Cauca, se adopta por primera vez esta iniciativa con el propósito de superar los obstáculos impuestos por la ineficiente provisión de agua y energía y las constantes inundaciones¹ (CVC, 2004). Aunque la planificación de cuencas hidrográficas fue asociada en sus comienzos con propósitos de protección ambiental más que con posibilidades de desarrollo (Zuñiga, 2004), también ha buscado promoverlo, entre otras cosas, conservando las condiciones físicas que hacen posible la continua provisión de los recursos naturales, indispensables para nuestras actividades diarias.

El medio ambiente cumple muchas funciones sin las cuales las actividades humanas no serían posibles. El rápido crecimiento del sistema socio-económico está sobrepasando las capacidades de los ecosistemas, haciendo evidente los límites al crecimiento económico continuado (Jacobs, 1991; Munasinghe, 1993; Goodland, 1995). Esta situación revela la importancia de proteger el medio ambiente y plantea la necesidad de planificar un desarrollo que tenga en cuenta las capacidades de los ecosistemas para soportarlo. Para tal propósito, la cuenca hidrográfica, al ser un sistema que integra estratégicamente a los recursos naturales es la unidad de planificación de desarrollo sostenible idónea a nivel regional (IDEAM, 2008).

En Colombia el proceso de planificación de cuencas hidrográficas, a cargo de las Corporaciones Autónomas Regionales, y materializado en los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCH), es un escenario de política donde el concepto del desarrollo sostenible tiene la oportunidad de ponerse en práctica; pero esta tarea enfrenta no sólo el problema de equilibrar intereses económicos, sociales y ambientales sino el de analizar la complejidad de un sistema natural como la cuenca hidrográfica y su interacción con los sistemas socioeconómicos (IDEAM, 2008). El presente estudio plantea una propuesta para apoyar las metodologías actualmente implementadas en los POMCH, en esa búsqueda constante de incorporar el concepto de desarrollo sostenible y aplicar un enfoque sistémico.

¹ En 1954 en Colombia se adoptó el modelo de manejo de la cuenca del río Tennessee creado en 1933, dando origen a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).

Aunque el concepto de desarrollo sostenible este sujeto a múltiples interpretaciones, en esencia se trata de garantizar la supervivencia humana en condiciones de vida aceptables, idea que cuenta con el apoyo político unánime (Daly y Cobb, 1997); pero sigue siendo tarea de investigación definir las formas de ponerlo en práctica. Actualmente, se pueden encontrar diferentes enfoques que proponen diversas formas de interpretarlo, de alcanzarlo y de medir el progreso hacia él (Turner, 1992; Moffatt *et al*, 2001; Van den Bergh y Hofkes, 1998; entre otros); así como métodos que permiten evaluar de forma integrada los posibles impactos sociales, económicos y ambientales de las políticas a implementar (Boulanger y Brécher, 2005). Sin embargo, cada región debe estudiar la forma de adecuar estas teorías y herramientas a la solución de su problemática particular y trabajar en la definición de criterios para evaluar la sostenibilidad, que entendida como la permanencia de unas condiciones en el tiempo requiere el tratamiento dinámico y sistémico de la información disponible.

A la vez, el enfoque sistémico trata de dar respuesta a la necesidad de tener en cuenta las profundas interconexiones que existen entre los sistemas sociales, económicos y ambientales. De esta forma, poder encarar la complejidad que presenta el problema del desarrollo sostenible y del sistema al cual se pretende aplicar. La utilidad de esta perspectiva para conseguir tal propósito ya ha sido reconocida en muchas partes (Hamilton *et al*, 1969; Gallopín, 2003; IDEAM, 2008; Hjorth y Bagheri, 2006, entre otros) pero su aplicación efectiva requiere las herramientas apropiadas. Con relación a esto, la dinámica de sistemas se destaca como la herramienta más completa, al permitir trabajar la complejidad de los problemas actuales, simular diferentes escenarios de gestión con información restringida y apoyar la toma de decisiones (Dyner, 1993; Boulanger y Brécher, 2005); sin embargo, su utilización no ha sido muy difundida para la planificación de cuencas hidrográficas en Colombia. En este trabajo se espera mostrar su utilidad para la formulación de estrategias de desarrollo sostenible en cuencas hidrográficas.

Como caso particular, la cuenca del río Yumbo, escogida como área de aplicación del presente estudio por ser una de las cuencas priorizadas en el Valle del Cauca y por la facilidad de acceder a su información, presenta situaciones que dan muestra de insostenibilidad, como es el conflicto en el uso y manejo del agua y suelo, manejo y disposición inadecuados de aguas residuales industriales y domésticas, disminución y pérdida del área boscosa y asentamientos humanos en zonas de riesgo, entre otras (CVC-PROAGUA, 2010). Estas irregularidades demandan la planificación de estrategias para controlarlas y prevenir otros problemas susceptibles de presentarse, teniendo en cuenta diferentes intereses que pueden estar en conflicto y efectos que sólo se perciben con el tiempo; por lo que tener al desarrollo sostenible como objetivo general de política y a la dinámica de sistemas como herramienta para el diseño de estrategias es muy apropiado.

El objetivo del presente trabajo es analizar estrategias que puedan promover el desarrollo sostenible a nivel de una cuenca hidrográfica como la del río Yumbo. Para tal propósito, se sigue un proceso en el que se da cumplimiento a los siguientes objetivos específicos: evaluar la sostenibilidad de la cuenca con base en los criterios de sostenibilidad relevantes, identificar los factores que determinan la sostenibilidad de la cuenca y evaluar la operatividad de estrategias hipotéticas inspiradas en los paradigmas del desarrollo sostenible, identificando las más apropiadas.

Inicialmente, un estudio comprensivo de las bases conceptuales y paradigmas del desarrollo sostenible, soporta la identificación de criterios para evaluar la sostenibilidad y la formulación de estrategias de desarrollo sostenible hipotéticas. Ya en el desarrollo del caso de estudio, un modelo de la cuenca construido con dinámica de sistemas a partir del software VENSIM (versión de libre distribución) captura la estructura que explica cómo las situaciones problemáticas condicionan su estabilidad. La simulación del modelo para un periodo de 50 años², iniciando en el año 2000 y finalizando en el año 2050, genera tendencias que permiten evaluar la sostenibilidad de la cuenca e identificar los factores que la determinan. La reformulación del modelo incorpora las estrategias hipotéticas que actuarán sobre estos factores y la simulación del modelo modificado genera escenarios de gestión para evaluar la operatividad de las estrategias y finalmente seleccionar las más apropiadas.

El presente documento está organizado de la siguiente forma. En la primera sección se presentan las bases conceptuales y paradigmas del Desarrollo Sostenible; en la segunda los antecedentes de la planificación en cuencas de Colombia; en la tercera, una descripción del método dinámica de sistemas, aplicado para diseñar las estrategias de desarrollo sostenible del caso de estudio; en la cuarta, una descripción de la metodología planteada para dar cumplimiento a los objetivos expuestos; en la quinta, se desarrolla el caso de estudio y en la sexta se concluye.

² El debate gira en torno a un periodo que comprende 50 o 60 años (Ecological Economics (Ed), 1997:275).

1. EL DESARROLLO SOSTENIBLE

1.1 Concepto de Desarrollo Sostenible

El desarrollo sostenible puede interpretarse como la visión evolucionada del patrón que, se considera, debe seguir la humanidad para mejorar sus condiciones de vida. En la época de posguerra, el enfoque del progreso fue el crecimiento, basado en el concepto de eficiencia económica. En la década de 1970, al reconocer el cuantioso número de pobres, producto de la inadecuada distribución de los beneficios, la visión se extiende al desarrollo, basado en la intervención del Estado para mejorar la distribución del ingreso (Munasinghe, 1993). Ahora, al considerar que se han ignorado los efectos ambientales del desarrollo, se proclama como objetivo a seguir el desarrollo sostenible (Comisión Brundtland, 1987).

La idea de que existen límites naturales al crecimiento tiene su origen en razonamientos de economistas clásicos. Robert Malthus, al defender que como la población crece geométricamente y la producción de alimentos aritméticamente, la mayor parte de la población debía permanecer en el nivel de subsistencia; David Ricardo al señalar que la expansión de la población hace que se utilicen, cada vez más, tierras menos fértiles propiciando el desmejoramiento de sus niveles de vida. Y finalmente, John Stuart Mill con el concepto de estado-estacionario (ver sección 1.3.4). Sin embargo en ese entonces los logros del progreso tecnológico dieron lugar a la idea de que un crecimiento económico exponencial perdurable sin restricciones naturales era posible (Martínez-Alier y Roca, 2001).

En la década de 1970 se revivió la preocupación por la capacidad del planeta para hacer frente a los patrones de crecimiento acelerado de la población, la producción y el consumo. El Club de Roma³, realizó una investigación titulada *Los Límites del Crecimiento*, en la que se construyó un modelo del mundo con dinámica de sistemas (ver sección 3.1) para analizar los efectos de largo plazo de los patrones de desarrollo observados en esa época. Sus resultados revelaron que de no modificar las tendencias de crecimiento observadas, se llegaría a una degradación ambiental sin precedentes y por consiguiente al colapso de la sociedad a escala global (Meadows *et al*, 1972).

³ “Asociación privada compuesta, desinteresadamente, por hombres de empresa, científicos y participantes en la vida pública nacional e internacional” (Meadows *et al*, 1972: 11).

Sin embargo este tema se ha difundido con más ahínco por cuenta de organizaciones internacionales⁴. Precisamente, el concepto de desarrollo sostenible más conocido es el de la Comisión Brundtland (1987), que lo define como el “desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”. Concepto que invita a descifrar la capacidad (económica, social y ambiental) que debe ser mantenida a través del tiempo para satisfacer continuamente las necesidades de la humanidad.

El significado del desarrollo sostenible puede ser abordado de dos formas: identificando los fines que deben perseguirse o los medios para alcanzarlo. Usualmente, se identifican fines como el consumo, utilidad o bienestar no decreciente y medios como conservar la capacidad productiva del sistema económico o la capacidad del medio ambiente para soportar el desarrollo. Por otro lado, los elementos básicos que este concepto confronta son: el crecimiento económico, la protección ambiental y la equidad social (inter e intra generacional) (Mulalic, 2004).

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, planificar el desarrollo sostenible implica identificar las formas más adecuadas de utilizar los recursos naturales y servicios ambientales, de manera que se garantice su continua provisión para las actividades productivas, la estabilidad de los ecosistemas para que no ocurran fenómenos irreversibles y la permanencia de unas condiciones ambientales en niveles tolerables para proteger la salud humana. Objetivos que pueden ser perseguidos tomando como unidad de planificación y gestión a un sistema que integre estratégicamente los recursos naturales, como lo hace la cuenca hidrográfica.

1.2 Las Tres Dimensiones del Desarrollo Sostenible

Una estructura popular para entender el significado del desarrollo sostenible consiste en distinguir entre sostenibilidad económica, social y ambiental, teniendo en cuenta que el desarrollo sostenible es un objetivo general que debe integrar estos tres tipos de sostenibilidad y cómo ponerlos en práctica (Goodland, 1995). El triángulo de Munasinghe (Figura 1) los relaciona, ubicando en los extremos sus retos y en los lados las soluciones para balancearlos. En lo que sigue, se profundiza en el significado de cada tipo de sostenibilidad, base de la identificación de criterios para evaluar la sostenibilidad de la cuenca objeto de estudio.

⁴ La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN (1980) sentó las bases del concepto con la Estrategia de Conservación Mundial, la Comisión Brundtland lo solidificó y la Organización de Naciones Unidas ONU lo ha reforzado con sucesivas conferencias (por ejemplo, la Conferencia de río de Janeiro, en 1992 y la de Johannesburgo, en 2002).

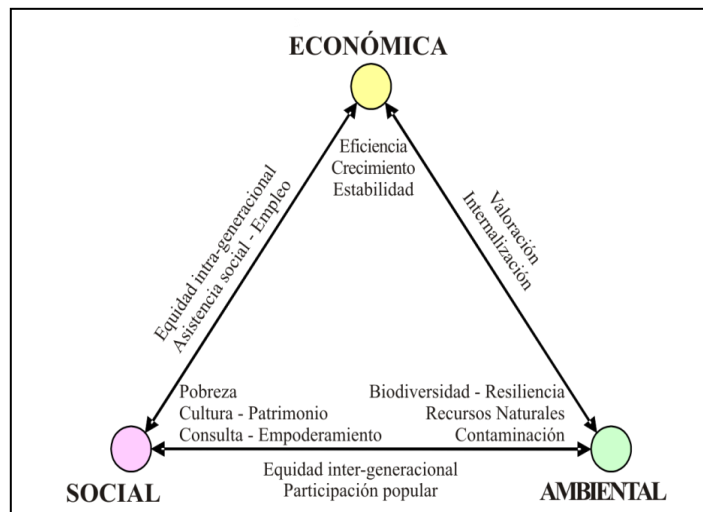


Figura 1. Aproximaciones de Munasinghe al Desarrollo Sostenible
(Fuente: Pearce, 1999)

1.2.1 Sostenibilidad Económica

De acuerdo al concepto de ingreso de Hicks (1948) la capacidad de sostenimiento de la economía consiste en consumir el ingreso manteniendo intacto el capital que permite generarlo. Pero el problema radica en la definición y estructura de ese capital (Goodland, 1995). De las cuatro formas de capital (manufacturado, natural, social y humano), el capital natural había recibido poca atención porque hasta hace poco no se consideraba escaso, ahora incluirlo en las decisiones económicas implica resolver problemas de valoración, sustitución y posible irreversibilidad. Sin embargo, su consideración en la sostenibilidad económica se reduce a la base de recursos naturales que provee insumos físicos al proceso de producción y en su uso eficiente para el fortalecimiento de la capacidad productiva (Munasinghe, 1993).

1.2.2 Sostenibilidad Social

Munasinghe (1993) asocia el concepto de sostenibilidad social con la preservación de la diversidad cultural y la reducción de conflictos destructivos. Indica la importancia de la equidad intrageneracional con la eliminación de la pobreza y la equidad intergeneracional reconociendo los derechos de las generaciones futuras, básicamente, conservando el medio ambiente. Finalmente, señala que fomentar la participación comunitaria en la toma de decisiones aporta a la construcción de un desarrollo socialmente sostenible.

Lehtonen (2004) identifica dos aproximaciones para abordar la dimensión social del desarrollo sostenible: las capacidades y el capital social. Las capacidades son definidas por Sen (1999) como las distintas combinaciones de funciones de vida que un individuo tiene libertad de hacer (o ser) y razones para valorar. Por otro lado, el capital social se refiere a las normas y redes de relaciones sociales que al facilitar la acción colectiva mejoran la eficiencia de la sociedad (Woolcock, 2002 en Lehtonen, 2004), aproximación que consistiría en valorar el capital social y mantener esta medida constante en el tiempo.

1.2.3 Sostenibilidad Ambiental

La sostenibilidad ambiental es la permanencia en el tiempo de las funciones ambientales: provisión de recursos naturales, sumidero de residuos, funciones de soporte de vida y servicios como el agrado. Para garantizarla debe controlarse la escala del sistema socio-económico, siguiendo reglas como: mantener las tasas de cosecha de recursos renovables, dentro de las tasas de regeneración; mantener la tasa de agotamiento de recursos no renovables igual a la tasa a la que sustitutos renovables puedan ser creados y mantener las emisiones de residuos dentro de la capacidad asimilativa del medio ambiente (El Serafy, 1991 en Goodland, 1995).

La sostenibilidad ambiental también requiere la resiliencia de los ecosistemas, entendida como la capacidad de todo ecosistema para conservar sus principales características y procesos que controlan su comportamiento después de enfrentar algún disturbio (Munasinghe, 1993). Esta resiliencia se asocia con la biodiversidad, complejidad o interconexión de los sistemas naturales, por lo que se sugiere que los impactos humanos que reducen estos elementos deben evitarse (Van Kotten, 2000).

1.3 Paradigmas Económicos del Desarrollo Sostenible

En la literatura económica existen diferentes interpretaciones sobre la forma de aplicar el concepto de desarrollo sostenible. Turner (1992) las agrupa en cuatro posiciones que van de la sostenibilidad muy débil a la muy fuerte. Esta divergencia parte de la definición de desarrollo sostenible como mantenimiento de capital constante, que lleva a concretar el tipo de capital y el grado de sustitución admitido. Estas posiciones se estudian en esta sección, destacando sus bases conceptuales, estrategias, instrumentos de política y posibles estimaciones. Una síntesis se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Síntesis de los Paradigmas Económicos del Desarrollo Sostenible

PARADIGMA	SOSTENIBILIDAD MUY DÉBIL	SOSTENIBILIDAD DÉBIL	SOSTENIBILIDAD FUERTE	SOSTENIBILIDAD MUY FUERTE
CORRIENTES	• Economía Neoclásica	• Economía Ambiental (Escuela de Londres)	• Economía Ecológica	• Teoría estado-estacionario de Herman Daly
ESTRATEGIAS	• Acumulación de capital que compense pérdidas naturales y mantenga el consumo constante	• Compensación entre recursos naturales. • En incertidumbre estándares mínimos seguros flexibles.	• Conservar el capital natural crítico. • En incertidumbre estándares mínimos seguros rígidos.	• Aumentar eficiencia en uso de recursos. • Controlar el crecimiento
REGLAS	• Tasa de ahorro > tasa de depreciación del capital. • Tasa de progreso técnico > tasa de descuento.	• Reglas de gestión ambiental básicas. • Constancia del valor monetario del capital natural agregado.	• No depreciación del capital natural crítico. • No sustituir capital natural por capital artificial.	• Crecimiento económico cero. • Crecimiento poblacional cero.
INSTRUMENTOS DE POLITICA	• Progreso técnico • Gastos en mitigación	• Tasas retributivas • Subsidios • Pago por servicios ambientales • Asignación de derechos de propiedad	• Políticas coercitivas y reguladoras en algunos contextos • Concientización y asignación de derechos de propiedad.	• Límites al ingreso y riqueza • Licencias a nacimientos • Cuotas de agotamiento
INDICADORES	• Producto Nacional Neto Verde.	• Ahorro neto ajustado	• Huella ecológica • Productividad primaria neta • Brecha de sostenibilidad	• Requerimiento Material Total (RMT)

Fuente: Interpretación a partir de Turner, 1992; Ozkaynak *et al*, 2004; entre otros.

1.3.1 Sostenibilidad muy débil: Contribución de la Economía Neoclásica

En esta postura se encuentran las contribuciones de los economistas neoclásicos que defienden que para garantizar el desarrollo sostenible, concebido como el consumo no decreciente en el tiempo, debe conservarse la capacidad productiva del sistema económico. Por lo que se sugiere mantener constante la reserva de capital agregado que entra en el proceso de producción. Esta perspectiva es calificada como muy débil, porque no da un tratamiento especial al capital natural, evadiendo el problema de su agotamiento, al suponer que otras formas de capital y el progreso tecnológico siempre podrán compensarlo (Cabeza, 1996; Martínez-Alier y Roca, 2001).

Este paradigma parte de los estudios de Solow (1974), Dasgupta y Heal (1974) y Stiglitz (1974), que incorporaron en modelos de crecimiento económico a los recursos agotables para encontrar las condiciones bajo las cuales el crecimiento económico continuado es posible. Solow (1974) encontró que un crecimiento indefinido es posible con la acumulación continua de capital, manteniendo la productividad del capital mayor a la del recurso natural. Dasgupta y Heal (1974) en ausencia de progreso técnico y con una ‘tasa de descuento’⁵ constante y positiva, predicen una trayectoria de consumo no sostenible, debido al efecto de la tasa de descuento positiva y la escasez del recurso natural. Stiglitz (1974) incorporando el progreso técnico exógeno, encontró que con una tasa de progreso técnico mayor a la tasa de descuento se alcanza un nivel sostenible de consumo per cápita, incluso asumiendo crecimiento poblacional (Pezzey y Toman, 2001, 2002; Yang, 1999).

Nuevos exponentes del paradigma neoclásico (Bovenberg y Smulders, 1995; Hofkes, 1996 y Valente, 2005) analizan el caso de recursos renovables, no renovables y contaminación con modelos de crecimiento endógeno que son resueltos al buscar soluciones de crecimiento sostenido (trayectorias en las que todas las variables crecen a una tasa constante). En estos modelos se muestra que bajo ciertas condiciones en la producción y elasticidades de sustitución la economía crece a una tasa positiva constante, manteniendo la calidad ambiental (o reserva de recursos naturales) en un nivel constante. El progreso técnico, gastos en mitigación y las capacidades regenerativas del medio ambiente compensan el agotamiento y deterioro de los recursos naturales y servicios ambientales (Van den Bergh y Hofkes, 1998).

Una estrategia para generar la acumulación de capital y asegurar una trayectoria de consumo no decreciente, es la regla ahorro-inversión o mejor conocida como regla de Hartwick, que consiste en invertir las rentas derivadas de la utilización de la reserva de recurso agotable en acumulación de capital reproducible. Hartwick (1977) mostró que esta regla permite a una economía cerrada con rendimientos constantes a escala mantener un flujo constante de consumo per-cápita en el tiempo. Solow (1986) señaló que la regla de Hartwick puede también interpretarse como mantener el stock de capital total constante (Cabeza, 1996).

Un indicador derivado de este paradigma para mostrar si una economía es sostenible es el Producto Nacional Neto (PNN) Verde proveniente de la noción de ingreso hickisiano. Este indicador de flujo desarrollado por Hartwick (1990) – entre otros – se calcula deduciendo del PNN convencional el valor de la depreciación de los recursos naturales no renovables, el deterioro de los recursos naturales renovables y el daño de la contaminación. Entre las críticas asociadas a esta medida se encuentra que es muy restrictivo al asumir rendimientos constantes a escala, ningún crecimiento demográfico y ningún cambio tecnológico (Stern, 1995).

⁵ El factor de descuento se usa para convertir flujos de beneficios y costos del futuro en su equivalente presente.

1.3.2 Sostenibilidad débil: Contribución de la Economía Ambiental

En esta posición se encuentran las modificaciones que los economistas ambientales han hecho a la aproximación de la sostenibilidad muy débil. En particular, los economistas ambientales Pearce y Turner (1990), Barbier y Markandya (1990) y Klassen y Opschoor (1990), defienden que aunque es posible sustituir capital natural por capital artificial hay ciertos componentes del capital natural que no tienen sustituto alguno (Navrud, 2002). Por lo tanto, se debe acoger la estrategia de mantener constante la reserva agregada de capital natural cuando no se pueda garantizar que la acumulación de capital o el cambio tecnológico compensarán las pérdidas ocasionadas por su disminución (Turner, 1992).

Las reglas de gestión de recursos naturales para restringir la escala del crecimiento económico (ver sección 1.2.3) son inmediatamente citadas por los defensores de este paradigma, quienes buscan ponerlas en práctica por medio de la valoración económica (Pearce y Turner, 1990). Ya sea que se decida mantener constante el nivel de capital natural existente, un nivel crítico o alguna cantidad entre estas dos opciones, el capital natural es agregado en unidades comparables (Hanley, 1997) y se proponen tres interpretaciones para la estrategia planteada. La primera es que el valor monetario de los activos naturales permanezca constante. La segunda alternativa es el mantenimiento de un flujo constante de servicios provenientes del capital natural y la tercera es que se mantenga constante el precio real de los activos naturales si refleja perfectamente su escasez (Pearce y Turner, 1990; Azqueta y Ferreira, 1994).

Los criterios considerados pueden implementarse a través de mecanismos coercitivos o reguladores como incentivos de precios, impuestos y cargos o la asignación de derechos de propiedad por medio de permisos negociables (Bruton, 1999; IDEAM, 2006). En particular se plantea para las cuencas el Pago por Servicios Ambientales, instrumentos económicos diseñados para equilibrar intereses entre propietarios y usuarios de los recursos naturales (Rudas, 1998; Costanza y Farber, 2002; IDEAM, 2006). Pero cuando el uso del capital natural se enfrenta a la incertidumbre se proponen límites a partir de estándares mínimos seguros (SMS) (Ciriacy-Wantrup, 1952; Bishop, 1978) que consisten en prevenir reducciones en la reserva de capital natural por debajo de un estándar mínimo seguro a menos que los costos de oportunidad social sean inaceptablemente altos (Hanley, 1997; Van Kotten, 2000).

Un indicador derivado de este paradigma es el ahorro neto ajustado, un indicador de estado desarrollado por Pearce y Atkinson (1993) que trata de acuñar los conceptos de sostenibilidad débil (reserva de capital agregado constante) y fuerte (reserva de capital natural constante). El cual mide que tanto los ahorros de una economía cubren la depreciación del capital de modo que se satisfaga la regla de sostenibilidad débil o fuerte, según sea el caso.

1.3.3 Sostenibilidad fuerte: Contribución de la Economía Ecológica

La sostenibilidad fuerte es una perspectiva que exige medidas más estrictas para garantizar la sostenibilidad, al considerar la complementariedad de capitales, los cambios en el patrón de escasez, la capacidad de los ecosistemas y las leyes de la termodinámica. Sus defensores son partidarios de la economía ecológica, un campo de estudio transdisciplinar, que integra elementos de la economía, ecología y otras ciencias naturales y sociales para buscar soluciones estructurales a los problemas ambientales (Van den Bergh, 2000).

La diferencia con respecto a los economistas neoclásicos radica en el reconocimiento de límites al crecimiento económico y que la conservación del capital natural por separado es necesaria. Pero, la divergencia con los economistas ambientales puede ser menos clara porque sus propuestas coinciden en la constancia del capital natural y la identificación de un capital natural crítico. Sin embargo, de acuerdo con Ozkaynak *et al.* (2004), entre economistas ambientales domina la valoración económica del capital natural agregado, mientras entre economistas ecológicos domina la identificación del capital natural crítico vía indicadores biofísicos.

Esta perspectiva sugiere prevenir las pérdidas y el deterioro de los recursos naturales con el monitoreo de indicadores físicos como la huella ecológica y la productividad primaria neta (PNN). La primera mide el área agregada de tierra ecológicamente productiva requerida para producir todos los recursos y absorber los residuos de una población usando la tecnología prevaleciente (Wackernagel y Rees, 1996). La segunda cuantifica la tasa de conversión de dióxido de carbono atmosférico en biomasa vegetal, indicando el estado de un rango amplio de procesos ecológicos (Running *et al.*, 2004).

Una aplicación práctica del criterio de capital natural crítico es el proyecto de la Unión Europea CRITINC (ver Ekins *et al.*, 2003). Esta estructura analítica desarrollada por Ekins y Simon (1999 en Douguet y Schembri, 2000) comprende cuatro niveles. El primero consiste en clasificar cada tipo de capital natural. En el segundo, las funciones ambientales son divididas en cuatro categorías: fuente, sumidero, soporte de vida y salud humana y bienestar. El nivel 3 introduce el concepto de sostenibilidad, se establecen estándares de sostenibilidad y se comparan con indicadores de estado y presión. Esto permite identificar una brecha de sostenibilidad cuya reducción se considera objetivo de política pública. Por último, el cuarto nivel relaciona los procesos de toma de decisiones y las herramientas de política para promover la sostenibilidad.

Para terminar, los instrumentos de política sugeridos por este paradigma, se concentran en la asignación de derechos de propiedad, al considerar que el mercado no reacciona efectivamente al cambio de patrón de escasez porque muchos recursos naturales no tienen dueño (Daly, 1994; Bruton, 1999). En incertidumbre se habla de respetar unos estándares mínimos seguros, pero el beneficio previsto para un uso alternativo es inaceptable, si algún capital natural crítico se pierde (Navrud, 2002).

1.3.4 Sostenibilidad muy fuerte: Economía en Estado Estacionario (EEE)

Este paradigma exige una economía en estado estacionario al considerar la escala óptima de los límites termodinámicos (Turner, 1992). Su máximo exponente, Herman Daly (1977), emplea el término básicamente en el mismo sentido de J. S. Mill (1881) para referirse a una economía donde dejan de crecer la población y el acervo de riqueza, como medida para desviarla de la ruta del crecimiento que conduciría a la autodestrucción, al llegar a un punto en que genera más costos que beneficios.

Se plantea que deben mantenerse los flujos de entrada (nacimientos, producción) y los flujos de salida (defunciones, consumo) iguales y unas tasas de ‘transumo’, mediante las cuales se mantienen constantes los acervo, tan bajas como sea posible. Para la población una tasa baja de transumo (natalidad y mortalidad bajas) significa una elevada esperanza de vida. Para el acervo de riqueza una tasa baja de transumo (producción y consumo bajos) significa una mayor durabilidad de los bienes y menos tiempo de la producción. Bajas tasas de transumo corresponde a un menor agotamiento de los recursos y una menor contaminación, porque menos producción de bienes significa menos utilización de recursos y desechos (Daly, 1989: 334-339).

Daly propone tres instituciones sociales de control: las que tratan de mantener constante una población, las que tratan de mantener constante un acervo de riqueza física y las que gobiernan la distribución. La primera se refiere a la imposición de límites mínimos y máximos del ingreso y el límite máximo de la riqueza; la segunda a licencias a los nacimientos transferibles y la tercera a la subasta de cuotas de agotamiento de recursos (Daly, 1989). Aunque hay posiciones en contra que prefieren las medidas indirectas, Daly defiende que estas permiten conciliar la eficiencia y la equidad y son susceptibles de aplicarse tan gradualmente como se desee.

Finalmente, en términos de medición esta el indicador Requerimiento Material Total (RMT) de Schütz y Welfens (2000), con el cual se mide la cantidad de recursos naturales y flujos ocultos contenidos en el proceso de transformación de los bienes producidos por una economía, considerado una aplicación del concepto de transumo de Herman Daly (Hinterberger y Luks, 1998).

2 PLANIFICACIÓN EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Al estudiar la forma de planificar el desarrollo sostenible en una cuenca hidrográfica es importante saber que se entiende por cuenca hidrográfica, comprender la forma en que ha operado un proceso de planificación a esta escala y su contexto actual; por eso estas son las tareas que se llevan a cabo en esta sección.

2.1 Concepto de Cuenca Hidrográfica

De acuerdo con el Código Nacional de los Recursos Naturales y de Protección del Medio Ambiente (Decreto 2811 de 1974), la cuenca hidrográfica es el espacio territorial en el que se distribuyen las aguas provenientes de las precipitaciones a través de un único sistema fluvial, conformado por corrientes superficiales y depósitos subterráneos que se encuentran conectados a un río principal, que finalmente converge en un cauce mayor. Al ser el agua un recurso indispensable para todas las especies vivas, la cuenca hidrográfica concentra una mayor oferta de recursos naturales y una mayor demanda por estos, convirtiéndola en unidad estratégica para la planificación de actividades de conservación y aprovechamiento.

2.2 El proceso de planificación en cuencas y su evolución en Colombia

La planificación en cuencas hidrográficas es el conjunto de estudios, análisis, metodologías y procedimientos conducentes a la formulación de programas, proyectos y estrategias que promuevan el uso sostenible de los recursos naturales, manteniendo un equilibrio sistemático entre su aprovechamiento y conservación. En Colombia actualmente este proceso se concreta en los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, considerados instrumentos para orientar el desarrollo sostenible a nivel territorial (Libreros *et al.*, 2003). Teniendo como referencia la gestión de la CVC, se puede apreciar su evolución. En particular Zúñiga (2004) distingue varios enfoques: *proteccionista* (1958-1968), donde fue fundamental la solución de los problemas biofísicos como la producción de agua; *de manejo multipropósito* (1968-1978), con grandes proyectos de desarrollo pero orientados a dar soluciones puntuales; *de manejo integral* (1978-1985), en el que se adelantaron acciones que condujeran a la elaboración de Planes de Manejo Integral; *sistémico* (1985-1993), con el que aplicando un enfoque sistémico en el análisis de los problemas se esperaba generar planes que concentrarán los esfuerzos y recursos en acciones con mayor impacto. *Y el actual* (1993...) basado en principios de carácter prospectivo, participativo, integralidad, equilibrio de intereses, sustentabilidad ambiental y diversidad étnica y cultural.

2.2.1 Enfoque actual: Planes de ordenamiento y manejo de cuencas

De acuerdo con la Guía Técnico-Científica del IDEAM (2008), creada en respuesta al requerimiento del Decreto 1729 de 2002 y los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCH) del Valle del Cauca, el proceso de ordenación y manejo de cuencas actualmente se desarrolla a través de las siguientes fases:

- **Fase de aprestamiento:** Es una fase preparatoria cuyo propósito es construir los cimientos del Plan a partir de una primera percepción en la que los actores involucrados dan a conocer lo que saben de la cuenca, por medio de talleres en los se aplican técnicas participativas (por ejemplo línea historia y cartografía social).
- **Fase de diagnóstico:** En esta fase se identifica básicamente el estado ambiental de la cuenca y situaciones específicas que alteran y podrían alterar su estabilidad. Se lleva a cabo a través de un diagnóstico derivado de la participación comunitaria (matrices de recursos y diagramas de árbol) y un diagnóstico técnico (indicadores).
- **Fase de prospectiva:** Con base en los resultados de diagnóstico se diseñan los escenarios futuros para el uso coordinado de los componentes del sistema. Se aplican herramientas de planificación estratégica como el ábaco (para priorización de situaciones), análisis estructural (para encontrar variables claves) y el análisis morfológico (para construir escenarios).
- **Fase de Formulación:** Se definen los objetivos, metas, programas, proyectos y estrategias para el Plan de ordenación y Manejo de la cuenca.
- **Fase de ejecución:** Se elabora un plan operativo en el cual se definen los requerimientos de recursos humanos, técnicos y financieros para alcanzar las metas propuestas.
- **Fase de seguimiento y evaluación:** Se establecen los mecanismos e instrumentos de seguimiento y evaluación, así como indicadores ambientales y de gestión para evaluar el cumplimiento del Plan.

La metodología que se aplica en el presente estudio podría apoyar las fases de diagnóstico, prospectiva y formulación a través del análisis dinámico y sistémico de las cuencas, la aplicación de criterios de sostenibilidad y la construcción de escenarios para apoyar la formulación de estrategias de gestión. De acuerdo con lo analizado en IDEAM (2008) las metodologías implementadas actualmente en los POMCH son fuertes en participación comunitaria y georreferenciación de indicadores biofísicos, pero se está descuidando el análisis de las interacciones sistémicas existentes y la dinámica de los procesos ocurridos en sus respectivos subsistemas.

3 LA DINÁMICA DE SISTEMAS COMO MÉTODO PARA EL DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Un instrumento de análisis ampliamente usado en la planificación del Desarrollo Sostenible es el modelo presión-estado-respuesta creado por Frien y Rapport (1979) que consiste en un sistema de indicadores que describen posibles cambios inducidos por las actividades humanas (presión) que conducen a un estado y a respuestas por parte de la sociedad (Suárez, 2003). Sin embargo, actualmente se buscan instrumentos que capturen más elementos del complejo problema del desarrollo sostenible. Por lo que la dinámica de sistemas parece ser la respuesta al sobresalir entre otras técnicas usadas para tal propósito (Boulanger y Brécher, 2005) y al poder usarse para diseñar estrategias de Desarrollo Sostenible, de la forma como se detalla en seguida.

3.1.1 Definición y Antecedentes

La dinámica de sistemas es una metodología estructuralista para construir modelos del comportamiento en el tiempo de sistemas complejos, a partir de las relaciones causales entre sus elementos esenciales. Su potencia no radica en la capacidad predictiva sino en el apoyo al diseño de políticas y la antelación de sus posibles consecuencias (Dyner, 1993). Es una aplicación práctica de la Teoría General de Sistemas, movimiento iniciado por Ludwig Von Bertalanffy para promulgar la integración de las ciencias a través de principios comunes (Bertalanffy, 1968).

Los orígenes de la dinámica de sistemas se asocian con los trabajos de un equipo del M.I.T bajo la dirección de Jay W. Forrester, aplicando técnicas como la simulación Monte Carlo, retrasos en la información y estructuras de retroalimentación. El desarrollo de estas ideas dio origen a la metodología dinámica industrial. Más tarde se aplicó en el análisis de las ciudades y en la construcción del primer modelo del mundo. Con el tiempo el uso de esta técnica se generalizó para diferentes sistemas (Aracil, 1995).

3.1.2 Elementos Básicos

La dinámica de sistemas, a diferencia de otras técnicas que se emplean para estudiar el comportamiento de procesos socioeconómicos (la econometría, por ejemplo), brinda alternativas para incorporar apreciaciones subjetivas y sobrellevar las deficiencias de información. Los instrumentos específicos que emplea esta metodología son los diagramas causales, los diagramas de Forrester y simulación computarizada, elementos básicos que serán examinados a continuación.

El *diagrama causal* es un esquema que relaciona las variables que constituirán el modelo, se construye uniendo las variables con flechas e indicando el sentido de sus variaciones conjuntas (positiva o negativa). Este diagrama permite conocer la estructura dinámica de un sistema, que puede ser *simple*, si entre las variables hay una relación unidireccional o *compleja* si la relación es interactiva y contiene bucles de retroalimentación (cadenas cerradas de relaciones causales, que transmiten una señal que regresa a su origen). Esta retroalimentación puede ser *positiva*, si el aumento de una variable provoca un nuevo aumento de la misma o *negativa*, si el aumento de una variable provoca su disminución posterior. Mientras la primera lleva al crecimiento exponencial del sistema, la segunda lleva a su estabilización (Aracil, 1995).

Los *diagramas de Forrester* son la representación matemática de los diagramas causales. Se construyen clasificando las variables en variables de nivel, flujo o auxiliares, para formar un modelo integrado con ecuaciones diferenciales de primer orden. Los niveles representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones del pasado y se simbolizan con rectángulos; los flujos determinan las variaciones en los niveles y se simbolizan con flechas compuestas de válvulas y nubes, que puede ser una fuente o sumidero dependiendo del tipo de flujo (ver Figura 2).

Agrupando los elementos mencionados obtenemos la estructura general de un modelo de dinámica de sistemas en la que a cada nivel se le puede asociar un flujo de entrada y un flujo de salida. En términos matemáticos es equivalente a una ecuación integral del saldo entre flujos o a una ecuación diferencial del saldo entre tasas de cambio de flujos, que indica la tasa neta de acumulación del nivel y puede ser resuelta por medio de métodos de aproximación como la ecuación de euler, donde el valor que toma la variable de nivel en el instante $t+\Delta t$ es el valor que tenía en t más el saldo neto de los flujos de entrada y salida en t multiplicado por el salto temporal Δt (ver Figura 2).

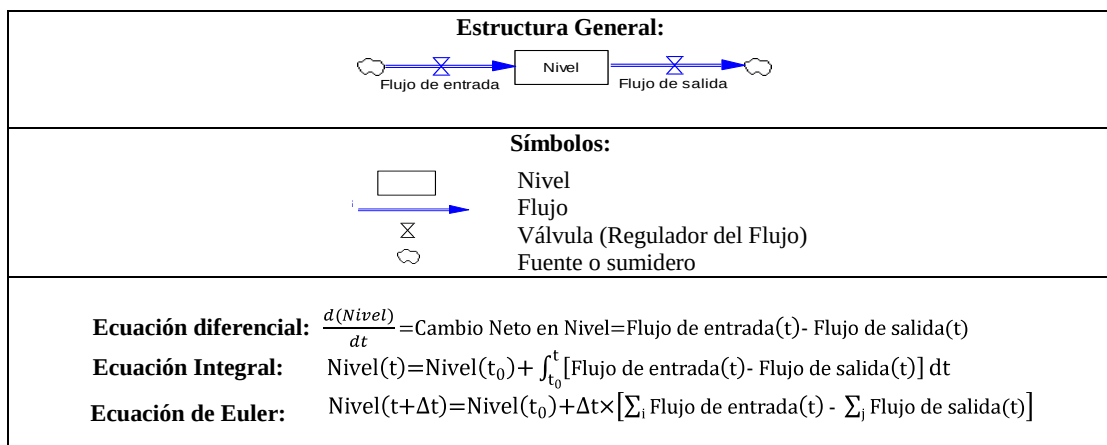


Figura 2. Simbología y formulación de Forrester (Sterman, 2000)

Para la simulación de un modelo de dinámica de sistemas se pueden emplear varios programas que contienen la simbología Forrester y métodos de simulación continua. El primero, que se empleó en modelos históricos, fue DYNAMO. Actualmente, se encuentran, STELLA e I-TINK, dos versiones americanas con una estructura similar, pero la primera orientada a usos académicos y la segunda a aplicaciones profesionales. Así como, POWERSIM y VENSIM, dos versiones europeas con mayores ventajas, la primera en la elaboración de modelos simultáneos interactivos y la segunda en la organización de datos y funciones de optimización (Aracil, 1995).

3.1.3 Proceso de aplicación de la dinámica de sistemas

En el proceso de construcción de modelos con dinámica de sistemas se distinguen tres fases: la conceptualización, la representación o formulación y la evaluación y análisis (ver Tabla 2). La *conceptualización* comprende la descripción verbal del sistema, la definición precisa del problema y la construcción del diagrama causal, con el que se simplifica al sistema. La *Representación o formulación*, donde se construye el diagrama de Forrester, que representa el modelo por medio de la simbología creada por Forrester; el sistema de ecuaciones con el que se concreta la formalización matemática de las relaciones causales identificadas; y se realiza el calibrado, que consiste en dar valores a los parámetros de las ecuaciones del modelo. Y la última fase de *evaluación del modelo*, consiste en realizar diferentes evaluaciones para validar la bondad del modelo, los contrastes más básicos son la consistencia de unidades de medida y de las ecuaciones planteadas. Por último se desarrolla la implementación y análisis, que consiste en realizar las simulaciones del modelo con las que se obtienen trayectorias que muestran la evolución del sistema.

Tabla 2. Proceso de construcción de un modelo con dinámica de sistemas

<i>Conceptualización</i>	
1.	Descripción verbal del sistema
2.	Definición precisa del problema
3.	Construcción del diagrama causal
<i>Representación o formulación</i>	
4.	Construcción del diagrama de Forrester
5.	Establecimiento del sistema de ecuaciones
6.	Calibrado
<i>Evaluación y Análisis</i>	
7.	Evaluación del Modelo
8.	Análisis e implementación

Fuente: Aracil, 1978; López y Martínez, 2000.

3.1.4 Aplicación de la dinámica de sistemas en la planificación de cuencas

La cuenca hidrográfica es un sistema dinámico cuyo funcionamiento corresponde a complejos mecanismos que resultan de la interacción de una serie de elementos bióticos, abióticos y antrópicos (Sánchez, 1995). Para comprender su funcionamiento y generar soluciones integrales es necesario adoptar un enfoque sistémico. La dinámica de sistemas da respuesta a esta necesidad y a nivel internacional y nacional se encuentran estudios que han aplicado este método para la planificación de cuencas. En lo que sigue se presenta una revisión de algunos de ellos.

A nivel internacional se encuentran los estudios de Hamilton *et al* (1969), Costanza *et al* (2002) e Ibañez *et al* (2004). Hamilton *et al* (1969) estudian el rol del agua en el contexto del desarrollo regional de la cuenca del río Susquehanna, ubicada al noreste de los Estados Unidos, por medio de un modelo simulado con DYNAMO, en el que agrupan las variables de acuerdo con la pertenencia a tres sectores: demográfico, laboral e hidrológico. El sector demográfico representa la oferta de trabajo y el sector laboral la demanda de trabajo. El sector laboral es una representación de la economía a través de los salarios provistos por tres tipos de industria: la de exportación, la de negocios y la doméstica. El sector hidrológico captura problemas en la cantidad y calidad del agua, comparando el estado de estas variables con niveles críticos. Se concluye que los cambios en el sector demográfico y laboral son de gran influencia, especialmente en migración y salarios, así mismo el estado de los costos regionales sobre la industria a largo plazo y los factores de educación y capacidad de la fuerza de trabajo son de gran importancia para el crecimiento y la viabilidad regional.

Costanza *et al* (2002) presentan el modelo más avanzado de desarrollo sostenible a nivel de una cuenca hidrográfica, construido a escala espacial y temporal, con STELLA y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la cuenca del río Patuxent, ubicada en Maryland (EE.UU). El modelo mide los efectos de cambios en el uso del suelo sobre la hidrología, la productividad de las plantas y el ciclo de nutrientes. Consta de dos componentes: ecosistémico y económico. El ecosistémico comprende las dinámicas del crecimiento de las plantas, el flujo del agua y la formación de materia orgánica. El económico predice la probabilidad de conversión de uso del suelo entre: bosque, agricultura y uso residencial, con base en el precio de venta de la tierra, diferenciación regional y costos de conversión. Entre los resultados se encuentra que la mayor fuente de contaminación del agua son los fertilizantes, el caudal máximo lo determina el grado de urbanización, el caudal mínimo el grado de reforestación y la producción primaria neta, que representa la salud de los ecosistemas, depende de la cobertura boscosa alterada por los patrones de uso del suelo.

Ibañez, *et al* (2004) realizan un modelo con VENSIM de la Cuenca del Alto Guadalentín, una de las zonas más secas de Europa situada en el sureste español. El modelo recoge las principales conexiones entre la agricultura, la población, la disponibilidad de agua y la erosión del suelo, y se dirige a encontrar una solución a la principal preocupación en la cuenca: la vertiginosa expansión de los cultivos de regadío debido a su acelerada rentabilidad. Sus principales variables exógenas son los precios y subvenciones percibidas, los costos de producción agrícola, el porcentaje de tierras retiradas, la precipitación y la disponibilidad de aguas externa a la zona.

A nivel nacional se distinguen los trabajos de Franco *et al* (2003), Quintero y Dyner (2004) y Maya *et al* (2004). Franco *et al* (2003) diseñan y aplican un modelo con VENSIM que simula la futura disponibilidad de agua potable en la ciudad de Cali basado en información histórica sobre el crecimiento industrial, comercial y demográfico y en estudios físicos sobre la disponibilidad de agua en el municipio. Encuentran que la disponibilidad de agua podría estar en riesgo los próximos años de no tomarse las medidas necesarias para evitarlo, entre lo que proponen campañas de ahorro de agua a nivel doméstico, comercial e industrial.

Quintero y Dyner (2004) presentan un modelo para estudiar la dinámica de potencialidades del suelo en cuencas hidrográficas, integrando dos instrumentos: autómatas celulares y dinámica de sistemas para el caso de estudio la cuenca del río Chachafruto, ubicada en el departamento de Antioquia y conformada por la región del Oriente Antioqueño próxima a Medellín. El modelo simula el proceso de erosión hídrica a partir de la interacción de diferentes factores, tales como, la erosividad de la lluvia, cobertura vegetal y topografía (pendiente, profundidad del suelo), escorrentía, según su influencia sobre el desprendimiento del suelo. Con esto, entre otras cosas, se logra descifrar que se tiene un mayor grado de erosión con suelos desnudos, seguidos de cultivos transitorios tecnificados y de bosques naturales primarios (intervenidos).

Maya *et al* (2004) analizan la acción colectiva en el uso de recursos de la cuenca de la Laguna de Fúquene, ubicada en el altiplano cundiboyacense. Utilizan en forma combinada tres instrumentos: la economía experimental (juegos económicos), Diagnóstico Participativo Rural (DPR) y dinámica de sistemas. El propósito es buscar soluciones al intensivo proceso de deforestación y contaminación del agua. Con juegos económicos identifican las decisiones que pueden tomar los actores frente al uso de recursos naturales y reglas. La información se complementa con DPR y se construye un modelo con STELLA de tres subsistemas: finca papera, finca ganadera y sistema hídrico, para identificar los efectos de las decisiones, reglas y estrategias de intervención, encontrando como estrategias resultantes, la concientización y programas de educación ambiental, transparencia y eficiencia en la regulación, incentivos para la conservación y autogestión del manejo de recursos naturales.

4 METODOLOGÍA

El análisis de las estrategias de desarrollo sostenible para la cuenca del río Yumbo, se desarrolla en cuatro fases: el análisis preliminar de la cuenca, la construcción del modelo de la cuenca, la evaluación de la sostenibilidad y análisis de estrategias.

El *análisis preliminar de la cuenca* comprende la descripción general del sistema y la definición de su problemática, identificada en el desarrollo de su Plan de Ordenamiento (CVC-PROAGUA, 2010), lo cual es representado en un diagrama causal que permite identificar como varios factores se combinan para generar las situaciones problemáticas que presenta el sistema estudiado, como propone la metodología dinámica de sistemas.

En el proceso de *modelación de la cuenca* se formulan, por medio de diagramas de Forrester y sistemas de ecuaciones, los procesos que están detrás de la problemática analizada, que se reduce a modelar lo que pasa en el subsistema ambiental, social y económico con énfasis en los problemas identificados. Esto se desarrolla con base en información de modelos e indicadores encontrados en la bibliografía y consulta a expertos en los respectivos temas. También esta fase incluye la asignación de valores a las variables y parámetros, con base en documentación de diferentes fuentes, información principalmente suministrada por dependencias de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), los registros de la Base de Datos del Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales (SISBEN) y la Alcaldía del municipio de Yumbo (ver en el Anexo numeral A los detalles de estas fuentes de información).

La *evaluación de la sostenibilidad de la cuenca* comprende la identificación de criterios de sostenibilidad (ambiental, social y económica) con base en el estudio previo y la simulación del escenario actual a partir del modelo construido con VENSIM, con el que por medio de la visualización del comportamiento de variables claves se evalúa si el actual patrón de desarrollo tendrá una tendencia sostenible en los próximos años aplicando los criterios de sostenibilidad identificados.

Y en la etapa final de *análisis de estrategias* se formulan las estrategias hipotéticas con base en los paradigmas estudiados, se vuelve a reformular el modelo construido, si es necesario, agregando nuevas funciones que representen la operatividad de las estrategias hipotéticas, o simplemente modificando ciertos parámetros con los cuales se consigue movilizar el sistema, para poder visualizar tendencias de sostenibilidad en el mismo, con las que se revalúa el comportamiento tendencial de la cuenca y se seleccionan las estrategias que llevarán al desarrollo sostenible de la misma.

5 CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL RÍO YUMBO

5.1 Análisis preliminar de la cuenca

Tener conocimiento de las principales características del sistema objeto de estudio y de la problemática que presenta, es indispensable para capturar en el modelo que se va a construir los elementos claves que lo convertirán en un instrumento efectivo para estudiar las alternativas de sostenibilidad de la cuenca.

5.1.1 Descripción general del sistema

La cuenca del río Yumbo está ubicada en la región central del Valle geográfico del río Cauca, entre su margen izquierdo y vertiente oriental de la cordillera occidental. Se encuentra ubicada en su totalidad en el Municipio de Yumbo, con una extensión de 6.673,43 hectáreas, que incluyen el centro urbano, seis de sus doce corregimientos y una pequeña porción de la industria asentada en su territorio (CVC-PROAGUA, 2010). Limita al norte con las sub-cuencas de Mulaló y San Marcos, al sur con la cuenca Arroyohondo, al oriente con el río Cauca y al occidente con la cuenca del río Dagua (ver Figura 3).

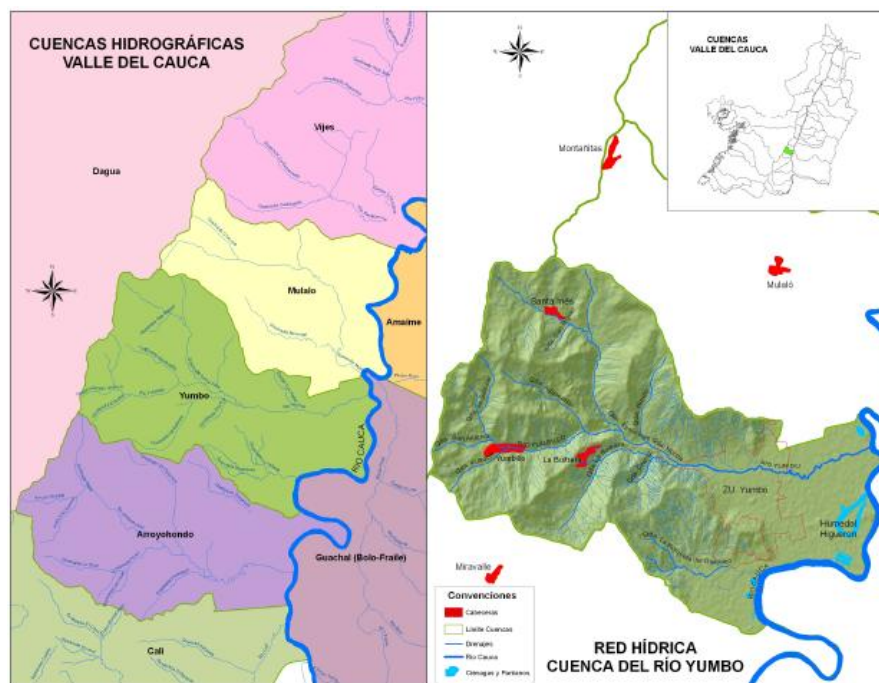


Figura 3. Mapa de ubicación geográfica de la cuenca del río Yumbo
Fuente: CVC- PROAGUA (2010)

A través de su historia la cuenca se ha aprovechado de diferente manera. Antes de la conquista fue asentamiento de una abundante población de indígenas dedicada a la agricultura y orfebrería; con la colonización española sus tierras fueron sobreexplotadas con la extracción de metales y la ganadería y su población utilizada como mano de obra hasta casi extinguirla; hacia 1637 se establece un resguardo indígena como estrategia de recuperación demográfica; a principios del siglo XX, comienza la modernización con la navegación a vapor que impulsa una actividad comercial, proceso que promovió la abolición del resguardo y el traspaso de sus tierras al municipio para la conformación del centro urbano en 1920. Con la terminación de la vía férrea hasta el Pacífico la región pierde importancia como puerto y comienza un proceso de industrialización con Cementos del Valle en 1938, que activó el crecimiento poblacional y la contaminación atmosférica en la parte plana (Londoño, 1997).

La cuenca hidrográfica del río Yumbo es alimentada por las corrientes de agua La Buitrera, Quebrada Honda, Quebrada Santa Inés y el río Yumbo. Su temperatura promedio es de 21°C y posee fuentes minerales usadas como material de construcción que son explotadas de manera formal e informal. Se identifican dos tipos de ecosistemas: bosque subandino y bosque seco tropical y humedal, el primero ubicado en la zona plana de la cuenca y el segundo ubicado en zona plana (CVC- PROAGUA, 2010). En la zona alta sobresale una economía basada en el autoconsumo, donde predominan los cultivos de café, café-plátano, aromáticas y hortalizas y en la zona alta una economía basada en cultivos tecnificados como la caña de azúcar, árboles frutales, algodón, sorgo y ají (CVC, 2006a). Como proveedora de agua cubre un 40% de la población urbana, ubicada en zona de ladera, y a la población rural de la zona alta. La zona industrial ha participado durante los últimos años con cerca del 62% de los ingresos municipales y en la cuenca se encuentra asentada alrededor del 5.4% entre las que sobresalen empresas como Cementos del Valle, Cartón Colombia y Químicas Borden (Alcaldía de Yumbo, 2001).

5.1.2 Definición de problemas

Para construir el modelo con el que se analizará la dinámica de la cuenca se parte del análisis de sus problemáticas, identificadas en su Plan de Ordenamiento y Manejo (CVC-PROAGUA, 2010), de las cuales se describen a continuación aquellas que son involucradas en el modelo construido en el presente trabajo con base en datos recopilados en el desarrollo de la presente investigación (ver en el Anexo A las fuentes de información):

- **Conflicto en el uso y manejo del agua:** Aunque se presentan graves problemas por inequidad en la distribución del agua que explica su conflicto, este estudio se concentra en el problema de su cantidad al estimarse un índice de escasez del 76.39% ⁶ para el año 2011, que corresponde a un nivel de escasez alto, que limita considerablemente sus usos.
- **Conflicto en el uso y manejo del suelo:** De acuerdo con datos del Grupo de Sistemas de Información de la CVC se estima un conflicto de uso del suelo para el 2011 de 47.23% debido principalmente a la cobertura de pastos naturales y a los cultivos sembrados en la zona alta de la cuenca.
- **Manejo y disposición inadecuada de aguas residuales industriales y domésticas:** De acuerdo con datos de la Dirección Técnica Ambiental de la CVC para el año 2007 se presentaron descargas municipales de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO de 4112.62 kg/día y de Sólidos Suspendidos Totales SST de 5185.55 kg/día. De acuerdo con el informe de CVC-PROAGUA (2010) esto se debe principalmente a que el municipio no tienen en funcionamiento su planta de tratamiento de aguas residuales.
- **Disminución y pérdida del recurso bosque:** En el año 2000 se registraron 1084.34 hectáreas de bosque natural y para el año 2005 estas pasaron a ser de 1063.4 hectáreas, de acuerdo con datos del Grupo de Sistemas de Información de la CVC, lo que indica una disminución anual del 0.4%.
- **Contaminación atmosférica:** Concentrándonos en el contaminante de partículas suspendidas en el aire de tamaño inferior a 10 micras, PM10, considerado por expertos de la CVC ⁷ como el de mayor impacto en Yumbo al superar la norma anual de 70 ug/m³; este ha sido en los últimos años en promedio de 72.8 ug/m³, principalmente asociado a emisiones por factores de área, en un segundo lugar por factores móviles y finalmente por fuentes fijas.
- **Asentamientos humanos en zonas de riesgo:** De acuerdo con la encuesta del SISBEN del 2007, el 8% de los habitantes indican que se encuentran en riesgo por deslizamientos de tierra y observando el recorrido del río Yumbo se encuentran asentamientos cerca de su cauce. La solución a este problema está ligada al déficit de vivienda en cantidad y calidad que presenta el municipio, que de acuerdo con información del Sistema de Evaluación y Seguimiento del PBOT de Yumbo fue respectivamente de 3174 y 4596 hogares para el 2005.

⁶ En CVC (2007) se estimó en 274.2%. La diferencia radica en que esta estimación considera la demanda doméstica de toda la población urbana, la cual en su mayoría es abastecida por la Empresa de Acueducto de Cali (EMCALI) y no como en el presente estudio en el que sólo se toma la demanda de la población ubicada en zona de ladera, que es la que se abastece con el agua del río Yumbo.

⁷ Consulta realizada al químico Germán Restrepo y al ingeniero Freddy Arevalo de la CVC.

5.1.3 Análisis básico de la problemática

Siguiendo el procedimiento planteado, se construye un diagrama causal, que recoge de manera general, la forma como varios factores se combinan para generar las situaciones problemáticas estudiadas. En el diagrama causal de la Figura 4 se recoge entonces una síntesis de estas problemáticas, permitiendo apreciar en particular, cómo el crecimiento de la población aumenta el vertimiento de aguas residuales domésticas a los cauces de agua, al no ejercerse control como actualmente ocurre, esto afecta negativamente la calidad de agua, lo cual tiene un efecto en la misma dirección en la calidad de vida, de la que depende la esperanza de vida y el nivel de la población. Pero es de esperar que la población siga creciendo y junto con ella la contaminación.

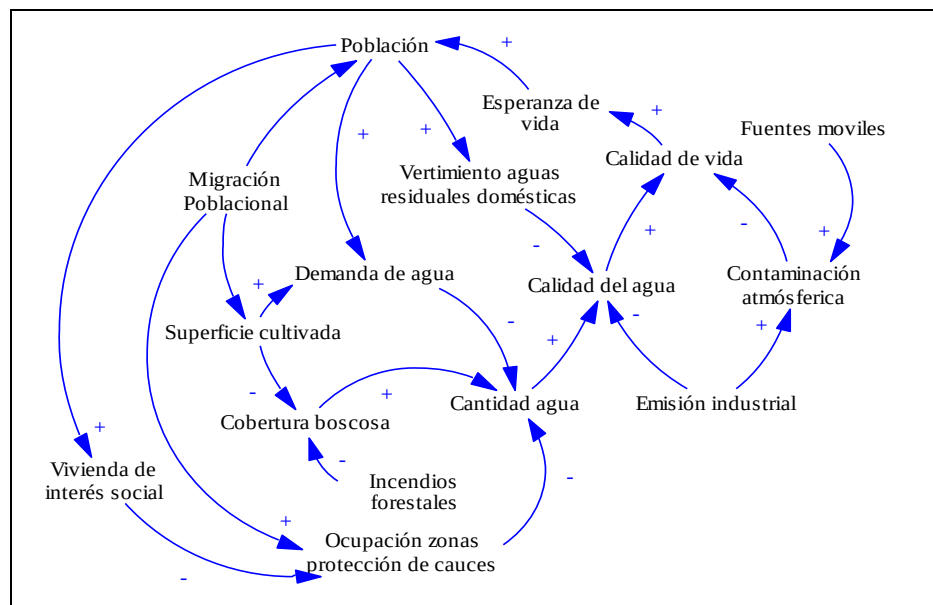


Figura 4. Diagrama causal de problemática general de la cuenca

Así mismo, se puede ver cómo la cobertura boscosa es afectada negativamente por la expansión de la superficie cultivada y los incendios forestales; esta deforestación junto con la ocupación de las zonas de protección de los cauces tienen como resultado la reducción de la cantidad del agua demandada para actividades agropecuarias y consumo doméstico.

También se observa la posible problemática ocasionada por la industria, que con las emisiones de gases y vertimientos de aguas residuales contaminan la atmósfera y el agua afectando también la calidad de vida de la población.

5.2 Modelo de la cuenca

Siguiendo la metodología de dinámica de sistemas aquí se desarrollan las fases relacionadas con la elaboración de los diagramas de Forrester y los sistemas de ecuaciones correspondientes, con los que se avanza a la identificación de la estructura dinámica de la cuenca a partir de sus subsistemas. En el Anexo numeral B se presenta un resumen de las principales formulas en el lenguaje de VENSIM.

5.2.1 Subsistema ambiental

El subsistema ambiental recoge las problemáticas asociadas a la dinámica hidrológica, de contaminación del agua y de contaminación atmosférica, para cada caso se comienza indicando sus niveles, cuya trayectoria en el tiempo revelará el estado del subsector estudiado y en conjunto la estabilidad del subsistema ambiental (En el Anexo C se presenta la formulación de otros submodelos simulados).

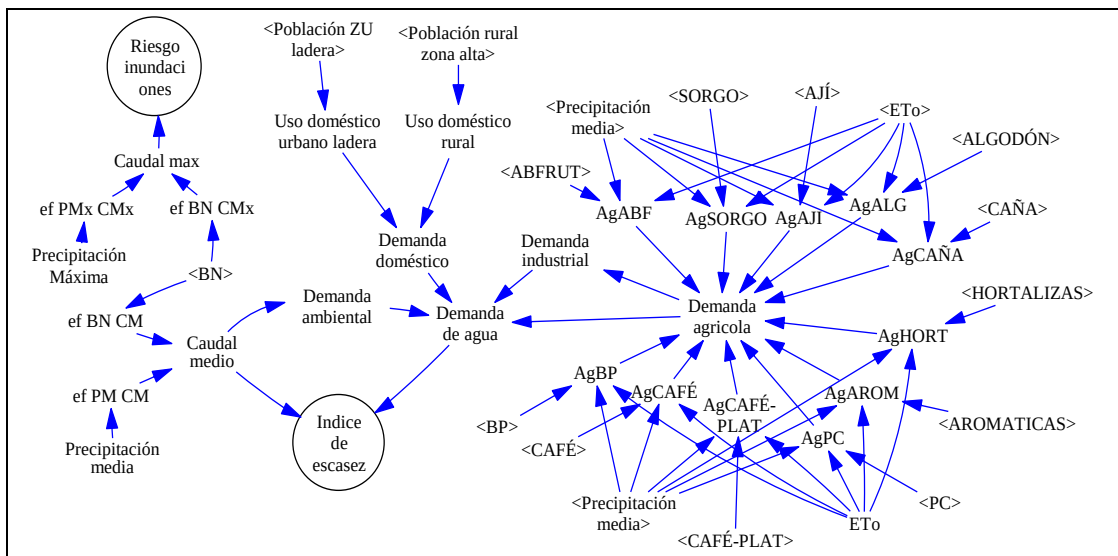
- **Submodelo Dinámica hidrológica**

El submodelo que describe la dinámica hidrológica del río Yumbo reúne dos indicadores de estado básicos: el índice de escasez y el riesgo de inundaciones. El primero estimado a partir de la oferta y demanda de agua y el segundo a partir de la relación de caudales máximos, como se puede apreciar en el diagrama de Forrester de la Figura 5 (indicadores de estado básicos en círculo).

De acuerdo con el IDEAM *et al* (2002: 128) el índice de escasez es la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible, luego de aplicar factores de reducción por calidad del agua y caudal ecológico (*fr*), como se expresa en la siguiente fórmula⁸:

$$\text{Índice de escasez} = \left[\frac{\text{Demanda de agua}}{(\text{Oferta de agua superficial}) \times fr} \right] \times 100 \quad (6)$$

⁸ En el caso del presente modelo no se utiliza el factor *fr* como se indica en la ecuación (6); en su lugar la reducción por calidad del agua y caudal ecológico, llamada aquí Demanda ambiental, se captura como un uso de agua a parte siguiendo el procedimiento de CVC (2007), como el 20% del caudal medio mínimo, de esta forma la demanda de agua con este componente adicional es dividida directamente por el caudal medio.



El índice de escasez indicará que la escasez de agua es baja si su valor porcentual es menor al 10%, una escasez de agua moderada si esta entre el 10 y 20%, una escasez de agua media si esta entre 20 y 40% y un nivel de riesgo de escasez de agua alto si es mayor que el 40%.

Para la determinación de la oferta superficial de agua se siguió el procedimiento de la CVC (2002) considerando para un primer balance a la precipitación media⁹ y luego al caudal medio como oferta de agua superficial. Así mismo el caudal medio y máximo son estimados a partir de los efectos de la precipitación y cobertura boscosa (ver sección 5.3.4). De esta forma:

$$Ofta\ agua\ superf. = Caudal\ medio = f(Precipitación, Bosque\ natural) \quad (7)$$

$$\text{donde } \frac{d \text{ Caudal medio}}{d \text{ Precipitación}} > 0, \quad \frac{d \text{ Caudal medio}}{d \text{ Bosque natural}} > 0$$

A su vez, la demanda de agua se estima a partir de la suma de la demanda para uso agrícola, demanda para uso doméstico, demanda para uso industrial y Demanda ambiental:

$$Dda\ de\ agua = Dda\ agricola + Dda\ domestica + Dda\ industrial + Dda\ ambiental \quad (8)$$

⁹ Se recomienda calcularla con el método de los polígonos de Thiessen, pero aquí se usa una aproximación tomando un promedio ponderado de las precipitaciones por subestación. Procedimiento también aplicado en la estimación de caudales.

Los usuarios del agua del río Yumbo están conformados por los habitantes del área rural de la zona alta y del área urbana en zona de ladera. El uso doméstico rural es igual a la dotación de agua, de 180 litros/día/habitantes por el número de habitantes de la zona y el uso doméstico urbano ladera es de 265 litros/día/habitante por el número de habitantes de la respectiva zona, sintetizando tenemos entonces:

$$Dda\ doméstica = Uso\ doméstico\ rural + Uso\ doméstico\ urbano\ ladera \quad (9)$$

De acuerdo con CVC (2002) se supone que el uso de agua industrial de una región es el 8% del agua consumida por el sector agrícola. El uso agrícola de agua es estimado a partir del consumo de agua de acuerdo al uso del suelo, el cual es determinado por la suma ponderada de las áreas de cultivo con sus coeficientes de cultivo (kc) respectivos, reducida por el factor de Evapotranspiración que es el 0.75 de la evaporación (ver ecuación 10).

$$Dda\ agrícola = [Precipitación\ media - Kc \times Eto] \times Area\ de\ cultivo \quad (10)$$

La evaluación del riesgo a inundaciones se estudia a partir de un índice de riesgo que es igual al cociente entre el caudal máximo anual y el caudal máximo del mes de abril de 1998¹⁰, que revisando la base de datos suministrada por la CVC fue de 44 m³/sg (ver ecuación 11).

$$Riesgo\ a\ inundaciones = \frac{Caudal\ máximo}{44.0\ m^3/sg} \times 100 \quad (11)$$

Entendiendo que entre mayor sea el valor porcentual arrojado por este indicador mayor será el riesgo a inundaciones en la Cuenca del río Yumbo.

• Submodelo Contaminación del agua

El submodelo que describe el comportamiento de la calidad del agua del río Yumbo recoge la dinámica de dos contaminantes del agua regulados por la Autoridad Ambiental: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendedos Totales (SST); considerando como indicadores de gestión la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) y la concentración de Sólidos Suspendedos Totales (SST) como se puede apreciar en el diagrama de Forrester de la Figura 6 (indicadores en círculo).

¹⁰ Fecha en la que se produjo la última inundación ocurrida en la ciudad de Yumbo (Becerra y Cortés, 2006)

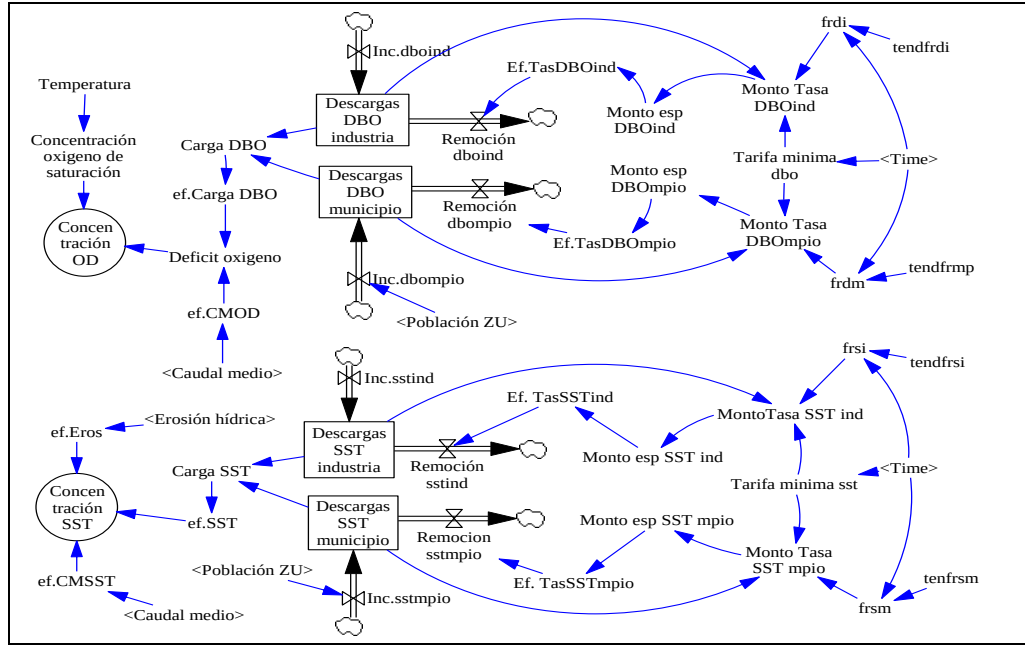


Figura 6. Diagrama de Forrester Submodelo Contaminación del agua

La Concentración OD mínima aceptable de acuerdo a la norma de calidad, para aguas con uso predominante de transporte y asimilación de aguas residuales es mínimo 2.0 mg/l (MAVDT, 2006) y se estima como la diferencia entre la Concentración de oxígeno de saturación (C_s) y el Déficit de oxígeno (ver ecuación 12). C_s se estima a en función de la temperatura media del agua a través de un polinomio de segundo orden (ver ecuación 13) (Chapra, 1997 en Oyarzun 2004). Y el Déficit de oxígeno esta en función de la carga de DBO y el nivel de caudal medio (ver ecuación 14).

$$\text{Concentración OD} = C_s - \text{Deficit de oxígeno} \quad (12)$$

$$C_s = 0.0035T^2 - 0.3369T + 14.407 \quad (13)$$

$$\text{Déficit oxígeno} = f(\text{Carga DBO}, \text{Caudal medio}) \quad (14)$$

$$\text{donde } \frac{d \text{ Déficit oxígeno}}{d \text{ Carga DBO}} > 0, \frac{d \text{ Déficit oxígeno}}{d \text{ Caudal medio}} < 0$$

La concentración SST mínima aceptable cuyo uso predominante es transporte y asimilación de aguas residuales es mínimo 80 mg/l (MAVDT, 2006). Para estimar la concentración SST se ajustan los efectos de la carga SST, la erosión hídrica y el caudal medio. Donde las Cargas SST y la Erosión hídrica harían aumentar la concentración SST, mientras el Caudal medio tendría un efecto de disolución (ver ecuación 15).

$$Conc.SST = f(Carga\ SST, Erosi3n\ h\ddot{u}dica, Caudal\ medio) \quad (15)$$

$$donde\ \frac{d\ Conc.SST}{d\ Carga\ SST} > 0, \ \frac{d\ Conc.SST}{d\ Erosi3n\ h\ddot{u}dica} > 0, \ \frac{d\ Conc.SST}{d\ Caudal\ medio} < 0$$

Para ambos casos, de las cargas contaminantes, DBO y SST, se toma la suma de las descargas industriales y del municipio de Yumbo reportadas a la CVC, es decir:

$$Carga = Descargas\ industria + Descargas\ municipio \quad (16)$$

El comportamiento de las descargas de DBO y SST en la industria y el municipio se representan por medio de acumulaciones en el tiempo, cuyo nivel se determina por los flujos de incremento y remoci3n anuales. Para ilustrar las relaciones mencionadas se presenta el caso de las descargas DBO industriales y municipales dadas por las ecuaciones 17 y 18 respectivamente.

$$Descargas\ DBO\ ind = Desc\ inic + \int_0^t (Inc.DBO\ ind - Rem.DBO\ ind) dt \quad (17)$$

$$Descargas\ DBO\ mp = Desc\ inic + \int_0^t (Inc.DBO\ mp - Rem.DBO\ mp) dt \quad (18)$$

A excepci3n de los incrementos en descargas municipales, los cuales son estimados a partir de las tasas dadas por el Ministerio de Medio Ambiente (2002), es decir, 0.04 kg/hab para las descargas DBO y 0.05 kg/hab para las descargas de SST, los dem3s flujos de incrementos y remociones de las ecuaciones 17 y 18 fueron estimados por medio de simulaciones hechas a partir de los incrementos y decrecimientos observados en la informaci3n registrada por estas descargas y el uso de la herramienta Solver del programa Excel¹¹.

Una vez hallados estos valores, se estima la sensibilidad de las remociones, tanto industriales como municipales, al efecto del monto total cobrado por concepto de tasas retributivas, es decir:

$$Remoci3n\ descarga = f(Monto\ por\ Tasa\ retributiva\ esperado) \quad (19)$$

$$donde\ \frac{d\ Remoci3n\ descarga}{d\ Monto\ por\ Tasa\ retributiva\ esperado} > 0$$

Los Montos por Tasa retributiva esperados son cantidades suavizadas de los montos por tasa retributiva estimados a partir de las tarifas m\ddot{u}nimas establecidas por el decreto 901/97 (Ministerio de Medio Ambiente, 2002) de la siguiente forma:

¹¹ La herramienta Solver de Excel opera con m\ddot{e}todos de optimizaci3n que permiten encontrar par3metros desconocidos como los de este caso.

$$\text{Monto por Tasa retributiva} = \text{Tarifa minima DBO} \times fr \times \text{Descarga} \quad (20)$$

Donde fr es un factor regional que determina el porcentaje en que debe aumentarse la tarifa mínima por no haber cumplido las metas de remoción. Las metas de remoción se fijan a partir del decreto 1594/1984 (Ministerio de Medio Ambiente, 2002) en mínimo 30% para efluentes domésticos y 20% para efluentes industriales y las tarifas mínimas son las expedidas por el Ministerio de Medio Ambiente de acuerdo con las Resoluciones 0273 de 1997 y 0372 de 1998.

• Submodelo Contaminación atmosférica

El submodelo que describe la dinámica de la contaminación atmosférica en la cuenca del río Yumbo explica la concentración anual de Partículas Suspensas en el aire de tamaño inferior a 10 micras (PM10). Así mismo evalúa la influencia de este contaminante sobre la salud de los habitantes de la cuenca a través de la tasa de morbilidad por enfermedades respiratorias (Morbilidad ER) en menores de 15 años (ver diagrama de Forrester de la Figura 7).

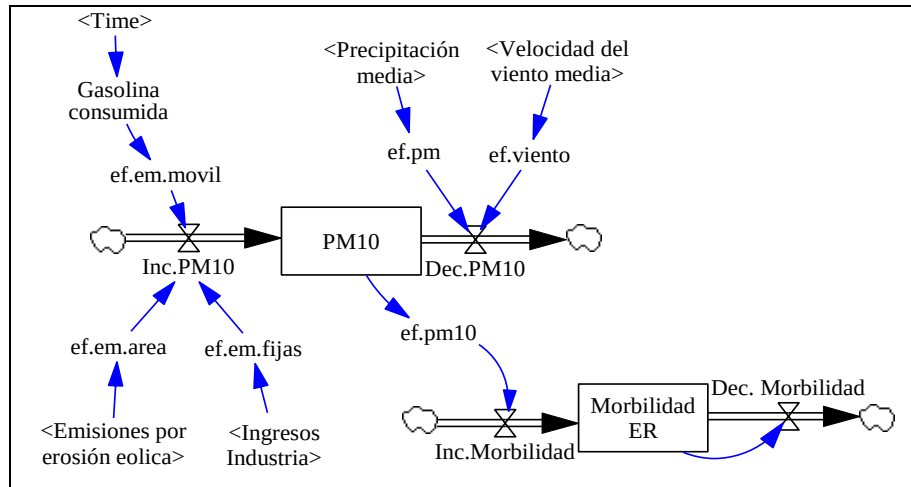


Figura 7. Diagrama de Forrester Submodelo Contaminación atmosférica

El comportamiento anual del PM10 se modela a partir de los cambios anuales en factores que hacen que este aumente y disminuya por medio de la ecuación 21. Aunque en realidad estos efectos interactúan de manera inmediata y por tanto el PM10 anual podría considerarse un flujo en lugar de un nivel, esta formulación permite percibir la fuerza de los factores de emisión frente a los de dispersión.

$$PM10 = PM10_{inic} + \int_0^t (Inc.PM10 - Dec.PM10) dt \quad (21)$$

Entonces el incremento en la concentración PM10 (Inc.PM10) estaría integrado por tres factores de emisión, las fuentes de área, (erosión eólica), fuentes móviles (el tráfico automotor) y fuentes fijas (emisiones industriales); estas dos últimas tomando como variables proxy la gasolina consumida y los ingresos de la industria (habitualmente se usa consumo de energía eléctrica). A su vez el decrecimiento en la concentración PM10 (Dec.PM10) sería por efecto de la precipitación y la velocidad del viento, lo cual es expresado en las ecuaciones 22 y 23.

$$Inc.PM10 = f(Erosión\ eólica, Gasolina\ consumida, Ingresos\ industria) \quad (22)$$

$$donde \frac{d\ Inc.PM10}{d\ Erosión\ eólica} > 0, \frac{d\ Inc.PM10}{d\ Gas.consumida}, \frac{d\ Inc.PM10}{d\ Ing.industria} > 0$$

$$Dec.PM10 = f(Precipitación\ media, Velocidad\ del\ viento) \quad (23)$$

$$donde \frac{d\ Inc.PM10}{d\ Erosión\ eólica} > 0, \frac{d\ Inc.PM10}{d\ Gas.consumida}, \frac{d\ Inc.PM10}{d\ Ing.industria} > 0$$

Para estimar el efecto de la contaminación atmosférica sobre la sociedad hay que tener en cuenta la tasa de morbilidad por enfermedades respiratorias relacionadas con la contaminación atmosférica tales como infecciones respiratorias agudas, asma y bronquitis. Además específicamente para niños menores de 15 años para evitar problemas de sesgo relacionados con hábitos de fumar en adultos (Ortiz et al 1996). De esta forma en el modelo la Morbilidad por enfermedades respiratorias se estima como una variable de nivel que aumenta por acción de la contaminación por PM10 y disminuye de acuerdo a una tasa estimada previamente (ver ecuación 24).

$$Morbilidad\ ER = Morb.ER\ inic \int_0^t (Inc.Morb.ER - Dec.Morb.ER) dt \quad (24)$$

Los cálculos de los cambios presentados en la Morbilidad ER y PM10 son fijados previamente de la misma forma en que se indicó se hace para los cambios en descargas DBO y SST. Es decir se observan los cambios presentados en los datos de estas variables y se aplican los métodos de optimización de Solver en Excel.

5.2.2 Subsistema económico

En el subsistema económico se recogen las dinámicas asociadas directamente con las actividades productivas que se desarrollan a nivel rural y urbano de la cuenca. Para cada caso se indican sus niveles cuya trayectoria en el tiempo indicará el estado de este subsector estudiado y en conjunto la estabilidad del subsistema económico.

- **Submodelo Economía agrícola**

El submodelo que describe la dinámica de la economía agrícola se subdivide en dos secciones donde se agrupan los cultivos de la zona alta y zona baja. En cada caso se determina el nivel de hectáreas sembradas de los diferentes cultivos que corresponden al uso actual. Como se aprecia en las figuras 8 y 9 se examinan nueve tipos de cultivos: café, aromáticas, hortalizas y café-plátano, en la zona alta y árboles frutales, ají, caña de azúcar, sorgo y algodón en la zona baja.

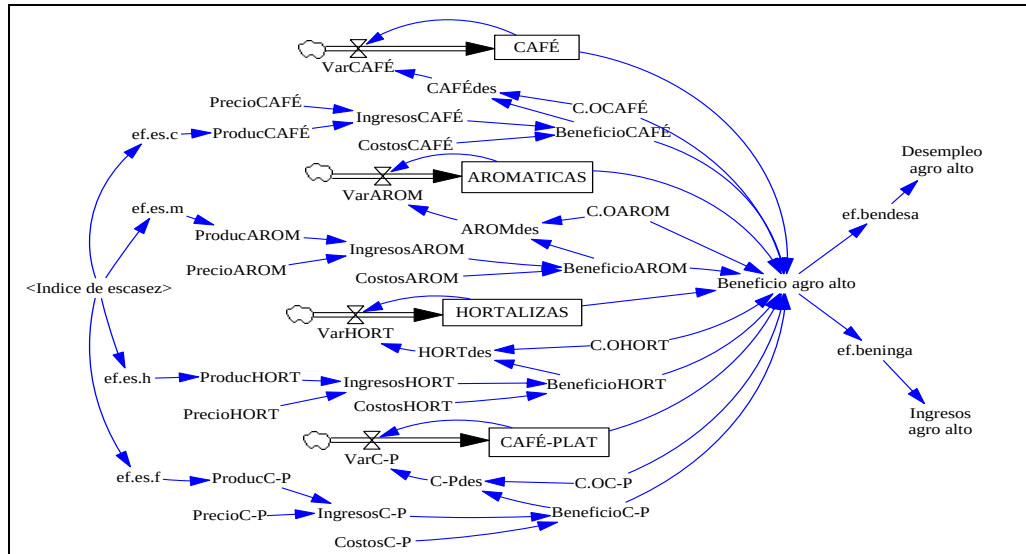


Figura 8. Diagrama de Forrester Submodelo Economía agrícola zona alta

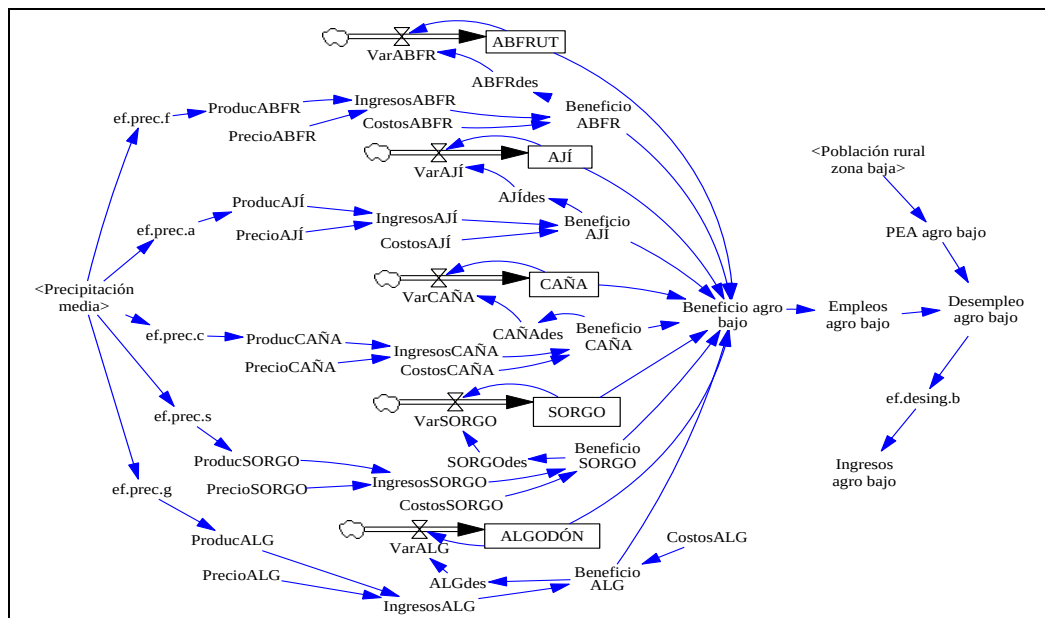


Figura 9. Diagrama de Forrester Submodelo Economía agrícola zona baja

Para estimar las hectáreas cultivadas de cada cultivo se tuvieron en cuenta las ecuaciones utilizadas por Ibañez y Martínez (2004) en su modelo de explotación de un acuífero como se presenta en la ecuación 25 y ecuaciones derivadas de esta.

$$Hectáreas cultivadas = hectareas\ inic. + \int_0^t Variación\ hectareas(t)dt \quad (25)$$

La formulación del flujo de la ecuación 25 responde al comportamiento “búsqueda de objetivos”. El “objetivo” representa el número de hectáreas que en cada momento los agricultores desearían cultivar (ver ecuación 26).

$$Variación\ hectáreas = \frac{hectáreas\ deseadas - hectáreas\ cultivadas}{tiempo\ de\ ajuste} \quad (26)$$

El modelo asume que existe una limitación al máximo de hectáreas cultivadas por factores naturales, tales como la topografía de la región. De esta manera:

$$Hectáreas\ deseadas = has\ máximas \times Fracción\ has\ deseadas \quad (27)$$

La fracción de hectáreas deseadas se estima como la probabilidad de que el costo de oportunidad de cultivarlas sea menor o igual al beneficio asumiendo una distribución de probabilidad exponencial de la siguiente manera:

$$Fracción\ has\ deseadas = 1 - EXP\left(\frac{-MAX[0, Beneficio\ hectáreas]}{Costo\ de\ oportunidad\ medio}\right) \quad (28)$$

El beneficio por hectárea es la diferencia entre los ingresos y los costos por hectárea. Los ingresos por hectárea resultan de multiplicar el precio percibido por la producción agrícola y la producción por hectárea de zona alta y baja se asocian al efecto de la escasez de agua y precipitación media, respectivamente:

$$Producción\ por\ hectarea\ zona\ alta = f(Escasez\ de\ agua) \quad (29)$$

$$Producción\ por\ hectarea\ zona\ baja = f(Precipitación\ media) \quad (30)$$

Otras variables que describen esta economía agrícola son los beneficios económicos agregados (beneficio agro alto y agro bajo), los ingresos de los hogares (ingresos agro alto y agro bajo) y el desempleo (desempleo agro alto y agro bajo) (ver Figuras 8 y 9). Los primeros son sumas ponderadas de los beneficios por cultivo; los segundos en la zona alta son asociados al beneficio de la zona y en la parta baja al aumento del empleo, no suficiente bajar la tasa de desempleo y aumentar los ingresos reales.

- **Submodelo Economía urbana**

El submodelo que describe la dinámica de la economía urbana determina los ingresos de los hogares, el desempleo y el déficit de vivienda de la zona urbana de la cuenca del río Yumbo, como se aprecia en la Figura 10.

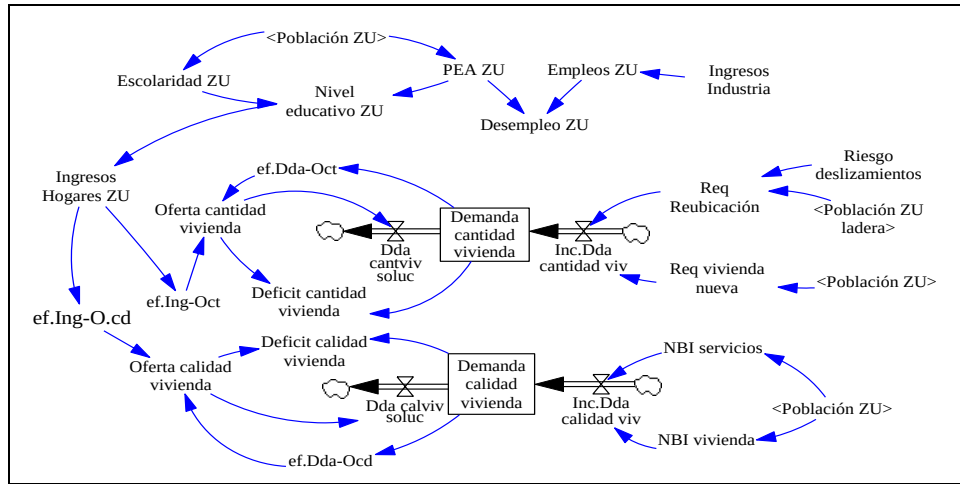


Figura 10. Diagrama de Forrester Submodelo Economía urbana

Los ingresos de los hogares urbanos son simulados a partir de su relación con el nivel educativo de los habitantes. Este nivel educativo se estima para la Población Económica Activa (PEA) y esta dado por su relación porcentual con la escolaridad:

$$Nivel\ educativo\ ZU = \left(\frac{Escolaridad\ ZU}{PEA\ ZU} \right) \times 100 \quad (31)$$

La Tasa de desempleo es estimada a partir del comportamiento de los empleos generados en la zona, variable que es ligada a los ingresos de la industria asentada, un indicador de estabilidad económica de la zona.

El déficit de vivienda en cantidad se determina por la relación porcentual entre la demanda y la oferta respectiva (ver ecuación 32). La retroalimentación entre la oferta y la demanda es capturada en el modelo de forma que la oferta está asociada al flujo de salida de la demanda y la demanda explica la respuesta de la oferta ante los requerimientos de la población (ver Figura 10).

$$Déficit\ cantidad\ vivienda = \frac{Demanda\ cantidad\ vivienda}{Oferta\ cantidad\ vivienda} \times 100 \quad (32)$$

La demanda por cantidad es simulada a partir de flujos, de entrada y salida, explicados respectivamente por los requerimientos de la población y la oferta de vivienda (ver ecuación 33). Como se observa en la Figura 10 se asocian dos tipos de requerimientos, por reubicación de población en zona de riesgo y por demanda de vivienda nueva. Por otro lado la oferta se vincula a dos factores, los ingresos de los hogares y la demanda.

$$Demanda\ cant.\ vda = Dda\ inic. + \int_0^t (Inc.\ vda.\ cant - Dda\ vda.\ soluc.) dt \quad (33)$$

Para la dinámica de la vivienda por calidad se sigue la misma lógica de la vivienda por cantidad (ver Figura 10). Sólo cambian los factores que incrementan la demanda, en este caso asociados a indicadores de necesidades básicas insatisfechas.

5.2.3 Subsistema social

En el subsistema social se recogen las dinámicas que determinan el número de habitantes y el nivel de calidad de vida de los mismos en la cuenca del río Yumbo.

- **Submodelo demográfico**

El submodelo que describe la dinámica demográfica de la cuenca del río Yumbo determina el comportamiento dinámico de la población a partir de las tasas de natalidad, mortalidad y migraciones de Yumbo. Tasas que son desagregadas para estimar también la dinámica de la población urbana, rural y de ladera (ver Figura 11).

La población total de la cuenca, como se expresa en la ecuación 34, es determinada mediante integral de flujos de natalidad, migraciones y mortalidad, cuyas tasas de acuerdo con el PBOT de Yumbo (Alcaldía Municipal de Yumbo, 2001) son en promedio de 9.237, 10.548 y 3.747 por cada mil habitantes.

$$Pob.\ cuenca = Pob\ inic + \int_0^t (Natalidad + Migraciones - Mortalidad) dt \quad (34)$$

La población de la cuenca se divide en población urbana, urbana ladera, rural zona alta y rural zona baja, estimadas también mediante integral de flujos de natalidad, migraciones y defunciones como proporción de las tasas de la población total de acuerdo al peso en el total de habitantes.

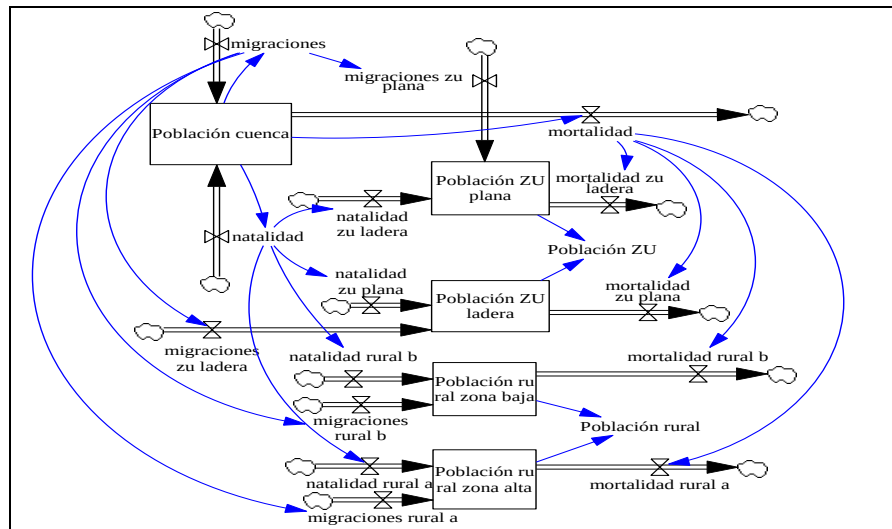


Figura 11. Diagrama de Forrester Submodelo Demográfico

- **Submodelo calidad de vida**

El submodelo que describe la dinámica de la calidad de vida en la cuenca del río Yumbo, determina el nivel de calidad de vida a partir de 6 factores claves: el déficit en dotación física, la contaminación, el nivel educativo, el ingreso percapita, riesgo salud y el riesgo de desastres naturales, como se aprecia en la Figura 12.

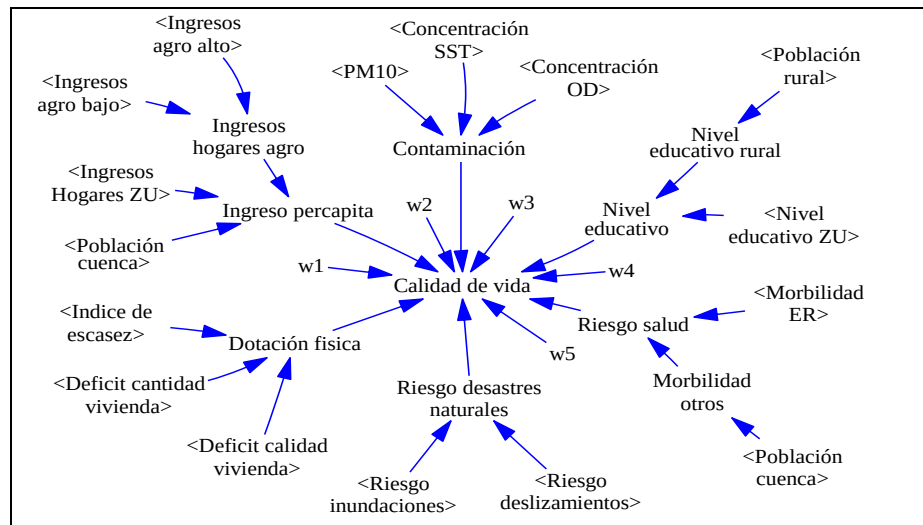


Figura 12. Diagrama de Forrester Submodelo calidad de vida

El nivel de calidad de vida es estimado a partir de la siguiente función multiplicativa en similitud a la función de bienestar social construida por Eppink *et al.* (2004):

Calidad vida

$$= \text{Dot. física}^{-w_1} \times \text{Contaminación}^{-w_2} \times \text{Nivel educativo}^{w_3} \times \text{Ing. pecápita}^{w_4} \times \text{Riesgo salud}^{-w_5} \times \text{Riesgo desastres}^{-1+(w)} \quad (35)$$

Donde los parámetros w_i , hacen referencia al aporte de los factores considerados a la calidad de vida y el signo que toma cada parámetro indica el sentido de dicho aporte. Los factores, dotación física, contaminación, riesgo salud y riesgo desastres naturales son un promedio de los indicadores que describen este aspecto en la cuenca en cada caso. El ingreso per cápita es el cociente entre el ingreso de los hogares y la población, mientras el nivel educativo rural y la morbilidad otros se estima a partir de su relación lineal con la población rural y la población de la cuenca respectivamente.

5.3 Estimaciones preliminares

En esta sección se detallan algunos procedimientos realizados previamente a la simulación del modelo con el apoyo de programas como Excel, R 2.13 y SPSS 15.

5.3.1 Complementación de datos

La estrategia seguida para completar los datos de variables demográficas a partir de la información del SISBEN consistió en calcular las tasas de cambio de los dos años disponibles (ver Tabla 3) y a partir de estas completar las series de datos suponiendo crecimiento exponencial en unos casos y crecimiento aritmético en otros.

Tabla 3. Estimaciones a partir de información del SISBEN

Variable	2003	2007	T.C	Variable	2003	2007	T.C
Pob cuenca	62533	67616	0.02	Ingresos ZU	4525,815	3514,07	-0,063
Pob ZU	60437	65226	0.019	Ingresos rural	95,515	84,176	-0,032
Pob rural	2096	2390	0.033	Empleos ZU	17383	18540	0,016
PEA ZU	19629	21129	0,018	Empleos rural	683	747	0,022
PEA rural	714	790	0,025	Escolaridad ZU	181858	195177	0,018
NBI	846	866	0.006	Escolaridad rural	4979	5591	0,029

Fuente: Cálculos del autor a partir de información del SISBEN (2003, 2007)

Esta misma estrategia se siguió para completar series de datos de los usos de suelo, pues sólo se contó con información de los años 2000 y 2005. De esta manera se obtiene un acercamiento a la tendencia que siguen estos datos. Así mismo, los datos de la población sirvieron para ponderar las tasas de morbilidad, registradas para el municipio de Yumbo, el cual alberga un número de habitantes mayor al de la cuenca.

5.3.2 Ajuste de variables con comportamiento aleatorio

En VENSIM sólo es posible emplear las distribuciones normal y uniforme por lo que a pesar que en algunos casos distribuciones asimétricas serían más apropiadas (ver Figura 23 y Tabla 10 en anexo D) para simular las variables ambientales se optó por seleccionar ajustes normales o lognormales como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Distribuciones estimadas para simular variables ambientales

Variable	n	Distribución	Variable	n	Distribución
Prec. media	21	LOGNORM($\alpha=6.93$, $\beta=0.16$)	Prec.Julio	21	NORMAL($\mu=45.08$, $\sigma=25.23$)
Prec.max	21	LOGNORM($\alpha=5.26$, $\beta=0.16$)	Prec.Ago	21	NORMAL($\mu=43.44$, $\sigma=18.61$)
Prec. Ene	21	NORMAL($\mu=50.28$, $\sigma=27.24$)	Prec.Sept	21	NORMAL($\mu=85.59$, $\sigma=38.14$)
Prec.Feb	21	NORMAL($\mu=56.19$, $\sigma=37.15$)	Prec.Oct	21	NORMAL($\mu=125.47$, $\sigma=40.86$)
Prec.Marzo	21	NORMAL($\mu=107.88$, $\sigma=53.01$)	Prec.Nov	21	LOGNORM($\alpha=4.72$, $\beta=0.32$)
Prec.Abril	21	NORMAL($\mu=145.04$, $\sigma=44.33$)	Prec.Dic	21	NORMAL($\mu=24.62$, $\sigma=1.93$)
Prec.Mayo	21	LOGNORM($\alpha=4.76$, $\beta=0.34$)	Temperatura	8	LOGNORM($\alpha=3.20$, $\beta=0.08$)
Prec.Junio	21	NORMAL($\mu=65.89$, $\sigma=41.76$)	Evapotrans	21	NORMAL($\mu=1007.41$, $\sigma=43.20$)

Fuente: Cálculos del autor a partir de información del Grupo de Recursos Hídricos de la CVC

Los precios y costos de los cultivos, deflactados con el índice de precios al productor base 2000 respectivo, fueron simulados con distribución normal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Distribuciones estimadas para simular precios y costos de cultivos

Variables	n	Prueba Shapiro-Wilk		Distribución y parámetros
		Estadístico	p-valor	
Precio café	11	0.9487	0.6536*	NORMAL($\mu=2.6842$, $\sigma=0.1549$)
Precio frutales	11	0.9827	0.9782*	NORMAL($\mu=0.4862$, $\sigma=0.0355$)
Precio ají	11	0.9095	0.2773*	NORMAL($\mu=0.5544$, $\sigma=0.1045$)
Precio hortalizas	11	0.9544	0.7205*	NORMAL($\mu=0.5187$, $\sigma=0.0457$)
Precio sorgo	11	0.9184	0.3438*	NORMAL($\mu=0.3564$, $\sigma=0.0273$)
Precio algodón	11	0.9410	0.5642*	NORMAL($\mu=1.1328$, $\sigma=0.1296$)
Costos café	11	0.8460	0.0521*	NORMAL($\mu=2.9399$, $\sigma=0.5045$)
Costos café-plátano	11	0.8769	0.1204*	NORMAL($\mu=3.1498$, $\sigma=0.6046$)
Costos hortalizas	11	0.9146	0.3144*	NORMAL($\mu=3.5891$, $\sigma=0.3833$)
Costos caña	11	0.8671	0.0924*	NORMAL($\mu=1.3386$, $\sigma=0.0710$)
Costos sorgo	11	0.9147	0.3146*	NORMAL($\mu=1.4218$, $\sigma=0.1596$)
Costos algodón	11	0.8743	0.1122*	NORMAL($\mu=3.6672$, $\sigma=1.0438$)

* Estadístico no significativo al 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de normalidad

Fuente: Cálculos del autor a partir de información de la Secretaría de Agricultura

Al observar que ciertas variables presentaban algún tipo de tendencia (ver Figura 24 en Anexo D), se decidió incluir esta tendencia por medio de la función RAMP de VENSIM, que toma como primer argumento la pendiente y luego los años en que se observa la tendencia, expresión a la que se agrega un valor aleatorio normal (ver Tabla 11 del Anexo D).

5.3.3 Ajuste de tendencias con regresión bootstrap

Para variables cuyo comportamiento se puede ligar a otras variables del modelo se optó por ajustar regresiones tipo bootstrap al tener pocos datos (ver descripción de técnica en Anexo E), con el fin de mitigar el sesgo; es así como fueron ajustadas las variables tarifa mínima DBO, tarifa mínima SST, consumo de gasolina, NBI vivienda, NBI servicios, incremento en la cantidad y calidad de demanda de vivienda, escolaridad, ingresos, empleos y población económicamente activa de la zona urbana, nivel educativo zona rural y empleos y población económicamente activa de la zona agrícola parte baja. En la Tabla 6 se presentan las estimaciones obtenidas al aplicar dicha técnica. Los límites superior e inferior sin inclusión del cero dan cuenta de la significancia de los parámetros estimados y la densidad normal de las simulaciones (ver Figura 25 en Anexo D) de la bondad de la estimación.

Tabla 6. Resultados Regresiones Bootstrap

Modelo	n	Estimaciones bootstrap			
		Coefficientes	E.E	Lim. inf	Lim. sup
$TarminDBO = \beta_0 + \beta_1 Tiempo$	8	-3980.1341 2.0028	95.1526 0.0475	-4177.5076 1.9089	-3791.7735 2.1014
$TarminSST = \beta_0 + \beta_1 Tiempo$	8	-9308.6586 4.6842	231.1353 0.1154	-9799.8526 4.4618	-8863.2865 4.9296
$Cons.gasolina = \beta_0 + \beta_1 Tiempo$	8	-5882129.83 3002.923	41816.539 20.8652	-5947241.7 2953.947	-5783949.5 3035.45
$NBIvivienda = \beta_1 PobZU$	8	0.00148	9.98969	0.00146	0.00150
$NBIservicios = \beta_1 PobZU$	8	0.00958	0.00011	0.00938	0.00979
$IncCantDda = \beta_0 + \beta_1 Reqviv$	8	-1070.508 0.7785	55.9761 0.0333	-1186.701 0.712	-960.479 0.8466
$IncCaldDda = \beta_0 + \beta_1 NBI$	8	-3359.326 5.744	257.018 0.3856	-3911.7658 4.938	-2828.559 6.556
$EscZU = \beta_0 + \beta_1 \ln(PobZU)$	8	-2062671 204059	24325.032 2209.952	-2113230 199662	-2014346 2086436
$InghogZU = \beta_0 + \beta_1 NiveduZU$	8	-73765.54 8531.82	494.106 53.3455	-74816.55 8421.56	-72745.522 8645.226
$Empleos ZU = \beta_0 + \beta_1 IngInd$	8	14580.04 0.0006061	176.85 0.0000366	14300.09 0.000535	14948.62 0.000673
$PEAZU = \beta_0 + \beta_1 \ln(PobZU)$	8	-232868.5 22955.7	2622.819 238.249	-238477.9 22506.3	-227930.2 23464.6
$Nivedru = \beta_0 + \beta_1 \ln(Pobru)$	8	-6.272 1.744	0.0273 0.0036	-6.3299 1.7353	-6.2037 1.7520
$Empleosagrob = \beta_1 Benagrob$	8	0.4503	0.0104	0.4334	0.4743
$PEAagrob = \beta_0 + \beta_1 Pobagrob$	8	42.0092 0.2557	1.6826 0.0024	38.5484 0.2509	45.6257 0.2609

Fuente: Caculos del autor a partir de información de la Dirección Técnica Ambiental de la CVC, la encuesta del SISBEN y Alcaldía de Yumbo

5.3.4 Ajuste de efectos con métodos paramétricos y no paramétricos

En un modelo como el simulado es importante definir las interacciones entre diferentes subsistemas. Estas interacciones son definidas estimando la sensibilidad entre variables de interés, como en el caso de los flujos de cambio positivo y negativo del PM10 (Inc. PM10 y Dec. PM10) y sus factores de influencia como emisiones fijas, de área y móviles en el primer caso y la precipitación y la velocidad del viento en el segundo (ver Tabla 7). Esto se hace a partir de la función exponencial $Y = Y^*(X/X^*)^\alpha$ donde Y sería la variable predictiva, Y^* su valor de referencia, X la variable explicativa, X^* su valor de referencia y α la elasticidad entre las variables normalizadas por el valor de referencia, es decir $\alpha = \ln(Y/Y^*)/\ln(X/X^*)$ (Sterman, 2000). De esta forma se captura la sensibilidad de las variables respuesta a los cambios de las variables explicativas de forma simple. En la Tabla 7 se muestran los valores de referencia y las elasticidades empleadas en cada caso.

Tabla 7. Ajustes no paramétricos de algunos efectos

Formula para ajustar efectos $Y = f(X) = Y^*(X/X^*)^\alpha$			
EFEECTO	Y*	X*	α
Inc. PM10=f(Emisiones fijas)	30.45	4598826.25	0.0175
Inc. PM10=f(Emisiones área)	30.45	0.2582	0.1585
Inc. PM10=f(Emisiones móviles)	30.45	132723.27	0.1049
Dec. PM10=f(Precipitación)	30.4549	1027.8702	0.6241
Dec. PM10=f(Velocidad viento)	30.4549	3.9179	1.9061
Inc. Morbilidad ER=f(PM10)	260.4027	81.8905	0.6930
Rem.DBO industria=f(Tarifa DBO)	2.2887	6578.76	4.3493
Rem.DBO municipio=f(Tarifa DBO)	2283.36	236938	0.2998
Rem.SST industria=f(Tarifa SST)	62.8963	30028.3	2.1702
Rem.SST municipio=f(Tarifa SST)	2854.2	634390	0.2639
Déficit OD=f(Carga DBO)	6.6098	3034.52	0.0771
Déficit OD=f(Caudal medio)	6.6098	0.2258	-0.2049
Concentración SST=f(Erosión)	338	0.1714	0.604
Concentración SST=f(Carga SST)	338	3034.52	0.0435
Concentración SST=f(Caudal medio)	338	0.2258	-0.1945
Oferta viv. Cantidad=f(Demanda viv. cantidad)	437.994	2046.02	0.3295
Oferta viv. Cantidad=f(Ingresos hogares ZU)	437.994	5462	1.2156
Oferta viv. Calidad=f(Demanda viv. calidad)	294.175	2406	2.2278
Oferta viv. Calidad=f(Ingresos hogares ZU)	294.175	5462	3.3881
Desempleo agro alto=f(Beneficio agro alto)	3.33	957.086	-0.2336
Ingresos agro alto=f(Beneficio agro alto)	69.972	957.086	0.1739
Ingresos agro bajo=f(Desempleo agro bajo)	35.061	4.46	-0.3714

Fuente: Cálculos del autor con información del Laboratorio ambiental CVC, SISBEN y Alcaldía de Yumbo

Algunas relaciones no lineales de dependencia entre variables también fue incluida recurriendo al uso de la función LOOKUP de VENSIM, para esto primero se normalizan las variables de entrada y de salida, dividiéndolas por un valor de referencia, que en este caso es el del año 2000, luego eliminando datos redundantes se introducen en el modelo relaciones como las observadas en la Figura 15 (Sterman, 2000). De esta forma las productividades del café, aromáticas, café-plátano y hortalizas son introducidas a partir de su relación con el índice de escasez y el caudal medio y máximo en la cuenca a partir del efecto causado por la precipitación media y máxima y las hectáreas de bosque natural presente en la cuenca.¹²

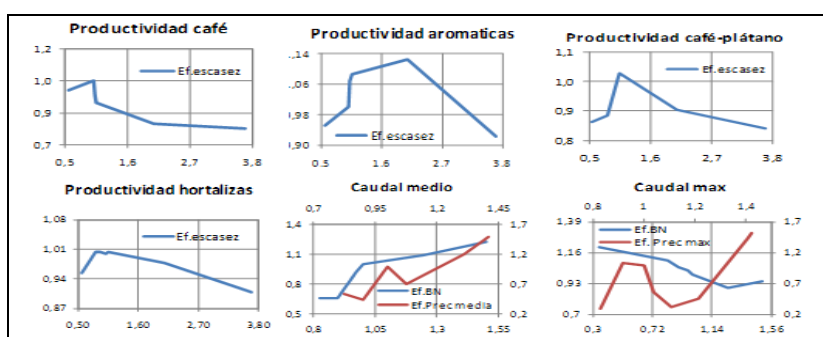


Figura 13. Ajustes no paramétricos de efectos en algunas variables

Fuente: Cálculos del autor con información de Secretaría de Agricultura y Grupo R. Hídricos CVC

5.3.5 Ajuste de parámetros de la función de calidad de vida con ACP

Para ajustar los parámetros de los factores que componen la función de calidad de vida, asumida de acuerdo a la estructura planteada por Eppink *et al* (2004) se empleó Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica explicada en el Anexo E y cuyos detalles de su aplicación son descritos en seguida.

Primero se analiza la variabilidad de los principales componentes conformados al aplicar ACP, a partir de los valores propios de los ejes principales conformados. El primer eje principal recoge la mayor parte de esta variabilidad (ver Figura 26 del Anexo D), es decir el 82.33% (ver Tabla 8) y por tanto se retiene solamente este primer componente. En la Figura 16 también se observa que el aporte de las variables es similar al estar cerca al borde del círculo de correlaciones. Como los parámetros requeridos deben sumar 1, se escogen las contribuciones absolutas arrojadas por el ACP (Contr.abs en Tabla 8) como las más indicadas para tal propósito.

¹² En cuencas hidrográficas de bosque tropical se ha comprobado que la reforestación tiene un impacto positivo en el volumen de los caudales (Deeb (1992) en Rudas (1998)).

Tabla 8. Valores y Vectores propios y Calidad de representación

Valores propios			Vectores propios y calidad de representación			
Inercia	Acum.	Razón	Variables	Vectores	Contr.abs	Contr.rel
4.939	4.939	0.823	Contaminación	-0.4131	0.1707	-0.8432
0.699	5.629	0.938	Dotación física	-0.3546	0.1257	-0.6210
0.264	5.893	0.982	Ingreso percapita	0.4364	0.1905	0.9408
0.086	5.979	0.996	Nivel educativo	-0.4403	0.1938	-0.9576
0.013	5.993	0.998	Riesgo desastres	-0.3629	0.1318	-0.6508
0.007	6.000	1.000	Riesgo salud	-0.4330	0.1875	-0.9264

5.4 Evaluación de la sostenibilidad

A continuación con base en variables indicadoras seleccionadas y los resultados de la simulación en VENSIM de las tendencias actuales se hace una evaluación de la sostenibilidad ambiental, económica y social en la zona.

5.4.1 Criterios de sostenibilidad

De acuerdo con lo estudiado en la sección 1.2 las variables del modelo para evaluar la sostenibilidad ambiental, social y económica de la cuenca son en cada caso:

- **Sostenibilidad ambiental:** Índice de escasez, riesgo de inundaciones, hectáreas de bosque natural BN, Caudal medio, Conflicto uso del suelo, erosión hídrica, erosión eólica, Concentración OD, Concentración SST y PM10.
- **Sostenibilidad económica:** ingresos zonas agro, desempleo zonas agro, ingresos zona urbana, desempleo zona urbana y déficit de vivienda.
- **Sostenibilidad social:** nivel poblacional, morbilidad por enfermedades respiratorias y por otras causas y nivel de calidad de vida

5.4.2 Evaluación con base en resultados del escenario actual

En las figuras 14 a 16 se muestran los resultados de las simulaciones para los indicadores seleccionados como criterios de sostenibilidad en la sección anterior y en lo que sigue se analiza su comportamiento en el tiempo.

- Evaluación sostenibilidad ambiental:** En la Figura 14 se agrupan los indicadores relacionados con la escasez del agua y el riesgo de inundaciones, la oferta de agua, uso del suelo y contaminación. En cuanto al índice de escasez se observa una tendencia a crecer en el tiempo hasta llegar a un porcentaje de alrededor el 260% lo cual es una indicación de escasez de agua alta; el riesgo de inundaciones presenta picos que alcanzan un nivel del 80%. En la oferta de agua se observa un caudal medio decreciente en el tiempo, así como una cobertura boscosa que de las 1.084 hectáreas en el año 2000 podría llegar a ser aproximadamente de 600 hectáreas. En relación al uso del suelo la tendencia del conflicto de uso del suelo es a crecer levemente alrededor de un 2% en 30 años y la erosión hídrica y eólica también presentan un leve incremento cuando lo ideal seria reducir estas tendencias. Y en relación a la contaminación se aprecian tendencias crecientes para la concentración SST y PM10 y decreciente para la concentración de OD. Por lo que en general se podría hablar de la no sostenibilidad ambiental en la cuenca.

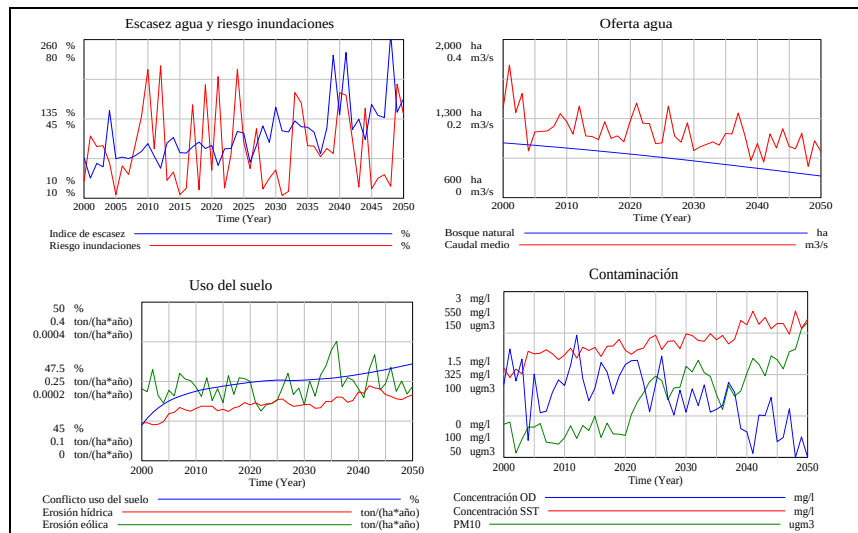


Figura 14. Indicadores sostenibilidad ambiental

- Evaluación sostenibilidad económica:** En la Figura 15 se agrupan los indicadores relacionados con las actividades económicas de la cuenca. En la economía agrícola de la zona alta el beneficio económico derivado del sembrado de cultivos podría decrecer vertiginosamente en el tiempo, los ingresos de los hogares decaer levemente y la tasa de desempleo aumentar ligeramente. En la economía agrícola de la zona baja se observa que aunque el beneficio económico derivado de la rentabilidad de los cultivos crece los ingresos reales de los hogares decaen vertiginosamente mientras el desempleo aumenta. En la economía urbana de acuerdo con las tendencias actuales se pueden presentar en el tiempo igualmente ingresos reales de los hogares más bajos y tasas de desempleo altas. Por ultimo respecto al déficit de vivienda, en cantidad puede tender a decaer a un 20%, mientras en calidad puede tender a elevarse hasta cerca de un 30%. Por lo que en general se podría hablar de la no sostenibilidad económica en la cuenca.

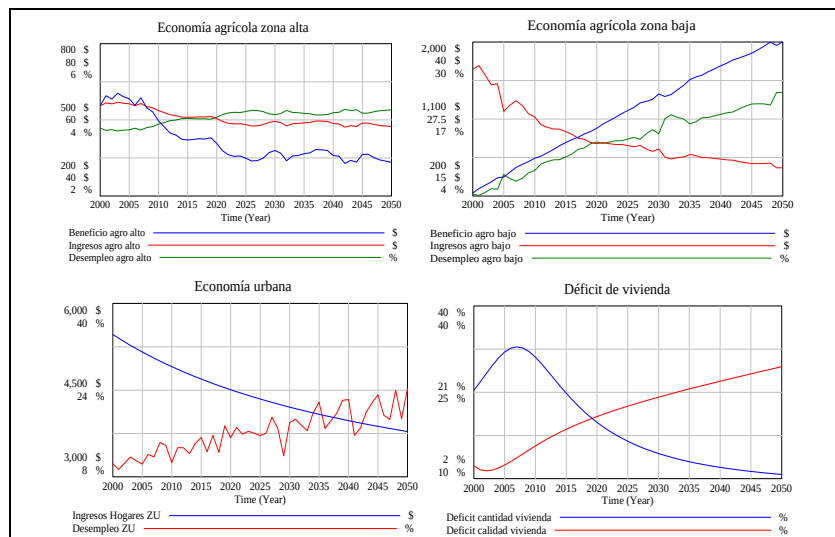


Figura 15. Indicadores sostenibilidad económica

- Evaluación sostenibilidad social:** En la Figura 16 se agrupan los indicadores de los niveles poblacionales, la morbilidad, nivel educativo y calidad de vida. Se observa que los niveles poblacionales crecen en el tiempo llegando a casi duplicar los valores iniciales. En la morbilidad, se aprecian tendencias crecientes en las tasas de morbilidad por enfermedades respiratorias y por otras causas llegando en 40 años a alcanzar casos de 3 casos por cada 1000 habitantes y 60 casos por cada 1000 habitantes respectivamente. En cuanto al nivel educativo se puede interpretar que al ritmo en que crece la población económica activa en zona rural y zona urbana los promedios de nivel educativo relativamente en el primer caso aumenten y en el segundo caso disminuyan. Y finalmente, se observa un indicador de calidad de vida decreciente en el tiempo por efecto del alejamiento de las tendencias ideales de los factores que la determinan. Todo esto dando un panorama desfavorable en cuanto a la sostenibilidad social de la zona.

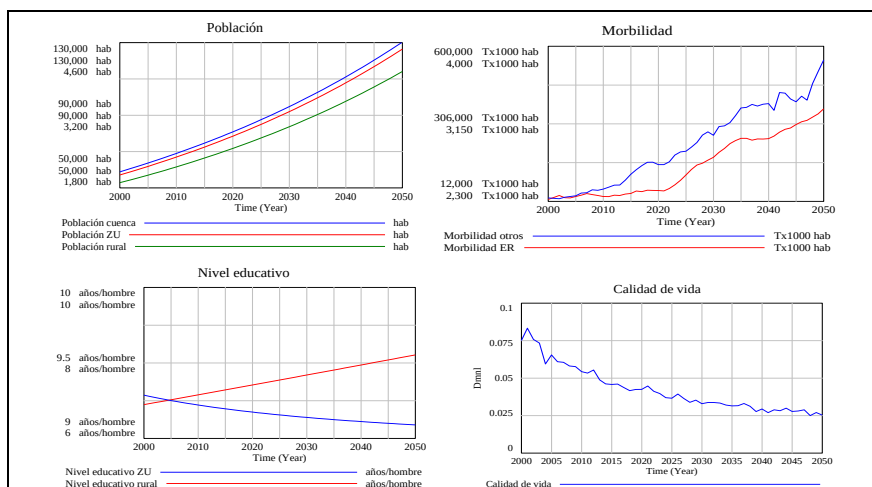


Figura 16. Indicadores sostenibilidad social

5.5 Análisis de estrategias de desarrollos sostenible

La teoría revisada nos ayuda a distinguir entre estrategias basadas en los paradigmas de sostenibilidad muy débil a sostenibilidad muy fuerte. Dos problemas centrales guían la formulación de estrategias de desarrollo sostenible hipotéticas en la cuenca hidrográfica: la escasez del agua y la contaminación de los cauces.

5.5.1 Formulación de estrategias de desarrollo sostenible hipotéticas

Con base en los paradigmas estudiados en la sección 1.3 se formulan estrategias cuya capacidad para dirigir a la cuenca hacia un camino de desarrollo sostenible será analizada con base en los escenarios de gestión construidos a partir de la simulación del modelo asumiendo tres posturas: pesimista, neutral y optimista y en general un cambio gradual en un horizonte temporal de 10 años.

- **Estrategia de sostenibilidad muy débil:** Confiando en que el cambio tecnológico compensará las pérdidas ocasionadas por la disminución del capital natural se plantea en un escenario pesimista un aumento del 10% de la productividad agrícola que permite obtener unas ganancias para financiar un acueducto que abastezca el 10% del consumo de agua de la población de ladera con agua de otras cuencas y a la vez el 10% del uso agrícola en la zona baja de la cuenca. Por otro lado, en el sector de calidad de agua se espera que un cambio tecnológico reduzca las descargas de DBO y SST y aumente la efectividad en la remoción de estas descargas en un 10%. Para los escenarios, neutral y optimista, se suponen los porcentajes de influencia indicados en la Tabla 12 del Anexo F.
- **Estrategia de sostenibilidad débil** Bajo el paradigma de la economía ambiental se pensaría en una compensación de pérdidas en capital natural con proyectos sombra de protección ambiental. En la cuenca se podría hablar del pago por servicios ambientales a los habitantes de la zona alta de la cuenca para que conserven la reserva de bosque natural constante ofreciendo en un escenario pesimista el 10% del beneficio del cultivo más rentable para reducir la producción agrícola y concentrarse en actividades de protección de la cobertura boscosa y cauce del río. Así mismo un incremento en las tasas retributivas por vertimientos de DBO y SST del 20%. Para los escenarios, neutral y optimista, se suponen los porcentajes de influencia indicados en la Tabla 12 del Anexo F.

- **Estrategia de sostenibilidad fuerte** Considerando al bosque natural y el caudal del río Yumbo, como oferta superficial de agua y sumidero de residuos, capitales críticos, se plantea como estrategia, inicialmente en un escenario pesimista, una conversión nula del bosque natural y su recuperación a partir de la conversión en 10 años del 20% del pasto natural llevando a su vez a las hectáreas sembradas con otros cultivos en la zona alta a su uso potencial ofreciendo un costo de oportunidad del 50% adicional del beneficio obtenido por el cultivo más rentable. Así mismo actuando sobre los recursos de baja entropía se plantea promover el ahorro de agua de consumo doméstico en un 10% y la reducción en descargas residuales del 10%. Para los escenarios, neutral y optimista, se suponen los porcentajes de influencia indicados en la Tabla 12 del Anexo F.
- **Estrategia de sostenibilidad muy fuerte** Tratando de representar el aporte de instituciones por medio del cambio de valores sociales se plantea que dado la limitación de actuar sobre tasas de crecimiento económico que en la cuenca son decrecientes en términos reales este paradigma se limita a actuar sobre el crecimiento poblacional que en un escenario pesimista inicialmente podría hablarse de una reducción de tasas de natalidad y migraciones del 10%. Para los escenarios, neutral y optimista, se suponen los porcentajes de influencia indicados en la Tabla 12 del Anexo F.

5.5.2 Resultados de simulación de estrategias

En lo que sigue se presenta un breve análisis de los resultados obtenidos de la simulación de las estrategias planteadas, los cuales pueden ser observados de la Figura 18 a 21. En estas figuras, en parte superior se ubican las influencias sobre los indicadores objetivo: índice de escasez, concentración OD y concentración SST y en la parte inferior las influencias sobre los indicadores de otros sectores donde estas ejercen una mayor influencia. Las interpretaciones son hechas de manera general pero los cambios se presentan a diferentes escalas de acuerdo al escenario pesimista, neutral y optimista considerado.

- **Análisis estrategia sostenibilidad muy débil:** Como estrategia que refleja la confianza en que la tecnología podrá siempre hacer más eficiente el uso de los recursos, en la Figura 17 se observa que la escasez de agua bajaría considerablemente pero no porque se haya hecho algo por recuperar este recurso sino por reducir su uso doméstico y agrícola en zona plana. Se observa también que las reducciones de descargas contaminantes por la implementación de tecnologías lograría aumentar la concentración OD y disminuir la de SST. Y en otros sectores los beneficios de la actividad agrícola aumentarían, mientras el conflicto de uso del suelo y la calidad de vida se incrementarían levemente.

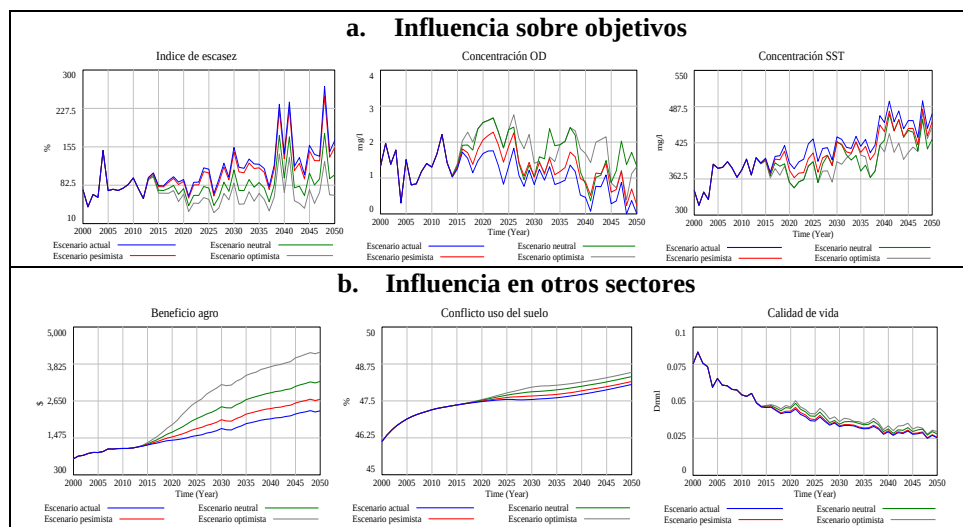


Figura 17. Resultados estrategia sostenibilidad muy débil

- **Análisis estrategia sostenibilidad débil:** En la Figura 18 se observa que manteniendo la reserva forestal constante e implementando mayores tasas retributivas de descargas residuales se lograría a largo plazo una pequeña reducción del índice de escasez del agua y cambios favorables en los niveles de concentración OD y SST. En otros sectores se percibiría un cambio positivo gradual en los beneficios de la zona agrícola alta, disminuiría el conflicto de uso del suelo al frenar las tasas de conversión de pasto natural a bosque natural y en temidos de calidad de vida los cambios se traducirían en pequeños aumentos. Así mismo, se podría generar una pequeña reducción en la erosión hídrica, concentración de PM10, emisiones por erosión eólica y por tanto menos casos de morbilidad por enfermedades respiratorias (ver Figura 27 del Anexo G).

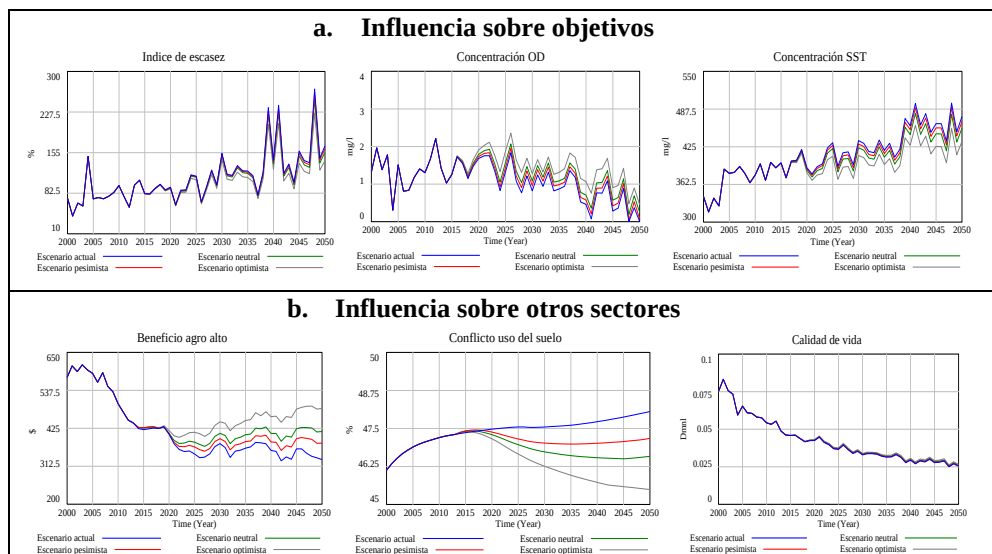


Figura 18. Resultados estrategias sostenibilidad débil

- Análisis estrategia sostenibilidad fuerte:** Al considerar la cobertura boscosa y el caudal del río Yumbo como capitales críticos de acuerdo con lo observado en la Figura 19 se lograría a largo plazo reducir considerablemente el índice de escasez de agua sin necesidad de limitar su uso, así mismo se aprecian cambios importantes en la concentración OD el cual podría llegar incluso a 3 mg/l, mientras la concentración SST es reducida considerablemente. En otros sectores se apreciarían cambios también importantes, como la recuperación a niveles más estables del caudal medio, una reducción del conflicto por uso del suelo a aproximadamente un 25%, niveles de calidad de vida que tienden a la estabilidad en el largo plazo. Y por otro lado, se podría conseguir una reducción en la erosión hídrica, emisiones por erosión eólica, concentración de PM10 y por lo tanto menos casos de morbilidad por enfermedades respiratorias (ver Figura 28 del Anexo G).

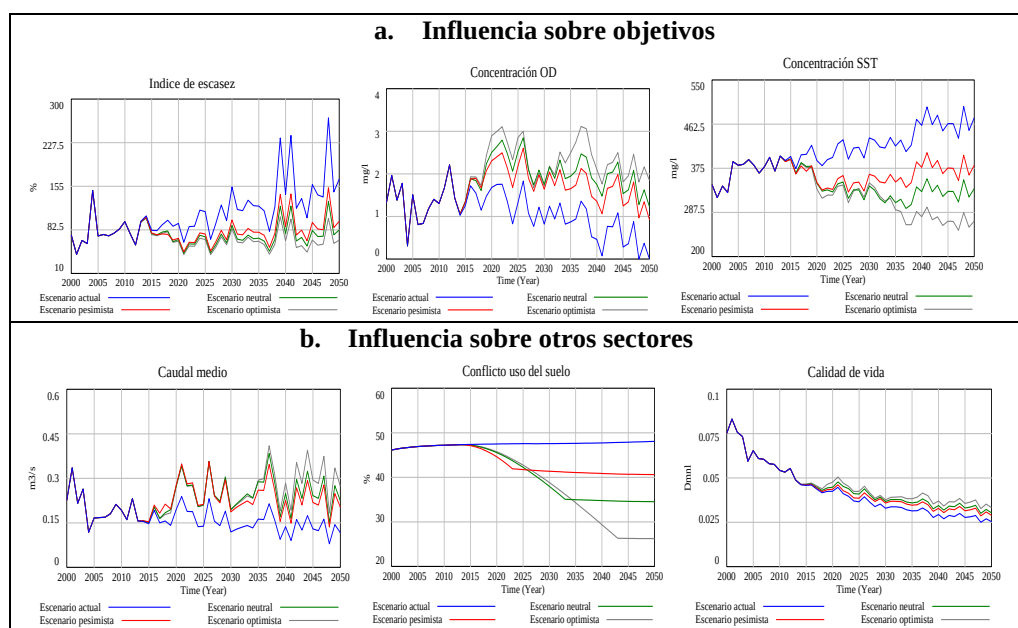


Figura 19. Resultados estrategia sostenibilidad fuerte

- Análisis estrategia sostenibilidad muy fuerte:** De acuerdo con la Figura 20 esta estrategia centrada en estabilizar la dinámica demográfica de la zona lograría en el largo plazo pequeñas reducciones en el índice de escasez por la reducción en el tamaño de la población consumidora de agua, así mismo con la disminución de descargas residuales por habitante se lograría niveles de concentración OD más estables en un escenario optimista y unas pequeñas reducciones en la concentración SST. En otros sectores se podrían ver indicios del estado estacionario de Herman Daly, al mantenerse el ingreso percapita y el déficit de vivienda constante. En calidad de vida se presentaría solo un leve incremento.

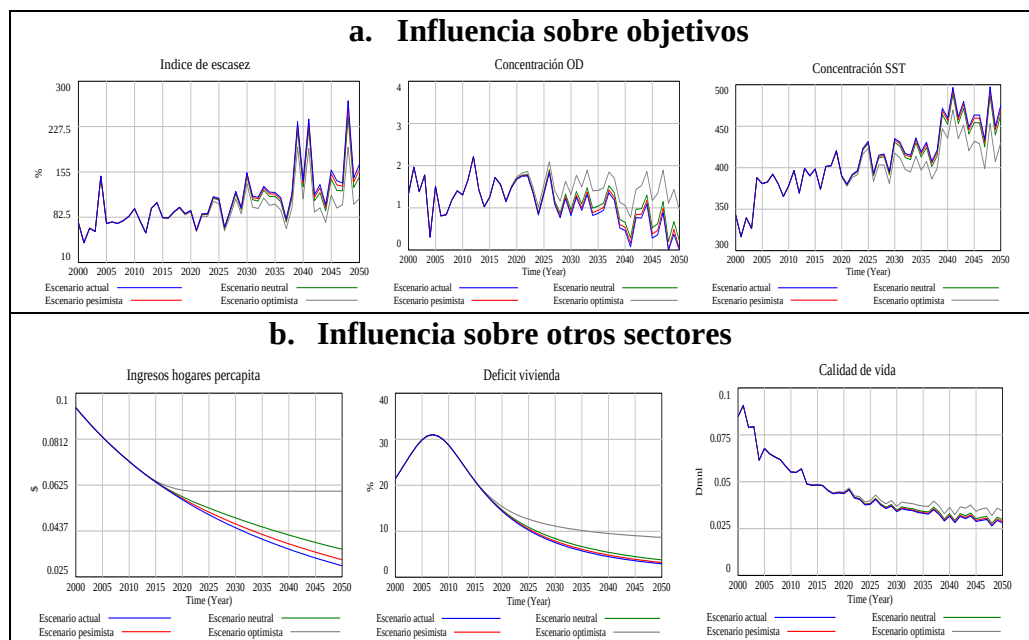


Figura 20. Resultados estrategia sostenibilidad muy fuerte

5.5.3 Discusión sobre impacto de estrategias y selección de más apropiadas

Brevemente, se podrían encontrar argumentos en contra de la efectividad de las estrategias planteadas, como que el cambio tecnológico esperado, en el que confían los seguidores de la sostenibilidad muy débil, no sea suficiente para amortiguar el impacto sobre la escasez de recursos; que no haya cooperación en el pago por servicios ambientales, promovido por los seguidores de la sostenibilidad débil, debido a que los ingresos percibidos por los habitantes de la cuenca son muy bajos; que las actividades de recuperación del área boscosa, considerada crítica para los seguidores de la sostenibilidad fuerte, no persistan en el tiempo o que controlar la dinámica poblacional de acuerdo con lo propuesto por la sostenibilidad muy fuerte no sea fácil. Pero es un deber de los hacedores de política buscar la forma de incorporar gradualmente estos cambios de manera que se pueda dirigir a la cuenca a una senda de desarrollo sostenible.

En lugar de seleccionar una sola estrategia como la más apropiada podría hablarse de una complementariedad de estrategias. Aunque teóricamente los paradigmas de base se manejan como sustitutos, principalmente por el grado de sustitución y complementariedad entre capital físico y natural que contemplan, se puede llegar a plantear combinaciones entre estrategias en diferentes campos de gestión de la cuenca con el fin de buscar la efectividad de estas acciones de política en términos del desarrollo sostenible de la cuenca de la siguiente forma:

- En consumo de agua, un ahorro promovido con la implementación de tecnologías puede acompañarse con campañas de concienciación a la comunidad sobre el ahorro en la fuente. Aquí entonces una combinación entre el paradigma neoclásico y el de la economía ecológica es percibida.
- En reducción de descargas residuales, la imposición de la autoridad ambiental a través de tasas retributivas es indispensable así como la implementación de tecnologías y campañas que promuevan una menor contaminación. Aquí entonces una combinación entre el paradigma de la economía ambiental, el neoclásico y el de la economía ecológica sería contemplada.
- En el tema de la conservación del área boscosa, al considerarse crítica, ofrecer un costo de oportunidad a otros usos del suelo sería un mecanismo de acción de gran utilidad. Aquí entonces los métodos operacionales derivados del paradigma de la economía ecológica y la economía ambiental se complementarían.

Hablar de este tipo de complementariedades no es nuevo. El logro del progreso técnico siempre ha sido reconocido, pero lo que se ha criticado es magnificar su poder de hacer más productiva la naturaleza (Martínez-Alier y Roca, 2001). En términos de gestión de la cuenca del río Yumbo la promoción del uso de dispositivos ahorradores de agua apoyarían las iniciativas de los economistas ecológicos porque estos reconocen que el mundo se rige por las leyes de la termodinámica y por tanto están a favor de proteger los recursos de baja entropía, es decir en desorden (van den Bergh, 2000). Por su parte los métodos de depuración de aguas residuales apoyan las iniciativas de los economistas ambientales porque los agentes sobre los que se emiten impuestos por contaminación recurrirán a estos para evitar ser multados, siguiendo la lógica de racionalidad económica involucrada en estos instrumentos económicos de comando y control (Burton, 1999; Pearce y Turner, 1990).

Por otra parte, los economistas ecológicos no rechazan del todo la idea de apoyar el manejo y gestión de los recursos naturales con incentivos económicos al reconocer que para ciertos bienes y servicios naturales ya existen mercados sobre los cuales surten efecto los cambios en precios de escasez (Naredo, 1987) y adicionalmente una modificación de los mismos es factible con el propósito de incluir costos sociales y ambientales (Constanza, 1994; Daly y Cobb, 1997). Para el manejo de las cuencas el IDEAM (2006) también reconoce que los instrumentos económicos desde la economía ambiental y la economía ecológica, en algunos contextos se complementan. Los de la perspectiva de la economía ambiental *“pueden incentivar en el corto plazo, la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, aunque lo conveniente para el medio ambiente es que la sociedad asimile una cultura de protección de su entorno sin mediar instancias coercitivas de tipo económico; sin embargo, la experiencia muestra que la concientización es un proceso gradual que en algunos casos requiere del apoyo de estos instrumentos”* (IDEAM, 2006:6).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una de las reflexiones de este trabajo es que el modelo construido permite capturar el efecto de largo plazo de problemáticas como la sobreexplotación de recursos, y en esa medida hace parte de modelos que capturan la compleja dependencia de la economía a los recursos naturales, que tras las críticas realizadas a los modelos tradicionales, Solow (1997) dijo que quería llegar a ver.

En los “Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas en el Valle del Cauca” se percibe la carencia de una visión integrada de los sistemas y la proyección en el tiempo de las situaciones problemáticas que no garantizan la sostenibilidad, para lo cual la dinámica de sistemas, como se pudo ver en el trabajo desarrollado, aporta en la comprensión de las interconexiones entre subsistemas de la cuenca y la definición de escenarios de acuerdo a las estrategias implementadas.

En los resultados del modelo de simulación se pueden ver las fuertes interconexiones que existen entre los sistemas económico, social y ambiental. La economía de la zona alta basada en el autoconsumo depende fuertemente de la rentabilidad de los cultivos sembrados ahí y de su dotación de agua. La economía de la zona baja al igual que en la zona urbana depende de los empleos generados en la zona que no alcanzan a ser suficientes para que los ingresos reales de los hogares crezcan y el desempleo baje. Así mismo el conflicto de uso del suelo esta fuertemente ligado a la creciente extensión del pasto natural promovido por actividades de pastoreo.

Como se indicó en la última sección del documento las estrategias inspiradas en diferentes paradigmas del desarrollo sostenible pueden actuar de forma complementaria, ya que desde el punto de vista de este trabajo la implementación de una no excluye la aplicación de la otra. Para el caso de la cuenca del río Yumbo una integración de las mismas es posible, por ejemplo cuando se considera crítica el área boscosa y se quiere promover su recuperación, el pago por servicios ambientales, puede servir de apoyo para frenar el deterioro de la cuenca e integrar socialmente a habitantes de la cuenca de la zona alta y con los de la zona baja.

El modelo construido en el presente trabajo se basa en teorías básicas, tratando de encontrar las interconexiones más evidentes entre las diferentes problemáticas examinadas, pero podrían encontrarse otro tipo de interconexiones posibles, retroalimentaciones y retrasos por parte de investigadores con un conocimiento más profundo sobre sus campos de aplicación que no son del dominio de un economista. Así mismo, se recuerda la importancia para el manejo de cuencas en Colombia de asociar el análisis de los sistemas estudiados al plano espacial, reto de futuras investigaciones sobre el tema.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía Municipal de Yumbo. 2001. *Plan Básico para la Ordenación Territorial del municipio de Yumbo –PBOT*. Planeación Municipal

Aracil, J., 1978. *Introducción a la dinámica de sistemas*. Alianza Editorial. Madrid.

Aracil, J., 1995. *Dinámica de Sistemas*. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. Isdefe. Madrid.

Azqueta, D., Ferreiro, A., 1994. *Análisis económico y gestión de recursos naturales*. Alianza Económica S.A. Madrid.

Barbier, E. B., Markandya, A., 1990. The conditions for achieving environmentally sustainable development. *European Economic Review*, 34: 659-669.

Becerra, P., Cortes, M. 2006. *Geografía de los Riesgos: Una Propuesta Pedagógica para el Municipio de Yumbo*. Trabajo de grado presentado para optar al título de Licenciadas en Ciencias Sociales. Universidad del Valle.

Bertalanffy, Ludwing von., 1968. *General System Theory*. George Braziller. (Versión española en el Fondo de Cultura Económica).

Bishop, R. C., 1978. Endangered Species and Uncertainty: The Economics of a Safe Minimum Standard, *American Journal of Agricultural Economics*, 60: 10-18.

Boulanger, P., Brécher, T., 2005. Models for policy-making in sustainable development: The state of the art and perspectives for research. *Ecological Economics*, 55, 337-350.

Bovenberg, A., Smulders, S., 1995. Environmental Quality and Pollution Saving Technological Change in a Two-sector Endogenous Growth Model, *Journal of Public Economics*, 57, 369-391.

Bruton, 1999. Environmental Regulation: The Challenge Ahead, *Alternative Law Journal*. 24, 3.

Cabeza, M., 1996. The concept of weak sustainability. *Ecological Economics*, 17, 147-156.

Chapra, S. 1997. *Surface Water – Quality Modeling*. Mc. Graw Hill. Boston.

Ciriacy-Wantrup, Siegfried V., 1952. *Resource Conservation: Economics and Policy*. Berkeley, CA: University of California Press.

Comisión Brundtland, 1987. *Nuestro Futuro Común*. Título original “Our Common Future”. The World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford, 1987.

Costanza, R. 1994. La economía ecológica de la sostenibilidad. Inversión en Capital Natural. En: Goodland, H; El Serafy, S., von Droste, B (eds), 1994. *Desarrollo económico sostenible: avances sobre el Informe Brundtland*. Tercer Mundo Editores.

Costanza, R., Farber, S. 2002. Introduction to the special issue on the dynamics and value of ecosystem services: integrating economic and ecological perspectives. *Ecological Economics* 41(3): 367–373.

Costanza, R., Voinov, A., Boumans, R., Maxwell, T., Villa, F., Wainger, L., Voinov, H., 2002. Integrated Ecological Economic Modeling of the Patuxent River Watershed, Maryland. *Ecological Monographs*, 72, 2, 203-231.

CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle), 2002. Manual de Procedimiento para el Calculo del Balance Oferta-Demanda de Agua. Subdirección de Gestión Ambiental. Grupo de Recursos Hídricos. Colombia, Santiago de Cali.

CVC, 2004. *Génesis y Desarrollo de una visión de progreso: CVC 50 años*, Colombia, Santiago de Cali.

CVC, 2005a. *Informe Final Suelos Cuenca Yumbo*. Dirección Técnica Ambiental.

CVC, 2005b. *Monitoreo de la Calidad del Aire Estaciones Semiautomáticas PM10 Sector Acopi-Yumbo*. Informe Ejecutivo. Preparado por Freddy Arevalo.

CVC, 2006a. *Elaboración y Actualización de la Cartografía Temática de Cobertura del Suelo de las Cuencas Hidrográficas de los ríos Bolo-Fraile, Bugalagrande, Cali y Yumbo, mediante la Utilización de Técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes de Satélite*. Informe Final Cuenca Yumbo. Contrato de Servicios CVC No. 0239 -11-2005. Presentado Por Franklin Arles Bedoya Beltrán.

CVC, 2006b. *Monitoreo de la Calidad del Aire Estaciones Semiautomáticas PM10 Sector Acopi-Yumbo*. Informe Ejecutivo. Preparado por Freddy Arevalo.

CVC, 2007a. Balance Oferta – Demanda de Agua Superficial Cuenca del río Yumbo. Dirección Técnica ambiental. Grupo de Recursos Hídricos.

CVC, 2007b. *Monitoreo de la Calidad del Aire Estaciones Semiautomáticas PM10 Sector Acopi-Yumbo*. Informe Ejecutivo. Preparado por Freddy Arevalo.

CVC, 2008. *Monitoreo de la Calidad del Aire Estaciones Semiautomáticas PM10 Sector Acopi-Yumbo*. Informe Ejecutivo. Preparado por Freddy Arevalo.

CVC-PROAGUA, 2010. *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Yumbo, Valle del Cauca*. Divulgación. Convenio CVC No. 215/09-Fundación PROAGUA.

Daly, H (compilador). 1989. *Economía, Ecología y Ética: Ensayos hacia una economía en estado estacionario*. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. Título original Economics, Ecology, Ethics. Essays Toward a Steady-State Economy, 1980. Freeman and Company, Nueva York-San Francisco.

Daly, H. 1994. De la economía de un mundo vacío a la de un mundo lleno. En: Goodland, H; El Serafy, S., von Droste, B (eds)., 1994. *Desarrollo económico sostenible: avances sobre el Informe Brundtland*. Tercer Mundo Editores. Colombia.

Daly y Cobb, 1997. *Para el bien común: reorientando la economía hacia la comunidad, el ambiente y un futuro sostenible*. Fondo de Cultura Económica.

Dasgupta, S., Heal, G., 1974. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*. Edinburgh, Scotland, Longman Group Ltd.

Deeb, A. 1992. Estimación de cambios en la respuesta hidrológica, Deeb Sossa S. en C. Ingenieros Consultores, DNP-PAFC-BID. Octubre.

Douguet, J.-M., Schembri, P., 2000. Sustainable Agriculture and Water quality Control: A structural approach to the evaluation of public environmental policies applied to the Brittany region in France, Reporte de Investigación producido como parte del proyecto CRITINC, Working Paper No.13, Guyancourt, Francia.

Dyner, Isaac., 1993. *Dinámica de Sistemas y Simulación Continua en el Proceso de Planificación*, Colciencias, Universidad Nacional Medellín.

Ecological Economics (Ed.), 1997. The Contribution of Nicholas Georgescu-Reoegen, *Ecological Economics*. El Servier, 22, 3.

Ekins P., Simon, S., 1999. Making Sustainability Operational : Critical Natural Capital and the Implications of a Strong Sustainability Criterion, *Summary Progress Report* for the European Commission, Contrato No. ENV4-CT97-0561.

Ekins, P., Simon, S., Deutsch, L., Folke, C., De Groot, R., 2003. A Framework for the Practical Application of the Concepts of Critical Natural Capital and Strong Sustainability. *Ecological Economics*, 44, 165-185.

El Serafy, S., 1991. The environment as capital (168-175) en: *Ecological Economics*, ed. R. Costanza. New York, Columbia University Press.

Eppink, F. V., van den Bergh, J., Rietveld, P. 2004. "Modelling biodiversity and land use: urban growth, agriculture and nature in a wetland area". *Ecological Economics*, 51, 201-216.

FAO, 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Number 130, 152 pp, Roma.

Franco, A., Orejuela, P. R., Vélez, A. M. 2003. *Análisis de los límites de crecimiento sostenible, basado en el recurso hídrico de la ciudad de Cali*. Trabajo de grado para optar al título de ingenieros industriales. ICESI. Santiago de Cali.

Fox, J. 2008. Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models. Second Edition. *SAGE Publications, Inc*

Gallopín, G., 2003. Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico. *Serie Medio Ambiente y Desarrollo*. CEPAL-ECLAC. Santiago de Chile.

Gobierno del Distrito Federal Mexico, 1997. Mexico Emissions Inventory Program. English version. Volumen V – Area Sources. Final. March 1997.

Goodland, R., 1995. The Concept of Environmental Sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26, 1-24.

Hamilton, H., Goldstone, S., Milliman, J., Pugh III, A., Roberts, E., Zellner, A., 1969. *Systems Simulation for Regional Analysis: An Application to River-Basin Planning*. M.I.T.

Hanley, N., Shogren, J., White, B., 1997. *Environmental economics: in theory and practice*, Oxford University Press, New York.

Hartwick, J., 1977. Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources. *American Economic Review*, 67: 972-974.

Hartwick, J., 1990. Natural Resources, National Accounting, and Economic Depreciation. *Journal of Public Economics*, 43: 291-304.

Hicks, J., 1948. *Value and Capital*, segunda edición, Clarendon, Oxford.

Hinterberger, F., Luks, F., 1998. Desmaterialización, Employment and Competitiveness in a Globalized Economy, Document preparado para la Quinta conferencia bienal de la International Society for Ecological Economics, Noviembre 15-19 1998, Santiago de Chile.

Hjorth, P., Bagheri, A., 2006. Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach. *Futures*, 38, 74-92.

Ibañez, J., Martínez, J., Martínez, S., 2004. El Modelo Hispased-Guadalentín para la Gestión Agrícola en una Zona con Riesgo de Desertificación. Ponencia presentada al II Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. TALCA (CHILE), nov.

Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2006. Caja de Herramientas para la Guía Técnico Científica de Ordenación de Cuencas Hidrográficas: Instrumentos Económicos en la Ordenación Y Manejo de Cuencas Hidrográficas en Colombia. Bogotá. Colombia.

IDEAM, 2008. “Guía técnico-científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia (Dcto 1729 de 2002)”, Bogotá. Colombia.

IDEAM, SINCHI, IAvH, IIAP, INVEMAR. 2002. Primera Generación de Indicadores de la Línea Base de la Información Ambiental de Colombia. SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia).

UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 1980. *World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development*. IUCN-UNEP Academic WWF, Gland, Switzerland.

Jacobs, M., 1991. *La economía verde: medio ambiente, desarrollo sostenible y la política del futuro*. ICARIA-FUHEM, Barcelona.

Klassen, G.K., Opschoor, J.B., 1990. Economics of sustainability or the sustainability of economics: different paradigms. *Ecological Economics*, 4: 93-116.

Lebart, L., Morineau, A., Piron, M., 1995. *Statistique exploratoire multi-dimensionnelle*, Dunod, Paris.

Lehtonen, M., 2004. The environmental-social interface of sustainable development: capabilities, social capital, institutions. *Ecological Economics*, 49, 199-214.

Libreros, P., Sánchez, N., Cardona, A., Mosquera, I., Escobar, R., 2003. *Formulación de Planes de Ordenación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas en el Valle del Cauca*. CVC- Grupo de Planificación Ambiental. Cali.

Londoño, L., 1997. *Yumbo, de resguardo indígena a capital industrial del Valle del Cauca*. Colección de Autores Vallecaucanos. Segunda Edición. Fundación Mixta Politécnico Universidad del valle Yumbo. Cali, Colombia.

López, E., Martínez, S., 2000. *Iniciación a la simulación dinámica*, Editorial Ariel, Barcelona, España.

Maya, D., Castillo, D., Ramos, P., Roldán, A., 2004. Análisis de la acción colectiva para el manejo de cuencas: Estudio piloto – cuenca de la Laguna Fúquene. *Informe Final de Investigación*. GTZ-CAR-CONDESAN- Pontificia Universidad Javeriana.

Martínez-Alier, J., Roca, J., 2001. *Economía Ecológica y Política Ambiental*. FCE. México.

Meadows, D. H., Meadows, D.L., Randers, J., 1972. *Los límites del crecimiento*. Fondo de Cultura Económica, México.

Mill, John Stuart., 1881. Of Property. En *Principles of Political Economy*. Libro II. Nueva York: Appleton-Century-Crofts.

Ministerio de Medio Ambiente, 2002. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales. Guía. Bogotá. Colombia

Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 2006. *Guía metodológica para el establecimiento de objetivos de calidad de los cuerpos de agua en ausencia de los planes de ordenamiento del recurso hídrico-PORH. Metodología MESOCA*. Bogotá. Colombia.

MAVDT, 2008. Manual de Inventario de Fuentes Naturales. Consultor K2 Ingeniería Ltda. Bogotá. Colombia.

Moffat, I., Hanley, N., Wilson, M., 2001. *Measuring and modelling sustainable development*. The Parthenon Publishing Group Inc. USA.

Mulalic, I., Olsen, T., 2004. Sustainable Development Indicators Based on National Accounts. Statistics Denmark, Artículo preparado para el 23:e Nordiska Statistikermötet. Filandia Agosto 18-21 de 2004.

Munasinghe, M., 1993. Environmental Economics and Sustainable Development. *World Bank Environment Paper*. World Bank, Washington, D.C.

Naredo, J. M. 1987. *La Economía en Evolución. Historia y Perspectivas de las Categorías Básicas del Pensamiento Económico*, Siglo XX, Madrid.

Navrud, S., 2002. Linking Physical and Economic Indicators of Environmental Damages. Capítulo 6 en: C. L. Spash y S. McNally (eds.) 2002. *Case Studies in Ecological and Environmental Economics*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK and Northampton, MA, USA.

Oyarzun, J. P. 2004. Modelación y Simulación de Oxígeno Disuelto, Materia Orgánica y Relación Distribucional de Macroinvertebrados en la Subcuenca del Río Traiguén. Universidad Católica de Temuco. Disponible en: <http://biblioteca.uct.cl/tesis/jessica-oyarzun/tesis.pdf>

Ozkaynak, B; Devine, P; Rigby, D., 2004. Operationalising Strong Sustainability: Definitions, Methodologies and Outcomes. *Environmental Values*, 13, 279-303. The White Horse Press.

Pardo C.E., J.E. Ortiz. 2004. Análisis multivariado de datos en R. Simposio de Estadística, Cartagena Colombia. Disponible en la dirección electrónica: <http://www.docentes.unal.edu.co/cepardot/analmultir.pdf>

Pearce, A., 1999. *The Science and Engineering of Sustainability: A Primer*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA. Disponible en la dirección electrónica: <http://maven.gtri.gatech.edu/sfi/resources/pdf/TR/TR018.PDF>.

Pearce, D. W., Turner, R. K., 1990. *Economics of Natural Resources and the Environment*, Hemel Hempstead, Harvester-Wheatsheaf.

Pearce, D. W., Atkinson, G. D., 1993. Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: an Indicator of 'Weak' Sustainability. *Ecological Economics*, 8(2): 103-108.

Pezzey, J., Toman, M., 2001. Progress and Problems in the Economics of Sustainability, publicado en: Tom Tietenberg y Henk Folmer, eds (2002), *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 2002/200*, Edward Elgar, Cheltenham, U.K.

Pezzey, J., Toman, M., 2002. The Economics of Sustainability: A Review of Journal Articles. *Resources for the Future*. Washington.

Quintero, L., Dyner, I., 2004. *Modelo de caracterización de la dinámica de potencialidades del suelo, integrando autómatas celulares y dinámica de sistemas*. Ponencia en el II Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.

Rudas, 1998. *Economía y ambiente*. FESCOL –CEREC –Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia.

Running, S., Nemani, R., Heinsch, F., Zhao, M., Reeves, M., and Hasimoto, H.: 2004, 'A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production,' *Bioscience* 54 (6), 547-559.

Sánchez, S., 1995. Una aproximación al proceso de planificación de cuencas hidrográficas, Ibagué, Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica.

Sen, A., 1999. *Desarrollo como Libertad*. Editorial Planeta, España. Título original: Development as freedmon.

Solow, R., 1974. "Intergeneracional Equity and Exhaustible Resources", *Review of Economic Studies (symposium)*, 29-45.

Solow, R., 1986. On the intergenerational allocation of natural resources. *Scandinavian Journal Economic*, 88, 141-149.

Sterman, J., 2000. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill. Boston.

Stern, D., 1995. The Capital Theory Approach to Sustainability: A Critical Appraisal. Working Papers Series, 9501. Boston University. Center for Energy and Environmental Studies.

Stiglitz, J., 1974. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. *Review of Economic Studies (symposium)*, 123-137.

Suárez, D., 2003. Indicadores e Índices Ambientales: Marco Teórico de Indicadores. Programa de Información e Indicadores de Gestión de Riesgos de Desastres Naturales. BID-CEPAL-IDEA. Manizales, Colombia.

Tolley, G., Riggs, F., 1961. *Economics of Watershed Planning*. The Iowa State University Press, Ames, Iowa.

Turner, R., 1992. Speculations on Weak and Strong Sustainability, *CSERGE Working Paper*. GEC 92-26, CSERGE, University of East Anglia, Norwich.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1977. Guideline for Development of Control Strategies in Areas with Fugitive Dust Problems. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina. EPA-450/2-77-029.

Valente, S., 2005. Sustainable Development, Renewable Resources and Technological Progress. *Environmental and Resource Economics*, 30: 115–125.

Van den Bergh, J., Hofkes, M., 1998. A survey of Economic Modelling of Sustainable Development.

Van den Bergh, J., 2000. Ecological Economics: Themes, approaches, and differences with environmental economics. *Tinbergen Institute Discussion Paper*. TI 2000-080/3. Disponible en <http://www.tinbergen.nl>.

Van Kotten, G., 2000. *The economics of nature: managing biological assets*. Blackwell Publishers, Oxford.

Wackernagel, M., Rees, W., 1996. Our Ecological Footprint: Reducing the Impact on the Earth. New Society Publishing, Gabriola Island, BC.

Weisberg, S. 2005. Computing Primer for Applied Linear Regression, Third Edition using R y S-Plus.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture Science and Education Administration.

ANEXOS

A. Principales fuentes de información para la construcción del modelo

Tabla 9. Principales fuentes de información para la construcción del modelo

Variables	Años	Fuente
Precipitaciones mensuales subestaciones Santa Inés, Yumbillo, Buitrera y Lloreda (mínima, máxima, media)	1987-2007	Grupo Recursos hídricos CVC
Caudales mensuales subestación Pasoancho (mínimo, máximo, medio)	1987-1992, 1998-2007	Grupo Recursos hídricos CVC
Evaporación subestación Pasoancho	1987-2007	Grupo Recursos hídricos CVC
Usos del suelo (actual y potencial)	2000, 2005	Grupo Sistemas de Información CVC
Concentraciones OD y SST	1998-2006	Laboratorio Ambiental CVC
Descargas y Tarifas de cobro por descargas OD y SST	1998-2007	Dirección Técnica ambiental CVC
Concentración PM10	2005, 2006, 2007, 2008	Laboratorio Ambiental CVC
Morbilidad	2003, 2004, 2005, 2006	Secretaría de Salud Yumbo
Ingresos industria asentada	2000-2008	Sistema de información y riesgo empresarial (SIREM) consultado en http://sirem.supersociedades.gov.co/SIREM/
Consumo de gasolina	1985-1992	Proyecciones a partir de los datos de Ortiz (1996)
Déficit vivienda en cantidad y calidad	1999, 2005	Alcaldía de Yumbo. Sistema de Evaluación y Seguimiento del PBOT consultado en http://www.yumbo.gov.co/aplicativo/#
Déficit solucionado vivienda en cantidad y calidad	2001-2008	Alcaldía de Yumbo. Sistema de Evaluación y Seguimiento del PBOT consultado en http://www.yumbo.gov.co/aplicativo/#
Tasas demográficas (natalidad, mortalidad, migraciones)	2001	PBOT Yumbo en Alcaldía de Yumbo (2001)
Precios, costos y producción de cultivos	2000-2009	Información Estadística Secretaría de Agricultura consultada en http://www.valledelcauca.gov.co/agricultura/
Población, ingresos hogares, PEA, Empleos, Nivel educativo, NBI, Riesgo deslizamientos	2003, 2007	Base de datos del SISBEN consultada por medio del CIDSE

B. Principales formulas del modelo en lenguaje VENSIM

Tabla 10. Principales formulas del modelo en lenguaje VENSIM

ABFRUT= INTEG (VarABFR,0)
VarABFR=(ABFRdes-ABFRUT)/10
ABFRdes=66*(1-EXP(-MAX(0, BeneficioABFR)))
BeneficioABFR=SMOOTH(IngresosABFR-CostosABFR,5)
IngresosABFR=PrecioABFR*ProducABFR
ProducABFR=(17.59+RAMP(0.9,2000,2050))*"ef.prec.f"
CostosABFR=(2.681+RAMP(0.154111,2000,2050))*RANDOM NORMAL(0.833,1,0.913,0.067,1)
AgABF=IF THEN ELSE(Precipitación media < 0.85 * ETo:AND:ABFRUT > 0 , ((0.85*ETo)-Precipitación media) *ABFRUT*10,0)
BN= INTEG (+IncBN-"Cambio BN-AROM"- "Cambio BN-PN",1084.34)
ef BN CM = WITH LOOKUP (BN/1084.34,([(0.3,0)-(1.5,1.223)], (0.3453,0.4), (0.825,0.66), (0.899,0.699), (0.977,0.842),(1,1),(1.25,1.062),(1.5,1.118)))
Calidad de vida=(Dotación fisica^(-w1))*(Contaminación^(-w2))*(Nivel educativo^w3) *(Ingreso percapita^w4)*(Riesgo salud^(-w5))*(Riesgo desastres naturales^(-1+ (w1+w2+w3+w4+w5)))
Concentración OD=MAX(Concentración oxígeno de saturación-Deficit oxígeno,0)
Concentración oxígeno de saturación=0.0035*Temperatura^2-0.3369*Temperatura+14.407
Concentración SST=338*"ef.Eros"*"ef.SST"*"ef.CMSST"
Deficit cantidad vivienda=(Oferta cantidad vivienda/Demanda cantidad vivienda)*100
Demanda cantidad vivienda= INTEG (Inc.Dda cantidad viv-Dda cantviv soluc,2046.02)
Descargas DBO industria= INTEG (Inc.dboind-Remoción dboind,45.775)
ef.Carga DBO=(Carga DBO/3034.52)^0.0771
ef.CMOD=(Caudal medio/0.2258)^(-0.2049)
ef.es.c = WITH LOOKUP (Indice de escasez/74.4597,([(0.4,0)-(6,1.2)], (0.55,0.9559), (1,1),(1.0096,0.9331),(1.0421,0.9002),(2.0521,0.7987),(3.6046,0.7768),(5.48,0.75)))
Inc.Dda cantidad viv=-1070.51+0.7785*(Req Reubicación+Req vivienda nueva)
Indice de escasez=(Demanda de agua/Caudal medio)*100
IngresosABFR=PrecioABFR*ProducABFR
Monto esp DBOind=SMOOTH(Monto Tasa DBOind, 5)
Monto Tasa DBOind=Descargas DBO industria*Tarifa minima dbo*frdi
Morbilidad ER= INTEG (Inc.Morbilidad-"Dec. Morbilidad",2320)
Precipitación media=EXP(RANDOM NORMAL(6.64,7.18,6.93,0.16,6.84))
Uso inadecuado=IF THEN ELSE(PC+PN>139.1,(PC+PN)-139.1,0)+IF THEN ELSE(CAFÉ+"CAFÉ-PLAT"+AROMATICAS+HORTALIZAS>58.6,(CAFÉ+"CAFÉ-PLAT"+ AROMATICAS+HORTALIZAS)-58.6,0)+IF THEN ELSE(ABFRUT+AJÍ+ALGODÓN+CAÑA+SORGO+CN>638.5, (ABFRUT+AJÍ+ALGODÓN+CAÑA+SORGO+CN)-658.5,0)

C. Otros submodelos simulados

• Submodelo de cambio de uso del suelo

El submodelo que describe el cambio de uso del suelo en la cuenca del río Yumbo se concentra en los usos de suelo que generan conflicto. Como se muestra en el diagrama de Forrester de la Figura 21 predominan los flujos de conversión hacia el pasto natural (PN) y el conflicto de uso del suelo esta determinado por la relación entre el uso inadecuado de las coberturas consideradas y el área de la cuenca.

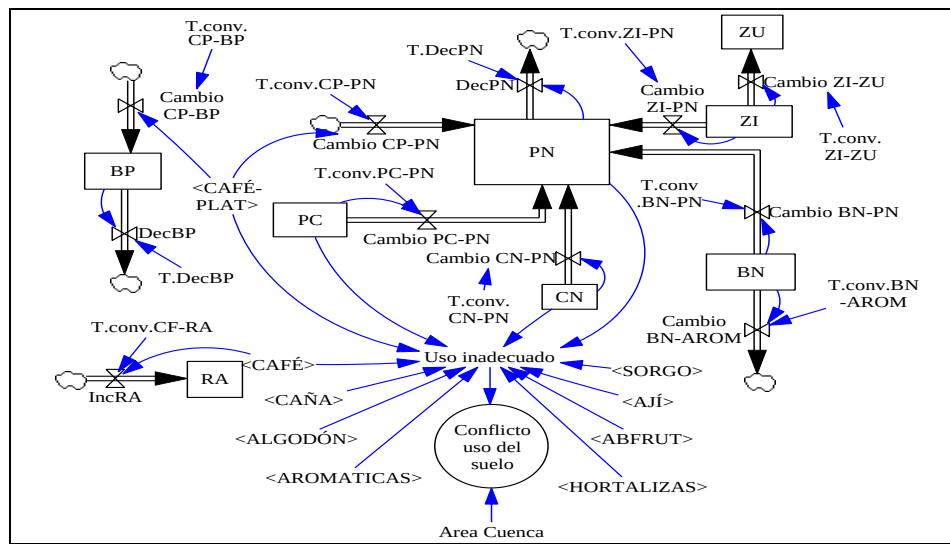


Figura 21. Diagrama de Forrester Submodelo Cambio de uso del suelo

Para explicar los cambios en los usos de suelo estudiados se estimaron primero las tasas de conversión de uso de suelo anuales en cada caso con la fórmula de tasa de cambio anual empleada por FAO (1996):

$$Tasa\ de\ cambio\ anual = \left(\frac{Uso\ del\ suelo\ año\ 2005}{Uso\ del\ suelo\ año\ 2000} \right)^{\frac{1}{años\ evaluados}} - 1$$

Los cambios de usos de suelo bosque natural (BN), bosque plantado (BP), pasto natural (PN), pasto de corte (PC), cantera (CN), rastrojo (RA), zona industrial (ZI) y zona urbana (ZU) son explicados como acumulaciones de flujos de cambios de uso de suelo afectados por tasas de conversión estimadas a partir de información del SIG de la cuenca de los años 2000 y 2005. Para el caso del bosque natural, que decrece con el cambio a pasto natural y aromáticas se tendría:

$$BN = BN_{inc} + \int_0^t -Cambio_{BN-PN}(t) - Cambio_{BN-AROM}(t)$$

donde $Cambio_{BN-PN} = T.conv_{BN-PN} \times BN$
 $Cambio_{BN-AROM} = T.conv_{BN-AROM} \times BN$

El conflicto de uso del suelo que representa el porcentaje del área intervenida cuyo uso actual no corresponde a su aptitud es expresado siguiendo al IDEAM (2004):

$$Conflicto\ uso\ del\ suelo = \left(\frac{Uso\ inadecuado}{Area\ cuenca} \right) \times 100$$

El uso inadecuado se calcula a partir de la diferencia entre los usos de suelo actual en conflicto y el uso potencial de cada zona donde hace presencia el tipo de cultivo. Se consideran tres grandes agrupaciones, pastos, cultivos en la zona alta y cultivos en la zona baja. De esta forma:

$$Uso_{inadecuado} = \begin{cases} \left[\sum_{i=1}^t PASTOS_i \right] - Uso\ pot.\ pastoreo > 0 \\ \left[\sum_{i=1}^t CULTIVOS\ ZONA\ ALTA_i \right] - Uso\ pot.\ Tierras\ cultivables > 0 \\ \left[\sum_{i=1}^t CULTIVOS\ ZONA\ BAJA_i \right] - Uso\ pot.\ bajas\ limitaciones > 0 \end{cases}$$

• Submodelo Erosión

El submodelo que describe la erosión estima dos tipos de erosión: hídrica y eólica. La primera es la pérdida de suelo por acción de la lluvia y la segunda son las partículas de suelo que se desplazan a la atmosfera por acción del viento. El diagrama de Forrester de la Figura 22 indica los factores involucrados en cada caso.

La erosión hídrica se estima a partir de la Ecuación de Perdida de Suelo (USLE) definida por Wischmeier y Smith (1978 en CVC 2005):

$$Erosión\ hídrica = R \times K \times LS \times C \times P$$

Donde la erosión hídrica es la perdida media anual de suelo en ton/ha/año, R es el factor de erosividad de la lluvia, K es el factor de erodabilidad del suelo, LS el factor de relieve (longitud y ángulo de la pendiente), C es el factor de protección de la cubierta vegetal y P es el factor de practicas de conservación.

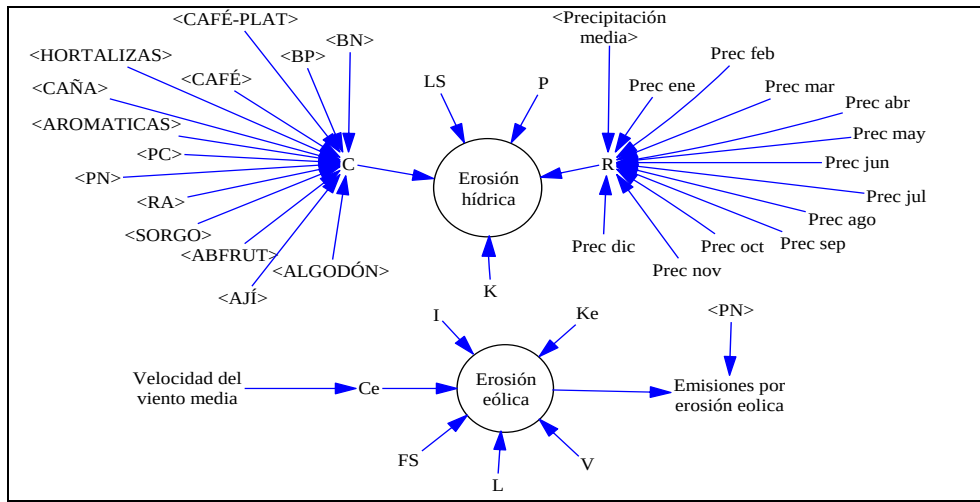


Figura 22. Diagrama de Forrester Submodelo Erosión

El factor R se estima a partir del índice de Fournier modificado por la FAO (CVC, 2005) con el cual se calcula el índice de agresividad climática:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde P_i es la precipitación media mensual y P es la precipitación media anual.

El factor K puede ser determinado de forma directa como indirecta. De acuerdo con CVC (2005) se estima un valor aproximado como:

$$K = \frac{2.1M^{1.14}(10^{-4})(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) * 1.2928}{100}$$

Donde K es el factor de erodabilidad (t/ha), M es la cantidad de partículas del suelo, a es el contenido de materia orgánica (%), b es el número que representa el tipo de estructura de suelo y c es el número que representa la clase de permeabilidad del suelo. El factor LS y C se calcula a partir de valores promedios encontrados en tablas predeterminadas (Lugder Reining 1992 en CVC 2005). Y al factor P se le asigna un valor de 1 al no observarse prácticas de conservación en la cuenca (CVC, 2005).

Ahora, el índice de erosión eólica se estima a partir de la ecuación presentada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S. EPA, 1977 en Gobierno del Distrito Federal México, 1997; MAVDT, 2008) como:

$$Erosi3n\ e3lica = FS \times I \times Ce \times Ke \times L \times V$$

Donde la Erosi3n e3lica corresponde al factor de emisi3n de part3culas suspendidas (tons/ha/a3o), FS es la fracci3n de las perdidas de erosi3n e3lica medido como part3culas suspendidas. I es la erodabilidad del suelo (tons/ha/a3o), Ce es el factor clim3tico, Ke es el factor de rugosidad superficial, L es el factor de amplitud de campo y V el factor de cobertura vegetal. A su vez el factor Ce que depende de la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la humedad superficial del suelo se estima a partir de la siguiente ecuaci3n:

$$Ce = \frac{0.345v^3}{\left[115 \times \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{PM_i}{TM_i - 10} \right)^{\frac{10}{9}} \right]^2}$$

Donde v es la velocidad del viento media corregida a pies, Pm es la precipitaci3n pluvial mensual en pulgadas, TM es la temperatura promedio mensual en 3F. Los valores para los factores L y V se establecen respectivamente a partir de formas funcionales consultadas en U.S. EPA (1977).

De acuerdo con U.S EPA (1977) una estimaci3n de las emisiones anuales de PM10 expresadas en toneladas al a3o, debidas a la erosi3n e3lica estar3an dadas por:

$$Emisiones\ por\ Erosi3n\ E3lica = \acute{area} \times Erosion\ e3lica \times 0.50$$

Donde se toma como 3rea la extensi3n de pasto natural, al ser la cobertura de mayor presencia en la cuenca y la m3s expuesta a la acci3n del viento.

D. Información complementaria de estimaciones preliminares

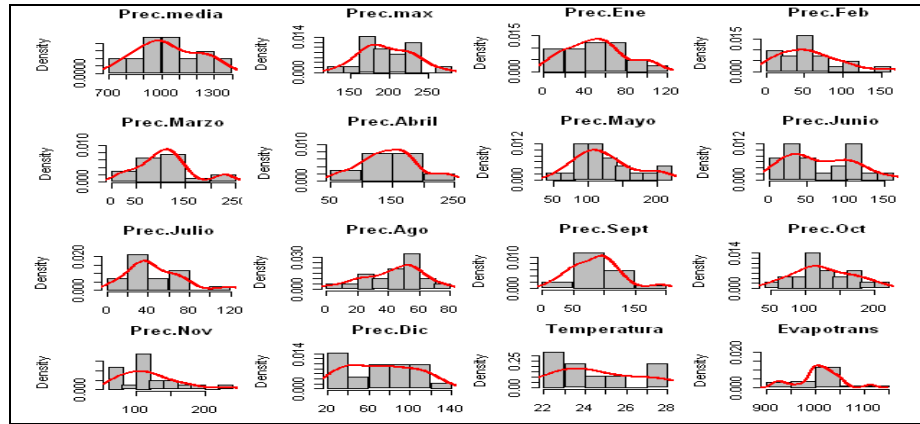


Figura 23. Histogramas variables ambientales con densidad kernel superpuesta

Tabla 11. Evaluación de distribuciones de probabilidad en variables ambientales

Variables	P- valor Anderson Darling Distribuciones evaluadas					
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull	Logistica	Cauchy
Prec. media	0.565	0.771*	0.732	0.341	0.559	0.168
Prec.max	0.806	0.887	0.904*	0.582	0.706	0.114
Prec. Ene	0.504	0.066	0.348	0.571	0.594*	0.335
Prec.Feb	0.332	0.187	0.656	0.825*	0.496	0.230
Prec.Marzo	0.315	0.027	0.206	0.384	0.656	0.767*
Prec.Abril	0.876	0.345	0.623	0.830	0.914*	0.391
Prec.Mayo	0.373	0.939*	0.920	0.449	0.531	0.179
Prec.Junio	0.143	0.036	0.286	0.357*	0.124	0.005
Prec.Julio	0.240	0.095	0.502	0.588*	0.447	0.079
Prec.Ago	0.377	0.000	0.000	0.008	0.413*	0.037
Prec.Sept	0.561	0.074	0.290	0.538	0.708*	0.193
Prec.Oct	0.852	0.674	0.875	0.889*	0.818	0.253
Prec.Nov	0.123	0.558*	0.506	0.138	0.300	0.207
Prec.Dic	0.325	0.167	0.191	0.380*	0.329	0.099
Temperatura	0.558	0.657*	0.623	0.375	0.618	0.327
Evapotrans	0.200	0.154	0.165	0.094	0.395*	0.603

* Distribución con el p-valor del estadístico Anderson Darling más alto

Tabla 12. Otros ajustes para simular información de cultivos y otras variables

Variables	n	Ajuste	Ajuste de ε
Precio aromáticas	10	$(4.03 + \text{RAMP}(0.013, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=1.063$, $\sigma=0.053$)
Precio café-plátano	10	$(2.56 + \text{RAMP}(-0.060, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=1.007$, $\sigma=0.046$)
Precio caña	10	$(0.042 + \text{RAMP}(-0.001, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=0.979$, $\sigma=0.036$)
Costos aromáticas	10	$(2.06 + \text{RAMP}(0.056, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=0.968$, $\sigma=0.064$)
Costos frutales	10	$(2.681 + \text{RAMP}(0.154, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=0.913$, $\sigma=0.067$)
Costos ají	10	$(3.291 + \text{RAMP}(0.254, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=1.04$, $\sigma=0.1$)
Producción caña	10	$(55.09 + \text{RAMP}(2.07, 2000, 2050)) * \varepsilon$	$f(\text{Precipitación media})$
Producción ají	10	$(12.93 + \text{RAMP}(1.251, 2000, 2050)) * \varepsilon$	$f(\text{Precipitación media})$
Producción sorgo	10	$(4.5 + \text{RAMP}(0.017, 2000, 2050)) * \varepsilon$	$f(\text{Precipitación media})$
Producción frutales	10	$(47.59 + \text{RAMP}(0.9, 2000, 2050)) * \varepsilon$	$f(\text{Precipitación media})$
Producción algodón	10	$(2.41 + \text{RAMP}(0.321, 2000, 2050)) * \varepsilon$	$f(\text{Precipitación media})$
Ingresos industria	8	$(3171741 + \text{RAMP}(377780, 2000, 2050)) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=1.066$, $\sigma=0.101$)
Morbilidad otros	8	$(-461499 + 8.188 * \text{Población cuenca}) * \varepsilon$	NORMAL($\mu=0.985$, $\sigma=0.387$)

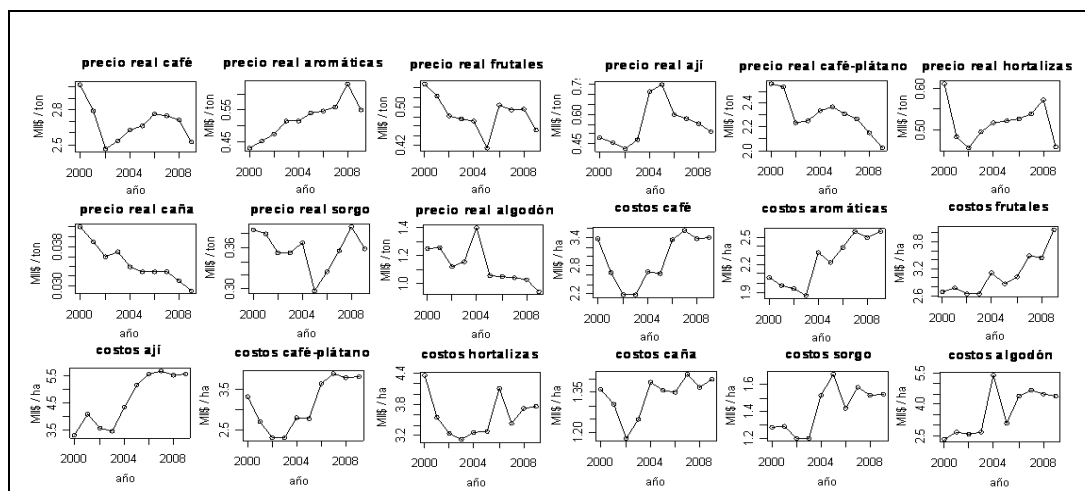


Figura 24. Comportamiento de precios y costos de cultivos

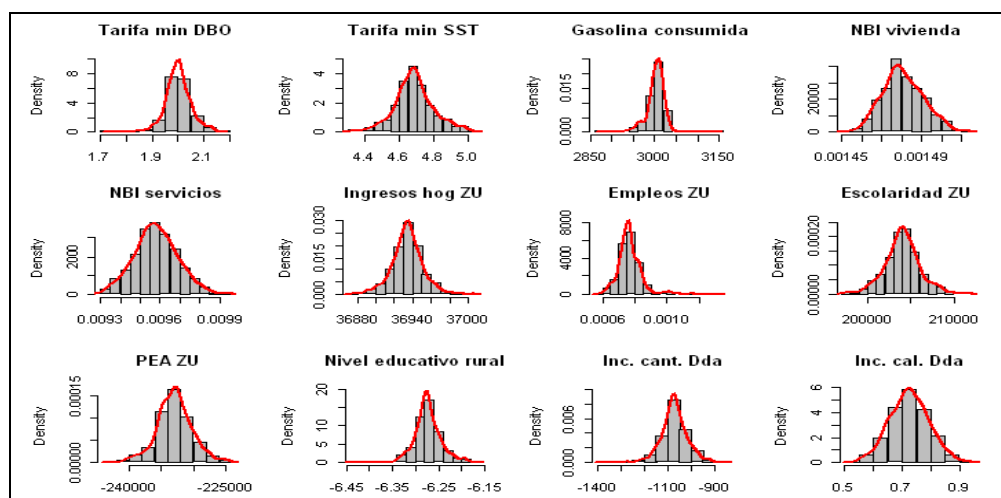


Figura 25. Histograma coeficientes β bootstrap con densidad kernel superpuesta

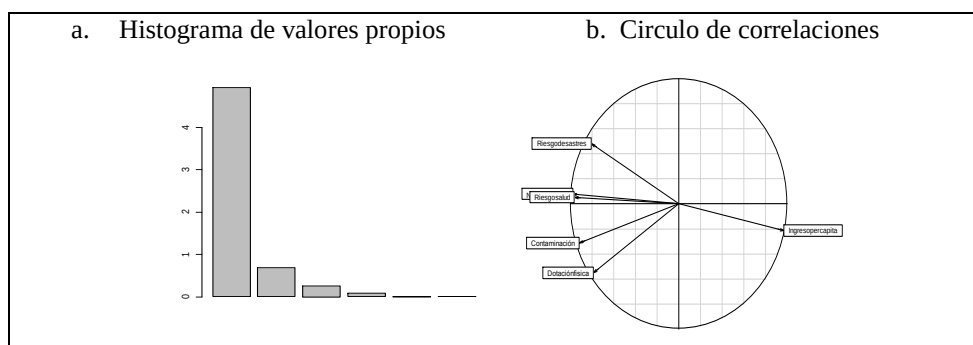


Figura 26. Histograma de valores propios y círculos de correlaciones en ACP

E. Descripción de algunas técnicas empleadas en estimaciones preliminares

• Regresión bootstrap

El método Bootstrap es usado en general para obtener estimaciones sin requerir supuestos sobre la distribución de los datos, consiste en construir una distribución empírica a partir de los datos muestrales seleccionando n observaciones con remplazamiento de la muestra original. En seguida se detalla el procedimiento para el caso de la regresión bootstrap con base en Fox (2008).

1. Se estiman los coeficientes $A, B_1, \dots, B_k$ para las muestras originales, y se calculan los valores ajustados y los residuales para cada observación:

$$\begin{aligned}\hat{Y}_i &= A + B_1 x_{i1} + \dots + B_k x_{ik} \\ E_i &= Y_i - \hat{Y}_i\end{aligned}$$

2. Se seleccionan las muestras bootstrap de los residuales, $e_b^* = [E_{b1}^*, E_{b1}^*, \dots, E_{b1}^*]'$, y a partir de estas, se calculan los valores Y remuestreados, $y_b^* = [Y_{b1}^*, Y_{b1}^*, \dots, Y_{b1}^*]'$, donde $Y_{bi}^* = \hat{Y}_i + E_{bi}^*$.
3. Se regresan los valores Y remuestreados con los X fijos para obtener los coeficientes de regresión bootstrap.
4. Los $b_b^* = [A_b^*, B_b^*, \dots, B_{bk}^*]'$ remuestreados pueden ser usados en la manera usual para construir errores estándar e intervalos de confianza para los coeficientes de la regresión.

Los modelos de regresión y modelos estadísticos similares pueden ser remuestreados de dos formas: (1) tratando los regresores como aleatorios y seleccionando las muestras bootstrap directamente a partir de las observaciones. (2) tratando los regresores como fijos y remuestrando a partir de los residuales E_i del modelo de regresión ajustado.

En R de acuerdo con Weisberg (2005) la regresión bootstrap puede ser aplicada con la función `boot.case` del paquete `arl3` de la siguiente manera:

```
library(arl3) # Se carga el paquete después de instalado
datos<-read.table(file="c://datos.txt",header=T) # Se leen los datos
modelo<-lm(Y~X, data=datos) # Se ajusta el modelo
betahat.boot<-boot.case(modelo,B=999) # Se aplica boot.case
apply(betahat.boot,2,mean) # Se estima la media de los coeficientes
apply(betahat.boot,2,sd) # Se estima el error de los coeficientes
```

- **Análisis de Componentes Principales**

El Análisis de Componentes Principales ACP, tiene como objetivo reducir la dimensión de un conjunto de n casos caracterizados por p variables cuantitativas, obteniendo un número menor de variables construidas como combinaciones lineales de las originales que describen las asociaciones entre casos y variables. En seguida se detalla el procedimiento con base en Lebart *et al* (1995):

Para una tabla de datos $X_{n \times p}$, con n casos y p variables, en términos geométricos, se busca la proyección de los casos en el espacio R^p o la de variables R^n , usando la distancia euclidiana, de forma que en R^p se maximice la suma de los cuadrados de las distancias entre todas las parejas de puntos proyectados sobre un eje H:

$$\max_H \sum_i^n \sum_{i'}^n d^2(i, i')$$

En primer lugar se busca la dirección del primer eje que conserve mejor las distancias originales de los puntos. Este problema de optimización da como resultado que la dirección de ese eje es la misma del vector propio asociado al valor propio más grande de la matriz $X'X$, por lo que el problema en términos matriciales se traduce a:

$$\text{Max}(u)u'X'Xu \quad \text{s.a} \quad u'u = 1$$

La solución es entonces la diagonalización de la matriz $X'X$, es decir obtener sus valores propios ordenados de mayor a menor y los vectores propios asociados. De esta forma se obtienen p componentes principales, que maximizan la variabilidad del conjunto de datos y son las coordenadas de los n puntos proyectados sobre el eje factorial u_α , expresados de la siguiente forma:

$$\psi_\alpha = Xu_\alpha$$

Para interpretar los resultados obtenidos en este análisis son estimados a su vez una serie de indicadores como la contribución relativa y absoluta de los casos y variables sobre el eje factorial y la calidad de estas representaciones medida por el coseno del ángulo de las proyecciones.

En R de acuerdo con Pardo y Ortiz (2004) el ACP puede ser aplicado con la función `dudi.pca` del paquete `ade4` de la siguiente manera:

```
library(ade4) # Se carga el paquete después de instalado
datos<-read.table(file="c://datos.txt",header=T) # Se leen los datos
acp <- dudi.pca(datos,scannf=F,nf=2) # Se realiza el ACP
acpI <- inertia.dudi(acp,row.inertia=T,col.inertia=T)
print(acpI$TOT,2) # Se imprimen indicadores
plot(acp$eig) # Se grafica el histograma de valores propios
print(acp$c1) # Se imprimen los vectores propios
```

F. Detalles de la formulación de estrategias de desarrollo sostenible

Tabla 13. Diferentes posturas de las estrategias de desarrollo sostenible

Enfoque		Sostenibilidad muy débil	Sostenibilidad débil	Sostenibilidad fuerte	Sostenibilidad muy fuerte
Cantidad de agua	Pesimista	Aumento en un 10% de la productividad agrícola y reducción del consumo de agua en zona de ladera y baja del 10%	Disminución del 20% en conversión de pasto a bosque. Costo de oportunidad del 10% adicional a beneficio de cultivo más rentable.	Conversión nula del bosque natural y en 10 años del 20% del pasto natural. Ahorro del 10% en consumo doméstico agua.	Disminución de tasas de natalidad y migraciones en 10%.
	Neutral	Aumento en un 25% de la productividad agrícola y reducción del consumo de agua en zona de ladera y baja del 50%	Disminución del 50% en conversión de pasto a bosque. Costo de oportunidad del 25% adicional a beneficio de cultivo más rentable.	Conversión nula del bosque natural y en 20 años del 50% del pasto natural. Ahorro del 20% en consumo doméstico agua.	Disminución de tasas de natalidad y migraciones en 25%.
	Optimista	Aumento en un 50% de la productividad agrícola y reducción del consumo de agua en zona de ladera y baja del 80%	Disminución del 100% en conversión de pasto a bosque. Costo de oportunidad del 50% adicional a beneficio de cultivo más rentable.	Conversión nula del bosque natural y en 30 años del 100% del pasto natural. Ahorro del 30% en consumo doméstico agua.	Tasas de natalidad y migraciones iguales a la de mortalidad.
Calidad de agua	Pesimista	Disminución de descargas y aumento en remoción de DBO y SST en un 10%	Aumento en tasa retributiva por descargas DBO y SST del 20%.	Disminución de descargas de DBO y SST en un 10%	Disminución de tasas de natalidad y migraciones en 10%.
	Neutral	Disminución de descargas y aumento en remoción de DBO y SST en un 20%	Aumento en tasa retributiva por descargas DBO y SST del 40%.	Disminución de descargas de DBO y SST en un 20%	Disminución de tasas de natalidad y migraciones en 25%.
	Optimista	Disminución de descargas y aumento en remoción de DBO y SST en un 30%	Aumento en tasa retributiva por descargas DBO y SST del 80%.	Disminución de descargas de DBO y SST en un 30%	Tasas de natalidad y migraciones iguales a la de mortalidad.

G. Más Influencias de estrategias sostenibilidad débil y fuerte

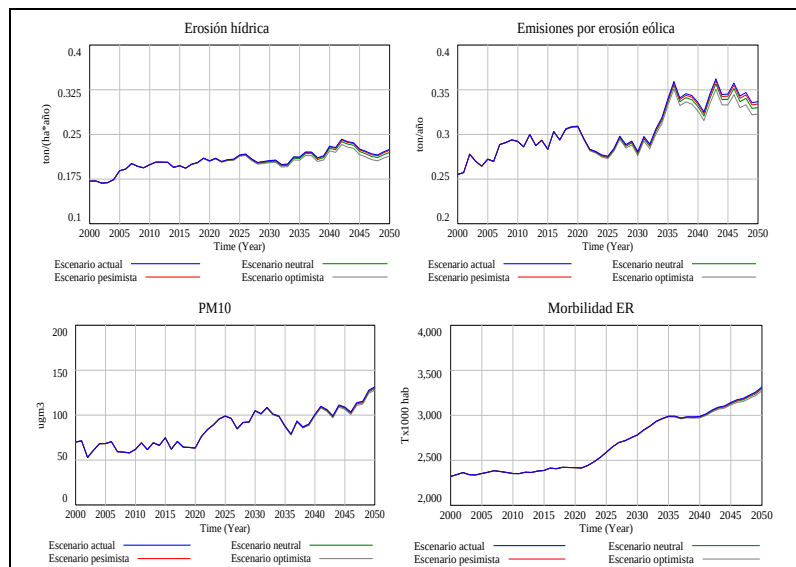


Figura 27. Influencia en otros sectores estrategia sostenibilidad débil

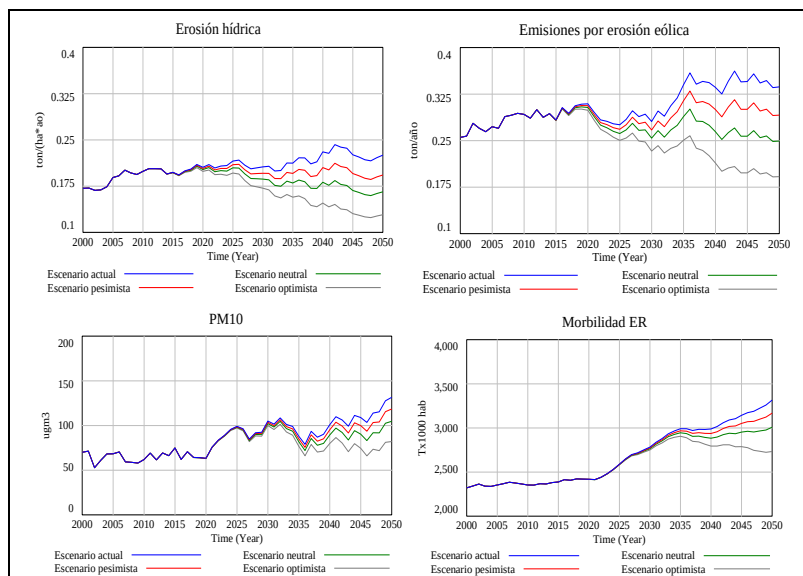


Figura 28. Influencia en otros sectores estrategia sostenibilidad fuerte