

AMBIENTE DE APRENDIZAJE Y MODELADO PARA LA TOMA DE DECISIONES
EN FENÓMENOS DE IMPACTO AMBIENTAL CAUSADOS POR
INFRAESTRUCTURA VIAL-UN ENFOQUE DINÁMICO SISTÉMICO.

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2015

AMBIENTE DE APRENDIZAJE Y MODELADO PARA LA TOMA DE DECISIONES
EN FENÓMENOS DE IMPACTO AMBIENTAL CAUSADOS POR
INFRAESTRUCTURA VIAL-UN ENFOQUE DINÁMICO SISTÉMICO.

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Sistemas

Director

HUGO HERNANDO ANDRADE SOSA

Magister en ingeniería de sistemas e informática

Codirectores

JORGE ANDRICK PARRA VALENCIA

Doctor en ingeniería de sistemas

ANGÉLICA CORZO HERNANDÉZ

Ingeniera civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

Dedico la consecución de este trabajo a mi hogar. Mi padre Hugo y madre Claudia, quienes día tras día durante los últimos 6 años han creído en mis decisiones y han apoyado mi estudio como estilo de vida, lo cual a la fecha de hoy me permite ser quien soy. A Laura mi hermana, quien siempre ha compartido mis felicidades y tristezas, dándome su amor desde su fuerte temperamento.

A mi familia Angarita Fernández y Zapata Villamizar, cuyo incondicional apoyo que recuerdo desde los inicios de mi consciencia, ha sido un elemento forjador en mi crecimiento personal y profesional.

A mi amigo, compañero y hermano, Cesar. Con quien hace 11 años atrás comparto inagotables tertulias llenas de racionalidad y creatividad. Además de ser esa persona con la cual siempre he compartido mis éxitos y fracasos, siempre a la expectativa de su opinión sensata.

A mi amigo, compañero y hermano, Jose Daniel. Con quien he compartido innumerables momentos de ocio necesarios para la creatividad, suspendidos de forma temporal por la distancia espacial que hoy nos tiene en lugares diferentes. Pero que a pesar de ello, su serenidad y amistad las recuerdo constantemente.

A mi amiga, compañera y novia, Viviana. Que con su consciencia femenina es capaz de explorar y sacar a flote los rincones más recónditos de mi ser. Con quien hoy día comparto el continuo presente de mi existencia endulzada con su personalidad. Además de ser esa persona que incansablemente me ha escuchado y acompañado en el extenso camino que he recorrido para terminar este trabajo.

A mi amigo y hermano, Álvaro. Quien me ha enseñado que la determinación nos puede llevar más lejos de lo que creemos y, que no habrá adversidad que logre doblegarnos si nuestra mente se mantiene firme y lucida frente a los objetivos que deseamos alcanzar.

A mi amigo y ex socio, Henry. Cuyo optimismo me ha enseñado a ver oportunidades en lugares insospechables y desconocidos para la mayoría de las personas.

A mis compañeros de universidad, con quienes compartí innumerables momentos de enriquecimiento personal y profesional, mientras batallábamos como equipo para alcanzar las metas que cada uno se había planteado individualmente.

A mi Maestro Hugo Andrade, quien me ha ayudado a ampliar mi cosmovisión del mundo compartiéndome su conocimiento y experiencias. Además de, alimentar constantemente mí deseo por construir explicaciones en una sociedad llena de diversidad.

A esta sociedad, sumida en decisiones racionales e individualistas. Que debe ver oportunidades en problemas sin importar credos, orígenes o lenguas. Al final todos somos una misma especie, seres humanos.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN..... | 20 |
| 1. PLANETAMIENTO DEL PROBLEMA | 23 |
| 2. JUSTIFICACIÓN..... | 26 |
| 3. OBJETIVOS | 27 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL | 27 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 27 |
| 4. MARCO REFERENCIAL | 29 |
| 4.1 MARCO DE ANTECEDENTES..... | 29 |
| 4.1.1 Grupo SIMON..... | 29 |
| 4.1.2 Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas..... | 31 |
| 4.1.3 Congreso Internacional de Dinámica de Sistemas..... | 33 |
| 4.2 MARCO TEÓRICO | 37 |
| 4.2.1 Impacto Ambiental | 37 |
| 4.2.2 Pensamiento Sistémico | 39 |
| 4.2.3 Dinámica de Sistemas | 39 |
| 4.2.4 Ingeniería del Software | 40 |
| 4.2.5 Herramientas de modelado y simulación | 41 |
| 4.3 MARCO CONCEPTUAL | 42 |
| 4.3.1 Diagrama de influencias..... | 42 |
| 4.3.2 Diagrama de Forrester o flujos y niveles | 43 |

| | |
|--|----|
| 4.3.3 Infraestructura vial | 43 |
| 4.3.4 Índice ambiental..... | 43 |
| 4.3.5 Infraestructura social..... | 44 |
| 4.3.6 Capacidad vial | 44 |
| 4.3.7 Índice de congestión | 44 |
| 4.3.8 Partes por millón | 44 |
| 5. METODOLOGÍA | 45 |
| 5.1 DINÁMICA DE SISTEMAS COMO PARADIGMA DE PENSAMIENTO..... | 45 |
| 5.2 DINÁMICA DE SISTEMAS COMO METODOLOGÍA DE MODELADO Y SIMULACIÓN | 51 |
| 5.3 METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL AMBIENTE DE APRENDIZAJE | 53 |
| 6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO UTILIZANDO DINÁMICA DE SISTEMAS..... | 57 |
| 6.1 PROTOTIPO I..... | 57 |
| 6.1.1 Propósito | 57 |
| 6.1.2 Restricciones | 57 |
| 6.1.3 Modelo en prosa y lenguaje de influencias | 57 |
| 6.1.4 Modelo en lenguaje de flujos y niveles..... | 59 |
| 6.1.5 Modelo en lenguaje de ecuaciones y definición de variables | 63 |
| 6.1.6 Resultados de simulación y discusión..... | 63 |
| 6.2 PRUEBAS DE EVALUACIÓN - PROTOTIPO I..... | 70 |
| 6.2.1 Conveniencia de límites..... | 71 |
| 6.2.2 Evaluación de la estructura..... | 72 |
| 6.2.3 Consistencia dimensional | 74 |
| 6.2.4 Evaluación de parámetros | 74 |
| 6.2.5 Condiciones extremas | 75 |
| 6.2.6 Error de integración | 79 |

| | |
|--|-----|
| 6.2.7 Comportamiento anómalo..... | 81 |
| 6.2.8 Análisis de sensibilidad..... | 83 |
| 6.3 PROTOTIPO II..... | 88 |
| 6.3.1 Propósito | 88 |
| 6.3.2 Restricciones | 89 |
| 6.3.3 Modelo en prosa y lenguaje de influencias | 89 |
| 6.3.4 Modelo en lenguaje de flujos y niveles..... | 92 |
| 6.3.5 Modelo en lenguaje de ecuaciones y definición de variables | 96 |
| 6.3.6 Resultados de simulación y discusión..... | 96 |
| 6.4 PRUEBAS DE EVALUACIÓN - PROTOTIPO II..... | 106 |
| 6.4.1 Conveniencia de límites..... | 106 |
| 6.4.2 Evaluación de la estructura..... | 107 |
| 6.4.3 Consistencia dimensional | 109 |
| 6.4.4 Evaluación de parámetros | 109 |
| 6.4.5 Condiciones extremas | 110 |
| 6.4.6 Error de integración | 114 |
| 6.4.7 Comportamiento anómalo..... | 116 |
| 6.4.8 Análisis de sensibilidad..... | 118 |
| 6.5 EVALUACIÓN POR ESCENARIOS – PROTOTIPO II: FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE POLÍTICAS | 124 |
| 7. INTERFAZ SOFTWARE – SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL 1.0..... | 133 |
| 7.1 ACTOR..... | 134 |
| 7.1.1 Delimitación | 134 |
| 7.1.2 Especificación..... | 135 |
| 7.2 DIAGRAMA CASOS DE USO..... | 136 |
| 7.2.1 Especificación casos de uso | 139 |

| | |
|---|-----|
| 7.3 DIAGRAMA DE ACTIVIDADES | 139 |
| 7.4 DIAGRAMA DE SECUENCIA | 140 |
| 8. EXPERIENCIA DE USO (PRUEBA DE USUARIO) | 141 |
| 8.1 DESCRIPCIÓN EXPERIENCIA | 141 |
| 8.1.1 Propósito | 141 |
| 8.1.2 Actividades | 142 |
| 8.2 MEDIOS | 143 |
| 8.3 ORIENTACIÓN PARA EL USO DE LOS MEDIOS | 143 |
| 8.4 OBSERVACIONES Y RESULTADOS..... | 144 |
| 9. DIVULGACIÓN | 147 |
| 10. CONCLUSIONES | 148 |
| 11. RECOMENDACIONES..... | 150 |
| CITAS BIBLIOGRÁFICAS | 152 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 158 |
| ANEXOS | 162 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Desarrollo Evolutivo | 54 |
| Figura 2. Modelado y simulación con la Dinámica de Sistemas – Metodología de los 5 lenguajes | 54 |
| Figura 3. Metodología general para el desarrollo del Ambiente de aprendizaje basado en la dinámica de sistemas | 56 |
| Figura 4. Diagrama de influencias prototipo I | 58 |
| Figura 5. Sector infraestructura vial prototipo I | 59 |
| Figura 6. Sector medio ambiente prototipo I | 60 |
| Figura 7. Sector población prototipo I | 60 |
| Figura 8. Sector calidad de vida prototipo I | 61 |
| Figura 9. Sector emisiones dióxido de carbono prototipo I | 61 |
| Figura 10. Sector aumento temperatura prototipo I | 62 |
| Figura 11. Mapa de sectores | 62 |
| Figura 12. Mapa de sectores – Prototipo I | 74 |
| Figura 13. Simulación índice ambiental – Pasos de integración Prototipo I | 80 |
| Figura 14. Diagrama de influencias prototipo II | 91 |
| Figura 15. Sector infraestructura vial prototipo II | 92 |
| Figura 16. Sector medio ambiente prototipo II | 93 |
| Figura 17. Sector calidad de vida prototipo II | 94 |
| Figura 18. Sector población prototipo II | 94 |
| Figura 19. Sector emisiones dióxido de carbono prototipo II | 95 |
| Figura 20. Sector aumento temperatura | 95 |
| Figura 21. Mapa de sectores prototipo II | 96 |
| Figura 22. Simulación índice ambiental – Pasos de integración Prototipo II | 116 |

| | |
|---|-----|
| Figura 23. Comportamiento anómalo – Prototipo II | 117 |
| Figura 24. Descripción interacción usuario – interfaz software – modelo | 133 |
| Figura 25. Diagrama de contexto | 135 |
| Figura 26. Diagrama de casos de uso | 137 |
| Figura 27. Pantalla principal | 171 |
| Figura 28. Simulador "conservación a través de inversión monetaria" | 171 |
| Figura 29. Simulador "conservación con inversión y políticas complementarias" | 172 |
| Figura 30. Diagrama de actividades | 139 |
| Figura 31. Diagrama de secuencia | 140 |

LISTA DE GRÁFICAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Gráfica 1. Índice ambiental estimado bajo tres escenarios de inversión en infraestructura vial..... | 65 |
| Gráfica 2. Calidad de vida bajo los tres escenarios de inversión en infraestructura vial | 67 |
| Gráfica 3. Índice de congestión vial bajo los tres escenarios de inversión en infraestructura vial..... | 68 |
| Gráfica 4. Niveles seleccionados para evaluación de estructura – Prototipo I..... | 73 |
| Gráfica 5. Simulación índice ambiental – Prototipo I..... | 76 |
| Gráfica 6. Simulación #1 condiciones extremas – Prototipo I..... | 78 |
| Gráfica 7. Simulación #2 condiciones extremas – Prototipo I..... | 79 |
| Gráfica 8. Simulación índice ambiental – Comportamiento anómalo Prototipo I ... | 82 |
| Gráfica 9. Simulación índice ambiental – Comportamiento esperado Prototipo I .. | 82 |
| Gráfica 10. Deterioro ambiental bajo diferentes escenarios de inversión vial– Prototipo I | 84 |
| Gráfica 11. Índice de congestión bajo la capacidad vial ofrecida por diferentes niveles de inversión para construcción de infraestructura de transporte – Prototipo I..... | 85 |
| Gráfica 12. Emisiones en partes por millón de CO2 en función de los índices de congestión para cada nivel de inversión en infraestructura vial– Prototipo I..... | 86 |
| Gráfica 13. Calidad de vida afectada por el multiplicador del índice ambiental para cada escenario de inversión en infraestructura vial– Prototipo I..... | 87 |
| Gráfica 14. Índice ambiental bajo diferentes escenarios de inversión destinada a su conservación–Prototipo I..... | 88 |
| Gráfica 15. Índice ambiental – Prototipo II | 97 |

| | |
|---|-----|
| Gráfica 16. Kilómetros construidos – Prototipo II | 98 |
| Gráfica 17. Emisiones en partes por millón de dióxido de carbono – Prototipo II .. | 99 |
| Gráfica 18. Índice de congestión – Prototipo II | 100 |
| Gráfica 19. Índice calidad de vida – Prototipo II..... | 102 |
| Gráfica 20. Flujos migratorios población – Prototipo II..... | 103 |
| Gráfica 21. Demanda conservación medio ambiente, demanda social construcción vías, preocupación política en inversión vial – Prototipo II..... | 104 |
| Gráfica 22. Niveles seleccionados para evaluación de estructura – Prototipo II.. | 108 |
| Gráfica 23. Nivel de emisiones de dióxido de carbono de CO2 para evaluación de estructura – Prototipo II..... | 108 |
| Gráfica 24. Índice ambiental – comportamiento de referencia condiciones extremas Prototipo II | 111 |
| Gráfica 25. Simulación #1 condiciones extremas – Prototipo II | 113 |
| Gráfica 26. Simulación #2 condiciones extremas – Prototipo II | 114 |
| Gráfica 27. Índice ambiental bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II | 118 |
| Gráfica 28. Índice de congestión vehicular bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II | 119 |
| Gráfica 29. Índice calidad de vida bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II | 120 |
| Gráfica 30. Demanda conservacionista bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II | 121 |
| Gráfica 31. Demanda social bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial..... | 123 |
| Gráfica 32. Preocupación política bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II | 124 |
| Gráfica 33. Evaluación políticas en índice ambiental– Prototipo II..... | 127 |
| Gráfica 34. Evaluación políticas en emisiones de dióxido de carbono – Prototipo II | 128 |
| Gráfica 35. Evaluación políticas en índice de congestión vehicular – Prototipo II | 129 |

Gráfica 36. Evaluación políticas demanda conservación ambiental – Prototipo II
..... 130

Gráfica 37. Evaluación políticas calidad de vida – Prototipo II..... 131

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Escenarios definidos para inversión en infraestructura – Prototipo I | 65 |
| Tabla 2. Límites Prototipo I | 71 |
| Tabla 3. Evaluación de Parámetros - Prototipo I..... | 75 |
| Tabla 4. Escenarios definidos para inversión en infraestructura..... | 76 |
| Tabla 5. Parámetros exógenos en condiciones extremas – Prototipo I | 77 |
| Tabla 6. Pasos de integración – Prototipo I | 80 |
| Tabla 7. Límites Prototipo II | 106 |
| Tabla 8. Evaluación de Parámetros - Prototipo II..... | 110 |
| Tabla 9. Escenario comportamiento de referencia..... | 111 |
| Tabla 10. Parámetros exógenos en condiciones extremas – Prototipo II | 112 |
| Tabla 11. Pasos de integración – Prototipo II | 115 |
| Tabla 12. Políticas definidas por escenarios aplicadas a Prototipo II | 126 |
| Tabla 13. Actores interfaz gráfica | 135 |
| Tabla 14. Caso de uso: Elegir simulador. | 170 |
| Tabla 15. Caso de uso: Elegir tiempo de simulación | 172 |
| Tabla 16. Caso de uso: Controlar simulación | 173 |
| Tabla 17. Caso de uso: Modificar parámetros | 174 |
| Tabla 18. Caso de uso: consultar diagrama de flujos-niveles..... | 174 |
| Tabla 19. Caso de uso: Ver diagrama de influencias..... | 175 |
| Tabla 20. Caso de uso: Descripción variables graficadas | 175 |
| Tabla 21. Caso de uso: Descripción simulador..... | 176 |
| Tabla 22. Caso de uso: Documentación general | 176 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--|-------------|
| Anexo A Ecuaciones PROTOTIPO I..... | 162 |
| Anexo B. Ecuaciones PROTOTIPO II..... | 167 |
| Anexo C. Especificación casos de uso | 170 |
| Anexo D. Guía experiencia de uso | 177 |

RESUMEN

TÍTULO:

AMBIENTE DE APRENDIZAJE Y MODELADO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN FENÓMENOS DE IMPACTO AMBIENTAL CAUSADOS POR INFRAESTRUCTURA VIAL - UN ENFOQUE DINÁMICO SISTÉMICO *

AUTOR:

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA **

PALABRAS CLAVE:

MEDIO AMBIENTE, INFRAESTRUCTURA VIAL, CONGESTIÓN VIAL, CALIDAD DE VIDA, DINÁMICA DE SISTEMAS.

DESCRIPCIÓN:

El desarrollo de infraestructura vial es considerado como variable sensible que estimula el crecimiento económico al mejorar la conectividad interna y externa de un país. Se ha demostrado entonces, que la ampliación de la capacidad instalada de infraestructura para transporte es una política que mejora la calidad de vida de las personas al disminuir elevados índices de congestión y en consecuencia, mejorar los tiempos de desplazamiento de la población donde se desarrollan estas iniciativas ingenieriles, lo cual puede incrementar el acceso a oportunidades que favorecen el desarrollo humano. Sin embargo, la consecución de estas obras ingenieriles trae consigo la preocupación de diversos gobiernos por los daños ecológicos que ellas pueden traer consigo, lo cual puede generar conflictos medio ambientales donde parte de la población reclama una mayor participación activa en la toma de decisiones frente a la planificación y desarrollo de la infraestructura vial, como manifestación de una posición conservacionista que se opone en primeras instancias a su construcción con el propósito de mantener la calidad medio ambiental. En consecuencia, el presente trabajo de grado plantea un modelo construido con dinámica de sistemas que mejora el estado de entendimiento frente al fenómeno complejo del impacto ambiental generado por el desarrollo de infraestructura vial, logrando analizar el comportamiento de diversas variables interrelacionado entre sí, que subyacen en el comportamiento de dicho fenómeno. Esto es complementando además, con la elaboración de una interfaz software para que expertos en el campo de la ingeniería civil y personas no conocedoras de dinámica de sistemas, interactúen con el modelo de forma sencilla y así, el producto del presente trabajo de grado sea un útil que pueda llegar a apoyar la toma de decisiones argumentada frente a la construcción de estas obras ingenieriles.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hugo Hernando Andrade Sosa, Magister en informática. Codirector: Jorge Andrick Parra Valencia, Doctor en ingeniería de sistemas. Angélica Corzo Hernández, Ingeniera civil.

ABSTRACT

TITLE:

LEARNING AND MODELING ENVIRONMENT FOR DECISION MAKING IN ENVIRONMENTAL IMPACT PHENOMENA CAUSED BY ROAD INFRASTRUCTURE - A DYNAMIC SYSTEMS APPROACH *

AUTHORS:

JUAN SEBASTIÁN ANGARITA ZAPATA **

KEYWORDS:

ENVIRONMENT, ROAD INFRASTRUCTURE, TRAFFIC CONGESTION, QUALITY OF LIFE SYSTEM DYNAMICS.

DESCRIPTION:

The development of road infrastructure is considered a sensitive variable that stimulates economic growth by improving internal and external connectivity in a particular country. It has been demonstrated through how expansion of the installed capacity of transport infrastructure is a policy that improves the quality of life of people by reducing high levels of congestion and thus improves travel times of the population where these engineering initiative are developed, which can increase access to opportunities that promote human development. However, achieving these engineering works brings the concern of many governments for potential ecological damage that it brings. Also, it projects can fit in the definition of environmental conflict where part of the population claims a more active participation in decision-making for the planning and development of road infrastructure, as a manifestation of a conservationist position opposing in early stages of its construction with the purpose of maintaining environmental quality. Consequently, this paper proposes a model built with dynamic systems that improves the condition of understanding in complex phenomenon of environmental impact caused by the development of road infrastructure, achieving analyze the behavior of several interrelated variables together model underlying the behavior of the phenomenon. This is further complemented with the development of a software interface for experts in the field of civil engineering and people unfamiliar system dynamics, interact with the model easily and well, the product of this work degree be a useful it can get to support decision-reasoned decisions facing the construction of these engineering works.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hugo Hernando Andrade Sosa, Magister en informática. Codirector: Jorge Andrick Parra Valencia, Doctor en ingeniería de sistemas. Angélica Corzo Hernández, Ingeniera civil.

INTRODUCCIÓN

Las repercusiones que el desarrollo de infraestructura vial tiene en el crecimiento económico son tema de discusión en diferentes países de Europa y América [1] [2] [3]. Debido al interés por demostrar los aportes que la construcción de vías trae consigo a procesos de producción y distribución de bienes y servicios, así como, sus ventajas en el mejoramiento de la calidad de vida de la población localizada en el contexto donde se desarrollan dichas iniciativas ingenieriles, al ser una solución que disminuye los índices de congestión brindando bajos tiempos de desplazamiento que le otorgan a las personas facilidades en la movilidad y acceso a oportunidades para favorecer su desarrollo humano.

En consecuencia, se ha demostrado en diferentes estudios que el mejoramiento de la infraestructura vial tiene una relación directa con la disminución de los costos de producción [4] y la generación de empleo directo. Lo cual sitúa el desarrollo vial como centro de debates económicos en diferentes gobiernos que se plantean objetivos dirigidos al desarrollo de políticas en inversión que incentiven el crecimiento de la infraestructura vial. Ejemplo de ello es el caso de países como Estados Unidos, Alemania, Japón, Reino Unido y Suecia, que han aumentado la creación de mecanismos de inversión para ampliar, mantener y conservar sus redes viales, logrando fortalecer sus economías al dotarlas de conectividad como ventaja competitiva frente a la economía de mercados globalizada que predomina en el mundo actualmente [5]. (Banco Mundial: 1994).

En este contexto, actualmente gobiernos suramericanos en compañía de instituciones estatales juntan esfuerzos por desarrollar proyectos orientados a construcción y mejoramiento de infraestructura vial, que promuevan la integración y

participación a nivel regional e internacional de las economías locales. En consecuencia, el transporte desempeña un papel activo en la rápida dinámica de desarrollo económico y social de América Latina. Sin embargo, la concentración de transporte en vehículos de combustión interna traen consecuencias negativas en congestión y contaminación¹, con lo cual, es de vital importancia desarrollar la malla vial bajo un modelo sostenible que preserve la calidad de vida de la población y el medio ambiente. El reto principal entonces, es consolidar una visión de transporte sostenible que integre múltiples compromisos regionales. Tal es el caso de la evaluación por escenarios de los impactos ambientales futuros asociados al IIRSA (Iniciativa para la Integración de la Infraestructura Regional Suramericana) en los ecosistemas de la amazonia comprendidos entre Bolivia y Perú [6].

De esta manera, con base en el trabajo realizado por Andrade, Lince & Parra [7], quienes elaboraron un modelo utilizando dinámica de sistemas para ilustrar los aspectos relevantes del impacto que el Corredor Bioceánico Ferroviario Central tiene sobre componentes socioeconómicos, ambientales y de desarrollo de la ciencia, tecnología e innovación en una vasta región suramericana comprendida entre Bolivia, Brasil y Perú; se presenta este trabajo de investigación como continuación de ello, al elegir la infraestructura vial del contexto colombiano caracterizado por iniciativas que responden a las necesidades de expansión y mejoramiento de la malla vial como respuesta, a los atrasos en la conectividad carretera del país y altos niveles de congestión en los principales corredores nacionales²; siendo entonces, un elemento que interactúa directamente con el medio ambiente y la calidad de vida de la población en función de sus necesidades de desplazamiento motorizado para la realización de actividades sociales,

¹ Transporte sostenible para América Latina: Situación actual y perspectivas. Documento de respaldo foro de transporte sostenible de América Latina 2011. Bogotá, Junio 22-24 de 2011. Organizado por el Ministerio de Transporte de Colombia, UNCRD y BID.

² Congreso Nacional del Transporte – COLFECAR. Conectividad de las ciudades. Pablo Roda, Cartagena, octubre 2014.

culturales, políticas y económicas que son consideradas necesarias para la sociedad³. En consecuencia, al profundizar en el componente medio ambiental y su deterioro causado por el desarrollo de infraestructura vial, se plantea la elaboración de un modelo para la toma de decisiones utilizando dinámica de sistemas como herramienta capaz de representar y describir las interrelaciones estructurales y comportamentales de alta complejidad que subyacen en este fenómeno.

³ Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad. Eduardo Alcántara. Dirección de Análisis y Programación sectorial de la vicepresidencia de infraestructura de CAF. Bogotá, Septiembre 2010.

1. PLANETAMIENTO DEL PROBLEMA

Acorde a la agencia medio ambiental de Estados Unidos el término conflicto ambiental se encuentra relacionada con los desacuerdos existentes en el ámbito ecológico y natural que involucran la utilización de tierras públicas o recursos naturales [8]. En este sentido, se reconoce la existencia de tres tipos de conflictos medio ambientales [9]: discrepancias entre los usuarios de determinado recurso natural, disputas entre los usuarios de un recurso natural y aquellos que se esfuerzan por conservarlo, así como, conflictos entre los diseñadores de políticas estatales en la órbita ambiental y aquellos que desean tener una mayor participación en la formulación de estas políticas para desempeñar un rol activo en la toma de decisiones. De esta manera, los proyectos enfocados al desarrollo de infraestructura vial son un ejemplo que encaja en la definición de conflicto medio ambiental, debido a que la consecución de estas obras ingenieriles promovidas por el estado entran en el dominio público de la población al modificar e influenciar el contexto y medio ambiente al cual pertenecen [10] [11]. Con lo cual, la presión pública para alcanzar un mayor grado de participación en la elaboración de políticas ambientales que garantice el desarrollo sostenible en la construcción de infraestructura vial crece constantemente, debido a que la elaboración de estudios tradicionales para evaluación de impactos naturales no presenta evidencia clara de las repercusiones que estos proyectos a mediano y largo plazo pueden traer consigo sobre la calidad de vida.

Caso particular del incremento en el desarrollo de infraestructura vial es Colombia, donde hoy día se formulan y ponen en marcha iniciativas enmarcadas en el contexto de proyectos viales, como elemento mitigador de diferencias sustanciales que presenta el territorio colombiano en términos de pobreza y subdesarrollo, las cuales han sido influenciados década tras década por condiciones de dispersión poblacional, subdesarrollo, conflictos armados, entre otros aspectos [12] [13] que

condicionan el crecimiento económico y la competitividad a nivel interno y externo del país. Esto genera como resultado niveles heterogéneos de desarrollo poblacional y condiciones socioculturales, junto con dificultades en la conectividad del sistema de transporte interno al establecer barreras geográficas que limitan el acceso y conectividad entre los mercados nacionales. Por tal motivo el estado colombiano ha centrado esfuerzos en aumentar el número total de kilómetros construidos incluyendo autovías y autopistas, carreteras principales o nacionales, carreteras secundarias o regionales, fomentando así el crecimiento y mejoramiento de la red nacional de transporte [14].

Paralelamente a estos proyectos de expansión y mejoramiento de la malla vial en Colombia, se plantean incógnitas frente al impacto real de estas iniciativas ingenieriles sobre el medio ambiente debido a sus repercusiones en los ecosistemas y biodiversidad regional a corto, mediano y largo plazo; y cómo podría llegar a afectar este impacto la sostenibilidad ambiental establecida como variable fundamental, en cada fase de estudio perteneciente a la ejecución de proyectos viales. Dicho interés en conocer los escenarios posibles del impacto ambiental, coincide con la creación de la Ley No. 1682 en la que se adoptan medidas y disposiciones para los proyectos de infraestructura para transporte; materializando el interés gubernamental por fomentar el desarrollo y crecimiento económico del país en forma sostenible garantizando la calidad de vida de las personas que habitan el contexto dentro del cual se desarrollan iniciativas ingenieriles.

De esta manera, la elaboración de estudios de impacto ambiental necesarios para el desarrollo de proyectos ingenieriles se realizan utilizando procesos de valoración sofisticados, en los cuales ha prevalecido el uso de modelos matemáticos de difícil aplicación [15], cuya implementación a su vez se convierte en una metodología con una frecuencia de uso baja debido a la alta complejidad de los mismos. Recurriendo entonces a métodos sencillos y tradicionales que relacionan linealmente causas y efectos de los impactos [16], contando así, con limitaciones para tener una visión

sistémica y completa del medio que no reconoce su complejidad determinada por las diferentes interacciones entre cada uno de los elementos ambientales relacionados entre sí a través del tiempo. Por ello, estimar repercusiones sobre elementos del medio ambiente como acontecimientos individuales y aislados que se ven afectados por causas particulares proporciona una visión incompleta de las perturbaciones reales que pueden afectar el funcionamiento normal del medio ambiente, debido a que no se determinan las causas subyacentes inmersas en el funcionamiento estructural de estos fenómenos. Los cuales, pueden ser reconocidos como sistemas para ser abordados a través del pensamiento sistémico utilizando la metodología de dinámica de sistemas como elemento recopilador de conocimiento y aprendizaje, que permite la elaboración de modelos que simulan el comportamiento del elemento ecológico cuando sobre él inciden desarrollos perturbadores de su estabilidad como es el caso de la infraestructura vial.

Así, el presente trabajo tiene por objetivo mostrar cómo el deterioro del medio ambiente generado por infraestructura vial crea una posición conservacionista por parte de la comunidad que se opone al desarrollo vial, disminuyendo la voluntad política de inversión pública que a su vez es influenciada positivamente por demandas sociales que exigen la construcción de más vías como respuesta a disminuir el índice de congestión planteado por los autores. En consecuencia, la construcción de este modelo es una herramienta útil para favorecer la toma de decisiones consciente en procesos públicos, donde diferentes actores tienen interés particulares (políticos, sociales, ambiental, económicos, entre otros) sobre el desarrollo de un proyecto vial.

2. JUSTIFICACIÓN

El aporte de la Dinámica de Sistemas (DS) se fundamenta en su interés por mejorar la comprensión y aumento del estado de entendimiento frente a fenómenos que se manifiestan en nuestro entorno y de los cuales somos parte. Por tal motivo, la DS se convierte en una herramienta útil que nos permite lidiar con la complejidad de la realidad que percibimos, al reconocer nuestro entorno como una constitución de sistemas que estructuralmente están determinados por relaciones dinámicas (realimentadas) entre infinitas variables que generan comportamientos percibidos a través de nuestras experiencias sensoriales, como observadores inmersos en dicha realidad.

Así, la propuesta de elaborar un ambiente de aprendizaje y modelado para la toma de decisiones utilizando dinámica de sistemas en fenómenos de impacto ambiental generado por infraestructura vial, es un aporte científicamente idóneo que demuestra la interdisciplinariedad e importancia de la ingeniería de sistemas al relacionar dinámica de sistemas con el elemento ecológico caracterizado por fenómenos interrelacionados de alta complejidad, que serán explicados a través de un modelo ambiental y metodologías ingenieriles útiles en la toma de decisiones frente a la planeación, organización y ejecución de proyectos viales, teniendo en cuenta su ejecución inevitable a mediano y largo plazo debido a su repercusión directa en la economía y desarrollo nacional. Por tal motivo, el modelo a desarrollar presentará varios escenarios representados en lenguaje de dinámica de sistemas para estimar las repercusiones ambientales que traigan consigo la consecución de dichas obras.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un ambiente de aprendizaje software con dinámica de sistemas para la estimación del impacto ambiental generado por el desarrollo de proyectos de infraestructura vial, que integre los principales factores involucrados en la dinámica de este fenómeno a partir de un modelo ambiental con el cual el usuario pueda interactuar para mejorar la toma de decisiones frente a la planeación, organización y ejecución de estos proyectos ingenieriles.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar a través de dinámica de sistemas (utilizando el software Evolución) el impacto ambiental generado por el desarrollo de infraestructura vial elaborando prototipos ambientales (modelos) con complejidad y cobertura creciente; que permitan analizar factores del entorno que favorecen su conservación y/o deterioro, dependiendo de la influencia de elementos físicos (bióticos y abióticos) y socioculturales (calidad de vida) pertenecientes al contexto en el cual se desarrollan las iniciativas viales.
- Implementar una evaluación por escenarios para la versión final del modelo que permita comprender y analizar las repercusiones de obras viales sobre el contexto ambiental a partir de variación de parámetros que demuestre la utilidad del modelo.
- Desarrollar un plan de pruebas para la evaluación y validación del modelo desarrollado con base en la colaboración de expertos en la temática estudiada, que permita determinar la representación y funcionamiento estructural correcto del fenómeno representado.

- Construir una interfaz software que permita a diferentes tipos de usuarios operar con el ambiente para mejorar el aprendizaje y la toma de decisiones sobre la implementación de infraestructura vial teniendo en cuenta el elemento ambiental.
- Realizar una experiencia de uso (pruebas de usuario) del ambiente software para verificar la utilidad y usabilidad del mismo.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO DE ANTECEDENTES

El desarrollo de infraestructura vial identificado como variable sensible para el desarrollo económico de un país ha sido objeto de estudio, con el objetivo de identificar claramente sus beneficios y puntos en contra dependientes del contexto donde se pongan en marcha las iniciativas viales. Por ello, desde el ámbito científico y académico se ha intentado integrar la dinámica de sistemas en el campo de la infraestructura de transporte con el objetivo de brindar bases sólidas que mejoren el estado de entendimiento frente a este fenómeno y que a su vez, permitan la formulación de políticas que maximicen los beneficios que la consecución de estas obras viales traigan consigo. Por ello en el presente capítulo se realiza una revisión de los trabajos realizados en el Grupo SIMON, así como trabajos a nivel nacional e internacional que reporten investigaciones en el campo de desarrollo de infraestructura vial.

4.1.1 Grupo SIMON. El Grupo SIMON de investigación de la Universidad Industrial de Santander durante aproximadamente 20 años, ha sido de los principales precursores de la dinámica de sistemas como herramienta integradora de conocimiento que mejora el estado de entendimiento frente a diferentes fenómenos, a través de procesos de aprendizaje. Con ello, han sido desarrollados proyectos en el campo ambiental con el objetivo de realizar aportes al conocimiento en la comprensión de la complejidad como característica principal del mundo en el cual nos encontramos.

Algunos de los trabajos realizados en el sector ambiental son mencionados a continuación:

- **Modelo del cambio global en el medio ambiente mediante la metodología de la dinámica de sistemas.** (Gélvez & Murillo, 2006)

Este trabajo presenta un modelo con dinámica de sistemas cuyo propósito principal se enfoca a entender la dinámica de cambio global resaltando la intervención de la humanidad en el sistema terrestre, usando el diagrama de Aspen como guía.

- **Micromundo de simulación para el aprendizaje de fenómenos ambientales asociados al cambio global.** (Ortiz & Vargas, 2010)

Herramienta software cuyo principal objetivo es mejorar el estado de entendimiento frente a los cambios ambientales a nivel global originados por acciones antropogénicas, para promover el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y reflexivo a cerca de esta problemática.

- **Herramienta software para el estudio de fenómenos ambientales, mediante el modelado y la simulación con dinámica de sistemas.** (Santamaria & Mendez, 2004)

Software que organiza un conjunto de artículos relacionados con la temática ambiental para ser mostrados a usuarios a través de contenidos multimedia, de tal modo que facilite el estudio en temas medio ambientales a través de la dinámica de sistemas.

Así, dentro del grupo SIMON se sienta un precedente en cuanto a trabajos de grado se refiere donde el tema medio ambiental se aborda a través del paradigma dinámico sistémico, con el objetivo de comprender la complejidad subyacente de

fenómenos ligados al ámbito ecológico. De esta manera, recientemente se dio inicio a la línea de investigación en infraestructura vial-medio ambiente abordada desde la dinámica de sistemas a través del proyecto realizado por el Profesor Hugo Andrade (Director del Grupo SIMON) titulado “Evaluación dinámica sistémica del impacto del corredor ferroviario bioceánico central” (Andrade, 2013), el cual fue desarrollado para el gobierno de Bolivia con el propósito de mejorar el estado de entendimiento frente a las repercusiones económicas, sociales y ambientales que la construcción del corredor bioceánico puede traer consigo.

4.1.2 Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Tomando los últimos cuatro Congresos Latinoamericanos de Dinámica de Sistemas (2010-2013), se realiza una revisión en busca de trabajos relacionados con el temática tratada en el presente proyecto. Los resultados son presentados a continuación:

- **Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico.** (Franco, 2010)

El objetivo de este trabajo es analizar la penetración de vehículos alternativos y el impacto que esta penetración tendrá en la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Mostrando en sus resultados que la concentración de carbono atmosférico, a pesar de que su reducción puede parecer prometedora con el cambio en las tecnologías de transporte, no basta con un solo cambio, pues la producción y emisión de CO₂ tiene otras fuentes.

Este trabajo contrasta con posibles políticas a incluir dentro del modelo desarrollado en el presente trabajo de grado, en el cual se tienen en cuenta los efectos que trae

consigo las emisiones de dióxido de carbono como efecto indirecto generado por el desarrollo de infraestructura vial.

- **Modeling for sustainable development of a peruvian river basin: a system dynamics approach.** (Rodriguez, 2012)

El presente trabajo tiene por objetivo modelar el desarrollo sostenible de una cuenca peruana. Teniendo en cuenta que diversas variables intervienen en el desarrollo sostenible de la cuenca, como la gestión del agua de la cuenca, la evolución de la población, el impacto del cambio climático, el desarrollo de la agricultura y la agroindustria. Aspectos como oferta, demanda, uso, calidad del agua, uso de la tierra entre otras, son las variables que cubre este estudio. El objetivo de este trabajo es ver las ventajas y desventajas del uso de la Dinámica de Sistemas para entender y modelar el desarrollo sostenible de la Cuenca Chira Piura, analizando diversos escenarios, así como desarrollar y proponer algunas políticas con el objeto de mejorar su desarrollo sostenible.

Este trabajo a pesar de no estar enfocado al desarrollo de infraestructura de transporte, se tiene en cuenta dentro de la revisión de antecedentes debido a que implica la construcción de una obra ingenieril que provee recursos de infraestructura básica, como es el caso de suministros hídricos. En él, se analizan los beneficios y desventajas a nivel económico, social y ambiental que trae consigo la consecuencia de dicha obra.

- **Evaluación de la necesidad de infraestructura de transporte para la disponibilidad y acceso de la papa en la ciudad de Bogotá, una mirada desde la dinámica de sistemas.** (Orjuela, 2013)

Este trabajo presenta, mediante la construcción de un modelo de dinámica de sistemas, el comportamiento dinámico de la infraestructura de transporte en la ciudad de Bogotá delimitado a la cadena de abastecimiento de la papa. Se analiza la dinámica de las relaciones entre transporte y alimentos, con el fin de establecer los requerimientos en infraestructura para ello.

Este trabajo concluye que la construcción de infraestructura de transporte como medida única para incentivar el desarrollo económico no genera las repercusiones esperadas en términos logísticos de transporte.

4.1.3 Congreso Internacional de Dinámica de Sistemas. Tomando los Congresos Internacionales de Dinámica de Sistemas en el periodo comprendido entre 2006 y 2012, se realiza una revisión en busca de trabajos relacionados con la temática tratada en el presente trabajo de grado. Los resultados son presentados a continuación:

- **Modeling the Evolution of National Road Procurement Strategies.**
(Altamirano, 2006)

Este trabajo plantea la problemática que las agencias y concesiones de transporte han descubierto frente a procedimientos de administración de contratos para la construcción de infraestructura vial. Para ello plantea el uso de una combinación de la teoría de la economía institucional y la teoría de diseño de ingeniería, con el objetivo de construir un modelo de dinámica de sistemas que puede capturar el contexto institucional y que sea capaz de indicar los escenarios probables frente al éxito o no de la construcción de estas obras ingenieriles. De esta manera este

trabajo contrasta con la decisión gubernamental de inversión para el desarrollo de infraestructura vial que en el presente proyecto se plantea como variable que estimula el aumento en el número de kilómetros construidos.

- **Environmental Conflicts, Stakeholders and a Shared Mental Model.** (Abraham, 2006)

Este trabajo presenta una visión compartida de los actores implicados en conflictos ambientales generados por el desarrollo de infraestructura vial. Con lo cual, se construye un modelo mental compartido de dichos actores del conflicto ambiental generado por el proyecto de infraestructura de transporte a gran escala en la región de Wellington de Nueva Zelanda. Los actores seleccionados en este proyecto intentaron generar un modelo común en forma de un diagrama de bucle causal. Este modelo se analiza cualitativamente para proporcionar conocimientos sobre los comportamientos posibles del sistema.

- **Simulation and Analysis of Taichung Urban Ecosystem.** (Yu-Feng Ho, 2007)

Este trabajo tiene por preocupación principal el entendimiento en el deterioro de la calidad de vida por factores como la congestión vehicular y el hacinamiento. Teniendo en cuenta consideraciones sociales, económicas y ambientales que permitan establecer un marco de referencia para políticas en pro de un desarrollo urbano sostenible. En consecuencia, este trabajo presenta similitudes con el modelo desarrollado en el presente proyecto de grado, en cuanto a las repercusiones que el deterioro ambiental y ecológico puede influenciar sobre la calidad de vida de las personas.

- **Limiting motor vehicles' CO2 emissions – a manufacturer's challenge.**
(Wansart, 2008)

Debido a las estrictas políticas incentivadas para disminuir las emisiones de dióxido de carbono en el sector transporte, este trabajo presente una visión amplia del mercado productor de vehículos para analizar diversas políticas que puedan ser implementadas para la disminución en las emisiones de este gas de efecto invernadero. Así, este trabajo es recopilado en esta sección debido a que los autores del presente trabajo de grado dentro del modelo planteado, el sector vehicular juega un rol importante como fuente que deteriora el medio ambiente.

- **The Importance of Feedback Loops Designing Environmental Policies for Sustainable Development.** (Georgiadis, 2008)

El objetivo de este artículo es evaluar el aporte que la legislación ambiental trae consigo en el desarrollo sostenible al incentivar la conservación de recursos naturales. Lo anterior encaja con la generación de políticas que se desean implementar para el prototipo 2 del presente modelo, donde se platearán escenarios con diferentes grados de conservación ambiental en contextos de construcción vial.

- **A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System.** (Armenia, 2010)

El propósito de este artículo es construir un modelo utilizando dinámica de sistemas que represente el sector privado de transporte en Estados Unidos, para simular y

prever pronósticos que permitan mantener la ventaja competitiva en términos energéticos de las empresas participantes de este sector, alcanzado así un sistema de transporte sostenible en términos económicos. En consecuencia, el planteamiento realizado en este documento es de utilidad para que los autores del presente proyecto de grado den cuenta de los beneficios económicos generados por la construcción vial.

- **Reducing CO2 Emissions due to a shift from Road to Cabotage Transport of Cargo in Brazil.** (Brito, 2011)

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el Plan Nacional de Brasil existente para la Logística y el Transporte (PNLT) enfocado a la reducción de las emisiones de CO2 en el transporte de carga nacional. Así, este trabajo considera uno de los efectos degradadores del ambiente que en el presente trabajo se definen, con lo cual es posible contrastar políticas implementadas en ambos modelos frente a la disminución en el impacto vial causado sobre el ambiente.

- **Reducing the Climate Impact of Transport – Technologies and Policies for Road Transport.** (Krail, 2012)

El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación del impacto de las políticas y estrategias para reducir las emisiones de CO2 provenientes del sector transporte a través de dinámica de sistemas.

- **The development of sustainable transports through the right logistics strategy – a system dynamics approach.** (Aschauer, 2013)

Este artículo plantea la importancia de estrategias logísticas que favorezcan el desarrollo sostenible del transporte terrestre a través de la dinámica de sistemas. Así, este trabajo sirve como referente para la elaboración de políticas que puedan reducir los impactos generados por el desarrollo de infraestructura vial con las emisiones de dióxido de carbono.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Impacto Ambiental. El Medio Ambiente es el conjunto de factores físico-naturales, estéticos, culturales, sociales y económicos que interaccionan con el individuo y con la comunidad en que vive; siendo además fuente de recursos que abastece al ser humano de materias primas y energía necesarias para su desarrollo. Ahora bien, sólo una parte de estos recursos es renovable y se requiere, por tanto, un tratamiento cuidadoso para evitar que un uso desmedido de estos conduzca a una situación de daño irreversible. Con lo cual, las acciones humanas de desarrollo ingenieril afectan directamente los ecosistemas al ocasionar perturbaciones que modifican en diferentes niveles la evolución natural y la sostenibilidad ambiental. Por ende, la evaluación de impacto ambiental ha sido concebida desde su origen como un conjunto ordenado, coherente y reproducible de antecedentes calificados que permiten tomar decisiones informadas en relación a las implicaciones ambientales positivas y negativas que desencadena una acción humana [17].

En consecuencia a lo anteriormente mencionado, en el marco de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo que se realizó en Río

de Janeiro (Brasil) en 1992, se acordó que en calidad de instrumento nacional se emprendería una evaluación del impacto ambiental de cualquier actividad que pudiera producir consecuencias negativas en el medio ambiente [18] como responsabilidad de la autoridad competente. Con lo cual, países de la región han dirigido esfuerzos para establecer una institucionalidad que aborde la temática ecológica, apoyando lineamientos de política ambiental con carácter preventivo y diseño de instituciones con competencias ambientales específicas para introducir un conjunto de instrumentos de gestión ambiental destinados a aplicar dichas políticas. En este contexto, desde hace al menos dos décadas, distintos países de América Latina y el Caribe se encuentran impulsando la instalación de Sistemas de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), como uno de los instrumentos claves para la prevención de posibles impactos ecológicos derivados de acciones humanas.

En el contexto colombiano, funciona el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) como entidad pública de orden nacional rectora en materia de gestión ambiental y recursos naturales, que promueve el desarrollo sostenible, la protección del patrimonio natural y el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano, realizando Estudios de Impacto Ambiental (EIA) como instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental debido a su impacto sobre el ecosistema [19]. Los estudios ambientales conjuntamente con los planes de ordenamiento territorial, son instrumentos apropiados para incorporar la dimensión ambiental en la planificación del desarrollo [20], dentro de los cuales se pretende observar los factores que se ven más afectados a causa de procesos específicos, realizando una evaluación por escenarios que estime el impacto de un proyecto ingenieril sobre el medio ambiente, al establecer una diferencia entre la situación futura del entorno si se ejecuta el proyecto, frente a una situación futura del mismo entorno donde no se ejecuta el proyecto.

4.2.2 Pensamiento Sistémico. El movimiento de sistemas se ha venido consolidando desde la segunda mitad del siglo XX, como un movimiento científico que ofrece una plataforma de pensamiento para abordar la diversidad dentro de un marco de unidad [21] y así, brindar una visión sistémica del mundo que permita reconocer los diferentes fenómenos como sistemas complejos que continuamente esta interactuando a diferentes niveles de resolución, desde su estructura interna, hasta la interacción a gran escala de múltiples sistemas en los cuales el ser humano se encuentra inmerso y cuya comprensión se vuelve un elemento de vital importancia para poder alcanzar un desarrollo sostenible en todos los aspectos ligados a la humanidad (ciencia, tecnología, economía, sociedad, entre otros). En consecuencia, el Pensamiento Sistémico se expresa de diversos modos a través de sus distintas vertientes (Teoría general de sistemas, ingeniería de sistemas, cibernética organizacional, entre otras) donde la dinámica de sistemas es una de ellas al cumplir el rol de marco conceptual que utiliza el modelado de sistemas como elemento para la representación de fenómenos naturales sobre los cuales se desea mejorar el conocimiento mediante constante aprendizaje.

4.2.3 Dinámica de Sistemas. La dinámica de sistemas es una disciplina académica creada en los años 60 por el Doctor Jay Forrester del Instituto Técnico de Massachusetts, originalmente enfocada a las ciencias de administración e ingeniería. Década tras década se ha desarrollado gradualmente como una herramienta útil en el análisis de sistemas complejos expresados como fenómenos en áreas sociales, económicas, físicas, químicas, biológicas y ecológicas [22] [23]. En el campo de la dinámica de sistemas, un sistema se define como una colección de elementos que continuamente interactúan a través del tiempo (condición dinámica) formando un todo unificado. El modelo fundamental de interacción entre los elementos de un sistema es llamado la estructura del sistema.

La dinámica de sistemas provee una herramienta de aprendizaje y comunicación de conocimiento a través del modelado, siendo posible reconocer fenómenos de alta complejidad que conforman nuestra realidad y que son expresados a través de sistemas. Permitiendo de esta manera, modificar constantemente los modelos mentales (propios de cada observador) que representan la estructura de estos fenómenos evaluando e interpretando su comportamiento dinámico.

4.2.4 Ingeniería del Software. Los desarrollos software contemporáneos que soportan continuos avances tecnológicos informáticos involucrados en diferentes áreas del desarrollo humano tal como economía e industria, necesitan determinadas características o atributos (eficiencia, confiabilidad, usabilidad, mantenibilidad, entre otros) que garanticen su calidad y buen diseño para lograr una conformidad con los requerimientos que los usuarios solicitantes de la solución software establecen.

La noción de ingeniería del software fue propuesta inicialmente en 1968 durante el contexto de la crisis del software [24] demarcada por el desarrollo hardware creciente; y una débil respuesta en el desarrollo informal de aplicaciones que soportaran las necesidades computacionales surgidas en este contexto. En consecuencia, el software resultante debía ser de órdenes de magnitud más grande y más complejo que los sistemas de software previos. A lo cual, se consolida la Ingeniería de Software como disciplina perteneciente a ingeniería que comprende todos los aspectos de la producción de software desde las etapas iniciales en la especificación de requisitos del sistema hasta el mantenimiento de éste después de su utilización. Siendo entonces necesario adoptar un enfoque sistemático y organizado de una metodología de desarrollo en particular, que permita producir software de alta calidad caracterizado por la satisfacción de las necesidades de cliente y usuario.

4.2.5 Herramientas de modelado y simulación. Actualmente, existen diferentes herramientas informáticas para modelado y simulación utilizando dinámica de sistemas, cuya principal función es representar dinámicamente las relaciones definidas en una hipótesis dinámica. A continuación, se da una breve descripción de opciones contemporáneas en cuanto a software de simulación existente se refiere:

4.2.5.1 Dynamo. Dynamo fue el programa creado por Jay Forrester en el MIT a finales de la década de los cincuenta para construir los primeros modelos de simulación dinámica. Posteriormente, se puso en circulación una versión de Dynamo para Windows, el Dynamo Plus, pero que en realidad seguía trabajando en el sistema MS-DOS. La mayor parte de los modelos de dinámica de sistemas construidos hasta principios de la década de los noventa estuvieron implementados en Dynamo o Dynamo-Plus.

4.2.5.2 Stella e IThink. Introducidos inicialmente para Macintosh en 1984, Stella se orienta a aplicaciones y usos académicos mientras Ithink es la herramienta de modelado y simulación más utilizada en el ámbito profesional y empresarial. Ambos softwares están disponibles para computadores Macintosh y Windows.

4.2.5.3 Powersim. Creado por la compañía noruega Powersim AS, con sede principal en la ciudad Bergen, es un ambiente totalmente integrado para desarrollar y ejecutar modelos de simulación en la Plataforma Microsoft Windows. Powersim tiene diferentes tipos de herramientas de simulación que cubren todas las necesidades para desarrollar modelos, ejecutar simulaciones y realizar análisis en profundidad utilizando dinámica de sistemas.

4.2.5.4 Vensim. Desarrollado en la década de los 80, Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. Vensim proporciona una forma simple y flexible de crear modelos de simulación, sean con diagramas causales o con diagramas de flujos.

4.2.5.5 Evolución. Software desarrollado en el Grupo de Investigación SIMON adscrito a la escuela de ingeniería de sistemas de la Universidad Industrial de Santander. Evolución permite al usuario la construcción y edición de modelos utilizando dinámica de sistemas a través de diferentes representaciones, tal es el caso de diagramas de influencias y diagramas de flujos y niveles, los cuales con la definición de ecuaciones para las variables creadas permite realizar simulaciones de comportamientos. Vale la pena resaltar que este es el software elegido para el desarrollo del modelo dinámico sistémico planteado en el presente proyecto.

4.3 MARCO CONCEPTUAL

A continuación se definen una serie de conceptos utilizados a lo largo del presente trabajo de grado, los cuales se encuentran ligados al propósito del mismo.

4.3.1 Diagrama de influencias. Lenguaje de representación de modelos de simulación dinámico sistémicos a través de los cuales se plasma esquemáticamente la hipótesis dinámica de trabajo inicial. En este diagrama se incluyen las variables que serán tenidas en cuenta dentro del modelo a construir relacionadas entre sí, a través de flechas.

4.3.2 Diagrama de Forrester o flujos y niveles. Diagrama característico de la Dinámica de Sistemas. Es una traducción del diagrama de influencias a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y realizar análisis de sensibilidad. Los "Niveles" son elementos que representan una acumulación y varían solo en función de otros elementos denominados "Flujos". Los "Flujos" son elementos que pueden definirse como funciones temporales, los cuales recogen las acciones resultantes de las decisiones tomadas en el sistema, determinando las variaciones de los niveles. Las "Variables auxiliares" y las "Constantes" son parámetros que permiten una visualización mejor de los aspectos que condicionan el comportamiento de los flujos.

4.3.3 Infraestructura vial. Infraestructura de transporte terrestre representada por kilómetros lineales construidos, que para el caso particular de este proyecto se definen como vías de doble calzada con una relación de capacidad vial para ofrecer un servicio óptimo de 37.500 vehículos por cada tramo de 150 kilómetros (Aproximadamente 250 vehículos por kilómetro).

4.3.4 Índice ambiental. Índice cualitativo que representa el estado del medio ambiente. Se define para él un intervalo abierto de valores entre 0 y 100, donde 100 representa un estado óptimo y valores inferiores a él, hacen alusión a deterioro ambiental. (Es importante resaltar que valores superiores a 100 bajo la evaluación de este índice cualitativo, representa un excelente estado de conservación ambiental bajo los supuestos establecidos por los autores del presente trabajo).

4.3.5 Infraestructura social. Infraestructura estimulada por inversión estatal para la construcción de hospitales, colegios, servicios públicos, entre otros elementos que otorgan a la población condiciones de salubridad mínimas, así como un entorno que estimulan el desarrollo humano.

4.3.6 Capacidad vial. Número de vehículos que la infraestructura vial construida puede soportar, manteniendo un nivel de servicio óptimo (circulación vehicular sin congestión).

4.3.7 Índice de congestión. Índice cualitativo que relaciona la capacidad vial disponible con el número de vehículos existentes, para determinar el nivel de servicio vial en cada instante de la simulación. Este índice puede presentar valores inferiores a uno, lo cual representa un estado óptimo de servicio; un valor igual a uno representa la existencia de un estado de congestión y valores superiores a uno, representan un alto índice de congestión que dificulta la circulación. (Lo anteriores bajo los supuestos establecidos por los autores del presente trabajo de grado.)

4.3.8 Partes por millón. Unidad de medida con la que se evalúa la concentración. Se refiere a la cantidad de unidades de una determinada sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto.

5. METODOLOGÍA

5.1 DINÁMICA DE SISTEMAS COMO PARADIGMA DE PENSAMIENTO

La elaboración de estudios de impacto ambiental necesarios en el desarrollo de proyectos ingenieriles, está dirigida a la formulación de evaluaciones construidas bajo un modelo de pensamiento reactivo, limitado a identificar eventos inmediatos producto de la consecución de estas obras civiles como relaciones causales unidireccionales. De esta manera, bajo esta lógica de pensamiento para tomar decisiones frente a la puesta en marcha o no de iniciativas viales, las consecuencias ambientales derivadas de ello son evaluadas y estimadas en función de relaciones lineales de causas y efectos, que arrojan estimaciones o valoraciones interpretadas en diversos ordenes de magnitud para saber qué tan grave o no podría ser el daño ambiental generado por la construcción de kilómetros viales.

Algunas técnicas utilizadas actualmente para realizar evaluaciones de impactos ambientales, son mencionadas a continuación: (Conesa, 2006)

- **Sistemas de red y gráficos:**
 - *Matrices causa-efecto:* Son métodos cualitativos y preliminares para valorar diversas alternativas de un mismo proyecto. Cada cuadrícula de interacción se dividirá en diagonal, haciendo constar en la parte superior la magnitud, M (extensión del impacto) precedido del signo + o -, según el impacto sea positivo o negativo en una escala del 1 al 10 (asignando el valor 1 a la alteración mínima y el 10 a la máxima). La sumatoria por filas indicará las incidencias del conjunto sobre cada factor ambiental y por tanto, su fragilidad ante el proyecto. La suma

por columnas dará una valoración relativa del efecto que cada acción produciría en el medio y por tanto, su agresividad.

- *Lista de chequeo:* Sirven primordialmente para llamar la atención sobre los impactos más relevantes que puedan tener lugar como consecuencia de la realización del proyecto. Sobre una lista de efectos y acciones específica se marcarán las interacciones más relevantes, bien por medio de una pequeña escala que puede ir de +2 a – 2. Estas listas irán acompañadas de un informe detallado de los factores ambientales considerados.
- *Método del CNYRPAB (Departamento de Desarrollo y Planificación Regional del Estado de Nueva York):* Se utilizan dos matrices, la primera de las cuales relaciona las condiciones iniciales del ambiente y el estado de los recursos naturales con las posibles acciones sobre el medio. Se marcan las cuadrículas a las que corresponde un impacto directo y se les califica con un número de orden. Estos impactos calificados se interrelacionan entre ellos mediante el empleo de una segunda matriz con objeto de identificar los impactos indirectos. Así pues, se destacan los impactos directos e indirectos que produce una determinada acción y también a la inversa, es decir, se pueden analizar las causas que dan lugar a un impacto dado. Es estático, ya que no se incluye la variable tiempo.
- *Método Sorensen:* En este método, los usos alternativos del territorio se descomponen en un cierto número de acciones, referidas a las condiciones iniciales del área objeto de estudio, determinando las condiciones finales una vez estudiados los efectos utilizando para ello varias tablas y gráficas; es decir:

- Una tabla cruzada: usos-acciones.
 - Una tabla cruzada: acciones-condiciones iniciales.
 - Un gráfico:
 - condiciones iniciales - condiciones finales.
 - efectos múltiples - acciones correctivas.
- *Método del Banco Mundial:* En esta metodología, los objetivos se fijan en la identificación y medición de los efectos de los proyectos sobre el medio ambiente señalando los puntos generales que sirven de base para analizar las posibles consecuencias del proyecto, indicando la información precisa y el tipo de experiencia necesaria que se requieren para estudiar con profundidad los aspectos ambientales de los diferentes proyectos y proporcionando una estructura para la formulación de procedimientos y pautas para el examen y la consideración sistemática de los factores ambientales.
- **Sistemas Cartográficos:**
 - *Superposición de transparentes:* Se trata de la elaboración de mapas de impacto obtenidos matricialmente. Se realiza una superposición de los mismos en los que se señalarán con gradaciones de color los impactos indeseables.
 - *Método Mc Harg:* Parte de una descripción ecológica del lugar, tratando de evaluar las posibilidades de ordenación o planificación y las consecuencias de éstas sobre el medio ambiente, preocupándose especialmente que los procesos biológicos consten como criterios restrictivos y orientadores en la planificación territorial.

Este método consiste en hacer un inventario mapificado de los siguientes factores: Clima, geología, fisiografía, hidrología, suelos, flora, fauna y uso actual del suelo. Seguidamente se interpretan los datos del inventario en relación con las actividades o acciones objeto de localización y se traduce en mapas específicos para cada una de las actividades, que son fundamentalmente agricultura, recreación, silvicultura y uso urbano, atribuyendo valores a los procesos. Comparando los usos objeto de localización entre sí, se obtiene una matriz de incompatibilidades y se sintetizan estos datos en un mapa de capacidad o adecuación. También realiza paralelamente un inventario económico y de visualización del paisaje que, junto con la matriz de adecuación, permite a la autoridad competente instrumentar la planificación.

- *Método Tricart*: El objetivo principal de este método es recoger una serie de datos y conocimientos científicos para comprender la dinámica del medio natural y destacar las zonas y factores que pueden limitar determinados usos del territorio.

- **Métodos basados en indicadores, índices e integración de la evaluación:**

- *Método de Holmes*: Este método se basa en el hecho de que muchos de los parámetros utilizados para los estudios medioambientales no son cuantificados, con lo cual, el empleo de indicadores numéricos no es válido. Así pues, la evaluación vendrá dada por un juicio subjetivo de un equipo evaluador. Los factores ambientales se clasificarán por orden de importancia, se comparan cualitativamente las variantes del proyecto por medio de un parámetro previamente seleccionado,

eligiendo la mejor variante en función de su importancia y de su posición respecto a los factores ambientales.

- *Método de la Universidad de Georgia:* Consiste en agregar los valores de 56 componentes ambientales marcando su importancia relativa. Para cada componente se emplean dos valores, uno para la situación presente y otro para la futura. Permite considerar simultáneamente el presente y el futuro, así como soluciones alternativas.

En consecuencia, la revisión y análisis de los métodos tradicionales usados para realizar evaluaciones y estimaciones de impactos ambientales, no garantizan un entendimiento completo de las implicaciones que la consecución de obras viales pueda traer sobre el ámbito ecológico. De esta manera, un enfoque alternativo para las estimaciones de impactos ambientales podría ser la elaboración de modelos prospectivos a partir de los cuales sea posible anticipar repercusiones, con base en datos estadísticos que demarquen alguna tendencia de comportamiento. Pero es en este punto donde la diversidad característica de la órbita ambiental constituida por elementos bióticos y abióticos entrelazados entre sí a través de complejas relaciones naturales, evita plantear la existencia de tendencias en patrones de comportamientos generados por construcción vial para definir proyecciones de los impactos esperados.

Por lo tanto, con evaluaciones tradicionales y la elaboración de modelos prospectivos para la estimación de impactos ambientales generados por el desarrollo de infraestructura vial, no se encuentran respuestas satisfactorias que permitan conocer los elementos estructurales que conforman la dinámica de estos fenómenos; ello implica entonces, un estado de desconocimiento frente a políticas que garanticen la sostenibilidad de proyectos viales, ya que su impacto solo se identifica como un evento superficial que ignora el por qué suceden los

comportamientos que emergen y son percibidos por los individuos como observadores de este fenómeno.

En consecuencia, es el paradigma dinámico sistémico el que nos da una visión holística frente a los impactos ambientales causados por la construcción vial, al enfocar su principal preocupación sobre el entendimiento profundo de cuales causas y efectos relacionados cíclicamente en estructuras complejas, son las que generan los comportamientos que observamos. Es así como podemos llegar a entender de qué forma el deterioro ambiental repercute sobre la calidad de vida de la población, la cual en un inicio busca ser incentivada a través del desarrollo vial. De esta manera, es a través de la dinámica de sistemas que podemos plantear estructuras cíclicas causales influenciadas entre sí, para generar comportamientos simulados que a través del modelado de complejidad creciente se asemeje cada vez más a los comportamientos observados en relación al impacto ambiental como fenómeno que se manifiesta tras la consecución de obras viales. Pero, ¿Cuál sería entonces el beneficio de la dinámica de sistemas como paradigma de pensamiento para abordar la temática ambiental?. Esto facilitaría una metodología para la intervención de políticas que favorezcan la sostenibilidad ambiental frente al desarrollo imperativo de iniciativas viales debido al contexto económico donde Colombia actualmente se encuentra. Ejemplo de ello, es lo planteado por Andrew Ford en su libro “Modeling the Environment”, donde ilustra como el desarrollo económico desencadena acciones antropogénicas que intervienen directamente los ecosistemas naturales, los cuales por su característica física pueden ser representados a través de metodologías de modelado y simulación. Es allí, donde estos fenómenos ambientales se conciben como sistemas representados a través de modelos, cuyas estructuras cíclicas causales o de realimentación representan hipótesis dinámicas que se asemejan a los comportamientos observados.

Es así, como estas explicaciones o hipótesis dinámica de los daños ambientales generados por construcción vial van tomando validez a medida que el proceso de modelamiento transcurre con la contrastación constante de los comportamientos fenomenológicos observados del desarrollo vial. De esta manera, el presente proyecto de grado aborda el paradigma de la dinámica de sistemas como paradigma de pensamiento idóneo para desarrollar la estimación del impacto ambiental comprendiendo que estructuras realimentadas favorecen o no su conservación, bajo la puesta en marcha de iniciativas ingenieriles de transporte identificado como elemento generador de efectos directos e indirectos que influyen el componente ambiental.

5.2 DINÁMICA DE SISTEMAS COMO METODOLOGÍA DE MODELADO Y SIMULACIÓN

Al abordar la problemática ambiental generada por el desarrollo de infraestructura vial desde el paradigma dinámico sistémico, se convierte en una necesidad imperante crear una imagen que describa el fenómeno tal cual percibimos. Dicha imagen hace alusión al modelo mental que tenemos del fenómeno y bajo el cual las acciones de evaluación ambiental y conservación se direccionan. Pero es en este punto donde aparece la mayor dificultad, debido a que no hay conciencia plena por parte de los observadores del fenómeno, frente a cuál es el modelo mental y cómo podemos reformularlo en función de las acciones que se toman. Por este motivo, en el presente trabajo de grado se recurre a la dinámica de sistemas como metodología de trabajo debido a las herramientas que ofrece para expresar dicha imagen mental mediante un modelo visible y explícito. Con lo cual, es posible llevar a cabo un proceso de modelado y simulación basado en el aprendizaje que mejora la comprensión dinámico sistémica del fenómeno, al plantear una hipótesis causal que cumple una función explicativa en términos estructurales de las repercusiones

directas e indirectos que el desarrollo vial genera sobre el medio ambiente y como a su vez, hay un decremento en la calidad de vida de la población.

Así, adoptando la dinámica de sistemas como metodología de trabajo es posible simular posibles futuros en diferentes escenarios bajo la hipótesis inicial planteada, a partir de la cual se cimienta la construcción de un modelo explícito con ciclos realimentados, flujos y niveles que funciona de filtro entre el modelo mental de los observadores y el fenómeno que se percibe, incrementando de esta manera el estado de entendimiento frente a la implementación de políticas para mitigar el impacto ambiental.

En consecuencia, al definir la dinámica de sistemas como metodología de trabajo, se procede a evaluar las características de la naturaleza del fenómeno que en el presente trabajo de grado es objeto de estudio, algunas de ellas son mencionadas a continuación:

- Existencia de retardos en el deterioro ambiental generado por el desarrollo vial debido a que la consecución de dichas obras ingenieriles no tiene una característica de aparición o construcción inmediata.
- Procesos de conservación ambiental que llevan implícitos tiempos de retardo donde las políticas de contingencia paralelas al desarrollo vial no tienen un efecto inmediato sobre el estado del medio ambiente.
- Problemáticas emergentes de congestión vial tras la construcción de infraestructura para transporte terrestre, debido al incremento de automóviles en circulación tras la mayor disponibilidad de vías. Lo cual puede ser considerado como un efecto emergente que desde un paradigma de pensamiento unidireccional, no es tenido en cuenta.
- Evaluación de la infraestructura vial como fuente generadora de efectos indirectos que deterioran el índice ambiental. Tal es el caso de la emisión de

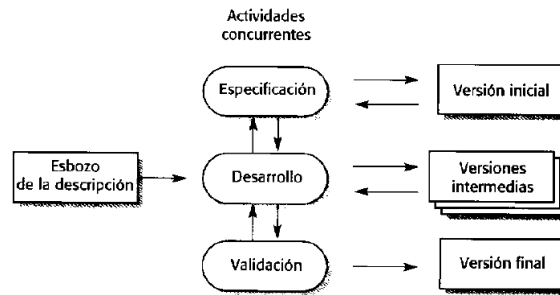
gases de efectos invernadero a consecuencia de los altos niveles de congestión vial.

De esta manera, las características del fenómeno descritas anteriormente en su gran mayoría pueden ser identificadas gracias a la adopción de la dinámica de sistemas como paradigma y metodología de trabajo, debido a que modelos de pensamiento tradicionales no evalúan ni ponen a consideración las estructuras causales subyacentes del fenómeno que hacen emerger diversos comportamientos, que en algunas ocasiones no pueden ser percibidas bajo simple observación o bajo evaluaciones de causa-efecto unidireccionales.

5.3 METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL AMBIENTE DE APRENDIZAJE

Tras realizar una revisión de las metodologías para desarrollo software existentes, fue elegido el enfoque evolutivo para el ambiente software a realizar en el presente proyecto. Ya que dicha metodología contempla el diseño y el refinamiento de una implementación o prototipo inicial, el cual es expuesto continuamente a comentarios de usuarios durante un determinado número de ciclos hasta obtener un producto adecuado a las necesidades del usuario.

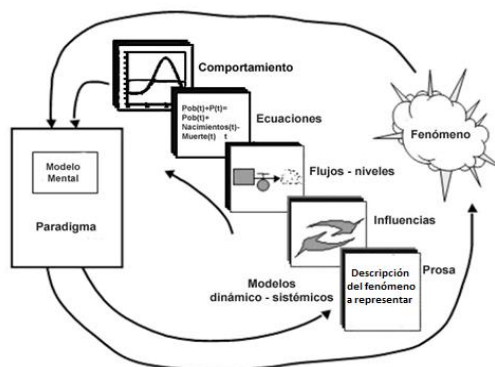
Figura 1. Desarrollo Evolutivo



Fuente: SOMMERVILLE, Ian. Ingeniería del Software. España: Pearson Education, S.A., Madrid, 2005.

El Ambiente software a desarrollar con el enfoque evolutivo facilitará la interacción del usuario con el modelo y cada uno de sus subsistemas; los cuales serán desarrollados en forma evolutiva teniendo en cuenta la complejidad creciente que tenga cada modelo planteado como prototipo, cuyo proceso de construcción interna estará orientado por la metodología de los “Cinco Lenguajes” planteada por el grupo SIMON de investigaciones en el libro Pensamiento Sistémico. (ver Figura 2)

Figura 2. Modelado y simulación con la Dinámica de Sistemas – Metodología de los 5 lenguajes

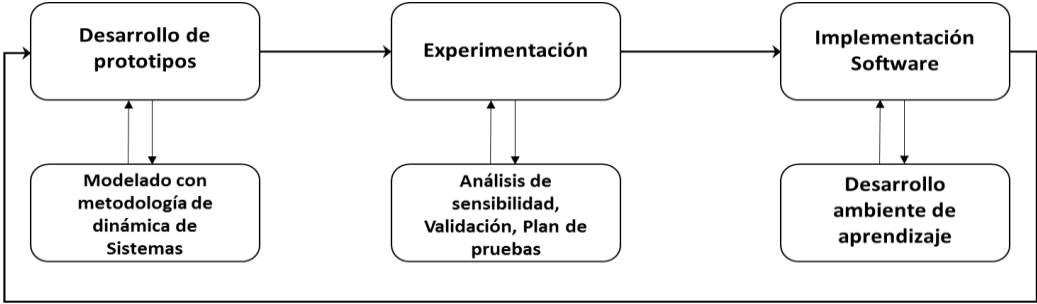


Fuente: Andrade, Hugo y Otros. Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad Bucaramanga. 2001

Con base en la Figura 2, inicialmente se realiza el reconocimiento del fenómeno que para este caso particular es el impacto ambiental influenciado por el desarrollo de infraestructura vial (lenguaje en prosa), del cual se tiene un modelo mental inicial que representa y filtra la interacción con dicho fenómeno. Posteriormente se da inicio a la revisión bibliográfica y literaria que incrementa la conceptualización entorno a la temática que involucra el fenómeno en estudio, con el objetivo de formular una hipótesis dinámica que muestre a través de lenguajes gráficos (diagrama de influencias y diagrama de flujo-nivel) las diferentes interacciones estructurales entre los elementos del sistema representado con el modelo, facilitando su comprensión en términos de complejidad; a lo cual paralelamente se plantea un lenguaje matemático de ecuaciones diferenciales que conjuntamente con el uso de simulación por computador, permite la interacción constante con el modelo, probando así, alternativas de acción sobre el sistema caracterizadas por la variación de parámetros para facilitar el planteamiento de diferentes escenarios futuros, lo cual mejora la toma de decisiones con base en el conocimiento adquirido a través de aprendizaje continuo generado por la constante interacción entre modelado y fenómeno que permite la reformulación y evaluación constante del modelo mental (paradigma mental), que permite cumplir con el propósito dinámico sistémico al relacionar directamente el fenómeno en estudio con su respectivo modelo mental planteado por el investigador para ser reformulado de forma constante.

De esta manera, el desarrollo general del ambiente de aprendizaje soportado en dinámica de sistemas será ejecutado bajo el marco de desarrollo evolutivo que simultáneamente debe incluir la metodología de los 5 lenguajes (ver Figura 3) para llevar a cabo la elaboración de los modelos con los cuales el usuario interactuará a través de la interfaz software a desarrollar. Donde la fase de experimentación permitirá realizar pruebas finales de evaluación que arrojarán resultados sobre los cuales se regresa a modificar el modelo inicial, durante un número de iteraciones determinado hasta tener un producto final satisfactorio.

Figura 3. Metodología general para el desarrollo del Ambiente de aprendizaje basado en la dinámica de sistemas



6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO UTILIZANDO DINÁMICA DE SISTEMAS

6.1 PROTOTIPO I

6.1.1 Propósito. El objetivo de este prototipo I es demostrar la correlación negativa existente ente desarrollo de infraestructura vial y deterioro del medio ambiente.

6.1.2 Restricciones

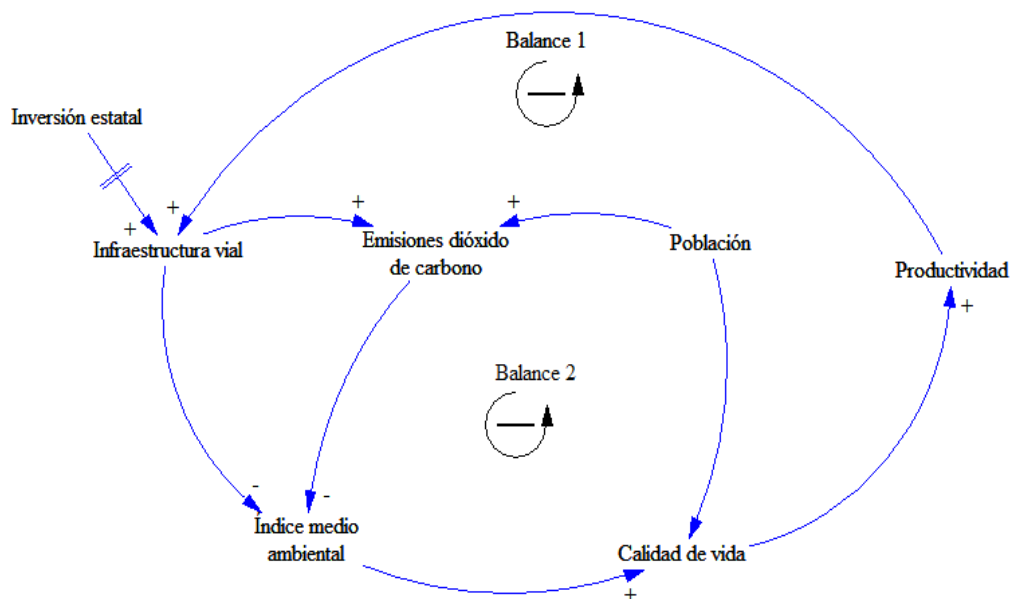
- Este prototipo I del modelo no cuenta con la inclusión de retardos, lo cual genera que algunos eventos considerados dentro de la hipótesis dinámica ocurran instantáneamente al inicio de la simulación. Ejemplo de ello es la construcción de kilómetros viales, los cuales se construyen de forma inmediata desde el primer instante de simulación.
- Para este prototipo I no se consideran dentro de la hipótesis dinámica algunos beneficios económicos que el desarrollo de infraestructura vial puede traer consigo. Tal es el caso de la generación de empleo que repercute de forma positiva sobre el indicador de calidad de vida afectado por el índice ambiental.

6.1.3 Modelo en prosa y lenguaje de influencias. La hipótesis de trabajo inicial describe el comportamiento base del modelo. Dicha hipótesis dinámica es mostrada en la Figura 4 y en ella se identifican dos ciclos de realimentación que participan en el comportamiento del modelo a través del tiempo. Además, es importante resaltar la característica exógena que presenta la inversión estatal cuyo aumento o

disminución está sujeto a decisiones gubernamentales que afectan de forma directa el crecimiento de infraestructura vial para transporte. Para la estructura del diagrama causal se aprecian dos ciclos de realimentación negativa. Estos ciclos causales son descritos a continuación:

Ciclo de Balance 1: en este ciclo interviene infraestructura vial, índice ambiental, calidad de vida y productividad. Un incremento en la construcción de infraestructura vial incrementa el deterioro del índice ambiental, lo que a su vez desencadena una disminución en la calidad de vida de la población, con lo cual hay un decremento en la productividad que atenúa la construcción de kilómetros de infraestructura vial.

Figura 4. Diagrama de influencias prototipo I



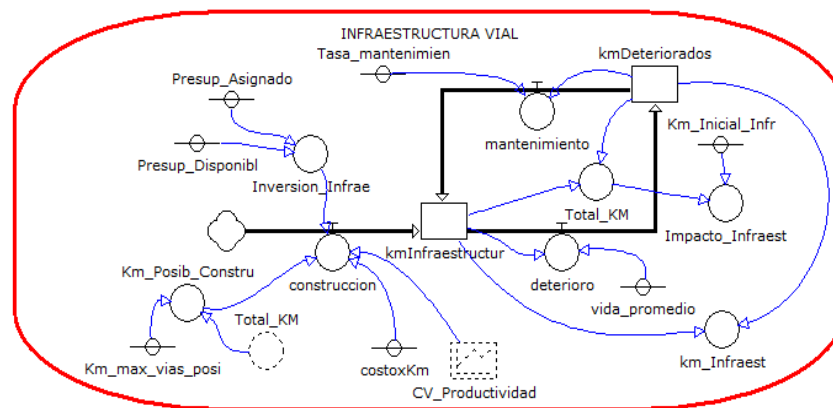
Ciclo de Balance 2: En este ciclo participa infraestructura vial, emisiones de CO₂, índice ambiental, calidad de vida y productividad. El desarrollo de infraestructura

vial genera un aumento en las emisiones de dióxido de carbono lo cual disminuye el índice ambiental, que a su vez atenúa la calidad de vida de la población, desencadenando una disminución en la productividad, que reduce en determinada proporción la construcción de kilómetros de infraestructura vial.

6.1.4 Modelo en lenguaje de flujos y niveles. Acorde a lo consignado en la hipótesis dinámica inicial se realiza la representación del modelo en lenguaje de flujos y niveles, definiendo una serie de sectores que contienen los elementos principales para el prototipo I. Cada de los sectores es descrito a continuación:

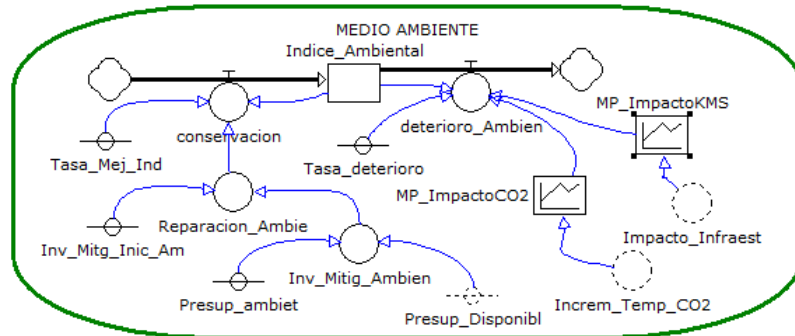
- **Sector infraestructura vial:** construcción, deterioro y mantenimiento de la infraestructura vial de transporte expresada en kilómetros lineales.

Figura 5. Sector infraestructura vial prototipo I



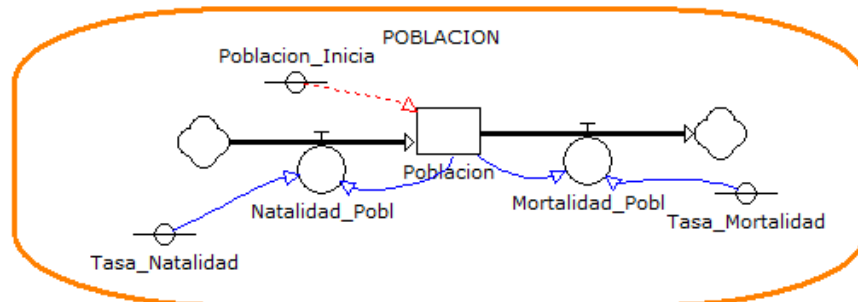
- **Sector medio ambiente:** representa el estado global del medio ambiente, reconociendo sus procesos de conservación y deterioro a causa del desarrollo de infraestructura vial.

Figura 6. Sector medio ambiente prototipo I



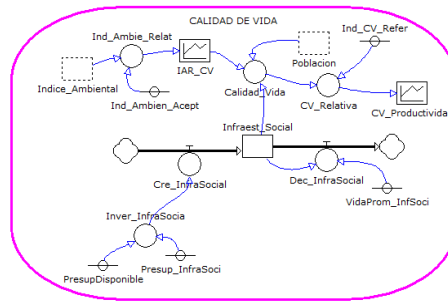
- **Sector población:** reproduce la dinámica poblacional básica incluyendo natalidad y mortalidad.

Figura 7. Sector población prototipo I



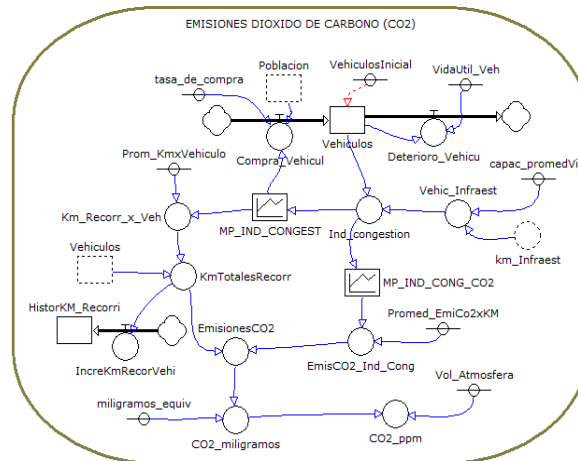
- **Sector calidad de vida:** representa la influencia de la inversión en infraestructura social y el índice ambiental sobre la población y cómo a su vez, repercute sobre el nivel de productividad dirigido al crecimiento de infraestructura vial.

Figura 8. Sector calidad de vida prototipo I



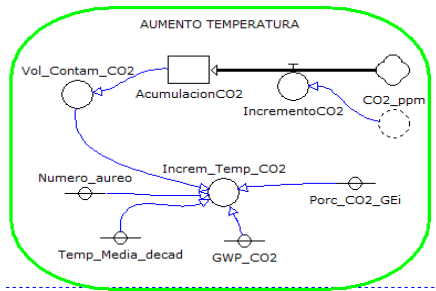
- **Sector emisiones de dióxido de carbono – CO2:** representa las emisiones de CO2 como consecuencia del flujo vehicular ligado al desarrollo y construcción de infraestructura vial de transporte.

Figura 9. Sector emisiones dióxido de carbono prototipo I



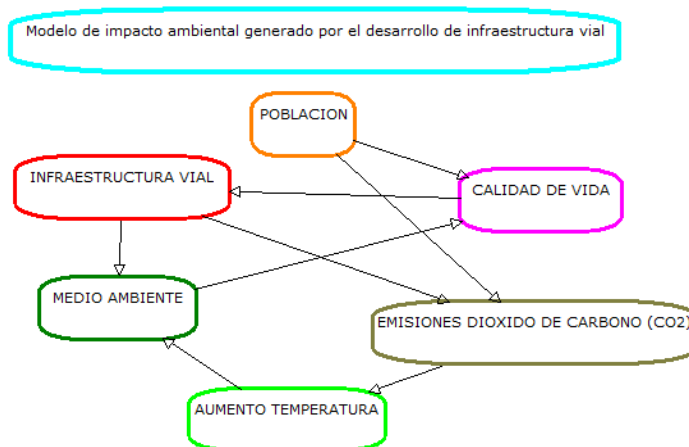
- **Sector aumento temperatura:** reproduce el aumento de la temperatura general a causa de la emisión de dióxido de carbono como gas de efecto invernadero, lo cual disminuye el estado del índice ambiental.

Figura 10. Sector aumento temperatura prototipo I



La construcción y estructuración del modelo propuesto en los sectores anteriormente mencionados permite la interacción con un ambiente de aprendizaje controlado, que funciona bajo los supuestos definidos en la hipótesis dinámica. A su vez, permite a modeladores y usuarios discutir constructivamente alrededor del modelo, con el objetivo de establecer políticas que mejoren el entendimiento acerca del fenómeno que se está representando. La relación de cada uno de los sectores mostrados anteriormente pueden ser observadas en el mapa de sectores de la Figura 11.

Figura 11. Mapa de sectores



Cada uno de los sectores anteriormente mencionados tiene un desarrollo en lenguaje de flujos y niveles. A partir del cual, se definen de forma gráfica el conjunto de variables identificadas y tenidas en cuenta para representar el comportamiento del fenómeno en estudio. Dichas variables se encuentran relacionadas dinámicamente a partir de un conjunto de ecuaciones definidas en el Anexo A, cuya principal función es permitir el estudio del comportamiento que el fenómeno presenta bajo condiciones iniciales establecidas por los modeladores.

6.1.5 Modelo en lenguaje de ecuaciones y definición de variables. La lista completa de variables con sus respectivas unidades que comprueban la dimensionalidad de la estructura dinámica planteada, puede ser consultada en el Anexo A del presente trabajo.

6.1.6 Resultados de simulación y discusión. Para representar el estado del medio ambiente se definió un indicador cualitativo que oscila en un rango abierto de valores entre (0-100), donde cien (100) representa un nivel óptimo de conservación y valores inferiores a él permiten describir cualitativamente su deterioro generado por el desarrollo de infraestructura vial. De igual forma, valores superiores a 100 representan un excelente estado de conservación ambiental bajo los supuestos establecidos por los autores del presente trabajo.

De esta manera, a partir de las simulaciones realizadas es posible observar cómo la inversión estatal para el desarrollo y construcción de infraestructura vial es un parámetro sensible que incide en el deterioro del medio ambiente, al favorecer acciones humanas que afectan el conjunto de factores físico-naturales que representan una fuente de recursos para abastecer al ser humano de materias primas y energía necesarias en su desarrollo. Estas acciones pueden ser

observadas en los comportamientos dinámicos que emergen a partir de la estructura con la cual ha sido construida el modelo; formalizados de la siguiente manera:

-Impacto directo: generado por la construcción de kilómetros lineales para infraestructura de transporte que modifica directamente los ecosistemas al ocasionar perturbaciones que ponen en riesgo la sostenibilidad ambiental.




-Impacto indirecto: generado a partir de la capacidad vial que ofrece la construcción de infraestructura vial, sobre la cual circula un parque automotor que a través del tiempo de simulación (50 años) reporta kilómetros recorridos. Simultáneamente estos kilómetros recorridos generan emisiones de dióxido de carbono por la utilización de combustibles fósiles. Estas emisiones estimadas en partes por millón⁴ de CO₂ propician un incremento en la temperatura que igualmente afecta el estado del medio ambiente.

El deterioro del medio ambiente dependiendo del nivel de inversión estatal para el desarrollo de infraestructura vial puede observarse en la gráfica 1, donde se plantearon tres escenarios de simulación descritos en la Tabla 1.

Los escenarios de la Tabla 1 tienen por objetivo dar evidencia de cómo a medida que la asignación presupuestal aumenta para la construcción de infraestructura vial el índice ambiental tiene un deterioro mayor. Por tal motivo, se pretende verificar una correlación negativa entre estas dos variables, a través de las siguientes asignaciones porcentuales de inversión estatal: 3,7 %, 4,7% y 5,7%.

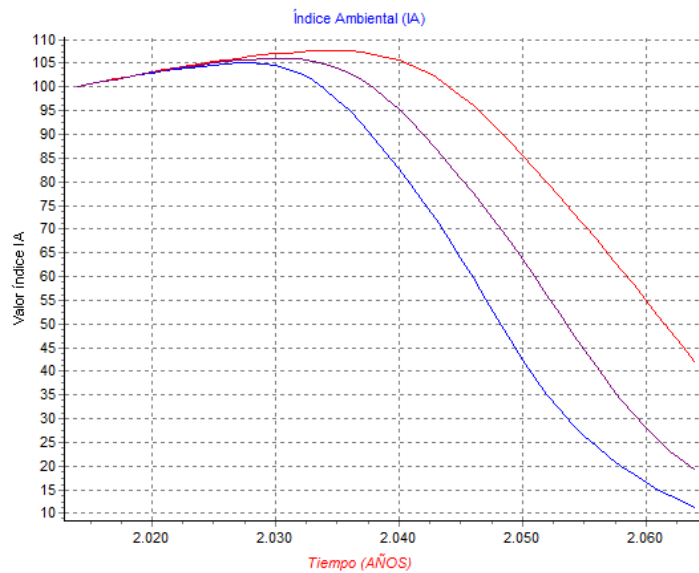
⁴ Partes por millón (ppm), es la unidad de medida con la que se evalúa concentración. Se refiere a la cantidad de unidades de la sustancia (Dióxido de Carbono) que hay por cada millón de unidades del conjunto (unidades volumétricas de aire).

Tabla 1. Escenarios definidos para inversión en infraestructura – Prototipo I

| ESCENARIO | VALORES | FRANJA |
|--|--------------------|---|
| Escenario base | 4,7 % del PGN 2014 |  |
| Aumento inversión infraestructura vial | 5,7 % del PGN 2014 |  |
| Disminución inversión infraestructura vial | 3,7 % del PGN 2014 |  |

PGN*: Presupuesto General de la Nación para Colombia 2014.

Gráfica 1. Índice ambiental estimado bajo tres escenarios de inversión en infraestructura vial



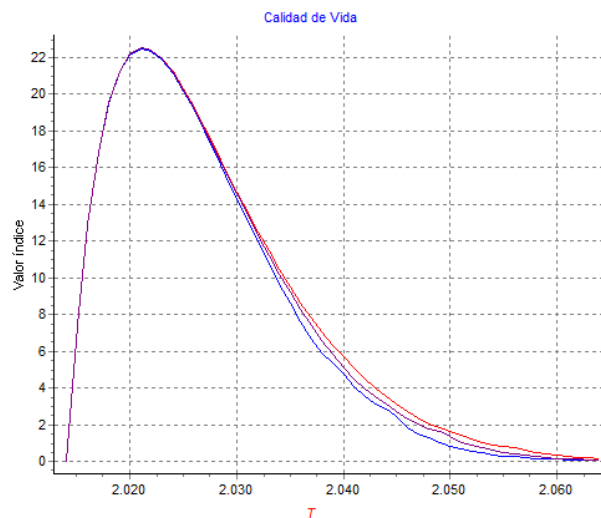
Realizando la estimación cualitativa del impacto ambiental y acorde a la definición dada por el Banco Interamericano de Desarrollo – BID en su revisión de la evaluación del impacto ambiental en países de América Latina y el Caribe, donde se reconoce al ser humano como elemento de ese contexto denominado ambiente que igualmente integra elementos sociales y económicos que interaccionan con el individuo y con la comunidad en la vive, se concluye que el desarrollo de obras ingenieriles para el transporte repercute en la calidad de vida de la población (ver gráfica 2) bajo los supuestos establecidos en la hipótesis dinámica, donde es influenciada por el indicador del estado ambiental, población e infraestructura social disponible.

Los objetivos para los cuales se fomenta la construcción de estas iniciativas ingenieriles, están orientados a favorecer el desarrollo socio económico del país al intentar disminuir los tiempos de viaje, incentivar la producción, mejorar la calidad de vida de la población al incrementar facilidades en materia de movilidad y aumentar acceso a oportunidades de trabajo, entre otros. Lo anterior depende en gran medida de la calidad del servicio ofrecido por la infraestructura de transporte construida, para lo cual los autores del presente trabajo definen la variable *índice de congestión (IC)* como indicador cualitativo que representa el nivel de servicio de la malla vial disponible, al establecer una relación entre kilómetros construidos y número de vehículos en circulación.

Al evaluar el índice de congestión bajo los 3 escenarios de inversión estatal en infraestructura vial, se observa en la Gráfica 3 que a pesar de un incremento en los kilómetros construidos indistintamente de asignación porcentual para inversión en estas iniciativa ingenieriles, el nivel de servicio para la infraestructura de transporte disponible tiende a deteriorarse a medida que la simulación transcurre, al registrar

un aumento en el índice de congestión vehicular cuyo valor de referencia definido como nivel óptimo para la circulación vehicular es menor a uno (1).

Gráfica 2. Calidad de vida bajo los tres escenarios de inversión en infraestructura vial

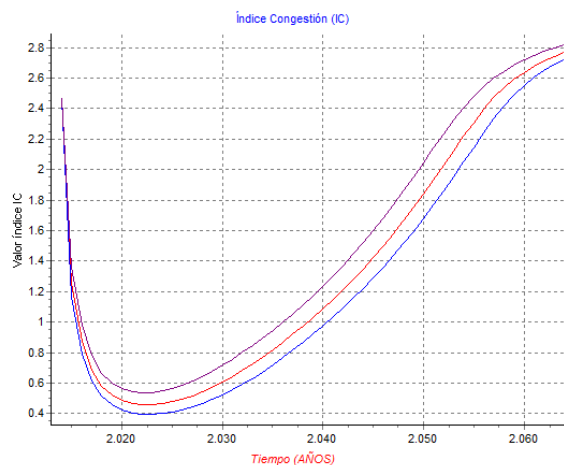


De acuerdo a los resultados obtenidos, es necesario definir la limitación estructural que presenta el modelo al no contar con la inclusión de retardos. Esto implica que el índice de congestión durante los primeros años de simulación, presente un valor bajo que decrece constantemente como consecuencia de la construcción inmediata de kilómetros lineales sin tener en cuenta los diferentes tiempos de ajuste que involucran las representaciones realizadas utilizando dinámica de sistemas.

Casos particulares de los efectos económicos que la construcción de kilómetros viales puede influenciar, son el incremento de la accesibilidad a oportunidades de trabajo y un mayor desplazamiento de fuerza de trabajo que incentiva la producción, acorde a los resultados obtenidos por [25] que reproducen el crecimiento económico

generado por proyectos viales, utilizando dinámica de sistemas al construir un modelo con el cual se prevé la demanda de transporte generada por estos proyectos de transporte al incluir en la malla vial peajes como fuente de ingreso económico que compensa la inversión inicialmente hecha durante la construcción.

Gráfica 3. Índice de congestión vial bajo los tres escenarios de inversión en infraestructura vial



Sin embargo, los aspectos financieros y técnicos definidos durante la planificación de proyectos para infraestructura vial son determinantes en el rol que la malla vial construida tenga al momento de soportar la demanda en transporte que traerá consigo, donde sistemas de transporte público y privado de baja calidad con una capacidad que no responde al número de viajes generado por la demanda creciente, puede propiciar problemáticas de movilidad que se manifiestan en congestión vehicular como lo muestra [26], quienes realizaron un modelo con dinámica de sistemas para entender como la construcción de vías responde a una presión por reducir la congestión del tráfico expresada en la duración de los tiempos de viaje. Dicho estudio fue realizado en Acra, ciudad capital del país africano Ghana donde

los altos volúmenes de tráfico se relacionan directamente con la contaminación del aire desencadenada a partir de la congestión vial que trae repercusiones sobre el estado de salud de la población. Esta contaminación se define a través de la emisión de gases de efecto invernadero, que los autores del presente trabajo de grado han tenido en cuenta dentro de los impactos de influencia indirecta que el desarrollo vial trae sobre el medio ambiente, estimando las emisiones de dióxido de carbono por la utilización de combustibles fósiles de los vehículos del parque automotor considerado para el sector transporte.

La emisión de estos gases de efecto invernadero repercute sobre el consumo energético que afecta el ambiente, como lo plantea [27] en un modelo dinámico sistémico que muestra como la demanda energética crece proporcionalmente a las emisiones cuya fuente de generación radica en el consumo eléctrico y la combustión vehicular. De esta forma se prioriza en alcanzar objetivos enfocados al desarrollo sostenible donde la calidad de vida de las personas sea estable al interactuar con el sector económico evaluando alternativas tecnológicas en combustibles y vehículos que contribuyan en la reducción de emisiones, como lo evalúa el modelo ASTRA elaborado por [28] para entender las causas que pueden favorecer la mitigación del impacto climático generado por el sector transporte, enfocando iniciativas que mejoren el consumo energético ligado a la infraestructura de transporte [29] y que claramente tiene repercusiones negativas sobre el medio ambiente como conjunto que aglomera elementos naturales, estéticos, culturales, sociales y económicos.

En consecuencia es posible inferir a partir de los comportamientos observados que el aumento en la asignación de recursos gubernamentales para incrementar la infraestructura vial (kilómetros construidos) como elemento que propicie escenarios para el desarrollo sostenible, no es una política que por sí sola pueda satisfacer y favorecer por completo el contexto bajo el cual se desarrolla. Debido a que su

influencia sin el acompañamiento de otras medidas complementarias presenta un elevado índice de congestión independientemente de la asignación presupuestal para su construcción, lo cual genera impactos negativos sobre el elemento ambiental que a su vez repercute sobre la calidad de vida de la población al disponer de un registro elevado de kilómetros construidos que puede ser insuficiente para favorecer elementos contenidos en la concepción integradora de ambiente, sociedad y economía.

6.2 PRUEBAS DE EVALUACIÓN - PROTOTIPO I

La estructura causal representada a través de la hipótesis dinámica planteada por los autores busca mejorar el estado de entendimiento frente a la relación dinámica *infraestructural vial-medio ambiente*, realizando la construcción de un modelo como herramienta de comprensión compartida sobre el fenómeno en estudio. Con ello, la representación de este modelo en lenguajes de flujos-niveles y simulaciones desempeña un rol de conexión entre la percepción de los observadores y la realidad percibida, para generar un aporte útil a procesos de aprendizaje y reflexión demarcados por el conjunto de variables endógenas definidas dentro del dominio de observación y modelamiento

De esta manera, el presente modelo requiere un conjunto de pruebas que validen la estructura causal planteada que intenta representar el comportamiento estructural subyacente del fenómeno en estudio. Ello permitirá ir conociendo limitaciones estructurales del modelo que a su vez representan oportunidades de mejora en la construcción y avance del mismo hacia los propósitos de aprendizaje y entendimiento que se establecen. Por ello, con el objetivo de evaluar el prototipo I construido utilizando dinámica de sistemas se revisó y seleccionaron un conjunto

de pruebas sugeridas por John Sterman en su libro Business Dynamics realizadas a continuación.

6.2.1 Conveniencia de límites. El objetivo de esta evaluación es determinar lo apropiado que son los límites establecidos para el modelo en el prototipo I acorde al propósito bajo el cual este es construido. Acorde a ello, representar la correlación negativa existente en la relación dinámica *infraestructural vial-medio ambiente* implica delimitar el conjunto de variables que son tenidas en cuenta para tal propósito. De esta manera, los autores del modelo elaboran la siguiente tabla de límites clasificando los elementos del modelo en dos grupos: endógenos y exógeno. En ella se listan las variables fundamentales consignadas en el diagrama de influencias a través del cual se recrea la hipótesis de modelamiento inicial.

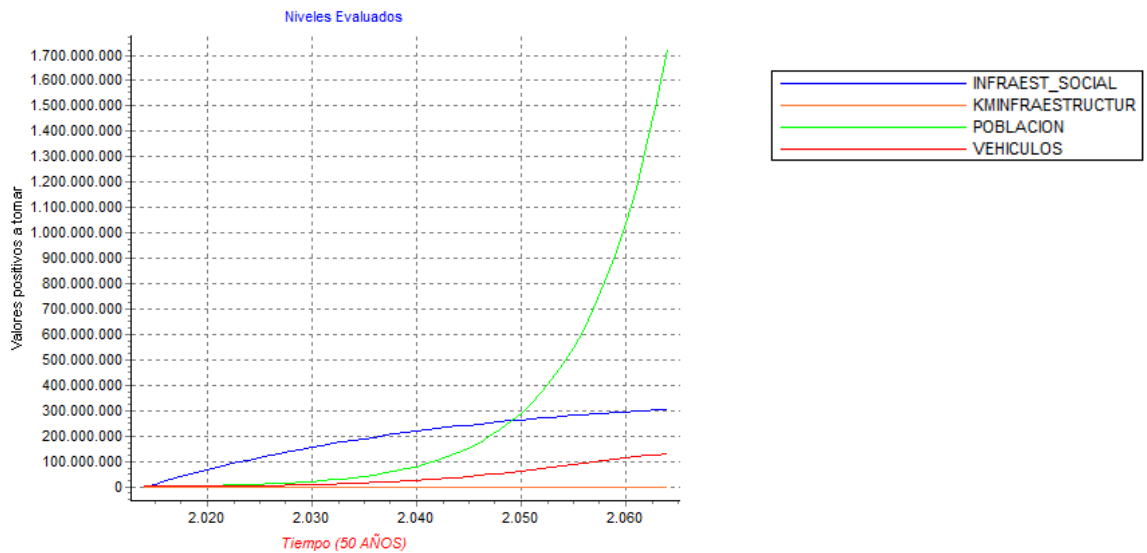
Tabla 2. Límites Prototipo I

| ELEMENTO | ENDÓGENO | EXÓGENO |
|--|----------|---------|
| Presupuesto general de la nación | | X |
| Inversión en infraestructura vial | | X |
| Infraestructura vial (<i>kilómetros construidos</i>) | X | |
| Índice ambiental | X | |
| Inversión en medio ambiente | | X |
| Población | X | |
| Parque automotor | X | |
| Kilómetros recorridos por vehículo | X | |
| Emisiones Dióxido de Carbono | X | |
| Infraestructura social | X | |
| Inversión en infraestructura social | | X |
| Calidad de vida | X | |
| Productividad calidad de vida | X | |

Acorde a la tabla de límites, el modelo construido es consistente en representar una correlación negativa entre el desarrollo infraestructura vial y el medio ambiente donde estas iniciativas se desarrollan. Lo anterior, es corroborado acorde a la revisión bibliográfica realizada hasta el momento donde se mencionan los posibles daños que la infraestructura de transporte puede generar sobre el ambiente. Así, tras la construcción del modelo, los límites definidos permiten representar impactos directos e indirectos en el contexto natural donde además se reconoce la influencia de estos eventos sobre la calidad de vida en términos ambientales y de infraestructura social, que tiene la población perteneciente al contexto donde se desarrollan las iniciativas ingenieriles.

6.2.2 Evaluación de la estructura. La evaluación de la estructura tiene por objetivo indagar y comprobar si el modelo construido es consistente con el conocimiento obtenido del sistema real el cual es objeto de estudio. Esto permite evaluar si los recursos necesarios para la dinámica de la hipótesis inicial del prototipo I, tienen comportamientos adecuados en conformidad con las realidades físicas básicas y las leyes de conservación de la materia. Para ello fueron seleccionados los niveles del modelo cuya dinámica utiliza recursos reales y cuantificables que no pueden tomar valores negativos en el horizonte de tiempo seleccionado en las simulaciones (50 años), así, dando cumplimiento a las leyes físicas tal cual lo muestra la siguiente gráfica:

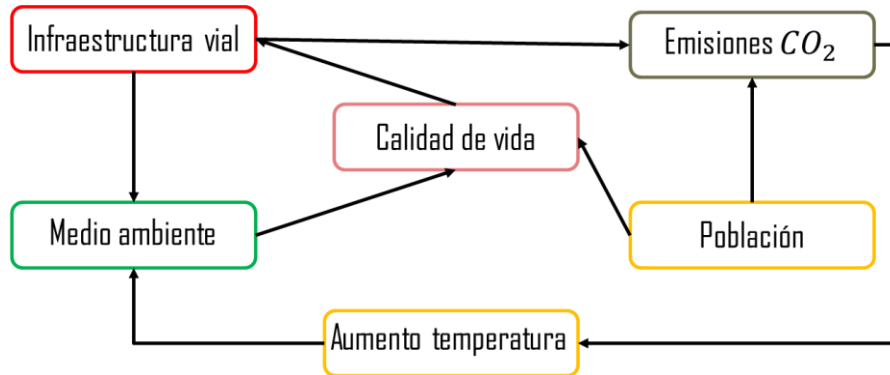
Gráfica 4. Niveles seleccionados para evaluación de estructura – Prototipo I



Acorde a la gráfica anterior los recursos utilizados por los niveles seleccionados para esta simulación de evaluación estructural, son kilómetros construidos, infraestructura social, personas y vehículos los cuales, no toman valores negativos al igual que sus contrapartes en el mundo real tampoco lo hacen. De tal manera, se evalúa y concluye que la estructura del prototipo I es consistente con las leyes físicas básicas.

Por otra parte, el nivel de agregación pertinente al desarrollo del modelo es consistente al diagrama de influencias, tal cual se puede observar en el mapa de sectores que permite observar las relaciones de la hipótesis dinámica en diagrama de flujos y niveles.

Figura 12. Mapa de sectores – Prototipo I



6.2.3 Consistencia dimensional. Esta evaluación consiste en especificar las unidades de medida para cada variable a medida que estas se van incluyendo en la construcción del modelo. Lo anterior, con el objetivo de identificar inconsistencias dimensionales que puedan propiciar interpretaciones erróneas o fallas en la estructura elaborada para la representación del fenómeno en estudio. En el Anexo A, se encuentra la descripción de cada una de las variables junto con sus respectivas unidades de medida, que otorgan la correcta dimensionalidad a las simulaciones realizadas.

6.2.4 Evaluación de parámetros. Los parámetros son elementos exógenos a la delimitación de los límites establecidos para el sistema real que deseamos modelar. Su principal característica radica en como los valores que puede tomar durante el horizonte de simulación afectan el modelo, pero a su vez la representación del sistema (modelo) no repercute sobre ellos. Con lo cual es claro identificar que entre variables exógenas y endógenas, no existen estructuras de realimentación.

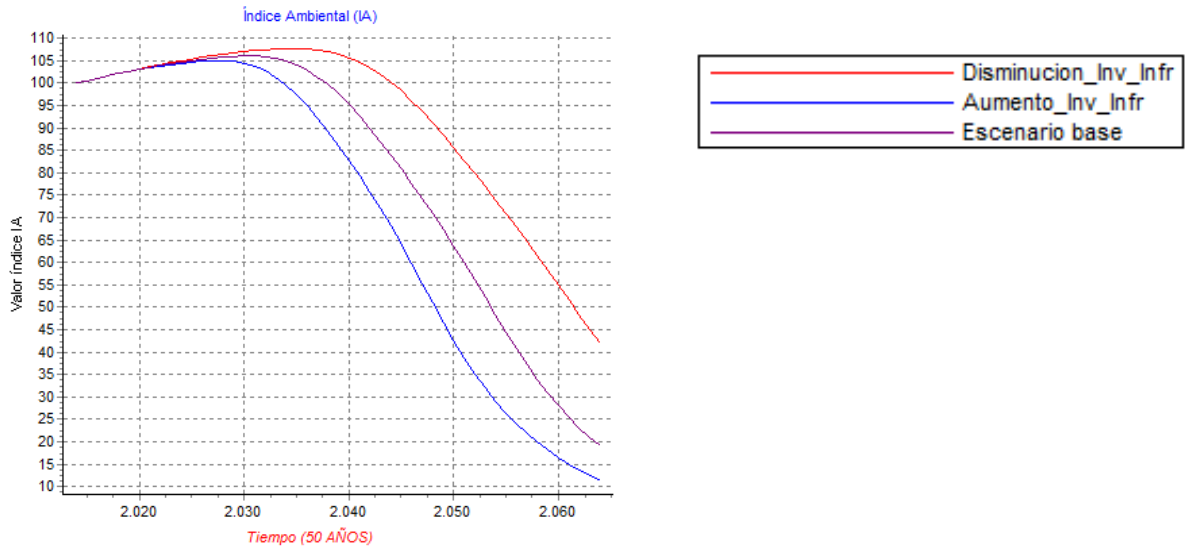
De esta manera tomando los elementos exógenos (parámetros) identificados en la prueba de suficiencia de límites, los autores del presente modelo realizan esta evaluación con el objetivo de examinar y describir el significado de cada uno de los parámetros y sus valores posibles acorde a la realidad percibida y modelada. Lo anterior consignado en la siguiente tabla:

Tabla 3. Evaluación de Parámetros - Prototipo I

| ELEMENTO | VALORES POSIBLES | VALOR DE REFERENCIA | UNIDADES | NOTAS |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|--|
| Presupuesto general de la nación | > 0 | 107.978.000 | Miles de millones de pesos | Dato de referencia tomado del Presupuesto General de la Nación (PGN) aprobado para 2014 por el congreso Colombiano |
| Inversión en infraestructura vial | $1 \geq X \geq 0$ | 0,047 = 4,7 % | Fracción | Participación relativa del sector transporte en la asignación de recursos estipulados en el Presupuesto General de la Nación 2014. (Para esta versión del modelo no se realiza un discernimiento de inversión y mantenimiento para el porcentaje asignado) |
| Inversión en medio ambiente | $1 \geq X \geq 0$ | 0,003 = 3 % | Fracción | Participación relativa del sector ambiente y desarrollo sostenible, en la asignación de recursos estipulados por el Presupuesto General de la Nación 2014. |
| Inversión en infraestructura social | $1 \geq X \geq 0$ | 0,116 = 11,6 % | Fracción | Participación relativa del sector salud y protección social, en la asignación de recursos estipulados por el Presupuesto General de la Nación 2014. |




6.2.5 Condiciones extremas. El objetivo de esta prueba es evaluar la robustez que tiene la estructura dinámica del modelo en condiciones extremas de simulación. Ello, se corrobora asignando valores iniciales extremos a lo cual el modelo debe responder arrojando comportamientos de forma realista sin importar el rango de valores que las entradas puedan tomar. El comportamiento de referencia para realizar la evaluación es el índice ambiental bajo tres escenarios diferentes de inversión estatal para desarrollo vial (Ver Gráfica 5).

Gráfica 5. Simulación índice ambiental – Prototipo I



Las características de los escenarios definidos para la inversión estatal en desarrollo de infraestructura vial tenidos en cuenta para el comportamiento de referencia son descritas en la siguiente tabla:

Tabla 4. Escenarios definidos para inversión en infraestructura

| ESCENARIO | VALORES | Franja |
|--|--------------------|---|
| Escenario base | 4,7 % del PGN 2014 |  |
| Aumento inversión infraestructura vial | 5,7 % del PGN 2014 |  |
| Disminución inversión infraestructura vial | 3,7 % del PGN 2014 |  |

PGN: Presupuesto General de la Nación para Colombia 2014.*

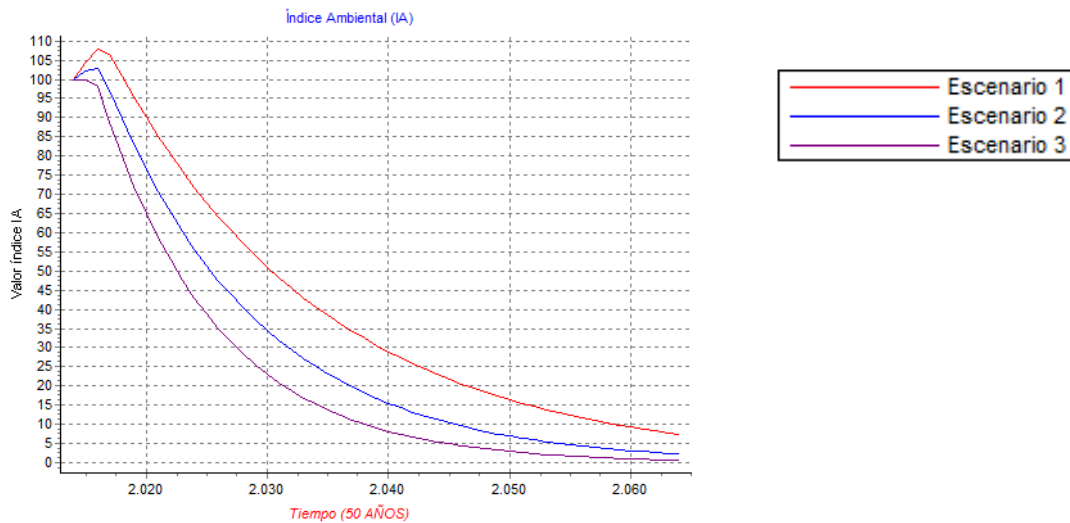
De esta manera, teniendo una coherencia estructural que representa de forma adecuada la relación dinámica *infraestructura vial-medio ambiente* bajo los supuestos establecidos por los modeladores, se procede a realizar dos simulaciones en condiciones extremas para los parámetros “Inversión en infraestructura vial” y “inversión en medio ambiente”, acorde a lo especificado en la siguiente tabla:

Tabla 5. Parámetros exógenos en condiciones extremas – Prototipo I

| PARÁMETRO EXÓGENO | Simulación #1 | | | Simulación #2 | | |
|--------------------------------|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
| Inversión infraestructura vial | 1 | 0.9 | 0.8 | 0 | 0.1 | 0.2 |
| Inversión medio ambiente | 0 | 0.1 | 0.2 | 1 | 0.9 | 0.8 |

Para la Tabla 5 los valores asignados a los parámetros de inversión en infraestructura vial y medio ambiente, corresponden a los límites posibles que dichas variables exógenas pueden tomar acorde a sus rangos de valores definidos en la Tabla 3: Evaluación de Parámetros. De esta manera, los resultados de las simulaciones #1 y #2 deben ser coherentes a la correlación negativa entre *infraestructura vial y medio ambiente*, que los autores del presente documento lograron representar estructuralmente a través del modelamiento de la hipótesis dinámica inicial. Los resultados obtenidos para la simulación #1 realizada en condiciones extremas se observan en la siguiente gráfica:

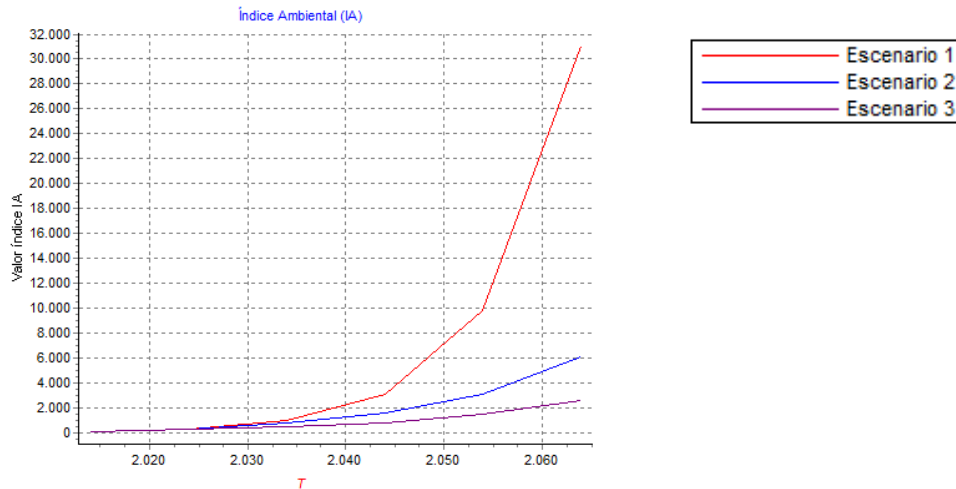
Gráfica 6. Simulación #1 condiciones extremas – Prototipo I



En la Gráfica 6 se observa el decrecimiento exponencial que el índice ambiental presenta cuando la inversión destinada a su conservación tiene valores extremos que tienden a cero. Inversamente el parámetro de inversión en infraestructura vial tiene valores extremos que tienden a 1, con lo cual los resultados obtenidos bajo los tres escenarios de esta simulación planteados en la Tabla 4 reflejan el comportamiento inversamente proporcional que estas dos variables poseen acorde a los acontecimientos reales que este fenómeno presentaría en dichas condiciones.

Posteriormente la Gráfica 7 representa la simulación #2 y sus 3 escenarios planteados bajo parámetros de simulación en condiciones extremas. En ella, la correlación negativa anteriormente mencionada se reconoce en los resultados de la simulación del índice ambiental. Donde porcentajes que tienden a cero para construcción de malla vial acompañados de altos niveles de inversión ambiental conducen a un crecimiento exponencial del índice ambiental.

Gráfica 7. Simulación #2 condiciones extremas – Prototipo I



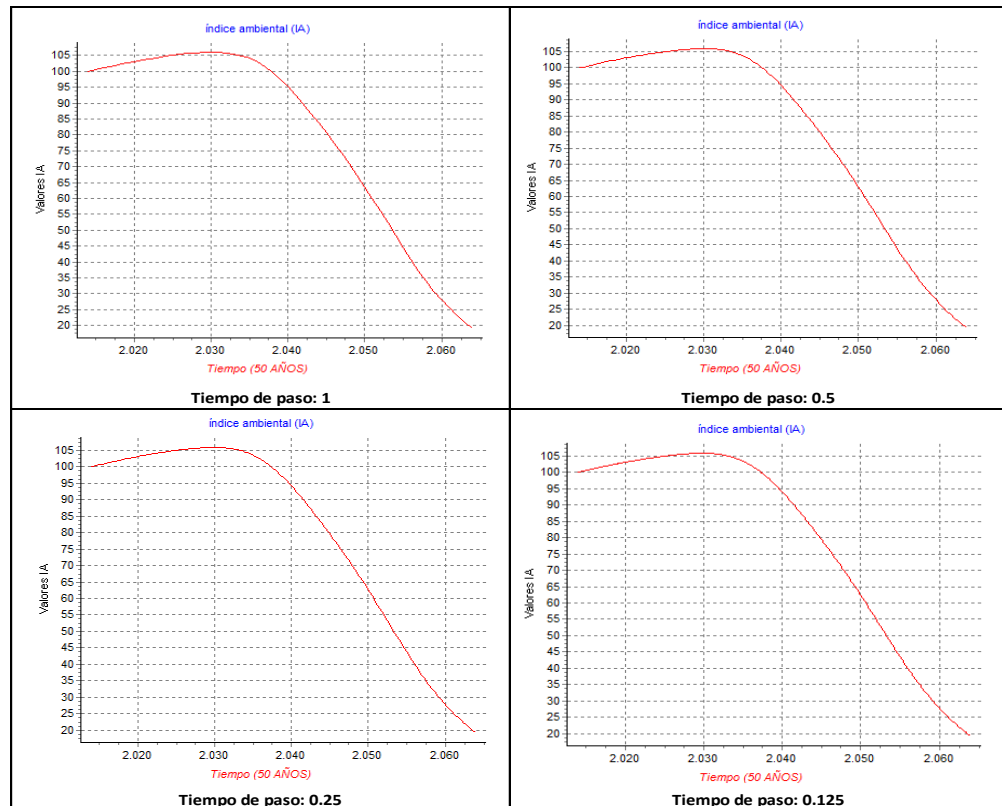
6.2.6 Error de integración. Los modelos construidos con dinámica de sistemas son usualmente formulados en condiciones de tiempo continuo y resueltos utilizando métodos de integración numérica. Por tal motivo, los modeladores deben elegir un método de integración y un tiempo de paso que generen una aproximación lo suficientemente precisa con respecto al propósito del modelo. De igual forma, los resultados de simulación del modelo no deben ser sensibles a la variación en el tiempo de paso o el método de integración seleccionado. Para realizar esta prueba nuevamente se toma el índice ambiental en condiciones de simulación donde la inversión en infraestructura vial es mayor que la inversión destinada a conservación ambiental. Con lo cual, el comportamiento esperado es un deterioro del índice que presenta su valor más cercano a cero sobre el final del horizonte de simulación establecido de 50 años. De esta manera, se realizaron simulaciones del índice ambiental con los siguientes pasos de integración:

Tabla 6. Pasos de integración – Prototipo I

| NÚMERO DE SIMULACIONES | PASO DE INTEGRACIÓN | COMPORTAMIENTO ÍNDICE AMBIENTAL |
|------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Simulación #1 | 1 | Decrecimiento con tendencia a cero |
| Simulación #2 | 0.5 | Decrecimiento con tendencia a cero |
| Simulación #3 | 0.25 | Decrecimiento con tendencia a cero |
| Simulación #4 | 0.125 | Decrecimiento con tendencia a cero |

Los resultados de simulación obtenidos con los pasos de integración definidos en la Tabla 6 se observan en la Figura 13.

Figura 13. Simulación índice ambiental – Pasos de integración Prototipo I

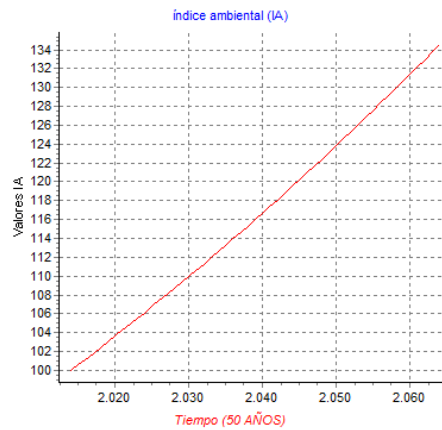


Con los resultados obtenidos en la Figura 13, las simulaciones para el índice ambiental no presentan sensibilidad alguna a la variación realizada con cuatro pasos de integración diferentes.

6.2.7 Comportamiento anómalo. Limitaciones en la disponibilidad de datos impide establecer la significancia o fortaleza de relaciones causales. La prueba de comportamiento anómalo examina la importancia estructural de estas relaciones, preguntando si comportamientos anómalos surgen cuando alguna de ellas es eliminada o modificada. Anomalías comportamentales por borrado de relaciones proveen evidencia de su importancia dentro de la estructura dinámica a la cual pertenecen.

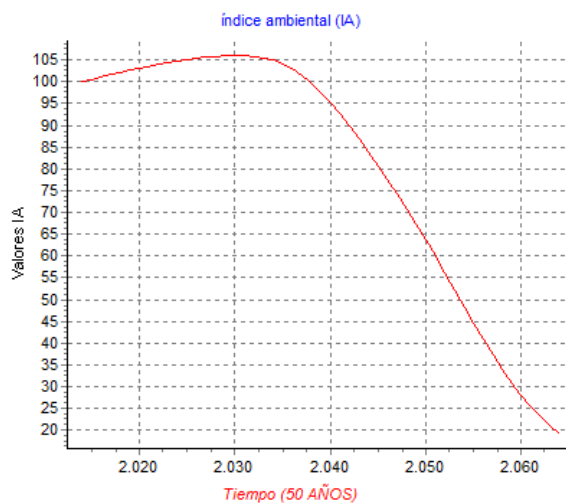
Para realizar esta evaluación fue elegida la variable “Índice ambiental” como indicador relacionado al propósito del modelo sobre el entendimiento de la relación dinámica infraestructura vial y medio ambiente. Así, se procedió a eliminar la variable “Impacto Infraestructura” que representa la influencia de la infraestructura vial sobre el medio ambiente al modificar la configuración física ambiental representada por elementos naturales tales como fauna y flora. De esta manera la eliminación de la relación Impacto Infraestructura – Índice ambiental genera un comportamiento anómalo frente al entendimiento real del fenómeno donde la construcción de kilómetros para infraestructura de transporte no genera un detrimento ambiental, tal se puede observar en la Gráfica 8.

Gráfica 8. Simulación índice ambiental – Comportamiento anómalo Prototipo I



La Gráfica 8 permite observar como hay un incremento lineal del índice ambiental a medida que se incrementa el número de kilómetros construidos eliminando la relación de influencia que ellos ejercen sobre el medio ambiente, cuando en realidad el comportamiento esperado debe ser el observado en la Gráfica 9 donde sí se contempla el impacto directo que la infraestructura de transporte infringe sobre los factores físicos ambientales.

Gráfica 9. Simulación índice ambiental – Comportamiento esperado Prototipo I

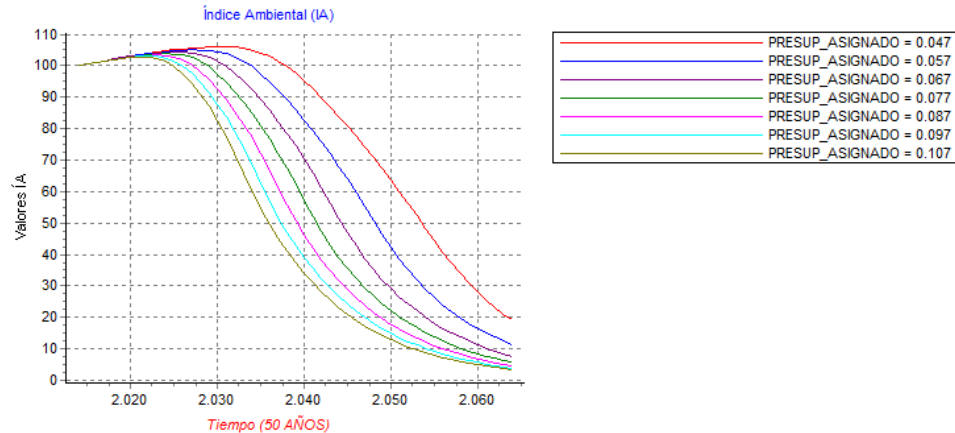


6.2.8 Análisis de sensibilidad. Esta prueba permite a los modeladores preguntar si sus conclusiones cambian de forma relevante respecto al propósito cuando los supuestos varían en un rango plausible de incertidumbre. De esta forma, la robustez en las conclusiones que el modelo presenta será probada utilizando el análisis de sensibilidad por variación de parámetros que ofrece la herramienta evolución 4.5.

6.2.8.1 Comportamiento del índice ambiental ante variación presupuestal destinada a la construcción de infraestructura vial. El objetivo del prototipo I del presente modelo es estimar el impacto ambiental que el desarrollo de infraestructura vial genera sobre el medio ambiente. Lo anterior con base en la característica exógena que el parámetro inversión estatal presenta, el cual se considera sujeto a la decisión estatal de promover o no el aumento de kilómetros construidos. Así, la simulación observada en la Gráfica 10 evalúa el índice ambiental bajo seis escenarios diferentes donde el parámetro exógeno de presupuesto asignado al desarrollo de infraestructura vial presenta un incremento acumulativo de 1 % con respecto a su valor inicial de 4,7 %. De esta manera, el aumento en el nivel de kilómetros construidos a través del tiempo incrementa la capacidad vial disponible que medida a través de un índice de congestión con respecto al parque automotor que puede circular sobre ella, determina una tendencia de kilómetros recorridos generadores de emisiones de dióxido de carbono.

El CO_2 emitido sumado al impacto físico que la construcción vial implica, generan un deterioro del estado ambiental representado por el índice observado en la Gráfica 10, para el cual su inversión en conservación como porcentaje de asignación procedente del presupuesto nacional se mantiene constante (3 %) en los 6 escenarios.

Gráfica 10. Deterioro ambiental bajo diferentes escenarios de inversión vial- Prototipo I



Los resultados obtenidos en la Gráfica 10 muestran como el índice ambiental decrece con mayor velocidad a medida que el número de kilómetros viales construidos aumentan, sumado a los efectos que trae consigo las emisiones de CO_2 procedentes de la circulación vial en la infraestructura disponible.

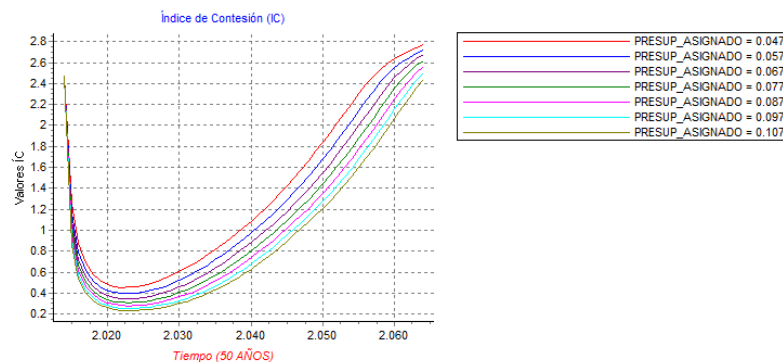
6.2.8.2 Índice de congestión vehicular bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. En esta simulación se aborda la variable endógena de congestión que establece una relación entre vías construidas y parque automotor disponible en circulación. Lo anterior teniendo en cuenta que el nivel de infraestructura disponible está sujeto al parámetro exógeno de inversión destinada para su construcción que es evaluado bajo los seis escenarios planteados en 6.2.8.1.

De esta manera, los resultados obtenidos en la Gráfica 11 plantean la discusión de como a medida que la infraestructura vial disponible incrementa se estimula un mayor flujo vehicular que la recorre. En consecuencia, la capacidad vial a través del tiempo tiende a saturarse generando altos índices de congestión. Ello habrá el

interrogante frente a si aumentos presupuestales destinados a construcción vial funcionan como política que mejora la conectividad terrestre que estimule la economía.

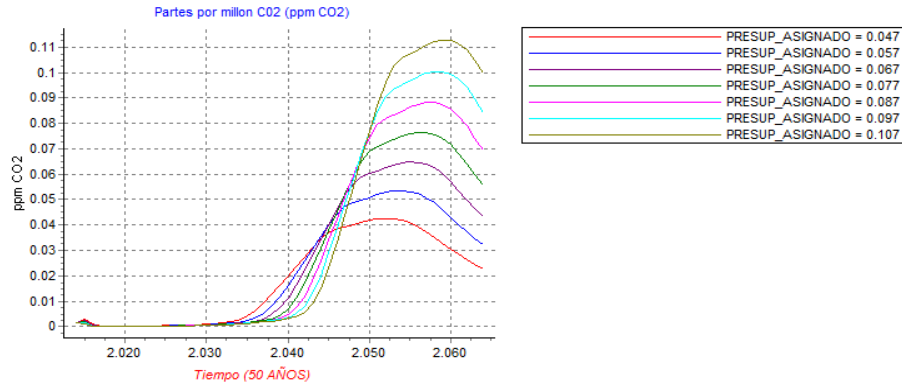
Es importante resaltar de igual forma, cómo elevados valores para el índice de congestión repercuten sobre mayores emisiones de CO_2 que sumado a la construcción vial representan los efectos indirectos y directos respectivamente, que dichas iniciativas ingenieriles generan para el deterioro ambiental.

Gráfica 11. Índice de congestión bajo la capacidad vial ofrecida por diferentes niveles de inversión para construcción de infraestructura de transporte – Prototipo I



6.2.8.3 Emisión partes por millón de dióxido de carbono bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. Esta simulación presentada en la Gráfica 12 muestra cómo los niveles de CO_2 en partes por millón (ppm) se encuentran directamente relacionados con el nivel de congestión vial que la infraestructura presenta en cada uno de los seis escenarios donde hay variación porcentual del presupuesto destinado a inversión vial.

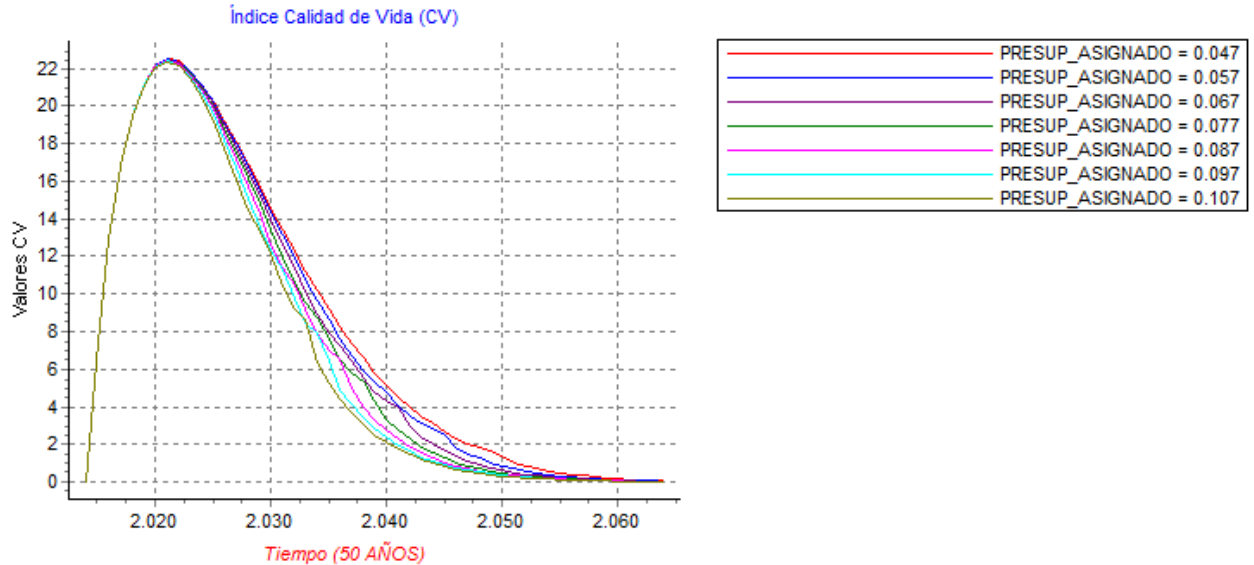
Gráfica 12. Emisiones en partes por millón de CO₂ en función de los índices de congestión para cada nivel de inversión en infraestructura vial– Prototipo I



Es posible observar cómo a medida que el índice de congestión aumenta (ver Gráfica 11) según el número de kilómetros viales construidos las emisiones en ppm de CO₂ aumentan, lo cual describe un comportamiento directamente proporcional entre las dos variables.

6.2.8.4 Comportamiento calidad de vida bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. Al reconocer a la población humana como elemento del medio ambiente donde se desarrollan construcciones viales, se muestra en esta simulación la calidad de vida que en función de población e infraestructura social está condicionada a un multiplicador ambiental que relaciona el índice ambiental con el bienestar general de las personas (aclarando que en esta versión del modelo no se tienen en cuenta los beneficios económicos que tiene el desarrollo de infraestructura vial sobre la calidad de vida a través de la generación de empleo).

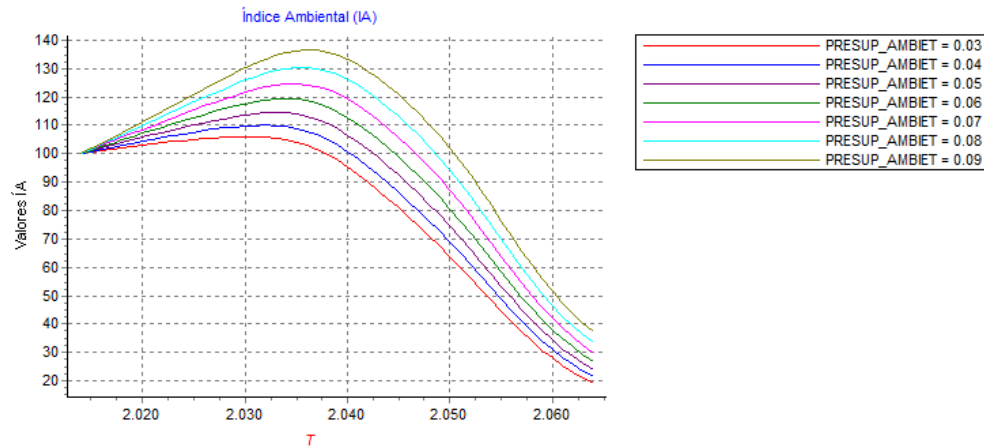
Gráfica 13. Calidad de vida afectada por el multiplicador del índice ambiental para cada escenario de inversión en infraestructura vial– Prototipo I



En la Gráfica 13 se observa como la calidad de vida se deteriora a través del horizonte de simulación en consecuencia del decremento en el índice ambiental que a su vez es afectado por los diferentes escenarios presupuestales de inversión en infraestructura vial.

6.2.8.5 Comportamiento del índice ambiental bajo variación presupuestas destinada a su conservación. Después de analizar los resultados de las simulaciones anteriores, se proponen aumentos porcentuales acumulativos de 1 % sobre el nivel base de inversión destinada a conservación del medio ambiente, que mitiguen los efectos directos e indirectos generados por construcción de infraestructura vial que decrementan el índice ambiental .

Gráfica 14. Índice ambiental bajo diferentes escenarios de inversión destinada a su conservación–Prototipo I



En la Gráfica 14 se observan los seis escenarios de simulación bajo los cuales se evalúan diferentes asignaciones porcentuales para inversión en ambiente. En ellos se encuentra una correlación positiva que disminuye el deterioro precipitado del índice ambiental observado en la simulación 6.2.8.1 donde se mantiene constante el 3% de inversión destinada a ambiente. Así, es posible pensar en la instauración de políticas que acompañen la construcción vial con el objetivo de mitigar los daños ambientales favoreciendo además, la calidad de vida de las personas que se encuentran en el contexto donde desarrollan las iniciativas ingenieriles.

6.3 PROTOTIPO II

6.3.1 Propósito. Mostrar cómo el deterioro del medio ambiente generado por el desarrollo de infraestructura vial crea una posición conservacionista por parte de la comunidad que se opone al desarrollo vial, disminuyendo la voluntad política de

inversión pública que a su vez es influenciada positivamente por demandas sociales que exigen la construcción de más vías como respuesta a disminuir el índice de congestión planteado por los autores.

6.3.2 Restricciones. Los límites del presente modelo no consideran elementos económicos que influyen y/o son influenciados por el desarrollo de infraestructura vial.

- No se considera el uso intensivo de la tierra como actividad de desarrollo económico y social, que aumenta con la mejora en la accesibilidad y disminución en los tiempos de desplazamiento generados por la capacidad vial instalada.
- Los tiempos de desplazamiento no tienen en cuenta los beneficios económicos que ellos pueden traer consigo al estimular la inversión privada que aumenta el desarrollo económico de las regiones donde se realiza la construcción vial.

6.3.3 Modelo en prosa y lenguaje de influencias. Para este segundo prototipo la inversión presupuestal destinada al desarrollo de infraestructura vial está sujeta a una variable denominada preocupación política, la cual en función del parámetro que representa la asignación presupuestal base destinada por el gobierno para construcción en transporte terrestre (4.7%), permite obtener la inversión gubernamental total dirigida al aumento de la capacidad vial. Así, la preocupación política representa el deseo por parte del gobierno para incrementar o disminuir la inversión en infraestructura vial en función del parámetro inicial definido para este rubro, acorde a las exigencias realizadas por la comunidad en el contexto ambiental y social. De esta manera, la construcción de kilómetros viales sigue manteniendo

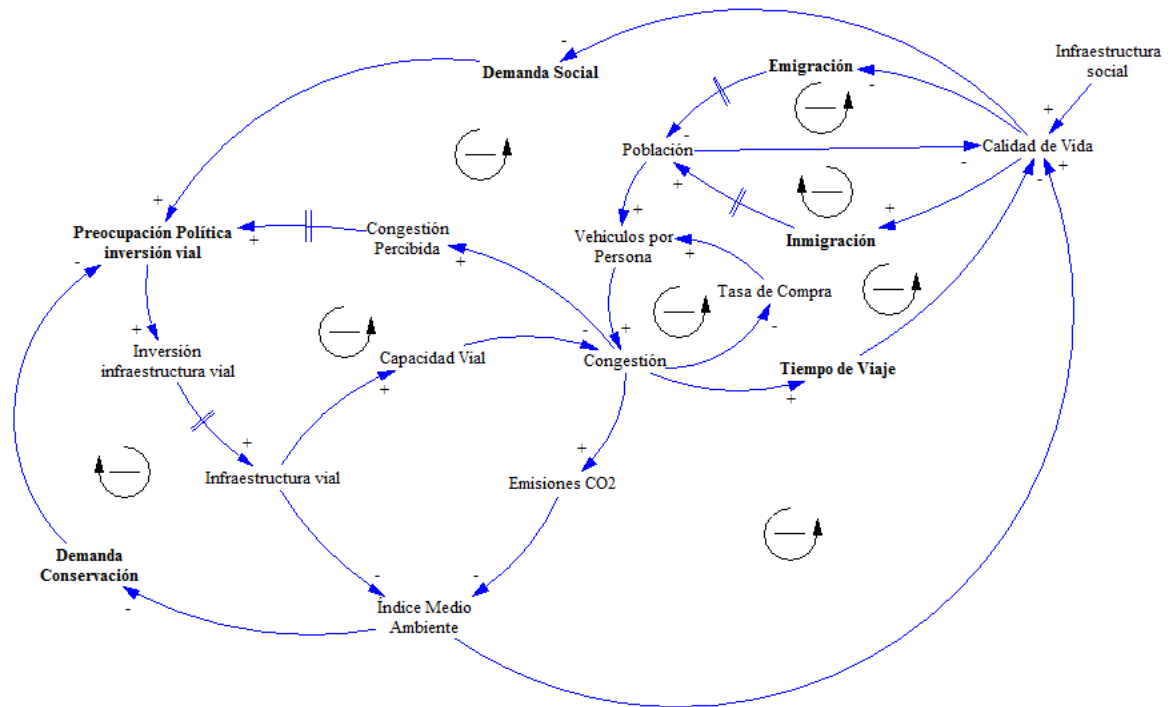
su efecto deterioro sobre el medio ambiente (la variable medio ambiente se entiende como ese conjunto de elementos físicos naturales que cumple el rol de contexto donde la población influenciada por el desarrollo vial permanece) de forma directa a través de la alteración física del ecosistema natural sumado a las emisiones de dióxido de carbono, que emergen como consecuencia del uso vehicular realizado por la población en la capacidad vial disponible. Estos efectos decrementan el valor del índice ambiental que de forma conceptual representa el estado general del medio ambiente, generando así, una demanda o aumento de las exigencias de la población que bajo una postura conservacionista se opone al desarrollo de estas iniciativas ingenieriles, al percibir el daño progresivo sobre el ambiente. Esta postura que se opone al desarrollo vial influencia una disminución en la preocupación política de inversión en más construcción vial.

Así, la hipótesis dinámica planteada para este prototipo II en el diagrama de influencias (ver Figura 14) además de contemplar el daño ambiental generado por el desarrollo vial, busca representar dinámicamente las mejoras en desplazamiento que intuitivamente la construcción de iniciativas para transporte traen consigo. Estas facilidades tienen una relación directamente proporcional con la calidad de vida de la población, la cual dentro de este prototipo depende del tamaño de la población, infraestructura social disponible, tiempo de desplazamiento y el estado medio ambiental. De esta manera, el valor que adopte el indicador calidad de vida repercute sobre los flujos migratorios del contexto donde se construyen las iniciativas viales, modificando el tamaño de la población que a su vez influencia el número de vehículos por persona lo cual en función de la capacidad vial instalada determina el índice de congestión de la infraestructura de transporte disponible.

Un aumento en la calidad de vida incrementa el flujo inmigratorio de población hacia el contexto de desarrollo vial; mientras que la disminución en la calidad de vida

aumenta el flujo emigratorio que es interpretado como el decremento en las condiciones que podrían garantizar un nivel de calidad de vida aceptable (las condiciones medio ambientales y la facilidad de desplazamiento en la infraestructura vial disponible). Así, el estado del indicador de calidad de vida representa la atractividad que el contexto donde se construye la malla vial tiene para la población en función de las condiciones ambientales y las facilidades de desplazamiento. Por otra parte, al igual que el indicador medio ambiental, el estado de la calidad de vida genera dependiendo de su valor una demanda social que incentiva e incrementa la preocupación política para aumentar la inversión en infraestructura vial y así, disminuir el índice de congestión lo cual conduce a una disminución de los tiempos de desplazamiento y en consecuencia aumenta la calidad de vida.

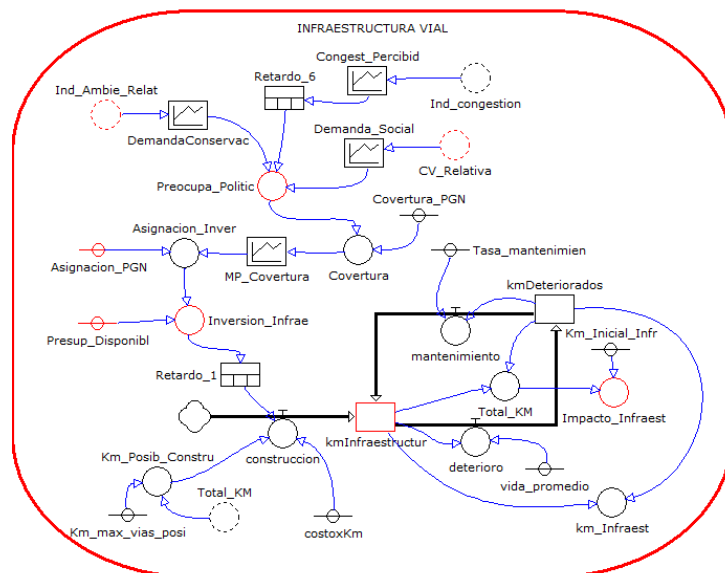
Figura 14. Diagrama de influencias prototipo II



6.3.4 Modelo en lenguaje de flujos y niveles. Acorde a lo planteado en la hipótesis dinámica del prototipo II, se realizó la construcción del modelo en lenguaje de flujos y niveles organizado en los mismos seis sectores que mostró el prototipo I, pero con la agregación de las nuevas variables incluidas en función del propósito del prototipo II definido en la sección 6.3.1. A continuación, se muestra cada sector de flujos y niveles con su respectiva descripción:

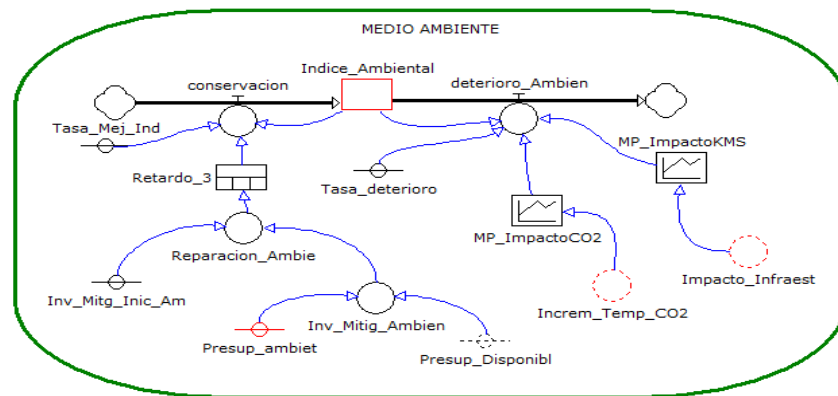
- **Sector infraestructura vial:** Representa la Infraestructura vial de transporte expresada en kilómetros lineales. Cuenta con un flujo de construcción, deterioro y mantenimiento de kilómetros construidos. La capacidad del sistema vial se calcula teniendo en cuenta tanto kilómetros en buen estado como deteriorados. La inversión para construcción vial está influenciada por una asignación porcentual base y la preocupación política de construir más o menos vías acorde a las demandas ambientales y sociales que la comunidad realiza.

Figura 15. Sector infraestructura vial prototipo II



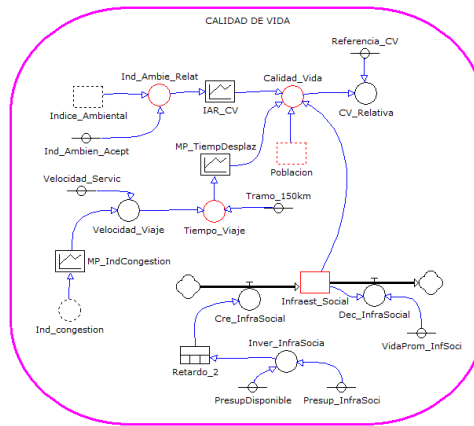
- **Sector medio ambiente:** Representa una concepción global del estado del medio ambiente reconociendo su conservación, así como su deterioro generado por el desarrollo de infraestructura vial y el incremento global de temperatura, a causa de emisiones de dióxido de carbono provenientes del transporte vehicular en la infraestructura vial.

Figura 16. Sector medio ambiente prototipo II



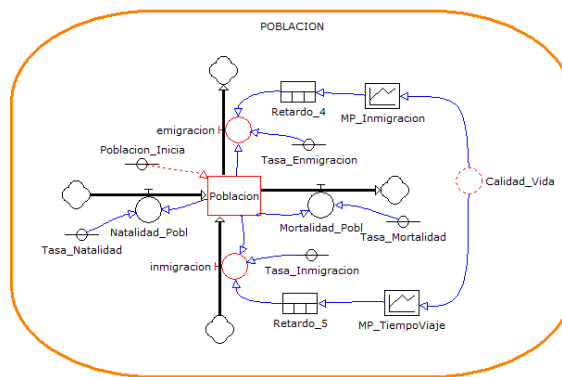
- **Sector calidad de vida:** Representa la calidad de vida de la población influenciada por el índice ambiental, inversión en infraestructura social, población y tiempo de desplazamiento en la infraestructura vial construida. Es importante aclarar que la definición de calidad de vida planteada para este modelo no contempla aspectos económicos ya que ellos están fuera de los límites de modelamiento establecidos en el propósito general del modelo. A su vez la calidad de vida repercute sobre los flujos de migración de la población perteneciente al contexto donde se desarrollan las obras ingenieriles

Figura 17. Sector calidad de vida prototipo II



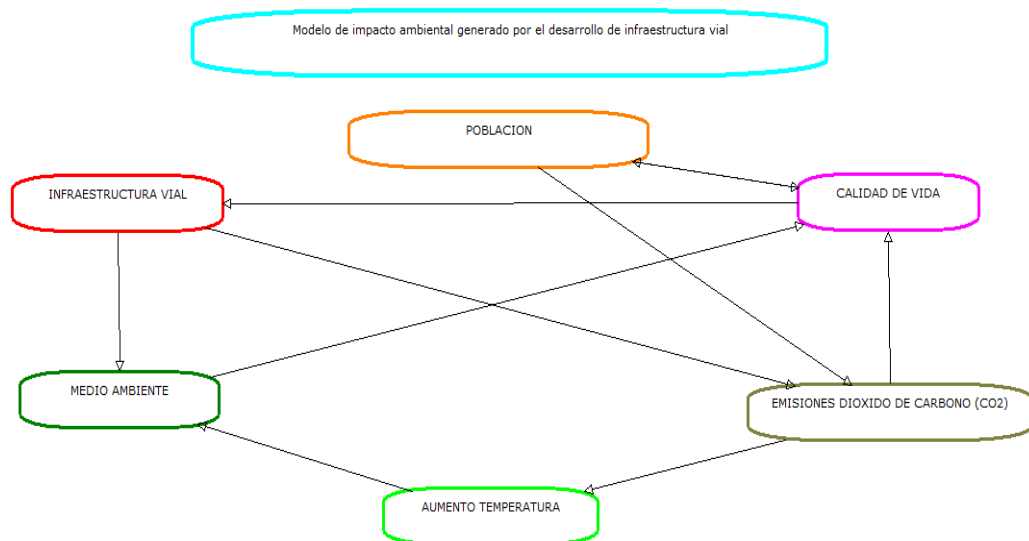
- **Sector población:** Representa la dinámica poblacional. En este sector hay flujos de natalidad y mortalidad, además de flujos migratorios afectados por la calidad de vida de la población. Si la calidad de vida disminuye (deterioro ambiental y aumento en los tiempos de desplazamiento lo cual genera congestión) se incrementa el flujo de emigración. Si la calidad de vida incrementa por buenas condiciones ambientales y un índice de congestión bajo, el flujo de inmigración aumenta ya que el contexto donde se desarrollan las iniciativas viales se vuelve un destino atractivo para nueva población.

Figura 18. Sector población prototipo II



Las relaciones entre los sectores de flujos y niveles descritos anteriormente pueden ser observadas en el mapa de sectores (ver Figura 21), el cual mantiene las relaciones más importantes planteadas en la hipótesis dinámica de este segundo prototipo.

Figura 21. Mapa de sectores prototipo II



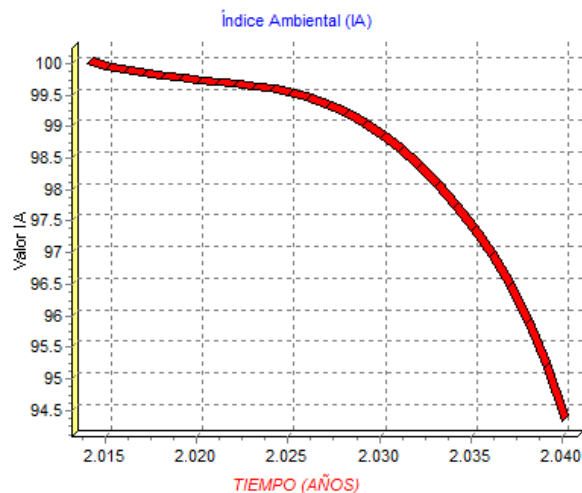
6.3.5 Modelo en lenguaje de ecuaciones y definición de variables. La lista completa de variables con sus respectivas unidades que comprueban la dimensionalidad de la estructura dinámica planteada puede ser consultada en el Anexo B del presente trabajo.

6.3.6 Resultados de simulación y discusión. El horizonte de tiempo seleccionado para los resultados de simulación fue de 26 años. En él, se plantea un escenario base donde las asignaciones presupuestales para infraestructura vial y medio

ambiente corresponden a lo establecido en el Presupuesto General de Nación 2014-Colombia.

Los resultados obtenidos muestran como la influencia de la construcción vial acompañada de emisiones de dióxido de carbono resultantes de la circulación vehicular sobre la misma, traen consigo un deterioro progresivo del índice ambiental como lo muestra la Gráfica 15. Con ello, el deterioro del índice de medio ambiente tiene una correlación negativa respecto al número de kilómetros construidos como se observa en la Gráfica 16, debido a que el daño ambiental tiene sus valores más bajos cuando la construcción de kilómetros es máxima.

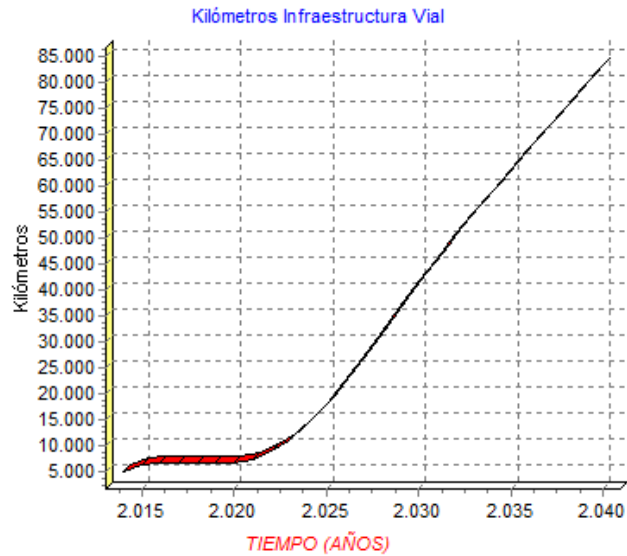
Gráfica 15. Índice ambiental – Prototipo II



Lo anterior, es consecuencia de una mayor capacidad instalada que necesariamente modifica incrementalmente el entorno natural durante su proceso de construcción y que además, aumenta el uso vehicular que conduce

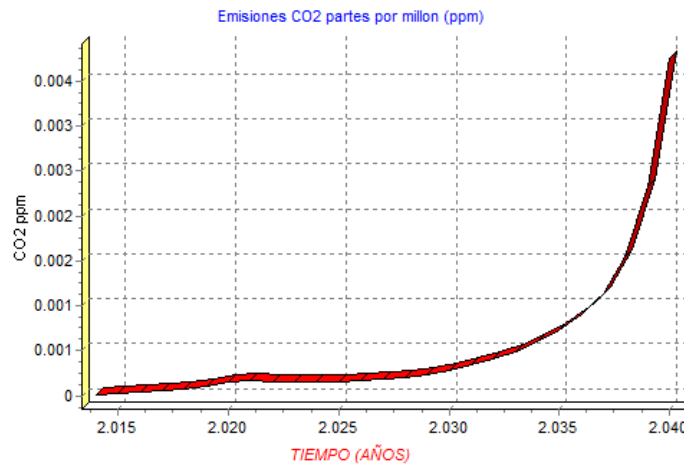
necesariamente a mayores niveles de emisiones de dióxido de carbono tal se observa en la Gráfica 17.

Gráfica 16. Kilómetros construidos – Prototipo II



Es importante resaltar como el número de kilómetros construidos no aumenta drásticamente al inicio del horizonte de simulación debido al tiempo de retardo o latencia que la construcción y consecución de dichas obras implica. De esta manera, aproximadamente durante los primeros 10 años del horizonte de tiempo la capacidad vial instalada inicial no responde de forma satisfactoria a la demanda vehicular que se moviliza. Lo cual, implica un incremento en el índice de congestión vehicular que relaciona el número de vías construidas con el parque auto motor disponible para circular. Lo anterior puede ser observado en la Gráfica 18.

Gráfica 17. Emisiones en partes por millón de dióxido de carbono – Prototipo II



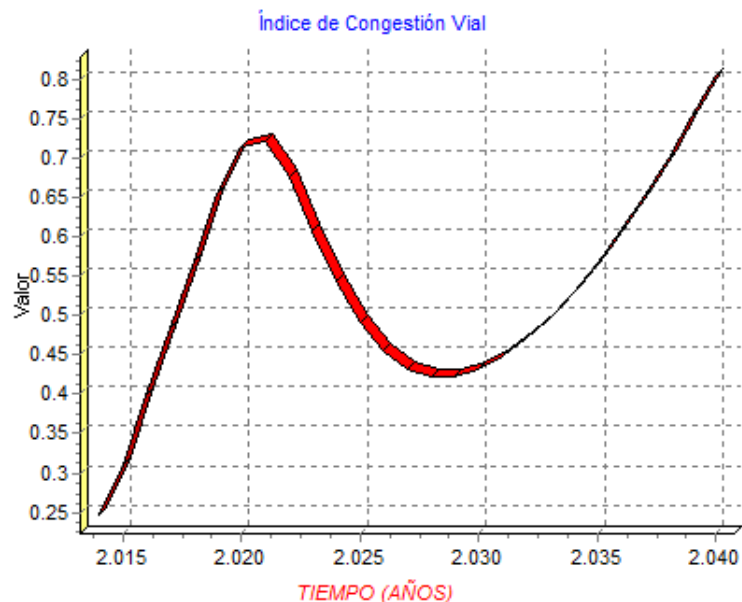
El índice de congestión es un indicador cualitativo cuyos valores próximos a cero representan un nivel óptimo de servicio sin congestión para circular sobre la maya vial disponible. Por otra parte, el valor uno (1) representa un estado de congestión de la infraestructura disponible y valores superiores a él, hacen alusión a un flujo vehicular de condiciones bajas que con dificultad permite el tránsito vehicular favoreciendo las emisiones de dióxido de carbono como se observa en la Gráfica 17, donde los valores más altos tienen una correlación positiva con el elevado índice de congestión durante los últimos años del horizonte de simulación.

Tradicionalmente los modelos de simulación contruidos para estimar los impactos económicos que la inversión en desarrollo vial trae consigo, utilizan la congestión vial como variable de referencia a nivel microeconómico con el objetivo de observar como la inversión estatal para la consecución de estas obras ingenieriles [30] es una política que mejora la accesibilidad y movilidad en las zonas influenciadas por la infraestructura de transporte. Lo anterior, debido a que mayor capacidad instalada disminuye los costos de desplazamiento incentivando así, el número de viajes

realizados por la población gracias a un servicio óptimo de transporte ofrecido por la malla vial.

Así, la disminución de la congestión por aumento de la malla vial es contrastada con los supuestos establecidos por los modeladores en el planteamiento de la hipótesis dinámica del presente trabajo. Posteriormente, tras la construcción del modelo en diagrama de flujos y niveles se encontró en las simulaciones realizadas evidencia de un comportamiento contra intuitivo en el efecto a largo plazo que la infraestructura de transporte trae sobre la congestión vial.

Gráfica 18. Índice de congestión – Prototipo II

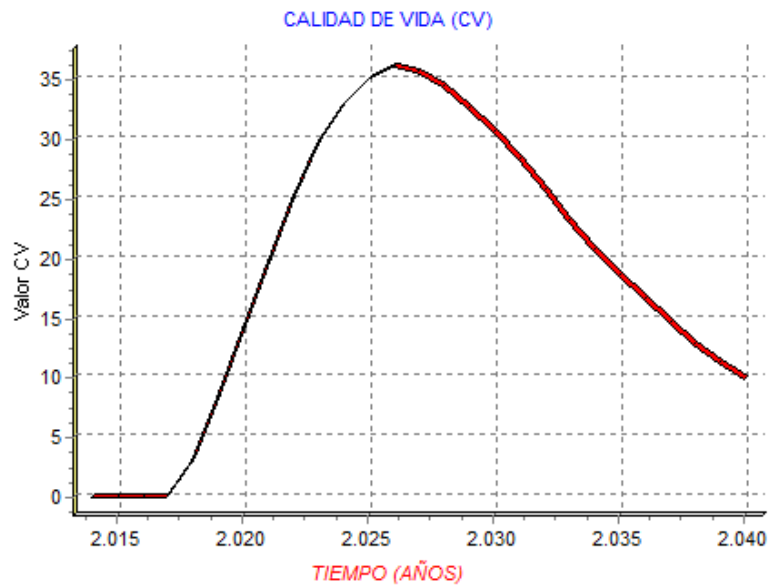


Aproximadamente, tras los primeros 10 años de simulación cuando la congestión ha alcanzado su mayor valor cualitativo y el tiempo de latencia para que las primeras obras viales estén listas, se observa la mejora en la movilidad. En este punto, el

índice de congestión empieza a disminuir y la construcción de infraestructura vial trae consigo el cumplimiento de su objetivo en materia de desplazamiento disminuyendo los tiempos de viaje y mejorando la movilidad. Por lo tanto, se alcanza un nivel de bienestar en la población que mejora la calidad de vida en la región al permitir facilidades de desplazamiento para tener mayor acceso a posibilidades y opciones en pro del desarrollo humano tal cual lo evidencia [31], en la construcción de un modelo utilizando dinámica de sistemas para estimar el impacto en materia económica y demográfica sobre una región determinada. Posteriormente, tras el año 2030 de simulación la construcción vial deja de responder a la demanda de desplazamiento del parque automotor disponible y la congestión incrementa nuevamente como igualmente lo evidencia [32]. Es aquí, donde se observa el comportamiento contra intuitivo debido a que una mayor disponibilidad vial trae consigo un incremento constante en la demanda vehicular en circulación. Con lo cual, la toma de decisiones tradicional de responder a la congestión vial con una política única de inversión vial no proporciona una solución estructural profunda que mantenga establemente bajos los tiempos de desplazamiento a largo del horizonte de simulación.

Así, el deterioro en la movilidad genera un mayor número de emisiones de dióxido de carbono que disminuye el índice ambiental y a su vez, junto con los tiempos de desplazamiento altos influyen directamente sobre la calidad de vida de la población como se observa en la Gráfica 19. En esta Gráfica, se aprecia el valor máximo de este indicador cuando la infraestructura vial cumple su objetivo de descongestión a mediano plazo, pero que recae con el transcurrir de los años de simulación paralelamente al deterioro ambiental y al nuevo aumento en la congestión después del año 2030.

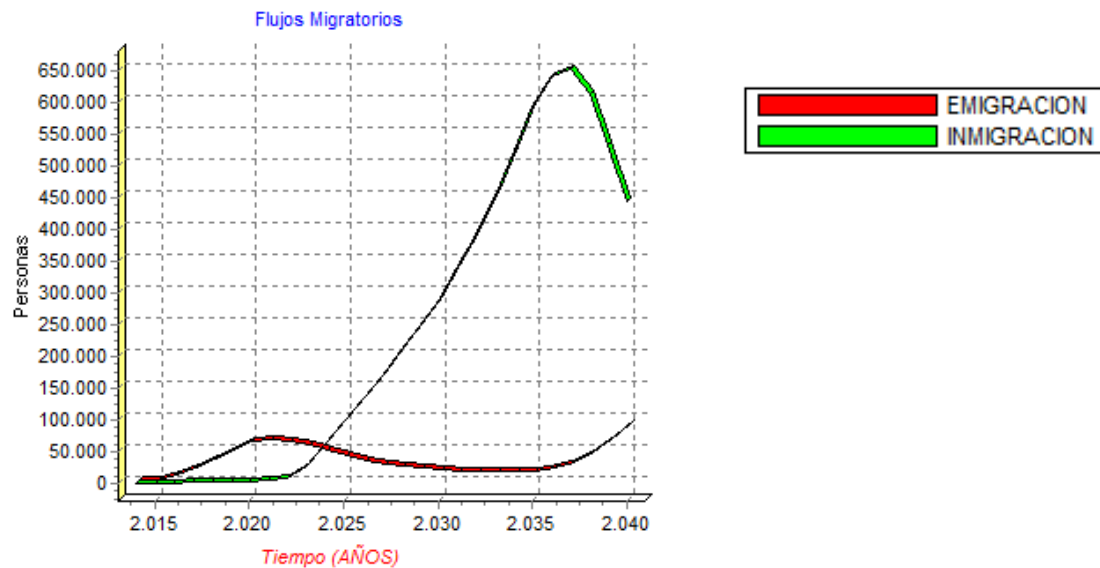
Gráfica 19. Índice calidad de vida – Prototipo II



En consecuencia, el valor que adopte el indicador calidad de vida repercute sobre los flujos migratorios del contexto donde se construyen las iniciativas viales modificando el tamaño de la población como se evidencia en la Gráfica 20. Un aumento en la calidad de vida incrementa el flujo inmigratorio de población hacia el contexto de desarrollo vial; mientras que la disminución en la calidad de vida aumenta el flujo emigratorio que es interpretado como el decremento en las condiciones que podrían garantizar un nivel de calidad de vida aceptable tal como se observa en la Gráfica 20 (las condiciones medio ambientales y la facilidad de desplazamiento en la infraestructura vial disponible). Sin embargo, es importante resaltar que estos flujos migratorios en función de la calidad de vida son percibidos con determinado tiempo de retardo por la población. Así, el pico máximo en la curva de inmigración de la Gráfica 20 no coincide exactamente con el valor máximo de calidad de vida en la Gráfica 19, al igual que ocurre con la curva de flujo emigratorio cuyo valores más elevados son percibidos al inicio y final del horizonte de

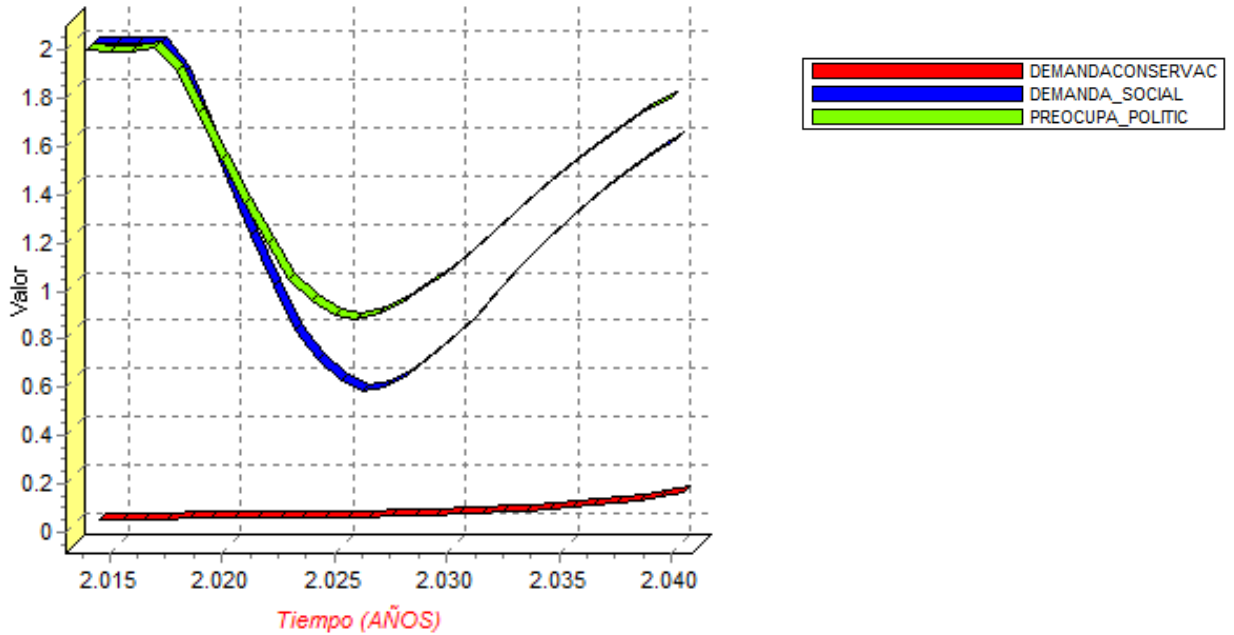
simulación, donde los valores de calidad de vida presentan valores bajos como se observa en la Gráfica 19.

Gráfica 20. Flujos migratorios población – Prototipo II



De esta manera, la preocupación política definida como variable dentro del presente modelo sirve como elemento conceptual de referencia que modela la toma de decisiones gubernamental contemporánea frente a la asignación porcentual que determina la cuantía de recursos públicos destinada a construcción vial en función de las exigencias que el contexto presenta en el ámbito social y ambiental. En la Gráfica 21 es posible observar el comportamiento cualitativo de la demanda conservacionista, la demanda social y la preocupación política.

Gráfica 21. Demanda conservación medio ambiente, demanda social construcción vías, preocupación política en inversión vial – Prototipo II



La demanda social puede ser observada en la Gráfica 21 y en ella se aprecia cómo aproximadamente sobre el año 2025 tiene sus valores más bajos cuando la calidad de vida de la población es máxima en correspondencia con la Gráfica 19. Esto implica que cuando la congestión vial es disminuida a mediano plazo por la construcción igualmente alrededor del año 2025 como se observa en la Gráfica 18, las exigencias sociales no presionan una mayor inversión vial estatal expresada en función de la preocupación política. Paralelamente, durante los primeros años de simulación la demanda conservacionista es baja debido a que el deterioro ambiental no es suficiente como para generar demandas por parte de la comunidad que se opongan al desarrollo vial; pero si se observa en su comportamiento tras el año 2030 hasta el final del horizonte de simulación que los valores que va tomando son cada vez mayores como consecuencia del deterioro ambiental creciente observado

en la Gráfica 15. De igual forma, tras el año 2030 la demanda social crece nuevamente con el aumento de la congestión como se aprecia en la Gráfica 18 y es allí, donde la preocupación política no responde completamente a la presión que la comunidad ejerce para aumentar el desarrollo vial (a diferencia de los primeros años de simulación en el horizonte de tiempo, donde se observa que la preocupación política satisface completamente la demanda social, logrando disminuir sus exigencias al tiempo que se reduce a corto plazo el índice de congestión, con una demanda de conservación que se mantiene relativamente baja) debido a que durante estos mismos años de simulación la demanda de conservación empieza a aumentar, atenuando la construcción de más infraestructura vial.

Por lo tanto, bajo las condiciones definidas para el escenario de simulación a partir del cual se obtienen los resultados anteriormente descritos, la inversión en infraestructura vial trae consigo efectos que deterioran el medio ambiente conduciendo a la creación de demandas en conservación en contraposición al desarrollo vial, que se manifiestan simultáneamente con la demanda social que exige la construcción de más vías como resultado del elevado índice de congestión, a pesar de la existencia previa de capacidad vial instalada en continua expansión como se observa en la Gráfica 16. Lo anterior, permite afirmar que el aumento de la capacidad vial por sí sola no es una solución que resuelva la movilidad a largo plazo y que por el contrario, su implementación sin medidas acompañantes deja el sistema en peores condiciones con respecto a las iniciales, en temáticas sociales y ambientales.

Por lo tanto, es necesario implementar políticas que permitan mejorar la movilidad de la población y garantizar así, la intervención ambiental de manera sostenible para estimular su conservación debido a su repercusión sobre la calidad de vida del contexto donde se desarrollan las iniciativas ingenieriles.

6.4 PRUEBAS DE EVALUACIÓN - PROTOTIPO II

De la misma forma como el prototipo I fue evaluado con ocho pruebas sugeridas por John Sterman en su libro *Business Dynamics*, se procede a realizar la evaluación estructural del prototipo II con el objetivo de corroborar su estructura y validar su robustez frente al propósito bajo el cual fue construido. En consecuencia, a continuación se observan los resultados para cada una de las pruebas aplicadas a esta versión II del modelo.

6.4.1 Conveniencia de límites. Los autores del modelo elaboraron la siguiente tabla de límites clasificando los elementos del modelo en dos grupos: endógenos y exógeno. En ella se listan las variables fundamentales consignadas en el diagrama de influencias a través del cual se recrea la hipótesis de modelamiento inicial en función del propósito definido para el prototipo II.

Tabla 7. Límites Prototipo II

| ELEMENTO | ENDÓGENO | EXÓGENO |
|--|----------|---------|
| Presupuesto general de la nación | | X |
| Inversión en infraestructura vial | X | |
| Asignación presupuestal base infraestructura vial | | X |
| Infraestructura vial (<i>kilómetros construidos</i>) | X | |
| Índice ambiental | X | |
| Demanda Conservacionista | X | |
| Asignación presupuestal inversión en medio ambiente | | X |
| Población | X | |
| Migración | X | |
| Parque automotor | X | |
| Tasa de compra vehicular | | X |
| Congestión | X | |
| Emisiones Dióxido de Carbono | X | |
| Infraestructura social | X | |

| | | |
|---|---|---|
| Asignación presupuestal inversión en infraestructura social | | X |
| Calidad de vida | X | |
| Demanda Social | X | |
| Preocupación Política | X | |

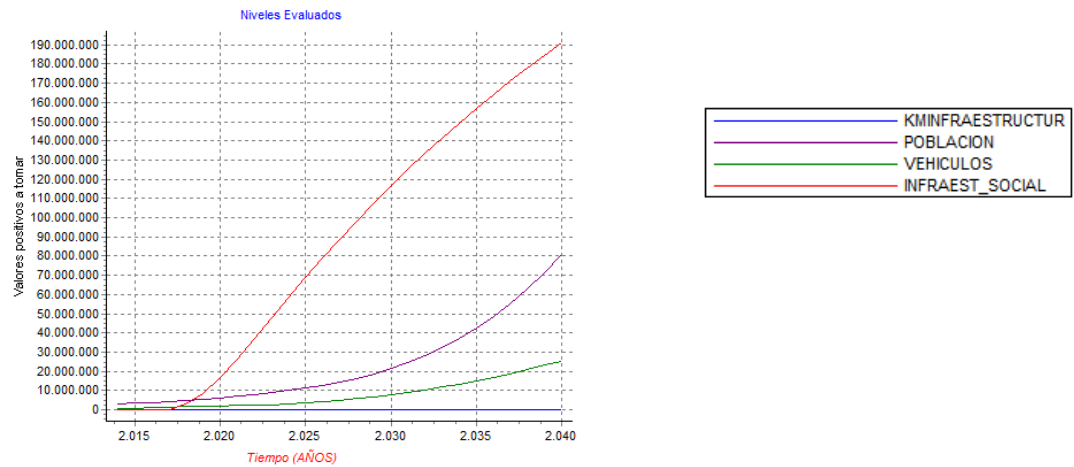
Acorde a la tabla anterior de límites, el modelo construido es consistente en representar como el deterioro del medio ambiente generado por infraestructura vial crea una demanda conservacionista por parte de la comunidad que se opone al desarrollo vial al afectar directamente la preocupación política de inversión para construcción de estas obras ingenieriles.

Es importante aclarar que la cuantía destinada a inversión vial es producto del parámetro exógeno “Asignación presupuestal base infraestructura vial” y la variable endógena “preocupación política”. Lo anterior debido a que la “preocupación política” puede disminuir o aumentar con respecto a la asignación presupuestal base para vías en función de la demanda conservacionista y social que la comunidad.

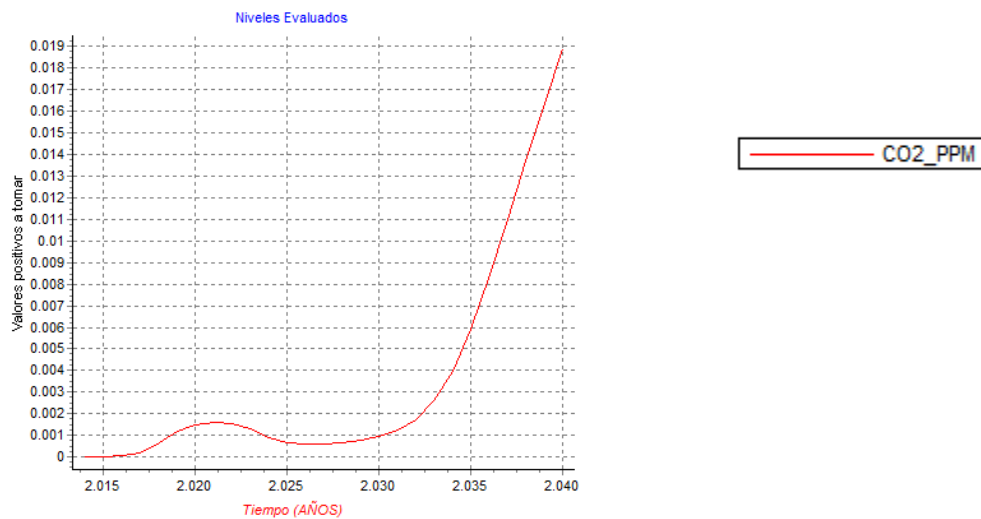
6.4.2 Evaluación de la estructura. Esta prueba evalúa si los recursos necesarios para el cumplimiento de la hipótesis del prototipo II tienen comportamientos adecuados en conformidad con las realidades físicas básicas y las leyes de conservación de la materia. Para ello fueron seleccionados los niveles del modelo cuya dinámica utiliza recursos reales y cuantificables que no pueden tomar valores negativos en el horizonte de tiempo seleccionado para la simulación (26 años).

Los niveles seleccionados fueron inversión kilómetros construidos de infraestructura vial, población, vehículos, emisiones de dióxido de carbono en partes por millón e infraestructura social, tal como lo muestran las siguientes gráficas:

Gráfica 22. Niveles seleccionados para evaluación de estructura – Prototipo II



Gráfica 23. Nivel de emisiones de dióxido de carbono de CO2 para evaluación de estructura – Prototipo II



En relación con las gráficas anteriores los niveles cuyas unidades son reales y cuantificables no toman valores negativos al igual que sus contrapartes en el mundo real tampoco lo hacen. De tal manera, se evalúa y concluye que la estructura del prototipo II es consistente con las leyes físicas básicas.

6.4.3 Consistencia dimensional. Esta evaluación exige especificar las unidades de medida para cada variable incluida en la construcción del modelo en lenguaje de flujos y niveles. Lo anterior evita inconsistencias dimensionales que puedan propiciar interpretaciones erróneas dentro de la estructura causal definida para el prototipo II cómo hipótesis explicativa al fenómeno en estudio. En el Anexo B se encuentra la descripción de cada una de las variables junto con sus respectivas unidades de medida que otorgan la correcta dimensionalidad a los resultados de simulación.

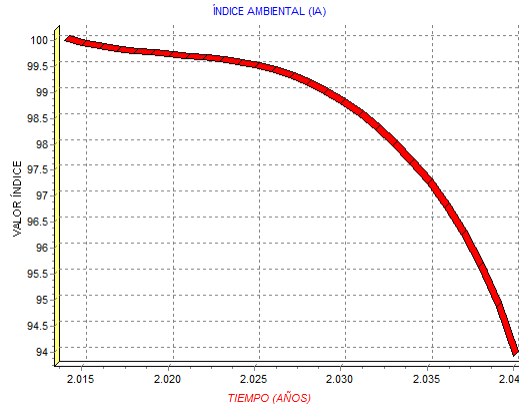
6.4.4 Evaluación de parámetros. Los parámetros son elementos exógenos a la delimitación de los límites establecidos para el sistema real que deseamos modelar. Su principal característica radica en como los valores que puede tomar durante el horizonte de simulación afectan el modelo, pero a su vez la representación del sistema (modelo) no repercute sobre ellos. De esta manera, tomando los elementos exógenos (parámetros) identificados en la prueba de suficiencia de límites, los autores del presente modelo describen minuciosamente el significado de cada uno de los parámetros y sus valores posibles acorde a la realidad percibida y modelada. Lo anterior consignado en la siguiente tabla:

Tabla 8. Evaluación de Parámetros - Prototipo II

| ELEMENTO | VALORES POSIBLES | VALOR DE REFERENCIA (Escenario base) | UNIDADES | NOTAS |
|---|-------------------|--------------------------------------|----------------------------|--|
| Presupuesto general de la nación | > 0 | 107.978.000 | Miles de millones de pesos | Dato de referencia tomado del Presupuesto General de la Nación (PGN) aprobado para 2014 por el congreso Colombiano |
| Asignación presupuestal base en infraestructura vial | $1 \geq X \geq 0$ | 0,047 = 4,7 % | Fracción | Participación relativa del sector transporte en la asignación de recursos estipulados en el Presupuesto General de la Nación 2014. (Para esta versión del modelo no se realiza un discernimiento de inversión y mantenimiento para el porcentaje asignado) |
| Tasa de compra vehicular | $1 \geq X \geq 0$ | 0,08 = 8 % | Fracción | Se estima que para Colombia por cada 1000 habitantes hay 80 vehículos particulares. 80 Lo que representa a nivel macroeconómico el 8% de la población influenciada por el desarrollo vial dentro de un contexto determinado. |
| Asignación presupuestal inversión en medio ambiente | $1 \geq X \geq 0$ | 0,003 = 0,3 % | Fracción | Participación relativa del sector ambiente y desarrollo sostenible, en la asignación de recursos estipulados por el Presupuesto General de la Nación 2014. |
| Asignación presupuestal inversión en infraestructura social | $1 \geq X \geq 0$ | 0,116 = 11,6 % | Fracción | Participación relativa del sector salud y protección social, en la asignación de recursos estipulados por el Presupuesto General de la Nación 2014. |

6.4.5 Condiciones extremas. El objetivo de esta prueba es evaluar la robustez que tiene la estructura dinámica del modelo en condiciones extremas de simulación. Ello, se corrobora asignando valores extremos a los parámetros exógenos de tal manera que el modelo responda arrojando comportamientos de forma realista sin importar el rango de valores que los parámetros puedan tomar. La expresión “realista” hace alusión a que los resultados de simulación deben estar en concordancia con los supuestos establecidos por los autores bajo la hipótesis dinámica del prototipo II. De esta manera, se elige como comportamiento de referencia el índice ambiental observado en la Gráfica 24.

Gráfica 24. Índice ambiental – comportamiento de referencia condiciones extremas Prototipo II



Para el comportamiento de referencia que se observa en la Gráfica 24 la asignación de valores a los parámetros exógenos corresponde al escenario base de simulación descrito en la siguiente tabla:

Tabla 9. Escenario comportamiento de referencia

| ELEMENTO | VALORES POSIBLES | VALOR DE REFERENCIA (Escenario base) |
|---|------------------|--------------------------------------|
| Presupuesto general de la nación | > 0 | 107.978.000 |
| Asignación presupuestal base en infraestructura vial | 1 >= X >= 0 | 0,047 = 4,7 % |
| Tasa de compra vehicular | 1 >= X >= 0 | 0,08 = 8 % |
| Asignación presupuestal inversión en medio ambiente | 1 >= X >= 0 | 0,003 = 0,3 % |
| Asignación presupuestal inversión en infraestructura social | 1 >= X >= 0 | 0,116 = 11,6 % |

Posteriormente se procede a realizar dos simulaciones con tres escenarios cada una en condiciones extremas para los parámetros “tasa de compra vehicular”, “asignación presupuestal inversión en medio ambiente”, “asignación presupuestal inversión en infraestructura social” e “asignación presupuestal base infraestructura vial”. Lo anterior acorde a los valores especificados en la siguiente tabla:

Tabla 10. Parámetros exógenos en condiciones extremas – Prototipo II

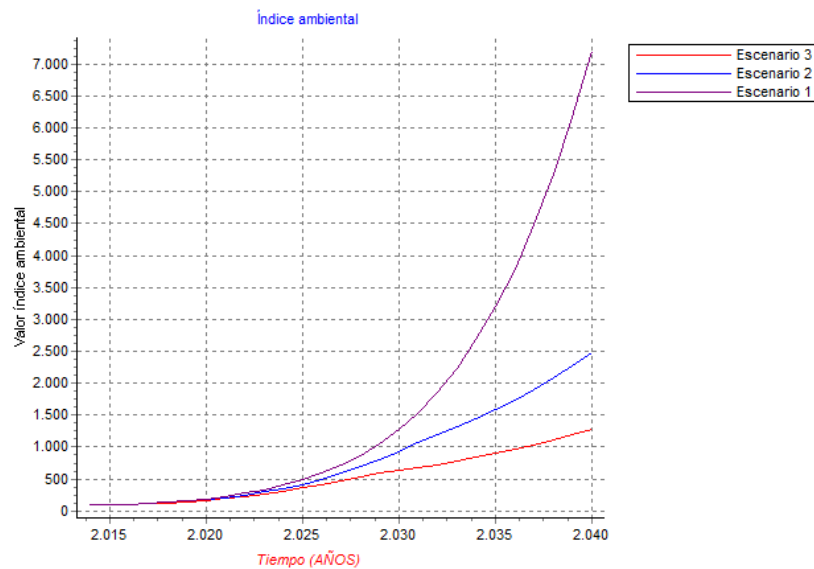
| Parámetro exógeno | Simulación # 1 | | | Simulación # 2 | | |
|-------------------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 | Escenario 1 | Escenario 2 | Escenario 3 |
| Tasa de compra vehicular | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 1 | 0.9 | 0.8 |
| Inversión en medio ambiente | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| Inversión en infraestructura social | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| Inversión base infraestructura vial | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 1 | 0.9 | 0.8 |

Fuente: Autor

En la Tabla 10 los valores asignados a los parámetros de inversión en medio ambiente, infraestructura social, tasa de compra vehicular e inversión base infraestructura vial, corresponden a los límites posibles que dichas variables exógenas pueden tomar acorde a sus rangos de valores definidos en la Tabla 8: Evaluación de Parámetros – Prototipo II. De esta manera los resultados de las simulaciones #1 y #2 deben ser coherentes al comportamiento de referencia observado en la Gráfica 24 donde el índice ambiental tiene una correlación negativa con la asignación presupuestal destinada para infraestructura vial.

Los resultados obtenidos para la simulación #1 realizada en condiciones extremas, se observan en la siguiente gráfica:

Gráfica 25. Simulación #1 condiciones extremas – Prototipo II

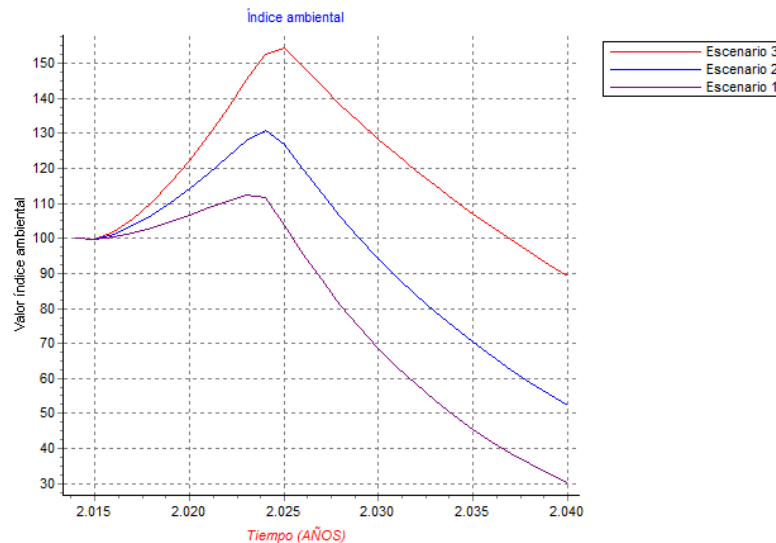


En la Gráfica 25 se observa como condiciones extremas caracterizadas por altas inversiones en conservación ambiental y bajas asignaciones presupuestales bases para infraestructura vial junto con bajas tasas de compra de vehículos, mantienen el comportamiento intuitivo y cualitativo esperado para el fenómeno de estudio en las condiciones anteriormente mencionadas, el cual tiende a un alto índice ambiental debido a la baja cantidad de vehículos como fuentes emisoras de CO2 que deterioran el ambiente además de la baja construcción vial que modifica el entorno natural a una ritmo bajo.

Posteriormente, la Gráfica 26 representa la simulación #2 y sus tres escenarios planteados bajo parámetros de simulación en condiciones extremas tal lo muestra la Tabla 10. En esta Gráfica se sigue manteniendo el comportamiento cualitativo esperado para el fenómeno, que para las condiciones de simulación planteadas: altos niveles en tasa de compra vehicular e inversión vial, hay un deterioro

significativo del índice medio ambiental debido a que los daños sobre él no son contrarrestados con inversiones elevadas que procuren su conservación.

Gráfica 26. Simulación #2 condiciones extremas – Prototipo II



En consecuencia, independientemente de los valores extremos que los parámetros exógenos puedan tomar bajo diferentes escenarios de simulación, los comportamientos cualitativos esperados para el caso particular del índice ambiental siguen siendo coherentes con la correlación negativa entre desarrollo vial y calidad medio ambiental. Así, se corrobora la robustez y adaptabilidad de la estructura causal planteada para este prototipo II, la cual responde coherentemente a cualquier valor que las entradas puedan tomar.

6.4.6 Error de integración. Los modelos construidos con dinámica de sistemas son usualmente formulados en condiciones de tiempo continuo y resueltos utilizando métodos de integración numérica. Por tal motivo, los modeladores deben elegir un método de integración y un tiempo de paso que generen una aproximación lo

suficientemente precisa con respecto al propósito del modelo, donde los comportamientos que son analizados en los resultados de simulación no presenten incoherencias gráficas provenientes del paso de integración seleccionado.

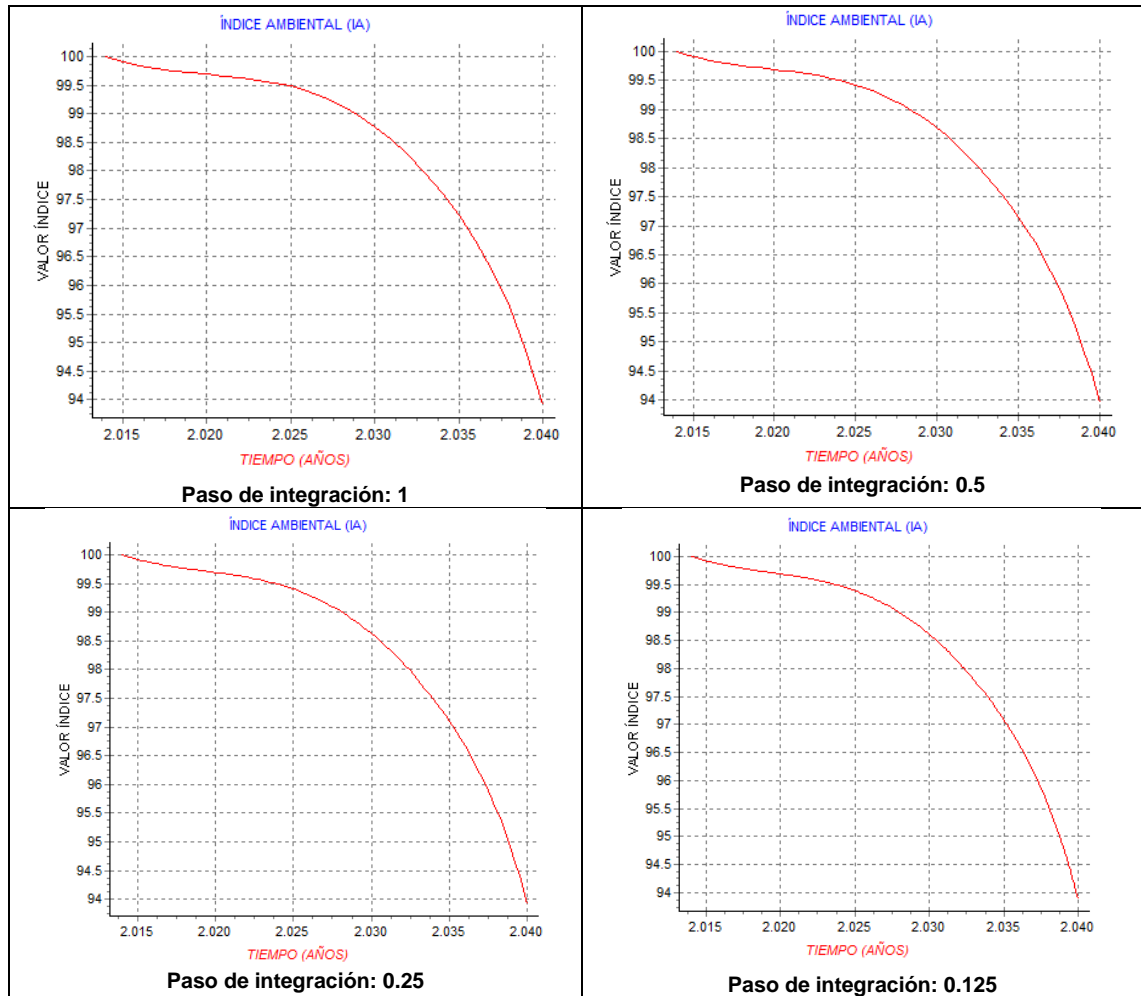
Para realizar esta prueba se elige el índice ambiental como comportamiento de referencia para evaluarlo bajo cuatro pasos de integración diferentes observados en la siguiente tabla:

Tabla 11. Pasos de integración – Prototipo II

| NÚMERO DE SIMULACIONES | PASO DE INTEGRACIÓN | COMPORTAMIENTO ÍNDICE AMBIENTAL |
|------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Simulación #1 | 1 | Decrecimiento tendencia a cero con |
| Simulación #2 | 0.5 | Decrecimiento tendencia a cero con |
| Simulación #3 | 0.25 | Decrecimiento tendencia a cero con |
| Simulación #4 | 0.125 | Decrecimiento tendencia a cero con |

Los resultados de simulación obtenidos con los pasos de integración definidos en la Tabla 11, se observan en la Figura 22.

Figura 22. Simulación índice ambiental – Pasos de integración Prototipo II

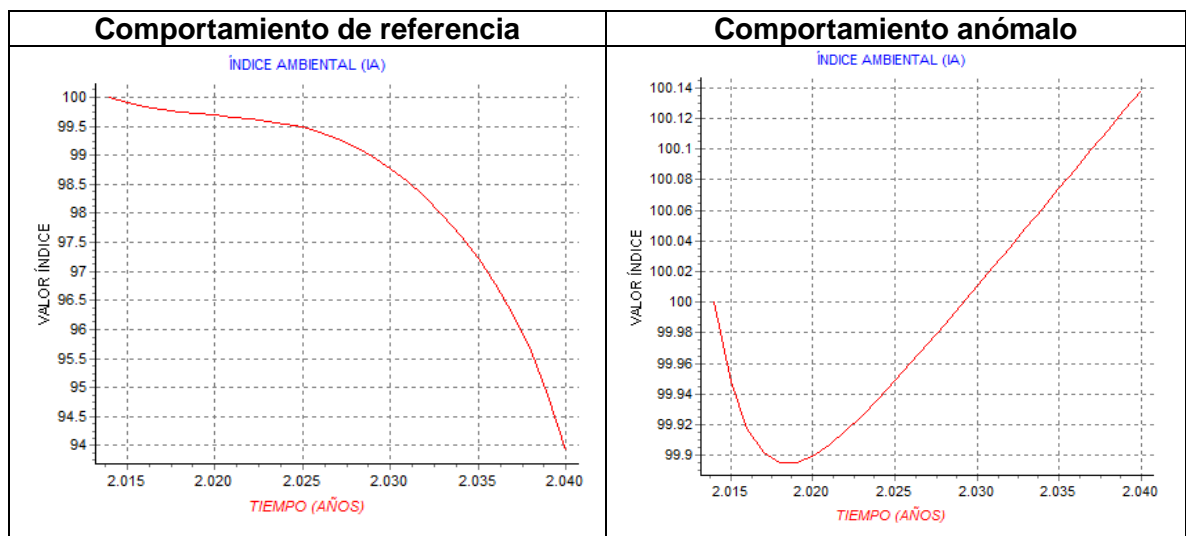


Con los resultados obtenidos en la Figura 22 para las simulaciones del índice ambiental, no se evidencia modificación o variación alguna utilizando cuatro pasos de integración diferentes.

6.4.7 Comportamiento anómalo. La prueba de comportamiento anómalo examina la importancia estructural de las relaciones causales preguntando si comportamientos anómalos surgen cuando alguna de las relaciones realimentadas

dentro de la estructura causal planteada como hipótesis de trabajo es eliminada o modificada. De esta manera, se procedió a eliminar la relación de influencia que la construcción de kilómetros viales ejerce sobre el índice ambiental para observar el comportamiento anómalo resultante que esta acción genera sobre el índice ambiental. Los resultados pueden ser observados en la Figura 23.

Figura 23. Comportamiento anómalo – Prototipo II

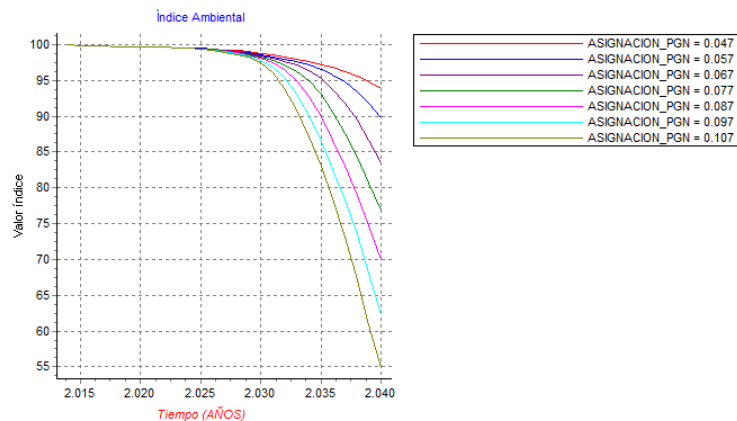


En la Figura 23, se observa el comportamiento de referencia donde se mantiene la relación de deterioro que la construcción vial tiene sobre el índice ambiental. A su vez, se aprecia el comportamiento anómalo resultante al eliminar dicha relación de influencia, lo cual genera un comportamiento que va en sentido opuesto a los resultados obtenidos por los dos prototipos del modelo planteados en el presente trabajo. En ellos, se ha verificado que la estructura causal planteada por los autores tiene una correlación negativa entre el estado del índice ambiental y la construcción de kilómetros viales. En consecuencia, se verifica la importancia de esta relación de influencia entre estas dos variables dentro del presente modelo para mantener vigente el objetivo bajo el cual es construido.

6.4.8 Análisis de sensibilidad. Esta prueba permite a los modeladores preguntar si sus conclusiones cambian de forma relevante respecto al propósito cuando los supuestos varían en un rango plausible de incertidumbre. De esta forma la robustez en las conclusiones que el modelo presenta será probada utilizando el análisis de sensibilidad por variación de parámetros que ofrece la herramienta evolución 4.5.

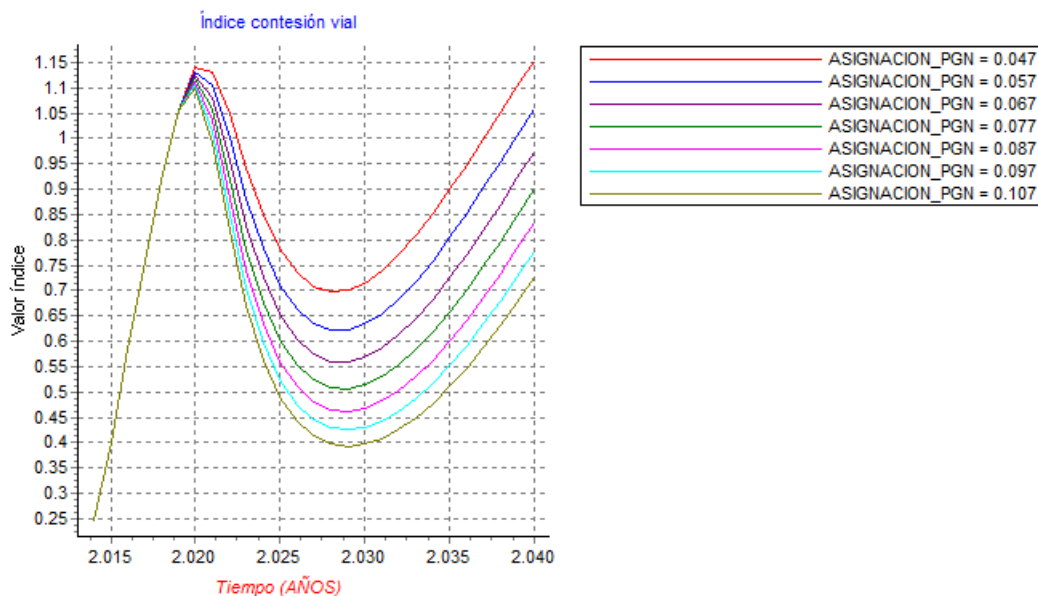
6.4.8.1 Índice ambiental bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. En la Gráfica 27 se observa el comportamiento que el índice ambiental presenta bajo seis escenarios diferentes de inversión en desarrollo vial donde cada uno de ellos presente un aumento de un punto porcentual con respecto al valor base de 4.7% definido en el Presupuesto General de la Nación 2014 para Colombia. Para cada asignación presupuestal se observa cómo después del año de simulación 2030 cuando la capacidad instalada de malla vial es máximo debido a la inversión, el valor del índice ambiental toma sus valores más bajos. De esta manera, la premisa bajo la cual se construye el modelo del presente trabajo de grado donde la construcción de infraestructura vial genera deterioro ambiental se mantiene vigente acorde al análisis de sensibilidad realizado en la Gráfica 27.

Gráfica 27. Índice ambiental bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II



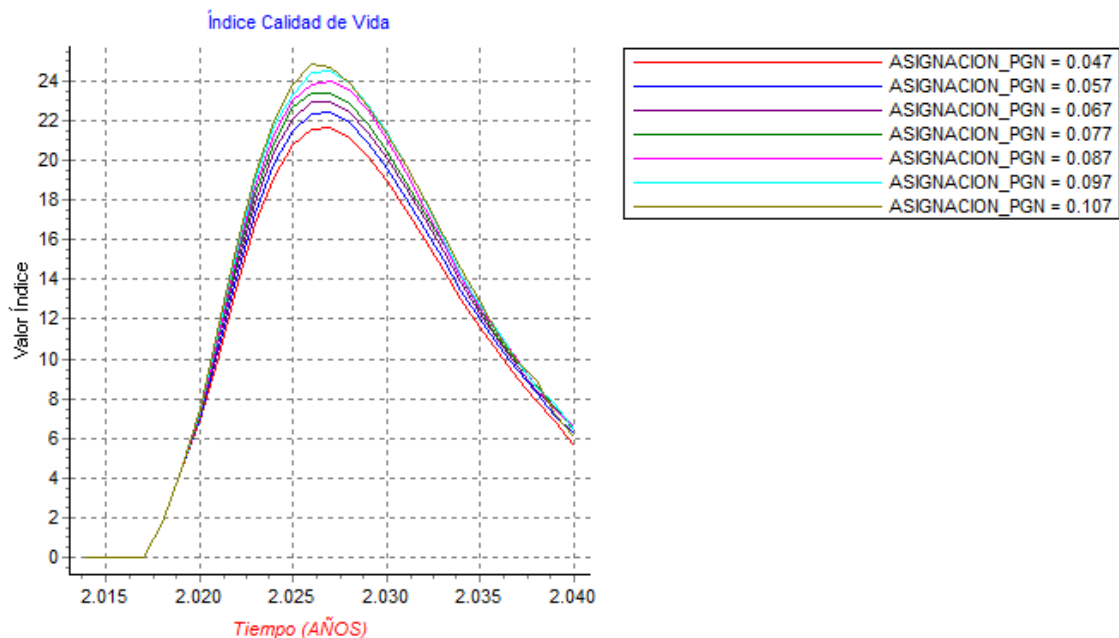
6.4.8.2 Congestión vehicular bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. El análisis de sensibilidad observado en la Gráfica 28 permite corroborar la permanencia del comportamiento contra intuitivo discutido anteriormente en la sección 6.3.6. En consecuencia, el aumento en la inversión destinada a construcción de infraestructura vial (en esta simulación se evalúan seis escenarios, cada uno de ellos con un aumento de un punto porcentual en el valor destinado a desarrollo vial) sigue presentando un elevado índice de congestión a largo plazo. Con ello, es posible concluir que independientemente de la asignación presupuestal destinada a desarrollo vial la demanda vehicular va en continuo aumento generando que la capacidad instalada aproximadamente después del año 2030 de simulación deje de responder al objetivo bajo el cual se implementa en un inicio como política única que pretende ser una solución a la problemática de movilidad.

Gráfica 28. Índice de congestión vehicular bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II



4.4.8.3 Calidad de vida bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. El análisis de sensibilidad presentado en la Gráfica 29 muestra como el índice de calidad de vida tiene un comportamiento análogo para cada asignación presupuestal que se defina para el desarrollo de infraestructura vial. Lo anterior, en correspondencia con la Gráfica 28 permite inferir que la calidad de vida tiene su valor más elevado cuando la capacidad vial instalada a mediano plazo responde a la demanda vehicular que circula sobre ella. Sin embargo, cuando el deterioro ambiental y el índice de congestión aumentan sobre el final del horizonte de simulación, el índice observado en la Gráfica 29 empieza a decrecer como consecuencia del aumento en los tiempos de desplazamiento que la congestión trae consigo.

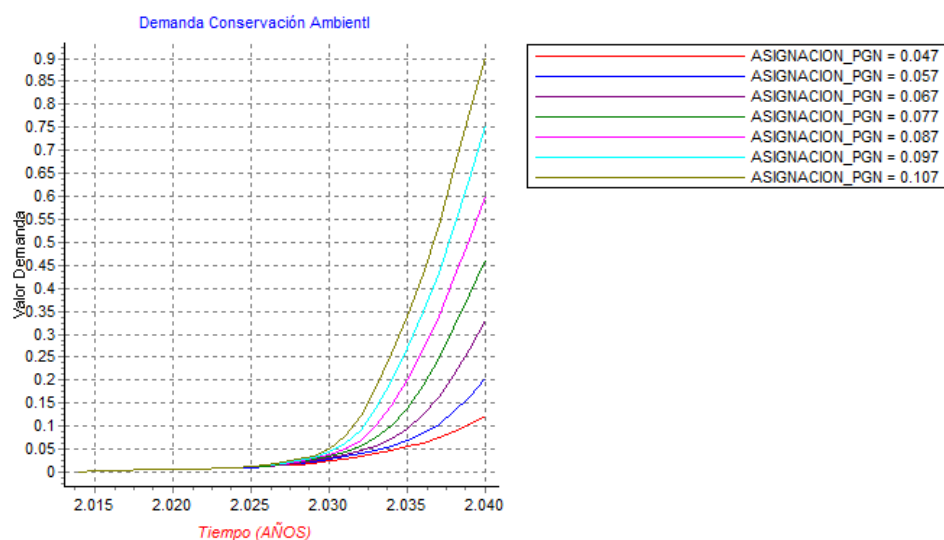
Gráfica 29. Índice calidad de vida bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II



De esta forma, el análisis de sensibilidad realizado permite corroborar la premisa que relaciona el estado ambiental y las facilidades de desplazamiento con la calidad de vida de la población.

6.4.8.4 Demanda conservacionista bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. En la Gráfica 30 se observa el análisis de sensibilidad realizado para la demanda conservacionista hecha por la población que se opone al desarrollo vial. Con los resultados obtenidos, a medida que hay un aumento porcentual de la asignación presupuestal destinada a construcción de infraestructura de transporte la demanda de conservación ambiental va creciendo como inconformismo de la población, al percibir el deterioro ambiental proveniente de la construcción vial y de las emisiones de dióxido de carbono emergentes del flujo vehicular que aumentan al final del horizonte de simulación cuando la congestión vial es máxima.

Gráfica 30. Demanda conservacionista bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II

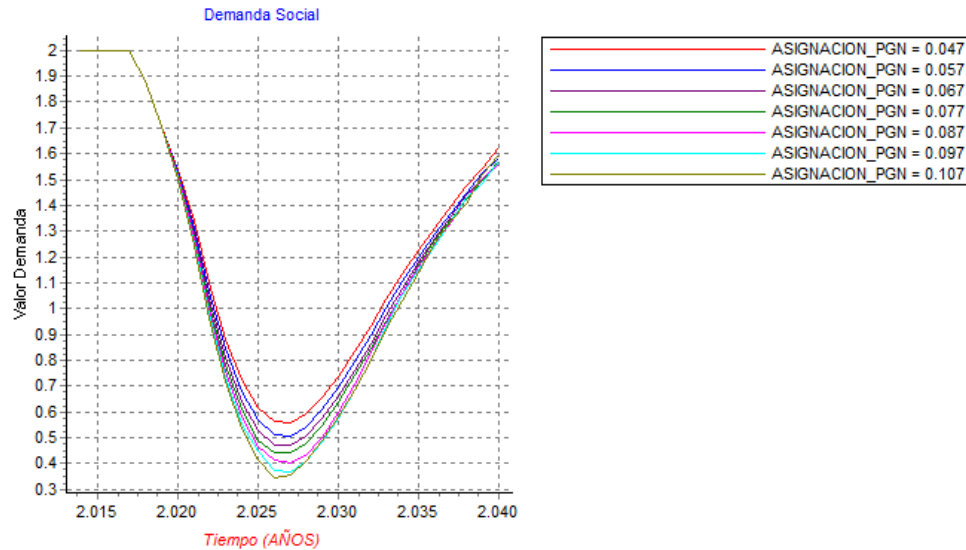


En consecuencia, se verifica que la demanda de conservación ambiental es directamente proporcional al desarrollo vial sujeto a la asignación presupuestal que se destine para ello.

4.4.8.5 Demanda social bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura vial. Para la demanda social la premisa que los autores del presente plantearon es que su comportamiento está sujeto en gran medida a las facilidades de desplazamiento que la capacidad vial instalada traiga consigo para la población. Con esto, el análisis de sensibilidad que se observa en la Gráfica 31 verifica esta premisa. En ella, se observa como la demanda social es mínima cerca al año 2027 de simulación cuando el índice de congestión es mínimo como solución que la ampliación de la malla vial trae consigo en materia de descongestión vehicular a mediano plazo. Sin embargo, la Gráfica 31 permite observar que independientemente de la asignación presupuestal que se destine a construcción de infraestructura de transporte, la demanda social aumenta sobre los últimos años de simulación lo cual conduce a mayor presión sobre el estado para aumentar la capacidad vial como respuesta a los elevados tiempos de desplazamiento productos de la congestión.

Por lo tanto, la demanda social presenta comportamientos análogos para cada asignación presupuestal en construcción vial debido a que ello como medida única que intenta mejorar el tema de movilidad por parte del estado, no es una solución que afronte la problemática estructuralmente, lo que con lleva a que al final del horizonte de simulación el sistema esté en peores condiciones a como esta inicialmente cuando la capacidad vial instalada era baja.

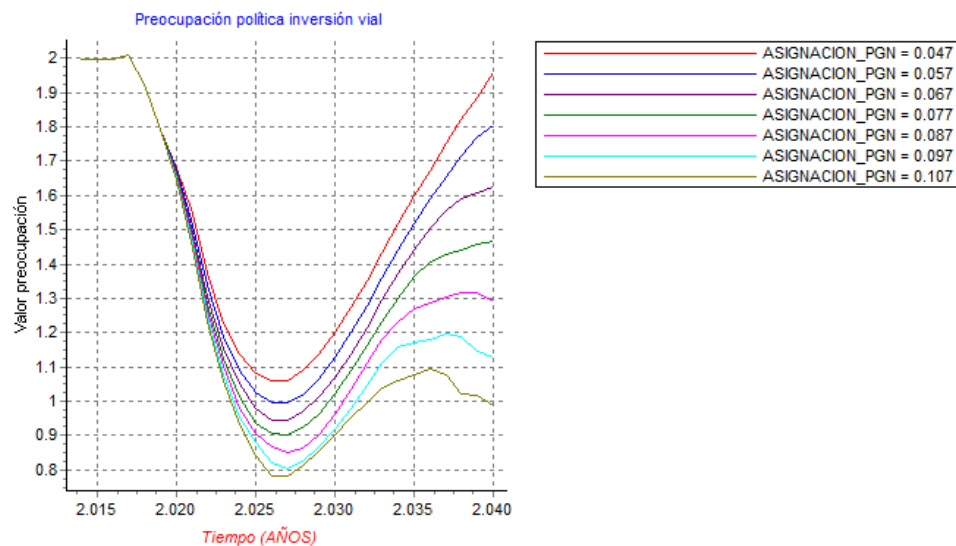
Gráfica 31. Demanda social bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II



4.4.8.6 Preocupación política aumento inversión vial bajo variación presupuestal destinada a construcción de infraestructura para transporte. En la Gráfica 32 se observa como la preocupación política expresada en función de que tanto puede variar la inversión en infraestructura vial con respecto a una asignación presupuestal base establecida, varía en con respecto a las demandas sociales que la población realiza. La preocupación política por aumentar la cuantía dirigida a desarrollo vial presente sus valores más bajo para cada asignación presupuestal cerca del año 2027 cuando la calidad de vida es máxima debido al bajo índice de congestión. Sin embargo, como la demanda vehicular sigue creciendo, la congestión vial vuelve a aumentar sobre el final del horizonte de simulación y es este punto donde la preocupación política no puede responder de la misma forma a como lo hizo cuando la capacidad instalada era baja al inicio del horizonte de simulación debido a que es este mismo punto donde la demanda conservacionista presenta sus mayores valores, a causa del deterioro ambiental. Este comportamiento se observa en la Gráfica 32 reflejando el peso que podrían

tener dos posturas de la población sobre la toma de decisiones de los gobernantes frente a una posible ampliación de la malla vial como solución que mejore el estado de la movilidad vehicular en cuanto a la asignación de recursos se refiere.

Gráfica 32. Preocupación política bajo diferentes escenarios de inversión en infraestructura vial – Prototipo II



6.5 EVALUACIÓN POR ESCENARIOS – PROTOTIPO II: FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE POLÍTICAS

Al abordar el entendimiento del impacto ambiental generado por el desarrollo vial desde la dinámica de sistemas como paradigma de pensamiento y metodología de trabajo, se favorece el planteamiento de posibles interrelaciones entre variables del fenómeno objeto de estudio que conducen a la formulación de políticas de intervención del modelo al realizar cuestionamiento del tipo ¿Qué pasaría sí...?, que pueden ser respondidos a partir de los comportamientos simulados obtenidos.

De esta manera, una vez terminada la etapa de modelamiento (se elaboraron 2 prototipos de complejidad creciente) de la cual se obtuvieron resultados de simulación que fueron discutidos para determinar la coherencia de los mismos con el propósito definido para el modelo, se procedió a realizar un conjunto de pruebas de evaluación que permitieron establecer la robustez del mismo bajo unos límites o restricciones establecidos por los autores. Así, se da paso a este capítulo dentro del presente trabajo de grado donde se definen una serie de políticas implementadas a modo de evaluación por escenarios sobre el prototipo II con el objetivo de plantear alternativas que mejoren la toma de decisiones frente a la sostenibilidad ambiental en el desarrollo y construcción de infraestructura vial para transporte como medida que estimula la calidad de vida y movilidad de la población.

Por lo tanto, basados en lo anterior las políticas propuestas son:

- Variación en la asignación presupuestal destinada a Inversión en conservación ambiental.
- Variación en la asignación presupuestal base destinada a la construcción de infraestructura de transporte
- Cambio de tecnología vehicular para disminuir las emisiones de dióxido de carbono por vehículo.
- Disminución del número de vehículos por persona con el propósito de aumentar la tasa de ocupación vehicular.
- Implementación de procesos de chatarrización que permitan constante renovación del parque automotor.
- Inversión en restauración ambiental paralela al desarrollo vial para compensar su deterioro generado por estas obras ingenieriles.

Así, cada una de las políticas anteriores es simulada en tres escenarios bajo condiciones controladas descritas a continuación:

- Escenario típico: Escenario con valores base bajo los cuales se realizaron las simulaciones de resultados del prototipo II en la sección 4.3.6. Dichos valores, hacen referencia a las asignaciones presupuestal descrita en el plan general de la nación para Colombia 2014.
- Escenario optimista: Escenario caracterizado por una alta inversión para desarrollo vial y conservación ambiental, interpretada como una elevada responsabilidad política por invertir en soluciones de conservación ambiental y crecimiento social que incentivan la calidad de vida de la población.
- Escenario descuidado: Escenario caracterizado por la más baja asignación presupuestal para inversión en desarrollo vial.

De esta manera, la descripción de los parámetros característicos de cada escenario puede ser observada en la Tabla 12.

Tabla 12. Políticas definidas por escenarios aplicadas a Prototipo II

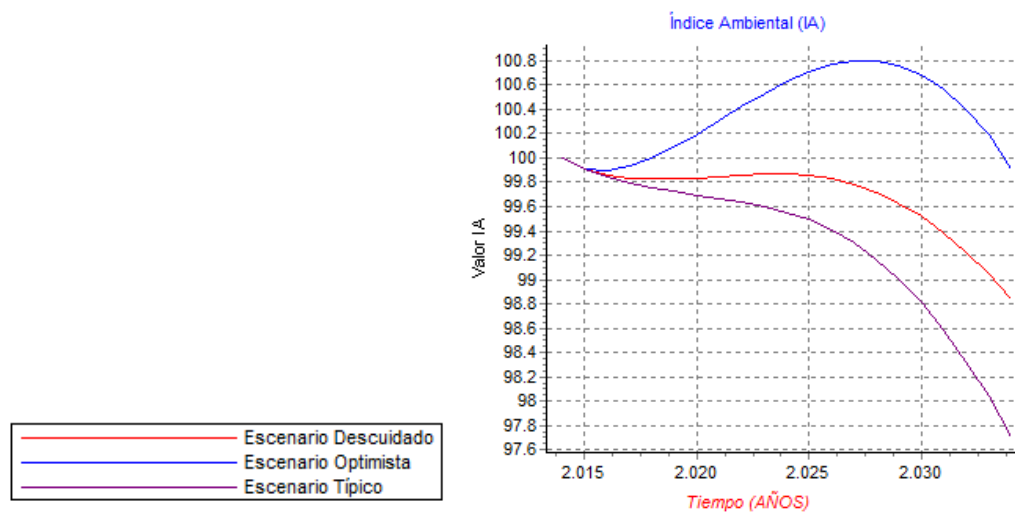
| Política | Escenario típico | Escenario optimista | Escenario descuidado |
|---|------------------|---------------------|----------------------|
| Inversión en infraestructura vial | 0.047 | 0.057 | 0.037 |
| Inversión en conservación ambiental | 0.003 | 0.01 | 0.005 |
| Cambio de tecnología vehicular para mitigar emisiones de CO2 | 0.2431 | 0.12 | 0.12 |
| Vehículos por persona | 0.08 | 0.04 | 0.08 |
| Chatarrización de vehículos | 0.01 | 0.1 | 0.1 |
| Inversión en restauración ambiental por construcción vial | 0.001 | 0.003 | 0.001 |

En consecuencia, las políticas plasmadas en la tabla anterior toman valores diferentes en cada uno de los tres escenarios planteados. El escenario típico tiene

las condiciones iniciales (valores de referencia) con las cuales se realizaron las simulaciones y discusión de los resultados del prototipo II en la sección inmediatamente anterior. A partir de ello, un aumento o disminución con respecto al valor de referencia para cada política en determinado escenario representa el apoyo o no que se le da a dicha política para que sea implementada en el sistema. De esta manera, se procedió a realizar las simulaciones de cada uno de los tres escenarios descritos anteriormente para determinar que influencia tienen las políticas dentro de la sostenibilidad ambiental y social que se pretende alcanzar con su implementación dentro del contexto donde se pone en marcha la construcción vial.

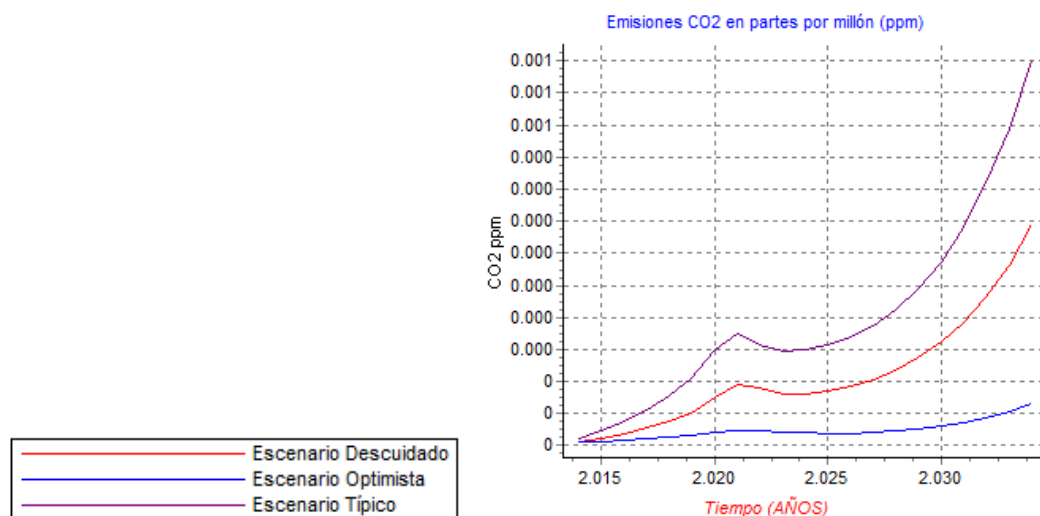
Así, observando los resultados obtenidos para el índice ambiental (IA) en la Gráfica 33, el escenario optimista presenta el mejor IA a pesar de tener la política de mayor asignación presupuestal para inversión en infraestructura vial. Con esto, el deterioro ambiental se logra compensar con el aumento porcentual en inversión destinada para su conservación acompañado de la asignación de recursos monetarios para su restauración a medida que la construcción de infraestructura vial se va lleva a cabo.

Gráfica 33. Evaluación políticas en índice ambiental– Prototipo II



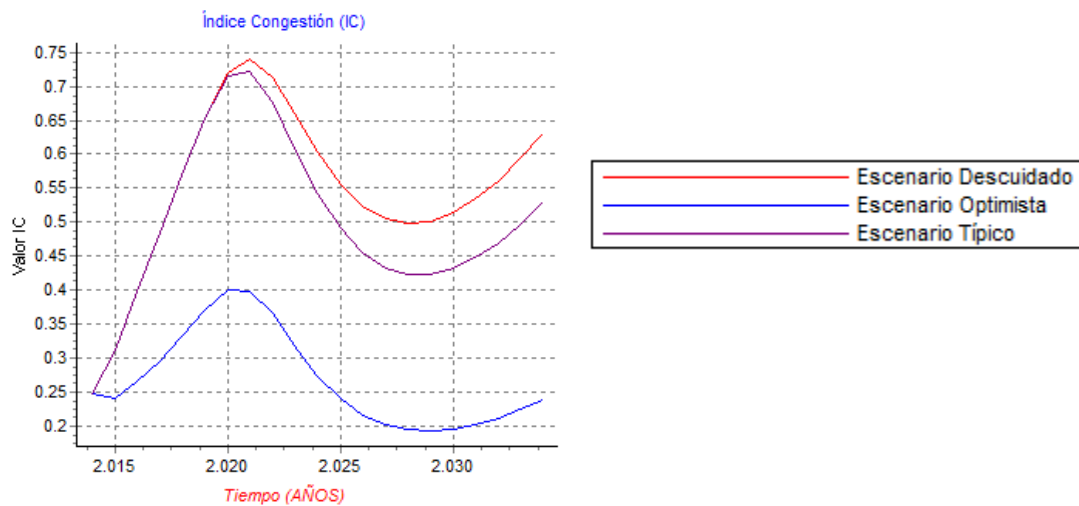
De igual forma, el cambio de tecnología en los vehículos que (migración a uso de vehículos eléctricos para disminuir el uso de combustibles fósiles) circulan por la malla vial reduce las emisiones de dióxido de carbono por vehículo lo cual favorece igualmente la conservación del IA. Las reducciones en las emisiones de dióxido de carbono en partes por millón pueden ser observador en la Gráfica 34. En esta gráfica se observa como el escenario optimista y descuidado reportan las emisiones de CO2 en partes por millón más bajas acorde a los valores de las políticas establecidas en la Tabla 12. Sin embargo, se evidencia similitud en el comportamiento cualitativo entre el escenario típico y el escenario descuidado (a pesar que los valores resultantes del escenario descuidado son inferiores al escenario típico). Dicha similitud se debe a que en el escenario descuidado el valor de vehículos por persona o tasa de ocupación vehicular se mantiene igual al valor que esta política toma en el escenario típico. En consecuencia, un cambio tecnológico para mitigar las emisiones de dióxido de carbono mientras se mantiene la misma demanda vehicular no permite mejorar la congestión vehicular como se observa en la Gráfica 35.

Gráfica 34. Evaluación políticas en emisiones de dióxido de carbono – Prototipo II



En la Grafica 35, se observa como el escenario optimista logra atenuar el índice de congestión producto de la implementación de una política que busca aumentar la tasa de ocupación vehicular. Así, se evita un elevado índice de congestión independientemente de la tecnología vehicular que tenga el parque automotor que circula sobre la malla vial (se controla la demanda vehicular circulante sobre la malla vial disponible)

Gráfica 35. Evaluación políticas en índice de congestión vehicular – Prototipo II

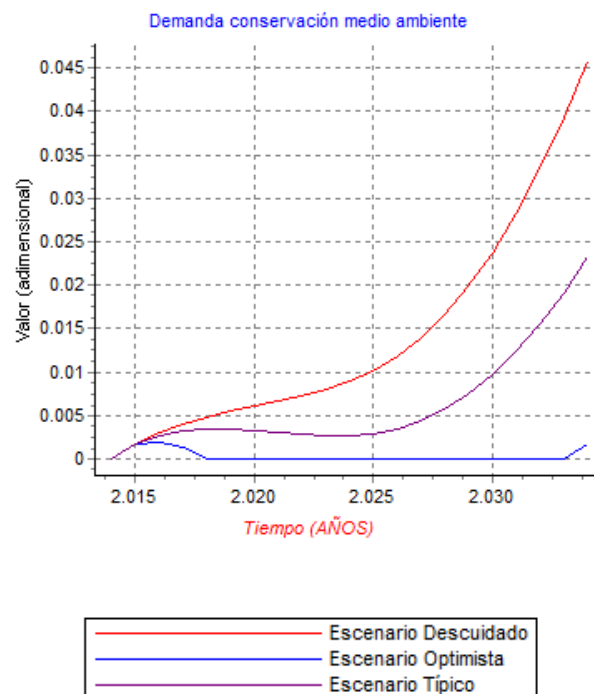


De igual forma, la implementación de una política de chatarrización favorece el proceso de descongestión como se observa en la Gráfica 35 donde el escenario típico presenta el índice de congestión más elevado como consecuencia de tener una tasa elevada de vehículos por persona, así como un valor bajo para procesos de chatarrización vehicular. En consecuencia, la implementación de estas políticas favorece la consecución del objetivo primario bajo el cual se construye la infraestructura vial al mejorar la movilidad vehicular y descongestionar los desplazamientos que las personas realizan, estimulando así, la calidad de vida de

la población y logrando reducir las posibles demandas sociales que emerjan por problemas de movilidad.

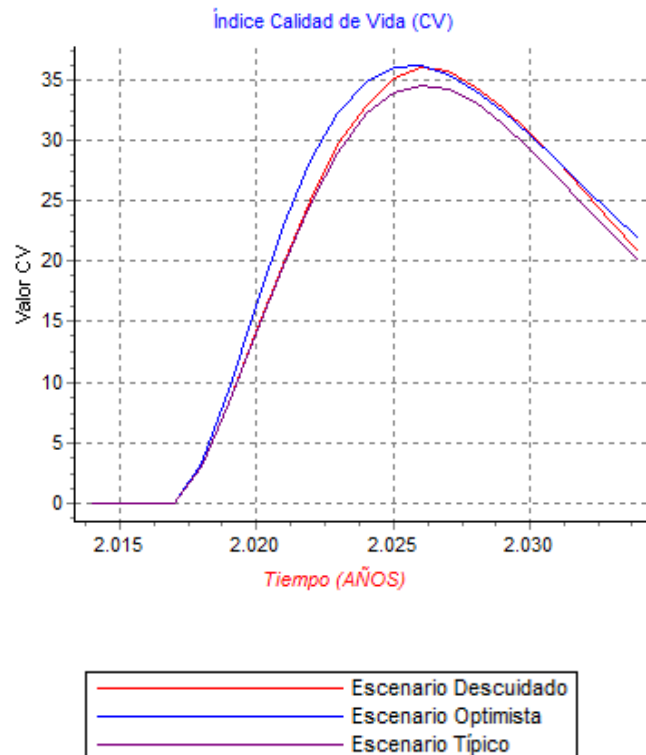
De esta manera, el escenario optimista a pesar de tener la mayor asignación presupuestal para el desarrollo de infraestructura vial genera la demanda de conservación más baja tal se observa en la Gráfica 36. Lo anterior, debido a la implementación de políticas que buscan reducir las emisiones de dióxido de carbono sujetas a un bajo índice de congestión para este escenario, acompañado además, del aumento en inversión que promueva la conservación y restauración ambiental dentro del mismo.

Gráfica 36. Evaluación políticas demanda conservación ambiental – Prototipo II



En consecuencia, la mayor capacidad vial alcanzada en el escenario optimista acompañada de políticas monetarias de conservación ambiental, junto con iniciativas de chatarrización y disminución del número de vehículos por persona que conducen al índice más bajo de congestión entre los tres escenarios planteados, permiten alcanzar el índice de calidad de vida más alto para la población involucrada en el contexto donde se construye la infraestructura vial como se observa en la Gráfica 37.

Gráfica 37. Evaluación políticas calidad de vida – Prototipo II



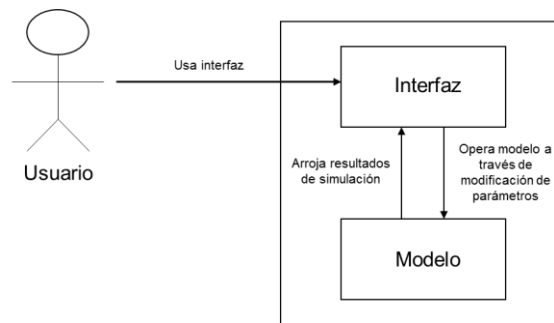
Por lo tanto, se corrobora la importancia de abordar el fenómeno de deterioro ambiental generado por desarrollo vial desde el paradigma dinámico sistémico. A través del cual es posible formular diferentes escenarios con diversas políticas que

permitan abordar la problemática holísticamente y así, alcanzar soluciones subyacentes que faciliten el desarrollo ambiental sostenible paralelamente a la construcción vial cuya consecución es de vital importancia para alcanzar los modelos de desarrollo económico y social que los países formulan para sus pueblos.

7. INTERFAZ SOFTWARE – Sostenibilidad ambiental 1.0

El modelo desarrollado en el presente trabajo de grado tiene por propósito mejorar y apoyar la toma de decisiones frente a la planeación, organización y ejecución de proyectos viales orientándose a garantizar la sostenibilidad ambiental del contexto donde se construyen estas iniciativas ingenieriles. Por lo tanto, es de vital importancia construir una interfaz software que permita a usuarios sin conocimiento y experticia en modelado y simulación con dinámica de sistemas, interactuar con el modelo de forma que puedan realizar simulaciones a partir de la modificación de parámetros sin necesidad de ir directamente al modelo y por ende, observar gráficas que describen los comportamientos en las variables de interés (ver Figura 24) siendo conscientes del modelo que subyace tras la interfaz, al poder consultar los respectivos diagramas de influencias y flujos-niveles (es importante aclarar que estos diagramas solo podrán ser consultados y no modificados, debido a que la interfaz es desarrollado únicamente para usuarios sin conocimiento en modelo y simulación). Esto, incentiva la toma de decisiones argumentada en procesos públicos donde diferentes actores tienen intereses particulares (políticos, sociales, ambiental, económicos, entre otros) sobre el desarrollo de proyecto viales.

Figura 24. Descripción interacción usuario – interfaz software – modelo



Ambiente software: Sostenibilidad ambiental 1.0

7.1 ACTOR

7.1.1 Delimitación

Un actor es una idealización de una persona externa o proceso que caracteriza las interacciones que los usuarios pueden tener con un sistema y sus respectivas funcionalidades [33]. Las interacciones que el actor tiene con el sistema pueden ser representadas a través de casos de uso los cuales son interpretados como unidades coherentes de funcionalidad.

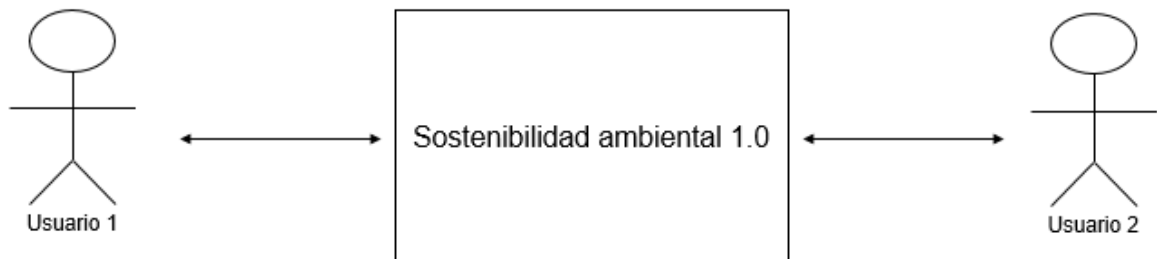
En consecuencia, para el presente desarrollo software la definición de usuarios (actores) que podrán interactuar con el modelo a través de la interfaz se realizó con base en el libro “Modelado y simulación en la escuela” escrito por el Profesor Hugo Andrade. Estos tipos de usuarios son descritos a continuación (Andrade y Otros., 2014):

- Usuario solo consciente de la presencia del modelado y simulación en los simuladores (**Usuario 1**): usuario no conocedor de dinámica de sistemas que encontrará en la interfaz un útil que apoya su proceso de aprendizaje frente a la temática de sostenibilidad ambiental en el desarrollo vial. De esta manera, el usuario solo experimenta guiado por la interfaz al modificar parámetros y observar gráficos que representan los comportamientos de las variables de interés.
- Usuario consciente del modelo (**Usuario 2**): usuario capaz de leer los diagramas de influencias y flujos-niveles (puede leer estos diagramas pero no modificarlos), lo cual le permite experimentar con la interfaz teniendo conocimiento del modelo que subyace en ella.

De igual forma, es importante aclarar que estos dos tipos de usuarios definidos para operar la interfaz software deben tener conocimientos en el área de la ingeniería civil, debido a que son ellos actores representativos en la planificación de proyectos enfocados a construcción vial y con este desarrollo software se pretende construir un útil que apoyo la toma decisiones y mejore el estado de entendimiento frente a la sostenibilidad ambiental en contextos donde se construyen estas iniciativas ingenieriles.

La Figura 25 representa la delimitación del sistema con los dos actores que interactúan con la interfaz software “sostenibilidad ambiental 1.0”.

Figura 25. Diagrama de contexto



7.1.2 Especificación

Tabla 13. Actores interfaz gráfica

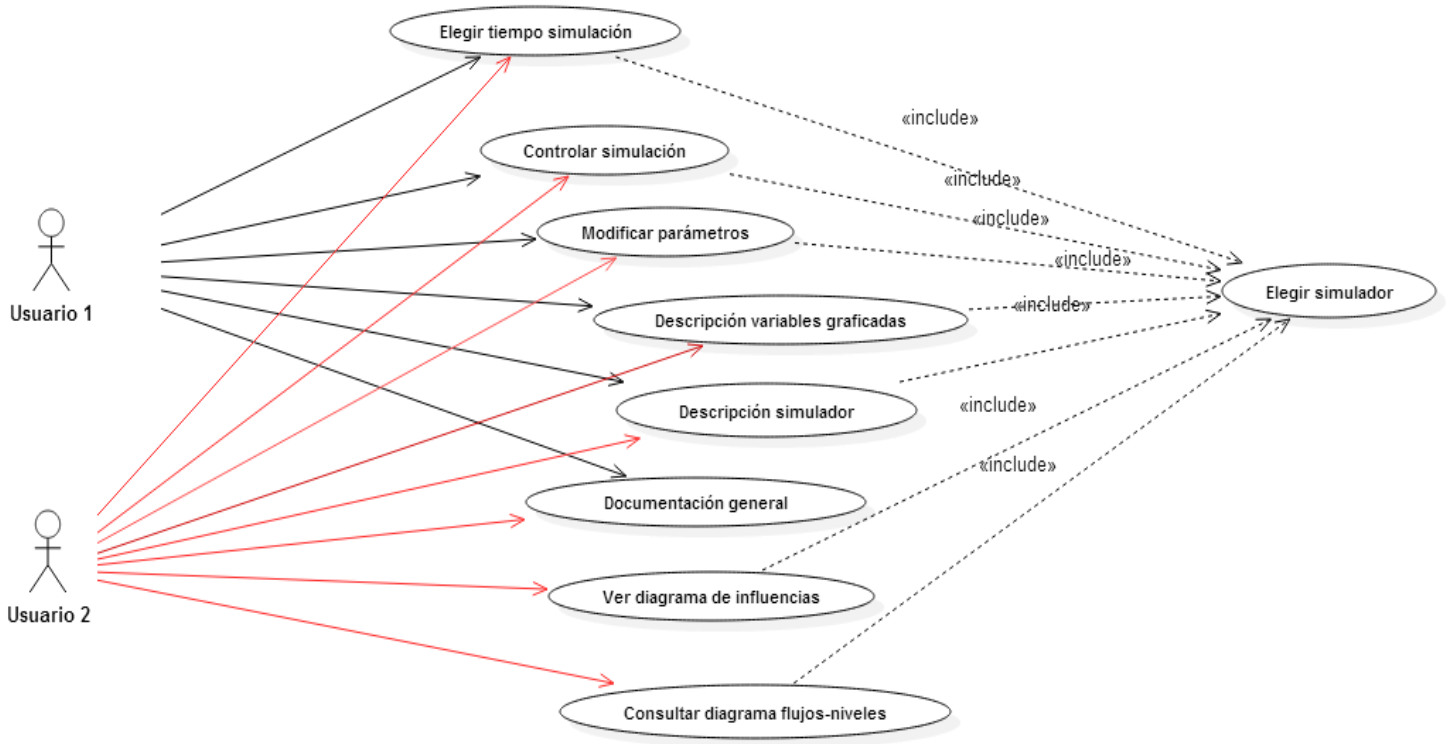
| | |
|---------------------|---|
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Casos de uso | Elegir simulador, elegir tiempo de simulación, controlar simulación, modificar parámetros, consultar diagrama de flujos-niveles, ver diagrama de influencias, descripción variables graficadas, descripción simulador, documentación general. |
| Tipo | Primarios |
| | |

| | |
|---------------------------|--|
| <p>Descripción</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Usuario 1: usuario no conocedor de dinámica de sistemas que encontrará en la interfaz un útil que apoya su proceso de aprendizaje frente a la temática de sostenibilidad ambiental en el desarrollo vial. De esta manera, el usuario solo experimenta guiado por la interfaz al modificar parámetros y observar gráficos que representan los comportamientos de las variables de interés. • Usuario 2: usuario capaz de leer los diagramas de influencias y flujos-niveles (puede leer estos diagramas pero no modificarlos), lo cual le permite experimentar con la interfaz teniendo conocimiento del modelo que subyace en ella. |
|---------------------------|--|

7.2 DIAGRAMA CASOS DE USO

El propósito de un caso de uso es definir una pieza de comportamiento coherente, sin revelar la estructura interna del sistema [33]. De esta manera, la ejecución de cada caso de uso es independiente de los demás, aunque una implementación de múltiples casos de uso puede llegar a crear dependencias implícitas entre ellos. En el nivel del sistema, los casos de uso representa el comportamiento externa de todo sistema tal y como se muestra a los usuarios que hacen uso de él. En la Figura 26 se puede observar el diagrama de casos de uso realizado con el software StarUML para el diseño de la interfaz software Sostenibilidad ambiental 1.0.

Figura 26. Diagrama de casos de uso



De esta forma, los usuarios a través de la interfaz software podrán interactuar con dos prototipos del modelo construido en el presente trabajo de grado; ellos son el prototipo II (sección 6.3) y la versión de este mismo prototipo que contiene la implementación de políticas descrita en la sección 6.5. Lo anterior, es definido con el propósito que los usuarios entiendan la importancia de la dinámica de sistemas como paradigma de pensamiento que permite abordar problemáticas complejas de forma holística. Esto se corrobora a través de los dos prototipos con los cuales podrán interactuar, debido a que el primero de ellos (prototipo II) permite evaluar las soluciones tradicionales que se ejecutan en el tema ambiental y que exclusivamente están dirigidas a la ampliación de recursos monetarios que incentiven su conservación. Mientras que el prototipo II se caracteriza por la implementación de

políticas que permiten evaluar soluciones alternativas y complementarias entre sí que brindan soluciones subyacentes para garantizar sostenibilidad ambiental.

Por lo tanto, los usuarios podrán interactuar con los prototipos mencionados anteriormente a través de dos simuladores que proporcionan la interfaz gráfica en los cuales los parámetros que podrán ser modificados en cada uno de ellos son descritos a continuación:

- Simulador 1 – “conservación a través de inversión monetaria” (Prototipo II – sección 6.3): “Asignación presupuestal base infraestructura vial”, “Asignación presupuestal conservación medio ambiente”, “Asignación presupuestal infraestructura social”.
- Simulador 2 – “conservación con inversión y políticas complementarias” (Prototipo II con políticas – sección 6.5): “Asignación presupuestal base infraestructura vial”, “Asignación presupuestal conservación medio ambiente”, “Asignación presupuestal infraestructura social”, “Emisiones CO₂ por vehículo (cambio de tecnología vehicular para mitigar emisiones de dióxido de carbono)”, “Vehículos por persona (tasa ocupación vehicular)”, “Tasa de chatarrización vehicular”, “Inversión en restauración ambiental por construcción vial”.

De igual forma, en cada simulador los usuarios podrán seleccionar entre un conjunto de variables que puede ser graficadas y cuyos comportamientos resultantes en las simulaciones estarán en función de la modificación de parámetros que se describe previamente. Así, en cada simulador el conjunto de variables que se puede graficar son:

- Simulador 1 y 2: “Índice medio ambiental”, “Emisión partes por millón dióxido de carbono”, “Índice de congestión”, “Kilómetros construidos”, “Atractividad conducción”.

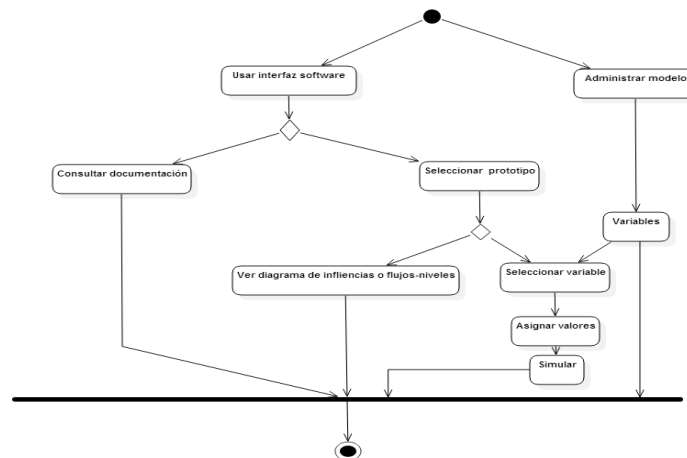
7.2.1 Especificación casos de uso

La especificación de los casos de uso definidos en el diagrama de casos de uso (Figura 26) puede ser consultada en el Anexo C.

7.3 DIAGRAMA DE ACTIVIDADES

El diagrama de actividades es una forma especial de máquina de estados prevista para modelar cómputos y flujo de trabajo. Los estados del diagrama de actividades representan los estados de ejecución del cómputo, no los estados de un objeto ordinario. Así, un estado de actividad representa la ejecución de una sentencia en un procedimiento o el funcionamiento de una actividad en un flujo de trabajo [33]. Las actividades que el usuario puede realizar utilizando la interfaz software se observan en la Figura 27.

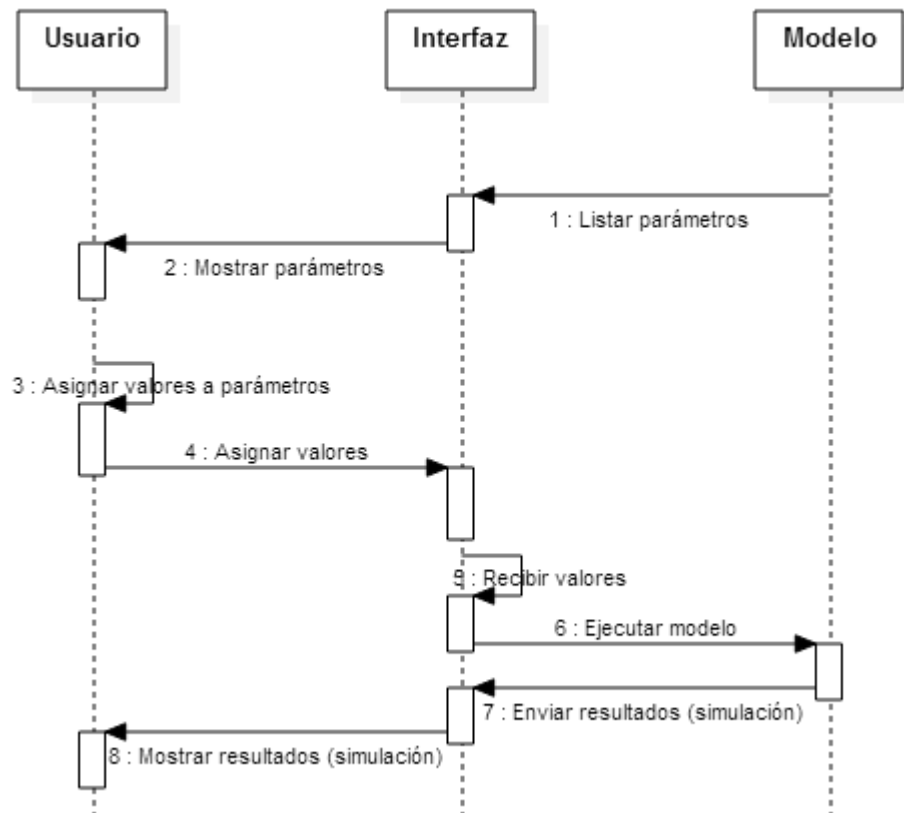
Figura 27. Diagrama de actividades



7.4 DIAGRAMA DE SECUENCIA

El objetivo de la interfaz software es mostrar al usuario los parámetros del modelo que en función del propósito del mismo pueden ser modificados. El usuario por su parte se encarga de asignar valores a ellos acorde a sus necesidades los cuales son definidos dentro del modelo para ejecutar la simulación. En consecuencia, el modelo ejecuta la simulación con los valores definidos por el usuario y obtiene unos resultados que son enviados a la interfaz software y mostrados al usuario gráficamente. La figura 28 muestra la secuencia de actividades que el usuario realiza a través de la interfaz para obtener los resultados de simulación del modelo.

Figura 28. Diagrama de secuencia



8. EXPERIENCIA DE USO (PRUEBA DE USUARIO)

Una vez culminado el proceso de modelamiento dinámico sistémico y el desarrollo de la interfaz software que opera la versión final del modelo construido, se procede a realizar una experiencia de uso del aplicativo con el propósito de corroborar su utilidad como herramienta que puede apoyar la toma de decisiones y mejorar el estado de entendimiento frente al tema de conservación ambiental en contextos de desarrollo vial. Así, por elementos relacionados con la temática del presente trabajo de grado, se procedió a realizar la experiencia de uso con la ingeniería civil Angélica Corzo adscrita a la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, quien es un usuario sin experticia en dinámica de sistemas como metodología de modelado y simulación. De esta manera, el desarrollo de la experiencia se realiza bajo el acompañamiento de un experto en dinámica de sistemas (autor del presente trabajo de grado) con el fin de orientar el contenido de la misma y obtener los resultados esperados, frente a la utilidad del producto software para personas del campo de la ingeniería civil no conocedoras de dinámica de sistemas.

8.1 DESCRIPCIÓN EXPERIENCIA

8.1.1 Propósito

Brindar a un usuario no conocedor de dinámica de sistemas como metodología de modelado y simulación especialista en el campo de la ingeniería un útil que apoye su proceso de aprendizaje y entendimiento frente a la temática de sostenibilidad ambiental en construcción vial.

8.1.2 Actividades

El usuario interactuará con la interfaz software donde tendrá dos momentos para experimentar con los respectivos simuladores que allí podrá encontrar. Inicialmente, el experto en dinámica de sistemas encargado de guiar la experiencia realizará una explicación y conceptualización del modelo operado por la interfaz, haciendo uso del diagrama de influencias y flujos-niveles que pueden ser consultados en la pantalla de inicio de la interfaz desarrollada. Así, el usuario podrá entender a plenitud el propósito del modelo operado por la interfaz así como sus restricciones. Posteriormente a ello, el usuario dará inicio a su interacción con la interfaz utilizando los dos simuladores como se indica a continuación.

8.1.2.1 Momento uno

En esta parte de la experiencia el usuario ingresará al simulador “conservación a través de inversión monetaria”, allí, cuenta con una interfaz de controles que le permiten modificar las fracciones porcentuales para inversión en desarrollo vial, conservación ambiental e infraestructura social. De esta manera, el usuario responderá un conjunto de preguntas contenidas en una guía que el experto en dinámica de sistemas le suministrará.

8.1.2.2 Momento dos

En esta parte de la experiencia el usuario ingresará al simulador “conservación con inversión y políticas complementarias”, allí, cuenta con una interfaz de controles que le permiten modificar las fracciones porcentuales de inversión para desarrollo vial, conservación ambiental e infraestructura social, así como, un conjunto de políticas complementarias que le permiten reflexionar holísticamente a cerca de la sostenibilidad ambiental. De igual forma, responderá un conjunto de preguntas con respecto a los resultados obtenidos en las gráficas del simulador.

8.1.2.3 Momento tres

En esta parte de la experiencia, el usuario tras haber culminado su interacción con los dos simuladores procede a reflexionar acerca de los dos enfoques posibles para abordar la sostenibilidad ambiental en el marco de construcción de infraestructura vial. Llegando a concluir, como la conservación medio ambiental se puede alcanzar a través de acciones conjuntas y complementarias entre sí, en lugar de acciones de contingencia que simplemente intentan mitigar los efectos deterioros del ambiente percibidos como relaciones lineales de causas y efectos.

8.2 MEDIOS

Para el desarrollo de esta experiencia se utiliza la interfaz software descrita en el capítulo 5 del presente trabajo de grado. Dicha interfaz, cuenta con dos simuladores los cuales operan el prototipo II del modelo descrito en la sección 6.3 y su respectiva versión con la implementación de políticas descrita en la sección 6.5. El prototipo I no se tuvo en cuenta en el desarrollo de la interfaz debido a que el proceso de modelamiento tiene un comportamiento de complejidad creciente, con lo cual se concluye que el prototipo II contiene lo especificado en el prototipo I, así como, las mejores realizadas sobre él durante el proceso de modelado que permitieron obtener como producto el prototipo II. Además, se realizó una guía para la experiencia donde se consignan el paso a paso de las actividades que el usuario debe hacer con cada simulador al igual que el conjunto de preguntas que debe responder a partir de los resultados de simulación obtenidos usando la interfaz software. Esta guía puede ser consultada en el anexo C.

8.3 ORIENTACIÓN PARA EL USO DE LOS MEDIOS

El desarrollo de esta experiencia de usuario está orientada por el acompañamiento del autor del presente trabajo de grado que desempeña el papel de experto en

dinámica de sistemas. Ello, con el objetivo de resolver cualquier duda o inquietud que puede surgir frente al funcionamiento de los medios utilizados en la experiencia.

8.4 OBSERVACIONES Y RESULTADOS

La experiencia de usuario comenzó dando lectura general de la guía presentada en el anexo 3 del presente trabajo de grado. El experto en el campo de ingeniería civil realizó la actividad uno donde se utilizó el simulador “conservación a través de inversión monetaria”. Allí, el usuario a través de las diferentes acciones que la guía le solicita hacer, dio cuenta de cómo la toma de decisiones tradicional enfocada al aumento de la capacidad en infraestructura vial como política única que mejore la movilidad vial, es una medida que no interviene la demanda vehicular y en consecuencia conduce a que en un largo plazo el sistema se sature y el índice de congestión aumente nuevamente. Además, reflexionó de como la inversión en conservación por más que se aumente no garantiza la sostenibilidad ambiental a largo plazo. En consecuencia, el usuario concluyó que mediante inversión en desarrollo vial y conservación ambiental se alcanzan soluciones mitigadoras y momentáneas que a largo plazo son insuficientes para garantizar el éxito de las iniciativas viales y la sostenibilidad ambiental; además que resultados aparentemente positivos se pueden alcanzar a mediano plazo, pero ello implica un elevado costo en términos de asignaciones presupuestales elevadas tanto en vías como medio ambiente, lo cual en la toma de decisiones gubernamental actual, podría no ser posibles teniendo en cuenta que existen otros aspectos dentro del presupuesto general de la nación que implican un elevado porcentaje de inversión.

Posteriormente, el usuario inició el uso del simulador dos - “conservación con inversión y políticas complementarias”, donde seleccionó el mismo tiempo de simulación que en el simulador uno y los mismos valores para asignación presupuestal de inversión en desarrollo vial, conservación ambiental e

infraestructura social con el propósito de evaluar un escenario alternativo donde se implementan políticas de sostenibilidad ambiental alterativas simultaneas a la inversión estatal previamente seleccionada y así, observar cómo ello mejora el comportamiento de las variables de interés. De esta manera, el usuario selecciono valores para las emisiones promedio de dióxido de carbono por vehículo, tasa de chatarrización, inversión adicional en conservación ambiental y tasa de ocupación vehicular. Para esta última variable selecciono un valor elevado y dio inicio a la simulación, observando como la sostenibilidad ambiental mejora significativamente y el índice de congestión presenta una mejora con respecto a los resultados obtenidos en el simulador uno. Sin embargo, para este índice, la tendencia a largo plazo pareciera presentar el mismo comportamiento que en el simulador uno, por ello, el usuario realizó una segunda simulación para la cual mantuvo los mismos valores en asignaciones presupuestales de inversión y políticas alternativas, a diferencia de seleccionar una tasa de ocupación más baja con respecto a la elegida en la simulación anterior. En consecuencia, el usuario se percató de cómo esta decisión modifica significativamente el comportamiento del índice de congestión al igual que las emisiones de dióxido de carbono y la atractividad de conducción, la cual se mantiene elevada. Por lo tanto, el usuario reflexionó sobre estos resultados y concluyó que socialmente se necesita una participación activa de la comunidad que garantice la sostenibilidad ambiental en el desarrollo vial, orientándose a disminuir el hábito de uso vehicular, lo cual autorregularía la demanda vehicular y contribuiría al éxito de la consecución de obras orientadas a construcción vial debido a la existencia permanente de un índice de congestión bajo que garantice movilidad adecuada.

Así, el usuario especialista en el campo de la ingeniería civil ve en la herramienta software un útil que puede mejorar el estado de entendimiento frente a la sostenibilidad ambiental a largo plazo y por ende ve en ella, una herramienta que puede ser incluida con un papel activo dentro de la toma de decisiones en la

planificación de proyectos de infraestructura vial. Además reconoció la importancia de la dinámica de sistemas como paradigma de pensamiento para abordar el estudio de fenómenos complejos como en este caso es la sostenibilidad ambiental, donde actualmente los estudios tradicionales que en esta área se desarrollan están enfocadas a promover soluciones reactivas frente a los daños percibidos por los observadores, lo cual conduce a mejoras momentáneas a corto plazo.

9. DIVULGACIÓN

En el marco del desarrollo del presente trabajo de grado se escribió un artículo que contiene la primera versión del modelo, la cual fue presentada en el XII Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas realizado los días 27, 28 y 29 de agosto en la Universidad Jorge Tadeo Lozano de Bogotá, con el título “Impacto del desarrollo en infraestructura abordando una visión ambiental a través de dinámica de sistemas”. Posteriormente, una versión mejorada del modelo fue presentada en el XII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas realizado los días 9,10 y 11 de diciembre en la ciudad de Alajuela, Costa Rica. En dicha oportunidad, el trabajo presentado se titula “Impacto ambiental generado por el desarrollo de infraestructura vial. Una visión dinámico sistémica”. De esta manera, los continuos avances alcanzados a lo largo del presente trabajo de grado fueron socializados en la comunidad nacional y latinoamericana de dinámica de sistemas con el objetivo de corroborar y discutir la utilidad del modelo como útil que favorezca la toma de decisiones en la construcción de infraestructura vial.

10. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de simulación obtenidos en los prototipos I y II del modelo, la ampliación de la capacidad instalada de infraestructura vial en escenarios bajo los supuestos establecidos por los autores, no funciona como medida a largo plazo que garantice la reducción del índice de congestión de forma permanente.

La inversión en conservación del medio ambiente en contextos de desarrollo vial como política única de contingencia frente a este fenómeno que deteriora su estado general, no garantiza la sostenibilidad ambiental a largo plazo debido a que es necesario el planteamiento y puesta en marcha de políticas complementarias dentro de las cuales se involucre la comunidad para generar una consciencia colectiva que promueva la preservación ambiental.

La comunidad adscrita al contexto donde se desarrolla la construcción vial puede ser un elemento activo en la conservación del medio ambiente, al emprender políticas que conduzcan al aumento de la tasa de ocupación vehicular generando así, una reducción las emisiones de dióxido de carbono provenientes del uso de combustibles fósiles, producto de la disminución en el uso del vehículo como medio de transporte.

El desarrollo incremental de modelado arrojó como resultado un útil que mejora el estado de entendimiento frente a la comprensión del deterioro ambiental generado por el desarrollo de infraestructura vial, al analizar causas subyacentes que direccionan el comportamiento del fenómeno objeto de estudio en el presente trabajo de grado.

El modelo desarrollado por los autores del presente trabajo de grado se postula como una herramienta que puede brindar apoyo en la toma de decisiones argumentada frente al deterioro ambiental en proyectos viales a través de la interfaz software desarrollada, la cual facilita el acercamiento de personas no especialistas en dinámica de sistemas con el estudio de fenómenos complejos mediante un enfoque estructural.

11. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones son hechas con el propósito de profundizar el estudio de la sostenibilidad ambiental en contextos donde se desarrollan proyectos de infraestructura de transporte, a través de modelado y simulación utilizando dinámica de sistemas para la construcción de futuros prototipos del modelo planteado en el presente trabajo de grado.

- Plantear una relación existente entre kilómetros lineales construidos de infraestructura vial y el número de hectáreas naturales que ello puede afectar. Lo anterior, con el propósito de establecer una tasa de deforestación vial en función de un nivel de hectáreas disponibles dependientes del contexto donde se ponga en marcha la construcción de infraestructura vial. Y así, establecer planes de contingencia que mitiguen dicho deterioro ambiental.
- Contemplar el uso de medios de transporte alternativos y analizar su efecto sobre la demanda vehicular que puede circular sobre la infraestructura vial disponible, con el propósito de analizar los posibles resultados de ello sobre el índice de congestión planteado por los autores.
- Ajustar parámetros ligados a las características de la infraestructura vial construida tales como la velocidad de servicio, con el objetivo de estimar el impacto ambiental y la sostenibilidad de la calidad de vida en contextos exclusivamente ciudadanos.

- Estimar de que forma el índice de congestión a través de los tiempos de desplazamiento afecta la productividad y atractividad económica de los contextos donde se desarrollan las iniciativas ingenieriles, ya que ello puede influir sobre la prosperidad del contexto y en consecuencia afectar de forma directa la calidad de vida de la población.
- Estimar cuantitativamente el tiempo de retardo que tarda la infraestructura vial disponible en saturarse nuevamente tras reducción inicial (corto plazo) del índice de congestión.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LYNCH, Tin. Analyzing the economic impact of transportation projects using rims II, implant and remi. En: Office of Research and Special Programs U. S. Department of Transportation. Estados Unidos: Washington D. C., 2000.

[2] HEINTZ, James. How Infrastructure Investments Support the U. S. Economy : Employment, Productivity and Growth. En: Alliance for American Manufacturing. Enero, 2009.

[3] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Impact of Transport Infrastructure Investment on Regional Development. doi:10.1787/9789264193529-en. 2002.

[4] GONZALES, María y ALBA, Carol (2006). Infraestructura vial en Colombia: un análisis económico como aporte al desarrollo de las regiones 1994-2004. Monografía para optar el título de economista. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle, 2006.

[5] REPÚBLICA DE COLOMBIA. Generar una Infraestructura adecuada para el desarrollo-Propuesta para discusión. Bogotá D.C: Ministerio de transporte, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Comunicaciones, 2006.

[6] SIERRA, Rodrigo et al. Escenarios de los posibles impactos ambientales futuros asociados a IIRSA en los ecosistemas de tres áreas de estudio en Bolivia y Perú. Comité Boliviano, Comité Peruano de la UICN. Agosto, 2011.

[7] Andrade, Hugo., LINCE, Emiliano., Parra, Jorge. Evaluación dinámica sistémica del corredor ferroviario bioceánico central. En: XI Encuentro Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. México: Monterrey, 2013.

[8] ABRAHAM, Elias. Environmental Conflicts Stakeholders and a Shared Mental Model. En: System Dynamics Review. 1996.

[9] SKUBA, Jackson. Contemporary public involvement: toward a strategic approach. En: The International Journal of Justice and Sustainability. 2001.

[10] GREGORY, Robin y Keeney, Ralph. Creating policy alternatives using stakeholder values. En: Management Science. 1994.

[11] ROWE, Gene y FREWER, LYNN. Public participation methods: a framework for evaluation. En: Science, Technology & Human Values. 2000.

[12] REPÚBLICA DE COLOMBIA. Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Bogotá D.C.: Departamento Nacional de Planeación. 2011.

[13] PÉREZ, Miguel. Efectos de la inversión en infraestructura vial sobre la producción de la industria manufacturera en Colombia: 1993-2007. Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2012.

[14] FEDESARROLLO – Centro de Investigación Económica y Social. Infraestructura de transporte en Colombia. En: 9º Congreso Nacional de la Infraestructura, Cámara Colombiana de la Infraestructura. Cartagena, 22 de noviembre de 2012.

[15] ZUÑIGA, Henry. Elaboremos un estudio de impacto ambiental – Documento Técnico. 2009.

[16] CONESA, Victora. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. España: Ediciones Mundial- Prensa, Madrid, 2006.

[17] BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO – BID. Revisión de la evaluación del impacto ambiental en países de América Latina y el Caribe – Metodología, Resultados y Tendencias. Santiago de Chile: Centro de Estudios para el Desarrollo –CED. 2001.

[18] MOUTHON, A. F., BLANCO, A. R., ACEVEDO, G. A. Ministerio del Medio Ambiente. Manual de evaluación de estudios ambientales. Bogotá, D.C.: Ministerio del Medio Ambiente. 2002.

[19] AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES – ANLA. Estudio de Impacto Ambiental. Consultado el 09 de Febrero de 2014. Disponible en: [<http://www.anla.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=8052&catID=1373>].

[20] ZUÑIGA, Henry. Elaboremos un estudio de impacto ambiental – Documento Técnico 2009.

[21] ANDRADE, Hugo et al. Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2001.

[22] SYSTEM DYNAMICS SOCIETY. Introduction to System Dynamics. Consultado el 09 de Febrero de 2014. Disponible en: [<http://www.systemdynamics.org/what-is-s/#overview>]

[23] STERMAN, John. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2000.

[24] SOMMERVILLE, Ian. Ingeniería del Software. España: Pearson Education, S.A., Madrid, 2005.

[25] OLORUNTOBI, Dada. Expected Success Factors for Public Sector Projects in Nigeria: A Stakeholder Analysis. En: Technology & Management in Construction: An International Journal. doi:10.5592/otmcj.2013.2.4. 2013

[26] ARMAH, Frederick et al. A Systems Dynamics Approach to Explore Traffic Congestion and Air Pollution Link in the City of Accra, Ghana. En: Sustainability Review. doi:10.3390/su2010252. 2010.

[27] LEE, Young. Modeling Causes and Impacts of Greenhouse Gas Emission in a City. En: The 28th International Conference of the System Dynamics Society. Seoul: System Dynamics Society, 2010. Seoul: System Dynamics Society, 2010.

[28] KRAIL, Michael. Reducing the Climate Impact of Transport -Technologies and Policies for Road Transport. En: The 30th International Conference of the System Dynamics Society. St. Gallen: System Dynamics Society, 2012.

[29] BALDONI, Fabrizio. A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System. En: The 28th International Conference of the System Dynamics Society. Seoul: System Dynamics Society, 2010. Seoul: System Dynamics Society, 2010.

[30] LAKSHMANAN, T. R. The broader economic consequences of transport infrastructure investments. En: Journal of Transport Geography. doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.01.001. 2011.

[31] BEHR, Joshua et al. Modeling and Simulating the Economic and Demographic Impact of Transport Infrastructure Investment. En: Proceedings of the 2011 Emerging M&S Applications in Industry and Academia Symposium. 2004.

[32] ABRAHAM, Elias. Environmental Conflicts Stakeholders and a Shared Mental Model. En: System Dynamics Review. 1996.

[33] RUMBAUGH, James. El lenguaje unificado del modelado. Manual de Referencia. Ediciones Addison Wesley, PEARSON EDUCACIÓN S.A., Madrid, 2000.

BIBLIOGRAFIA

ABRAHAM, Arun. Environmental Conflicts, Stakeholders and a Shared Mental Model. En: The 24th International Conference of the System Dynamics Society. Nijmegen: System Dynamics Society, 2006.

ALTAMIRANO, Mónica. Modeling the Evolution of National Road Procurement Strategies. En: The 24th International Conference of the System Dynamics Society. Nijmegen: System Dynamics Society, 2006.

ANDRADE, Hugo et al. El modelado y simulación en la escuela. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2014.

ANDRADE, Hugo et al. Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad. Bucaramanga: Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2001.

ARMENIA, Jorg. Limiting motor vehicles' CO2 emissions – a manufacturer's challenge. En: The 26th International Conference of the System Dynamics Society. Atenas: System Dynamics Society, 2008.

ARMENIA, Stefano. A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System. En: The 28th International Conference of the System Dynamics Society. Seoul: System Dynamics Society, 2010.

ASCHAUER, Gerald. The development of sustainable transports through the right logistics strategy – a system dynamics approach. En: The 31th International Conference of the System Dynamics Society. Cambridge: System Dynamics Society, 2013.

BRITO, Ireneu. Reducing CO2 Emissions due to a shift from Road to Cabotage Transport of Cargo in Brazil. En: The 29th International Conference of the System Dynamics Society. Washington: System Dynamics Society, 2011.

CONESA, Victora. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. España: Ediciones Mundial- Prensa, Madrid, 2006.

FRANCO, Carlos y BANEJA, Andrés. Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico. En: Revista Avances en Sistemas e Informática, Diciembre, 2010, p. 135-141.

GELVEZ, Sergio y MURILLO, Oscar. Modelo del cambio global en el medio ambiente mediante la metodología de la dinámica de sistemas. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2006

GEOGIADIS, Patroklos. The Importance of Feedback Loops Designing Environmental Policies for Sustainable Development. En: The 26th International Conference of the System Dynamics Society. Atenas: System Dynamics Society, 2008.

KRAIL, Michael. Reducing the Climate Impact of Transport – Technologies and Policies for Road Transport. En: The 30th International Conference of the System Dynamics Society. St. Gallen: System Dynamics Society, 2012.

ORJUELA, Javier. Evaluación de la necesidad de infraestructura de transporte para la disponibilidad y acceso de la papa en la ciudad de Bogotá, una mirada desde la dinámica de sistemas. En: XII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. México: Ciudad de México, 2013.

ORTIZ, Nathali y VARGAS, Rafael. Micromundo de simulación para el aprendizaje de fenómenos ambientales asociados al cambio global. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010.

RODRIGUEZ, Ricardo. Modeling for Sustainable Development of a Peruvian River Basin: A System Dynamics Approach. En: Pontificia Universidad Católica del Perú, CENTRUM Católica Business School, 2012, pp. 219-244.

SANTAMARIA, Oscar y MENDEZ, Andrés. Herramienta software para el estudio de fenómenos ambientales, mediante el modelado y la simulación con dinámica de sistemas. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004.

SOMMERVILLE, Ian. Ingeniería del Software. España: Pearson Education, S.A., Madrid, 2005.

YU-FENG, Ho. Simulation and Analysis of Taichung Urban Ecosystem. En: The 25th International Conference of the System Dynamics Society. Boston: System Dynamics Society, 2007.

ANEXOS

Anexo A Ecuaciones PROTOTIPO I

| Variable | Tipo | Definición | Descripción |
|------------------|-----------|--|---|
| AcumulacionCO2 | Nivel | 400.03 | Acumulado partes por millón de CO2 (huella de carbono). [Partes por millón (Miligramos/Metro Cúbico)] |
| CO2_miligramos | Auxiliar | (miligramos_equiv*EmisionesCO2) | Miligramos de CO2 emitidos por el parque automotor disponible que recorre los kilómetros de infraestructura vial disponible. [MiligramosCO2/Km*Vehículos] |
| CO2_ppm | Auxiliar | (CO2_miligramos/Vol_Atmosfera) | Partes por millón de dióxido de carbono por metro cubico de aire. [Partes por millón (Miligramos/Metro Cúbico)] |
| CV_Productividad | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.25,0.9,0.9,0.9,0.924878,1,1.009756,1.062439,1.169268,1.2,1.2) | Multiplicador de la productividad debida a la calidad de vida. [adimensional] |
| CV_Relativa | Auxiliar | Calidad_Vida/Ind_CV_Refer | Indicador de calidad de vida relativo, que permite ver cómo cambia la calidad de vida con respecto a un nivel mínimo inicial asumido. [adimensional] |
| Compra_Vehicul | Flujo | (tasa_de_compra*Poblacion)*MP_IND_CONGEST | Flujo de compra vehicular. [Vehículos/año] |
| Cre_InfraSocial | Flujo | Inver_InfraSocia | Crecimiento anual de la infraestructura social debido a la inversión en la construcción de nueva infraestructura social. [miles dólares/año] |
| Dec_InfraSocial | Flujo | Infraest_Social/VidaProm_InfSoci | Decrecimiento de la infraestructura social debido al cumplimiento de su vida útil promedio. [miles dólares/año] |
| Deterioro_Vehicu | Flujo | Vehiculos/VidaUtil_Veh | Flujo de deterioro vehicular. [Vehículos/año] |
| EmisCO2_Ind_Cong | Auxiliar | (Promed_EmiCo2xKM*MP_IND_CONG_CO2) | Emisiones de CO2 por vehículo para los kilómetros que recorre de infraestructura vial. [KgCO2/Km] |
| EmisionesCO2 | Auxiliar | KmTotalesRecorr*EmisCO2_Ind_Cong | Emisiones de CO2 totales acorde al número de kilómetros recorridos por todo el parque automotor disponible para cada instante de la simulación. [KgCO2] |
| GWP_CO2 | Parámetro | 1 | Índice GWP (acrónimo del inglés Global-warming potential - GWP) es una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, por lo general dióxido de carbono. El dióxido de carbono tiene un valor GWP de 1. [adimensional] |
| HistorKM_Recorri | Nivel | 0 | Histórico de kilómetros totales acumulados recorridos por todo el parque automotor disponible. [Kilómetros] |
| IAR_CV | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.1,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.1,1.2,1.3,1.6,1.6,1.6,1.7,1.8,1.8,1.9,2.2,2.1,2.2,2.3,2.4,2.4,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5) | Define la relación entre el índice ambiental relativo y la calidad de vida. [adimensional] |
| Impacto_Infraest | Auxiliar | Total_KM/Km_Inicial_Infr | Relación del impacto generado por kilómetros de infraestructura vial |

| | | | |
|------------------|-----------|---|--|
| | | | construidos con respecto al índice ambiental. [adimensional] |
| MP_ImpactoKMS | Tabla | $\text{INTSPLINE}(2,0,0.25,0,0.03107039,0.07249757,0.2303755,0.7103246,1.151878,1.8814,2,2)$ | Multiplicador que relaciona el impacto que la construcción vial tiene sobre el medio ambiente al modificarlo físicamente. [adimensional] |
| IncreKmRecorVehi | Flujo | KmTotalesRecorr | Flujo que representa el número total de kilómetros recorridos por el parque automotor en cada instante de la simulación, sobre la infraestructura de transporte. [Kilómetros] |
| Increm_Temp_CO2 | Auxiliar | $\text{SQRT}(\text{Vol_Contam_CO2} * \text{Temp_Media_decad} * \text{Numero_aureo} * \text{GWP_CO2} * \text{Porc_CO2_GEI})$ | Incremento en grados centígrados de la temperatura, como consecuencia de las emisiones de CO2. [grados centígrados] |
| IncrementoCO2 | Flujo | CO2_ppm | Incremento en la acumulación de dióxido de carbono en partes por millón. [ppm CO2] |
| Ind_Ambie_Relat | Auxiliar | $\text{Indice_Ambient} / \text{Ind_Ambien_Acept}$ | Define el índice ambiental relativo. Relacionando el índice ambiental con una medida del mismo considerada aceptable (Ind_Amb_min_Acep). [adimensional] |
| Ind_Ambien_Acept | Parámetro | 50 | Define el valor mínimo aceptable para el índice ambiental. [adimensional] |
| Ind_CV_Refer | Parámetro | 50 | Corresponde al valor mínimo asignable al índice de calidad de vida. [adimensional] |
| Ind_congestion | Auxiliar | $\text{Vehiculos} / \text{Vehic_Infraest}$ | Índice de congestión para estimar el nivel de uso que se le da a la infraestructura vial disponible. Cuando el resultado del cociente sea igual o superior a 1, se considera un sobre uso de las vías disponibles. [adimensional] |
| Indice_Ambiental | Nivel | 100 | Este índice mide el estado global del ambiente como resultado de la historia de acciones de mejoramiento y de deterioro del ambiente. Su valor inicial es un valor de referencia para poder apreciar cómo cambia al desarrollo de infraestructura vial. [adimensional] |
| Infraest_Social | Nivel | 30000 | Inversión acumulada en la infraestructura social que se conserva funcional al servicio de toda la población. [miles de dólares] |
| Inv_Mitg_Inic_Am | Parámetro | 10000000 | Inversión en conservación medio ambiental inicial. [miles dólares/año] |
| Inv_Mitig_Ambien | Auxiliar | $\text{Presup_Disponibl} * \text{Presup_ambiet}$ | Inversión destinada a medio ambiente y desarrollo sostenible acorde al porcentaje sectorial definido en el Presupuesto General de la Nación 2014. [miles dólares/año] |
| Inver_InfraSocia | Auxiliar | $\text{PresupDisponible} * \text{Presup_InfraSoci}$ | Inversión destinada a infraestructura social por parte del Presupuesto General de la Nación. [miles dólares/año] |
| Inversion_Infrae | Auxiliar | $\text{Presup_Disponibl} * \text{Presup_Asignado}$ | Inversión destinada a infraestructura de transporte acorde al presupuesto general designado para el año 2014 y la respectiva asignación porcentual para el sector transporte. [miles dólares/año] |
| KmTotalesRecorr | Auxiliar | $\text{Km_Recorr_x_Veh} * \text{Vehiculos}$ | Kilómetros totales recorridos por el parque automotor disponible en función del índice de congestión. [Kilómetros] |

| | | | |
|------------------|-----------|---|--|
| Km_Inicial_Infr | Parámetro | 118691 | Kilómetros iniciales de infraestructura. Dato tomado del Departamento de Planeación Nacional. [Kilómetros] |
| Km_Posib_Constru | Auxiliar | IF (Km_max_vias_posi-Total_KM<=0,0,Km_max_vias_posi-Total_KM) | Kilómetros a construir acorde al parámetro de kilómetros máximos construibles hasta 2064. [Kilómetros] |
| Km_Recorr_x_Veh | Auxiliar | Prom_KmxVehiculo*MP_IND_CONGEST | Kilómetros recorridos por vehículo acorde a la infraestructura vial disponible y al respectivo índice de congestión que determina que tantos kilómetros puede circular un vehículo. [Kilómetros] |
| Km_max_vias_posi | Parámetro | 900000 | Kilómetros máximos de vía corresponden al máximo valor de vías construibles hasta el año 2064. [Kilómetros] |
| MP_ImpactoCO2 | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.25,0,0.03107039,0.07249757,0.2303755,0.7103246,1.151878,2,2.055162,2) | Multiplicador que relaciona el impacto que las emisiones de CO2 provenientes de los carros circulantes en la infraestructura vial construida sobre el medio ambiente. [adimensional] |
| MP_IND_CONGEST | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.5,1.5,1.4,1,0.7,0.5,0.3,0) | Multiplicador que afecta los kilómetros recorridos por vehículo acorde al resultado del índice de congestión. Si la congestión es muy alta (mayor que 1), los kilómetros promedio recorridos por vehículo empezarán a disminuir. [adimensional] |
| MP_IND_CONG_CO2 | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.2,0,0.02926829,0.06829268,0.1073171,0.302439,1,1.622968,1.987244,2,2,2) | Multiplicador que acorde al índice de congestión afecta las emisiones de CO2 promedio de cada vehículo. [adimensional] |
| Mortalidad_Pobl | Flujo | Poblacion*(Tasa_Mortalidad) | Flujo de mortalidad de la población. [Personas/año] |
| Natalidad_Pobl | Flujo | Tasa_Natalidad*Poblacion | Flujo de natalidad de la población. [Personas/año] |
| Numero_aureo | Parámetro | 1.6180 | Número áureo, el cual es el límite a que llegan los cocientes del último (consecuente) entre el penúltimo (antecedente) número en la sucesión de Fibonacci a partir del cociente 233/144 y equivale a $1.6180 \cdot c$ o $(1 + \sqrt{5})/2$; pero a partir de 377/233 se ratifica. Sirve como Factor proporcional y de crecimiento. |
| Poblacion | Nivel | Poblacion_Inicia | Población del contexto afectado por el desarrollo vial. [Personas] |
| Poblacion_Inicia | Parámetro | 3000000 | Población inicial del contexto afectado por el desarrollo vial. [Personas] |
| Porc_CO2_GEI | Parámetro | 0.70 | Porcentaje que ocupa el CO2 en los gases de efecto invernadero dentro de la atmósfera. [fracción porcentual] |
| PresupDisponible | Parámetro | 107978000 | Presupuesto General de la Nación aprobado para 2014 por el congreso Colombiano. [miles de dólares] |
| Presup_Asignad | Parámetro | 0.047 | Participación relativa del sector transporte en la asignación de recursos estipulada por el Presupuesto general de la nación 2014. [fracción porcentual] |
| Presup_InfraSoci | Parámetro | 0.116 | Participación relativa del sector salud y protección social, en la asignación de recursos estipulada por el Presupuesto general de la nación 2014. [fracción porcentual] |

| | | | |
|---------------------|-----------|-----------------------------------|---|
| Presup_ambiet | Parámetro | 0.003 | Participación relativa del sector ambiente y desarrollo sostenible, en la asignación de recursos estipulada por el Presupuesto general de la nación 2014. [fracción porcentual] |
| Prom_KmxVehiculo | Parámetro | 12000 | Promedio de kilómetros anuales recorridos por vehículo, según dato suministrado por Carlos de Araujo presidente de Bridgestone para Colombia. [Kilómetros] |
| Promed_EmiCo2xKM | Parámetro | 0.2431 | El "Transportation Energy Data Book", Edición 30, calcula que por cada galón que un carro consume, se recorren 22,5 Millas que equivalen a 36,2 Kilómetros. Acorde a lo anterior, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) calcula que se emiten aproximadamente 8,81 Kg de CO2 por galón consumido. Con lo anterior se estima que la cantidad de CO2 que se emite por Kilómetro recorrido es 0.243 Kg CO2/Km. [KgCO2/km] |
| Reparacion_Ambiente | Auxiliar | Inv_Mitig_Ambien/Inv_Mitg_Inic_Am | Define la relación entre lo invertido en mitigación y la inversión inicial de mitigación inicial. (Valor de referencia). [adimensional] |
| Tasa_Mej_Ind | Parámetro | 50 | Tiempo Promedio para que una unidad del índice ambiental se recupere por la recuperación autónoma y por la acciones de mitigación ambiental. [años] |
| Tasa_Mortalidad | Parámetro | 0.0556 | Tasa de mortalidad establecida por el DANE para Colombia. [Adimensional/año] |
| Tasa_Natalidad | Parámetro | 0.1911 | Tasa de natalidad establecida por el DANE para Colombia. [Adimensional/año] |
| Tasa_deterioro | Parámetro | 20 | Tiempo Promedio para que una unidad del índice ambiental se deteriore por la existencia de la infraestructura la otra infraestructura de transporte [años] |
| Tasa_mantenimiento | Parámetro | 1.1 | Tiempo promedio de mantenimiento por kilómetro. [AÑOS] |
| Temp_Media_decadad | Parámetro | 17 | Temperatura media decadal. [grados centígrados] |
| Total_KM | Parámetro | kmDeteriorados+kmInfraestructur | Kilómetros totales de la infraestructura de transporte. [Kilómetros] |
| Vehic_Infraest | Auxiliar | km_Infraest*capac_promedVial | Número de vehículos que los kilómetros de infraestructura vial disponibles puede soportar para un uso normal de la vía, teniendo en cuenta que esta es hallada a partir de una suma ponderada de kilómetros en buen estado y kilómetros deteriorados. [vehículos] |
| Vehiculos | Nivel | VehiculosInicial | Parque automotor disponible para circulación sobre la red de infraestructura de transporte. [vehículos] |
| VehiculosInicial | Parámetro | 3700000 | Parque automotor de vehículos particulares reportados para Colombia en el año 2013, según una |

| | | | |
|------------------|------------|--|---|
| | | | investigación del banco BBVA. "BBVA Research". [vehículos] |
| VidaProm_InfSoci | Parámetro | 30 | Vida promedio de la inversión en lo social - denota una tasa de disminución de la inversión acumulada. [años] |
| VidaUtil_Veh | Parámetro | 8 | Se entiende por vida útil el tiempo durante el cual un activo (en este caso el vehículo) puede ser utilizado, tiempo durante el cual puede generar renta. [años] |
| Vol_Atmosfera | Parámetro | 5000000000000000000 | Se estima el volumen de la atmósfera terrestre. Suponiendo la Tierra como una esfera perfecta de radio 6378 km y considerando que la zona donde la atmósfera es densa tiene una altura de 10 km. |
| Vol_Contam_CO2 | Parámetro | AcumulacionCO2*0.000001 | Volumen de CO2 en partes por millón. [partes por millón CO2] |
| capac_promedVial | Parámetro | 250 | Capacidad de vehículos en circulación por kilómetro lineal en vías de doble sentido. Para tramos de 150 km se registra una capacidad de 37500 vehículos. $37500\text{Vehic}/150\text{Km}=250\text{Vehic}/\text{Km}$. [vehículos] |
| conservación | Flujo | $(\text{Indice_Ambiental} * \text{Reparacion_Ambie}) / \text{Tasa_Mej_Ind}$ | Mejora del índice de ambiental: representa los incrementos por recuperación autónoma del ambiente y por inversión en recuperación, por año. [adimensional/año] |
| construcción | Flujo | $\text{MIN}(\text{Km_Posib_Constru}, (\text{Inversion_Infrae}/\text{costoxKm})) * \text{CV_Productividad}$ | Construcción: representa los kilómetros, años de construcción de nueva infraestructura de transporte. Este flujo opera con el presupuesto asignado para el año. [kilómetros/año] |
| costoxKm | Kilómetros | 1200 | Costo promedio en América Latina para construcción de un kilómetro de infraestructura de transporte (un millón 200 mil dólares). [miles dólares] |
| deterioro | Flujo | $\text{kmInfraestructur}/\text{vida_promedio}$ | Deterioro de Infraestructura de Transporte: representa el deterioro de la infraestructura de transporte por año dado en kilómetros. [Kilómetros/año] |
| deterioro_Ambien | Flujo | $(\text{Indice_Ambiental}/\text{Tasa_deterioro}) * (\text{MP_ImpactoCO2} + \text{MP_ImpactoKMS})$ | Representa el deterioro en el índice ambiental debido a la infraestructura de transporte y el aumento de la temperatura por efectos del CO2 como gas de efecto invernadero. [adimensional/año] |
| kmDeteriorados | Nivel | 2000 | Kilómetros de vías deterioradas. [Kilómetros] |
| kmInfraestructur | Nivel | 5000 | Kilómetros de Infraestructura de Transporte: representa los kilómetros de infraestructura de Transporte en buen estado disponibles. [Kilómetros] |
| km_Infraest | Auxiliar | $(\text{kmInfraestructur} + (0.5 * \text{kmDeteriorados}))$ | Corresponde a la capacidad de la infraestructura de transporte. Es una suma ponderada, para kilómetros en Buen estado 1, para los kilómetros, deteriorados 0.5. [Kilómetros] |
| Mantenimiento | Flujo | $\text{kmDeteriorados}/\text{Tasa_mantenimien}$ | Mantenimiento: representa los kilómetros de infraestructura de transporte que reciben mantenimiento por año. [Kilómetros/año] |
| miligramos_equiv | Parámetro | 1000000 | Equivalente para convertir kilogramos en miligramos de CO2. [miligramos] |

| | | | |
|----------------|-----------|------|---|
| tasa_de_compra | Parámetro | 0.08 | Según BBVA Research, se estima que para Colombia por cada 1000 habitantes hay 80 vehículos particulares. 80 vehículos / 1000 personas = 0.08 vehículos/persona. [vehículos/persona] |
| vida_promedio | Parámetro | 15 | Representa la vida promedio de la infraestructura de transporte para que se deteriore de un kilómetro de vía. Para que esta pase a un estado que requiere mantenimiento. [años] |

Anexo B. Ecuaciones PROTOTIPO II

Teniendo en cuenta que el proceso de modelamiento es un proceso incremental, se omiten las ecuaciones del Prototipo I debido a que ellas son descritas en el ANEXO A.

| Variable | Tipo | Definición | Descripción |
|------------------|-----------|--|--|
| Asignacion_Inver | Auxiliar | $MP_Covertura * Asignacion_PGN$ | Asignación porcentual que se destina a la inversión vial. [fracción porcentual] |
| Asignacion_PGN | Parámetro | 0.047 | Participación relativa del sector transporte en la asignación de recursos estipulada por el Presupuesto general de la nación 2014. [miles dólares/año] |
| Atract_Conduccio | Auxiliar | $tasa_de_compra * MP_IND_CONGEST$ | Representa como la atracción por la compra de vehículos disminuye en función del índice de congestión. [adimensional] |
| Congest_Percibid | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.1,0.1,0.13,0.17,0.22,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.48,0.5,0.65,0.7,0.8,0.8,1) | Congestión percibida por los gobernantes lo cual se transforma en una fracción porcentual para destinar más inversión en desarrollo vial. [adimensional] |
| Cobertura | Auxiliar | $Preocupa_Politic / Covertura_PGN$ | Representa la relación existente entre la preocupación política real y la cobertura presupuestal para vías acorde al porcentaje definido en el PGN. Una cobertura menor a 1 representa baja preocupación por inversión vial como resultado de óptimas condiciones de desplazamiento. Cobertura igual a 1 representa que se asigna el porcentaje destinada a construcción vial establecido en el PGN. Cobertura mayor a 1 representa una alta preocupación por aumentar la inversión vial debido a la demandas de la comunidad. [fracción porcentual] |
| Cobertura_PGN | Parámetro | 1 | Fracción porcentual que representa una cobertura del 100% de la asignación porcentual destinada en el Presupuesto General de la Nación para construcción vial. [fracción porcentual] |
| | | | Multiplicador que representa la demanda ambiental que la comunidad ejerce sobre los gobernantes pertenecientes al contexto donde se |

| | | | |
|------------------|----------|--|---|
| DemandaConservac | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.2,2,1.8,1.6,1.4,1.2,1,0.8,0.6,0.4,0.2,0) | desarrollan las obras viales, para destinar un mayor o menor porcentaje a la construcción vial acorde al estado del índice ambiental. [adimensional] |
| Demanda_Social | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.2,2,1.8,1.6,1.4,1.2,1,0.8,0.6,0.4,0.2,0) | Multiplicador que representa la demanda social que la comunidad hace sobre los gobernantes para invertir más o menos en infraestructura vial, acorde al estado de la calidad de vida. Esta exigencia de la comunidad radica en la construcción vial para disminuir el índice de congestión que afecta la calidad de vida al disminuir los tiempos de desplazamiento de la población. [adimensional] |
| Inversion_Infrae | Auxiliar | Presup_Disponibl*Asignacion_Inver | Inversión destinada a infraestructura de transporte acorde al presupuesto general designado para el año 2014 y la respectiva asignación porcentual para el sector transporte que varía en función de la preocupación política como inversión adicional producida por demandas sociales, conservacionistas y congestión percibida por los gobernantes. [miles dolares] |
| MP_Covertura | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.2,0.7,0.7,0.9,1,1,0.9971256,1.072665,1.3,1.5,1.532881) | Establece la relación no lineal existente en la cobertura y la asignación base establecida para infraestructura vial en el PGN. Determina que tanto puede disminuir, mantenerse o aumentar dicha asignación porcentual base. [adimensional] |
| MP_Enmigracion | Tabla | INTSPLINE(2,0,1.5,0.5,0.35,0.1,0.05,0.025,0.01) | Multiplicador que representa el efecto que la calidad de vida tiene sobre la emigración de personas. El deterioro ambiental y el aumento en los tiempos de desplazamiento a causa de altos índices de congestión, incentiva que la población abandone el contexto donde se desarrollan y están las iniciativas viales. [adimensional] |
| MP_ImpactoCO2 | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.25,0,0.03107039,0.07249757,0.2303755,0.7103246,1.151878,2,2.055162,2) | Multiplicador que relaciona el impacto que las emisiones de CO2 provenientes de los carros circulantes en la infraestructura vial construida sobre el medio ambiente. [adimensional] |
| MP_ImpactoKMS | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.25,0,0.03107039,0.07249757,0.2303755,0.7103246,1.151878,1.8814,2,2) | Multiplicador que relaciona el impacto que la construcción vial tiene sobre el medio ambiente al modificarlo físicamente. [adimensional] |
| MP_IndCongestion | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.1,2,1.7,1.5,1.3,1.1,0.9062033,0.8320476,0.7267878,0.6466827,0.5817976,0.5261819,0.4479856,0.4015088,0.3550596,0.2805994,0.2348165,0.1891181,0.1646641,0.136282,0.1370309,0.11,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1) | Multiplicador que estima en qué medida el índice de congestión vial repercute sobre la velocidad de desplazamiento de las personas en el contexto donde se desarrolla la infraestructura vial. [adimensional] |
| MP_Inmigracion | Tabla | INTSPLINE(2,0,1.5,0.025,0.025,0.05,0.1,0.35,0.5) | Multiplicador que representa el efecto que la calidad de vida tiene sobre la inmigración de personas. La disminución en los tiempos de desplazamiento a causa de bajos índices de congestión, incentiva la atraktividad del contexto donde está funcionando la infraestructura de transporte y se desarrollan las obras |

| | | | |
|------------------|-----------|---|--|
| | | | viales, para que personas nuevas lleguen a este contexto. [adimensional] |
| MP_TiempDesplaz | Tabla | INTSPLINE(2,0,0.5,2,2,2,2,2,1.7,1.5,1.3,1.1,0.9,0.8,0.5,0.4,0.3,0.3,0.3,0.3,0.25,0,0,0,0,0) | Multiplicador que relaciona el tiempo de viaje con la calidad de vida. Esta relación está fundamentada en que reducción en los tiempos de viaje influencia directamente proporcional la calidad de vida de la población, debido a que con un desplazamiento óptimo hay mayor acceso a oportunidades de desarrollo humano. [adimensional] |
| Preocupa_Politic | Auxiliar | (Demanda_Social+Retardo_6)-DemandaConservac | Preocupación política en inversión vial que se estima en función de la demanda social (que acorde a la calidad de vida solicita la construcción de vías), la congestión percibida por la clase política y la demanda de conservación que se opone a más desarrollo vial por el deterioro ambiental. [fracción adimensional] |
| Retardo_1 | Retardo | RETARDO(Inversion_Infrae,10,5,0) | Retardo que representa el tiempo que la construcción inicial de kilómetros tarda en completarse en su totalidad. [años] |
| Retardo_2 | Retardo | RETARDO(Inver_InfraSocia,5,3,0) | Tiempo de retardo para culminar las obras sociales acorde a la inversión destinada para ello. [años] |
| Retardo_3 | Retardo | RETARDO(Reparacion_Ambie,3,1,0) | Tiempo de retardo necesario para que la inversión en conservación ambiental tenga efecto en el flujo de conservación ambiental. [años] |
| Retardo_4 | Retardo | RETARDO(MP_Enmigracion,5,2,0) | Tiempo de retardo necesario para que sea percibida la disminución en la calidad de vida y en consecuencia el flujo de emigración empiece a aumentar. [años] |
| Retardo_5 | Retardo | RETARDO(MP_Inmigracion,4,2,0) | Tiempo de retardo necesario para que sea percibido el aumento en la calidad de vida y en consecuencia el flujo de inmigración empiece a aumentar. [años] |
| Retardo_6 | Retardo | RETARDO(Congest_Percibid,7,3,0) | Representa el tiempo de latencia para que los gobernantes hagan nuevas inversiones debido a la congestión existente que no puede ser controlada por la capacidad instalada. [años] |
| Tasa_Enmigracion | Parámetro | 0.039 | Tasa de migración promedio neta (últimos 12 años) establecida por el DANE. [adimensional/año] |
| Tasa_Inmigracion | Parámetro | 0.039 | Tasa de migración promedio neta (últimos 12 años) establecida por el DANE. [adimensional/año] |
| Tiempo_Viaje | Auxiliar | Tramo_150km/Velocidad_Viaje | Tiempo de viaje estimado para tramos de 150 km. Calculado a partir de la velocidad de viaje influencia por el índice de congestión y la velocidad promedio de servicio. [horas] |
| Tramo_150km | Parámetro | 150 | Longitud de tramo vial para el cual se estima el tiempo de viaje en función de la velocidad. [kilómetros] |
| Velocidad_Servic | Parámetro | 60 | Velocidad estipulada para los kilómetros viales construidos, bajo la cual se considera que hay una circulación óptima en el desplazamiento vehicular. [Kilómetros/hora] |

| | | | |
|-----------------|----------|---|---|
| Velocidad_Viaje | Auxiliar | $Velocidad_Servic * MP_IndCongestion$ | Velocidad de viaje estimada en función de la velocidad de servicio y el efecto multiplicador que el índice de congestión puede tener sobre ella. [Kilómetros/hora] |
| Emigración | Flujo | $Nivel_1 * (Retardo_4 * Tasa_Emigracion)$ | Flujo de emigración de personas que abandonan el contexto donde se desarrollan las obras viales por la disminución en la calidad de vida, que se afectada por el índice ambiental y el índice de congestión. [Personas/año] |
| Inmigración | Flujo | $Nivel_1 * (Retardo_5 * Tasa_Inmigracion)$ | Flujo de inmigración de personas que llegan al contexto donde hay desarrollo vial debido a un buen índice de calidad de vida percibido. [Personas/año] |

Anexo C. Especificación casos de uso

Tabla 14. Caso de uso: Elegir simulador.

| | |
|------------------------|--|
| Caso de uso | Elegir simulador |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Inclusión |
| Propósito | El usuario tiene la posibilidad de elegir dos prototipos para diferenciar entre soluciones tradicionales de inversión en conservación ambiental y formulación de políticas complementarias que estimulan la sostenibilidad ambiental. |
| Descripción | El actor puede elegir entre dos simuladores: “conservación a través de inversión monetaria” y “conservación con inversión y políticas complementarias”. |
| Precondiciones | Ninguna |
| Flujo principal | El actor accede a una pantalla principal donde puede seleccionar los siguientes simuladores: “conservación a través de inversión monetaria” y “conservación con inversión y políticas complementarias”. Dependiendo de su elección se procede con los sub-flujos. (ver Figura 27) |
| Sub-flujos | <p><i>Sub-flujo conservación a través de inversión monetaria.</i> Si el usuario elige como opción este simulador accederá a una pantalla de controles donde puede interactuar con el modelo a través de la modificación de parámetros y observar gráficamente los resultados de simulación que trae consigo el aumento o disminución en inversión vial, ambiental y social. (ver Figura 28)</p> <p><i>Sub-flujo conservación con inversión y políticas complementarias.</i> Si el usuario elige como opción este simulador accederá a una pantalla de controles donde puede interactuar con el modelo a través de la</p> |

| | |
|-----------------------|---|
| | modificación de parámetros y observar gráficamente los resultados de simulación que trae consigo la implementación de políticas destinadas a la reducción de emisiones de dióxido de carbono, disminución de la tasa de ocupación vehicular, chatarrización vehicular e inversión en conservación y restauración ambiental. (ver Figura 29) |
| Excepciones | Ninguna. |
| Poscondiciones | El usuario accede al simulador correspondiente al prototipo seleccionado. |

Figura 29. Pantalla principal



Figura 30. Simulador "conservación a través de inversión monetaria"

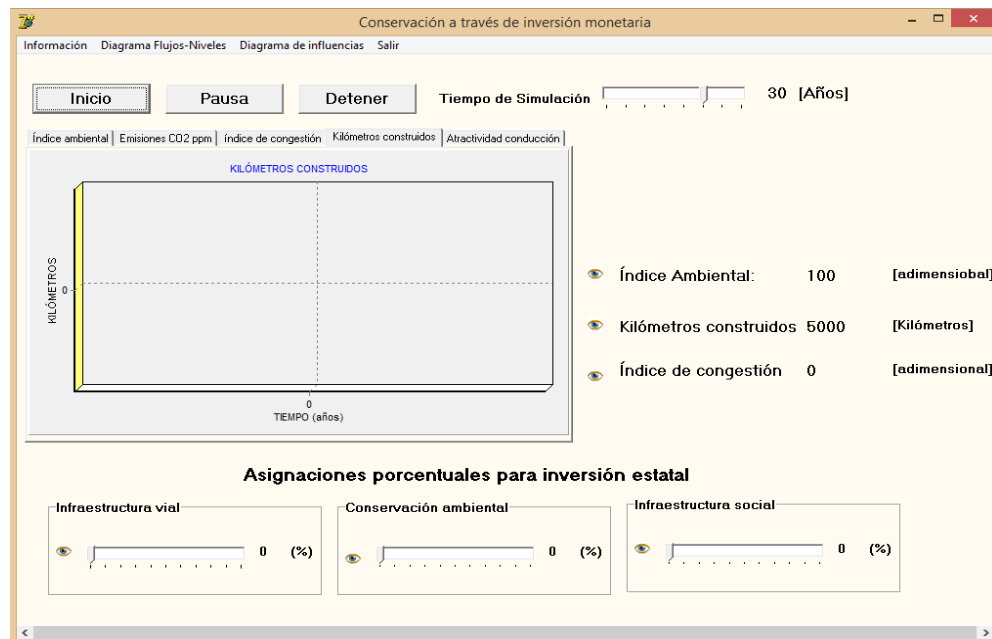


Figura 31. Simulador "conservación con inversión y políticas complementarias"

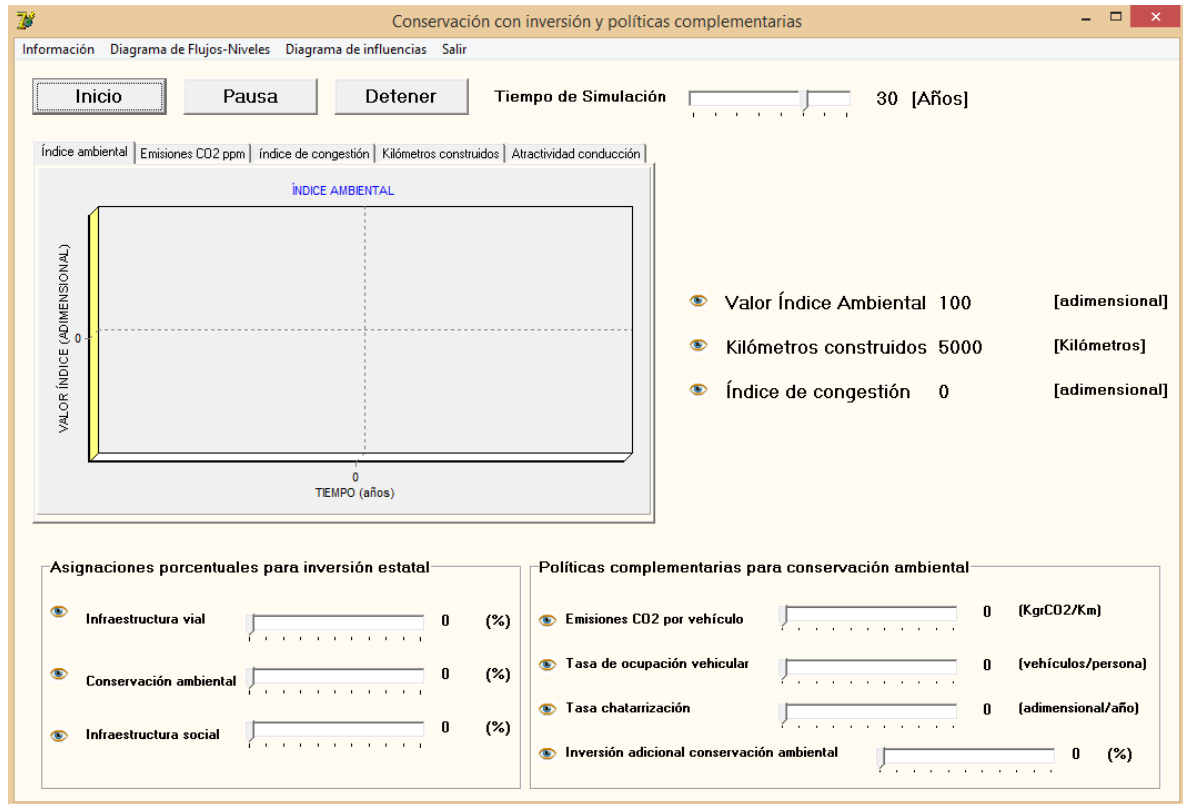


Tabla 15. Caso de uso: Elegir tiempo de simulación

| | |
|------------------------|--|
| Caso de uso | Elegir tiempo de simulación |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Permitir al usuario elegir el tiempo de simulación a partir del cual se observarán gráficamente los resultados de simulación de los prototipos contenidos en cada simulador en función del tiempo seleccionado. |
| Descripción | El usuario cuenta con un elemento que le permite ajustar (disminuir o incrementar) el tiempo de simulación u horizonte de tiempo que las simulaciones durarán |
| Precondiciones | Se requiere ejecutar previamente el caso de uso elegir simulador |
| Flujo principal | Se presenta al usuario la interfaz correspondiente al simulador seleccionado en la pantalla principal. En cada interfaz el usuario elige el tiempo de simulación bajo el cual se arrojarán los resultados del modelo a través de gráficos. |
| Sub-flujos | Ninguno. |

| | |
|-----------------------|---|
| Excepciones | El usuario está restringido a un rango numérico al momento de seleccionar el tiempo de simulación (rango entre 5 y 40 años de simulación). |
| Poscondiciones | El tiempo de simulación observado en los resultados de simulación presentados gráficamente es determinado en función de la elección realizada por el usuario. |

Tabla 16. Caso de uso: Controlar simulación

| | |
|------------------------|---|
| Caso de uso | Controlar simulación |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Permitir al usuario controlar la simulación de los prototipos construidos utilizando dinámica de sistemas. |
| Descripción | El usuario cuenta con las siguientes opciones: iniciar, pausar y detener que le permiten controlar la simulación de los resultados graficados. |
| Precondiciones | Se requiere ejecutar previamente el caso de uso elegir simulador |
| Flujo principal | El usuario accede a la pantalla principal de alguno de los dos simuladores. En la pantalla del simulador seleccionado encuentra botones de “Inicio”, “Pausa” y “Detener”. Dependiendo de la elección de estos botones se procede con los correspondientes sub-flujos. |
| Sub-flujos | <p><i>Inicio.</i> Si esta es la opción elegida por el usuario el sistema simula las variables de interés del modelo hasta el tiempo de simulación seleccionado por el usuario. En consecuencia, gráficamente se observan los resultados de simulación. Durante la simulación el usuario puede pasar a los sub-flujos <i>Pausa</i> y/o <i>Detener</i>.</p> <p><i>Pausa.</i> Si esta es la opción elegida por el usuario cuando la simulación se encuentra en marcha, los resultados son arrojados gráficamente en el tiempo de simulación en el cual se seleccionó esta opción. Si el usuario decide continuar con la simulación procede con el sub-flujo <i>Inicio</i>.</p> <p><i>Detener.</i> Si esta es la opción elegida por el usuario el sistema la simulación es interrumpida por el sistema.</p> |
| Excepciones | Ninguna. |
| Poscondiciones | Al usuario se le presentan los resultados de simulación de las variables de interés por medio de gráficas. |

Tabla 17. Caso de uso: Modificar parámetros

| | |
|------------------------|---|
| Caso de uso | Modificar parámetros |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Permitir al usuario asignar valores a algunas variables (parámetros) de cada uno de los prototipos que posee un simulador en la interfaz gráfica. |
| Descripción | El usuario cuenta con controles dentro de la interfaz de cada simulador que le permiten asignar valores a algunos parámetros del modelo que son mostrados en pantalla. |
| Precondiciones | Se requiere ejecutar previamente el caso de uso elegir simulador |
| Flujo principal | El usuario accede a la pantalla principal de alguno de los dos simuladores. En la pantalla del simulador el usuario puede asignar valores a variables del modelo (parámetros) que le son mostradas en función del propósito del simulador |
| Sub-flujos | Ninguno. |
| Excepciones | El usuario está restringido a un rango numérico seleccionado a priori por el programador en cada uno de los parámetros cuyo valor puede ser modificado. |
| Poscondiciones | Los valores seleccionados por el usuario son asignados al prototipo del simulador correspondiente para realizar la simulación. |

Tabla 18. Caso de uso: consultar diagrama de flujos-niveles

| | |
|------------------------|--|
| Caso de uso | Consultar diagrama de flujos-niveles |
| Actores | Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Permitir al usuario consultar el diagrama de influencias general de cada simulador. |
| Descripción | El usuario cuenta con un sistema de pestañas donde puede elegir qué sector en particular desea ver del diagrama de flujos y niveles. |
| Precondiciones | Se requiere ejecutar previamente el caso de uso elegir simulador. |
| Flujo principal | El usuario accede a la pantalla principal de alguno de los dos simuladores elegido. En la pantalla del simulador el usuario puede elegir ver el diagrama de influencias que soporta la construcción del modelo operado por la interfaz. Podrá consultar cada uno de los sectores que dicho diagrama contiene |
| Sub-flujos | Ninguno. |
| Excepciones | Ninguna |
| Poscondiciones | Se presentará al usuario el sector que deseé consultar del diagrama de flujos y niveles. |

Tabla 19. Caso de uso: Ver diagrama de influencias

| | |
|------------------------|--|
| Caso de uso | Ver diagrama de influencias |
| Actores | Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Relacionar al usuario con las variables relacionadas a través de la hipótesis dinámica que sustenta cada simulador. Así, más allá de realizar experimentos a través de los controles de cada simulador, el usuario puede comprender las relaciones cíclicas causales que subyacen en los comportamientos de las gráficas observadas. |
| Descripción | El usuario puede consultar el diagrama de influencias como hipótesis dinámica de trabajo que sustenta la construcción del modelo. |
| Precondiciones | Se requiere previamente ejecutar el caso de uso elegir simulador |
| Flujo principal | El usuario accede a la pantalla principal de la interfaz gráfica donde elige un simulador y posteriormente puede consultar el diagrama de influencias que relaciona conceptualmente las variables tenidas en cuenta para la construcción del modelo. Facilitando así, la comprensión del concepto de realimentación. |
| Sub-flujos | Ninguno. |
| Excepciones | Ninguna. |
| Poscondiciones | El usuario puede ver el diagrama de influencias del modelo construido con dinámica de sistemas |

Tabla 20. Caso de uso: Descripción variables graficadas

| | |
|------------------------|---|
| Caso de uso | Descripción variables graficadas |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Familiarizar y relacionar al usuario con las variables cuyo comportamiento a través del tiempo puede ser observado gráficamente. |
| Descripción | El usuario puede consultar definiciones de las variables más relevantes en función del propósito bajo el cual el modelo es construido. |
| Precondiciones | Se requiere previamente ejecutar el caso de uso elegir simulador |
| Flujo principal | El usuario accede a la pantalla principal de la interfaz gráfica donde elige un simulador. Posteriormente, puede consultar las definiciones de las variables que puede ser graficadas a partir de la modificación de parámetros realizada por el usuario. Así, el usuario puede conocer los supuestos bajo los cuales los autores del presente trabajo definen dichas variables relevantes en función del propósito del modelo. |
| Sub-flujos | Ninguno. |
| Excepciones | Ninguna. |
| Poscondiciones | El usuario puede ver la descripción en prosa de variables pertenecientes al modelo construido utilizando dinámica de sistemas |

Tabla 21. Caso de uso: Descripción simulador

| | |
|------------------------|--|
| Caso de uso | Descripción simulador |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | Permitirle al usuario profundizar en la descripción conceptual del prototipo controlado por cada simulador. |
| Descripción | El usuario puede consultar información relacionada al propósito de cada simulador. |
| Precondiciones | Se requiere ejecutar previamente el caso de uso elegir simulador. |
| Flujo principal | El usuario accede a la pantalla principal de alguno de los dos simuladores. Allí, podrá consultar información acerca del simulador. Esto con el propósito de brindar documentos de apoyo que mejoren el entendimiento del útil que opera, teniendo presente que bajo él subyace un modelo construido con dinámica de sistemas. |
| Sub-flujos | Ninguno. |
| Excepciones | Ninguna. |
| Poscondiciones | El usuario puede consultar la descripción estática de cada simulador. |

Tabla 22. Caso de uso: Documentación general

| | |
|------------------------|--|
| Caso de uso | Documentación general |
| Actores | Usuario 1, Usuario 2. |
| Tipo | Generalización |
| Propósito | El usuario tiene la posibilidad de consultar información general acerca de la interfaz desarrollada para operar el modelo. |
| Descripción | El actor puede elegir entre la siguiente consulta de información: “acerca de los autores”, “información del modelo”, “información de la interfaz”. |
| Precondiciones | Ninguna |
| Flujo principal | El actor accede a la pantalla principal de la interfaz donde puede consultar información acerca del modelo, la interfaz y una breve descripción de los autores. |
| Sub-flujos | <p><i>Sub-flujo acerca de los autores.</i> Si el usuario elige como opción esta documentación, puede conocer el autor, el director y los codirectores del presente trabajo.</p> <p><i>Sub-flujo información del modelo.</i> Si el usuario elige como opción consultar esta información, podrá conocer el propósito puntual del modelo así como las restricciones del mismo. Le permitirá estar informado acerca de los límites de modelamiento del mismo.</p> <p><i>Sub-flujo información de la interfaz.</i> Si el usuario elige como opción consultar esta información, conocerá el propósito general de la interfaz que opera el modelo</p> |
| Excepciones | Ninguna. |

| | |
|-----------------------|--|
| Poscondiciones | El usuario mejora su comprensión acerca del modelo y por ende mejora su interacción con la interfaz y controles que pueden ser modificados para realizar experimentos de simulación. |
|-----------------------|--|

Anexo D. Guía experiencia de uso

EXPERIENCIA DE USO: ALCANZANDO SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN EL CONTEXTO DE DESARROLLO VIAL

ACTIVIDAD 1: uso simulador “conservación a través de inversión monetaria”.

El presente simulador permite a un usuario no conocedor de dinámica de sistemas observar el impacto ambiental generado por desarrollo vial bajo políticas estatales tradicionales que promueven su conservación mediante inversión monetaria. Así, el usuario puede a través de controles disminuir y/o aumentar la asignación presupuestal en desarrollo vial y conservación ambiental, para dar cuenta de su relación inversamente proporcional donde a mayor a número de kilómetros construidos menor será el índice ambiental bajo los mecanismo de inversión tradicional. De igual forma, podrá evaluar el estado del índice de congestión vial en función de la infraestructura vial disponible.

En la parte de superior el usuario puede controlar la simulación a través de las siguientes funciones:



- **Inicio:** inicia la simulación.
- **Pausa:** permite después de iniciar la simulación, pausarla.
- **Detener:** permite al usuario dar por terminada una simulación que está en desarrollo.
- **Tiempo de simulación:** permite al usuario seleccionar el tiempo de simulación en años en un rango de 5 a 40 años.

¡Aprendamos a simular y entender los resultados!

Para comenzar realiza los siguientes pasos en el simulador:

1. Elija un tiempo de simulación.
2. Seleccione una asignación presupuestal para desarrollo vial, conservación ambiental e infraestructura social.
3. Inicie la simulación.
4. Observe los resultados.
 - ¿Cuál es el comportamiento del índice ambiental al aumentar el número de kilómetros construidos? _____

¿Qué ocurre con el índice de congestión vial a medida que el número de kilómetros construidos aumenta? _____

5. Tradicionalmente el aumento de la capacidad vial es considerada la solución correcta para disminuir la congestión. Por ello, acorde a los resultados obtenidos en el punto 4 para el índice de congestión, aumente la fracción porcentual para inversión vial y aumente la inversión en conservación ambiental como medida de contingencia para los daños generados por más desarrollo vial.

- Ahora, ¿Qué ocurre con el índice de congestión vial? _____

- Ahora, ¿Qué ocurre con el índice ambiental? _____

6. Responda la siguiente pregunta:

- Si la congestión vial incrementa a largo plazo independientemente del número de kilómetros construidos y el deterioro ambiental es notable a pesar de la inversión para su conservación, ¿es posible que la toma de decisiones no se esté efectuando de manera correcta para garantizar la efectividad de los proyectos viales y la sostenibilidad ambiental? ¿Puede hacer alguna sugerencia frente a la toma de decisiones tradicional? _____

ACTIVIDAD 2: uso simulador “conservación con inversión y políticas complementarias”.

El presente simulador permite a un usuario no conocedor de dinámica de sistemas mitigar el impacto ambiental generado por desarrollo vial bajo políticas estatales tradicionales que promueven su conservación mediante inversión monetaria, junto con la implementación de políticas complementarias que permitan alcanzar un nivel de sostenibilidad ambiental a largo plazo. Además, permite entender como el uso de políticas adicionales a inversión mejora el índice de congestión y en consecuencia, se alcanza el objetivo para el cual la infraestructura vial es construida.

¡Aprendamos a simular y entender los resultados!

Para comenzar realiza los siguientes pasos en el simulador:

1. Elija el mismo tiempo de simulación utilizado en el simulador 1.

2. Seleccione la misma asignación presupuestal para desarrollo vial, conservación ambiental e infraestructura social elegidas en el simulador 1.

3. Políticas complementarias: Seleccione un nivel de emisiones de dióxido de carbono por vehículo (tenga en cuenta que un vehículo particular en promedio emite 0,2 KgCO₂/km), seleccione el porcentaje de chatarrización vehicular, seleccione el porcentaje para inversión adicional de restauración ambiental y elija el valor de 0.08 para la tasa de ocupación vehicular.

4. Inicie la simulación.

Observe los resultados.

- ¿Qué diferencias encuentra en el índice ambiental con respecto a los resultados obtenidos en el simulador 1? _____

- ¿Qué comportamiento presente índice de congestión con respecto a los resultados obtenidos en el simulador 1? _____

5. Disminuya la tasa de ocupación vehicular a 0.02 y mantenga los mismos valores seleccionados anteriormente para el resto de políticas complementarias.

6. Inicie la simulación

- ¿Qué diferencias percibe en el índice de congestión con la reducción en la tasa de ocupación vehicular? _____

- ¿Por qué la reducción de la tasa de ocupación vehicular favorece la sostenibilidad ambiental y disminuye el índice de congestión? _____

¡Pensemos holísticamente!

¿Por qué la conservación ambiental no funciona únicamente a través de inversión estatal? _____

¿Por qué no se tiene un índice de congestión bajo únicamente con aumento del número de kilómetros construidos? _____

¿Cómo cree que la dinámica de sistemas aporta en la planificación de proyectos viales teniendo en cuenta el componente ambiental? _____
