

**MODELADO DEL CAMBIO GLOBAL EN EL MEDIO AMBIENTE MEDIANTE LA  
METODOLOGÍA DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS**

**SERGIO AUGUSTO GÉLVEZ CORTÉS  
OSCAR MAURICIO MURILLO SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**MODELADO DEL CAMBIO GLOBAL EN EL MEDIO AMBIENTE MEDIANTE LA  
METODOLOGÍA DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS**

**SERGIO AUGUSTO GÉLVEZ CORTÉS  
OSCAR MAURICIO MURILLO SUÁREZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero de Sistemas**

**Director  
HUGO HERNANDO ANDRADE SOSA  
Ingeniero de Sistemas, Msc.  
Director Grupo SIMON de investigaciones.**

**Codirector  
CARLOS FERNANDO GUERRA HERNÁNDEZ  
Ingeniero Químico  
Coordinador de la Especialización en Ingeniería Ambiental UIS.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**TITULO: MODELADO DEL CAMBIO GLOBAL EN EL MEDIO AMBIENTE MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS\***

**AUTORES:** Gélvez Cortes, Sergio Augusto; Murillo Suárez, Oscar Mauricio \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Cambio Global, Dinámica de Sistemas, Sistemas Naturales Físicos, Simulación, Modelado, Diagrama de procesos sociales, Diagrama de Aspen, Dinámica Ambiental.

**DESCRIPCIÓN:** Este trabajo presenta el proceso investigativo realizado en el modelado del conocimiento sobre las relaciones que conforman la dinámica de cambio global, resaltando la intervención de la humanidad en el sistema terrestre, usando al Diagrama de Aspen como guía. Este trabajo de investigación destaca el uso de la Dinámica de Sistemas como metodología utilizada en el proceso de construcción de modelos que explican el comportamiento de fenómenos de diversa índole incluyendo la simulación de sistemas complejos, tal y como es el fenómeno del cambio global en el medio ambiente.

En base al diagrama de Aspen se realizó un análisis de cada una de las fuerzas motrices que lo constituyen, para posteriormente pasar a desarrollar un modelo de simulación, mediante dinámica de sistemas, en el que se ilustran los problemas del sistema terrestre relacionados con el cambio global en el medio ambiente, destacando la participación del elemento humano en el mismo y comprendiendo la complejidad del problema para considerar alternativas de intervención.

Siguiendo la metodología de prototipado evolutivo extrapolada a la investigación así como la Dinámica de Sistemas, se crearon cuatro modelos cada uno con un mayor grado de complejidad, partiendo de un primer modelo sencillo en el que interactúan los factores que percibe la mayoría de la gente con más facilidad y llegando hasta un cuarto modelo que muestra aquellos factores complejos que son mas significativos para aquellas personas con conocimientos profundos en las diferentes áreas relacionadas con el cambio global.

---

\* Proyecto de grado en la modalidad de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Andrade Sosa, Hugo Hernando.

**TITLE: MODELLING OF THE GLOBAL CHANGE IN ENVIRONMENT BY MEANS OF THE METHODOLOGY OF THE DYNAMICS OF SYSTEMS\***

**AUTHORS:** Gélvéz Cortes, Sergio Augusto; Murillo Suárez, Oscar Mauricio \*\*

**KEY WORDS:** Global Change, Systems Dynamic, Physical Natural Systems, Simulation, Modelling, Social Processes Diagram, Aspen Diagram, Environmental Dynamics.

**DESCRIPTION:** This document presents the investigation process in the modelling of the knowledge on the relations that shape the dynamics of global change, emphasizing the intervention of the humanity in the terrestrial system, using the Aspen Diagram as a guide. This investigation project so emphasizes the use of Systems Dynamics methodology which is used in the process of construction of models that explain the behavior of phenomena of diverse nature including the simulation of complex systems, and as it is the phenomenon of the global change in environment.

Based on the Aspen Diagram an analysis was made, comprising the driving forces of global change, in order to develop a simulation model, by means of Systems Dynamics, illustrating the problems of the terrestrial system related to the global change in environment, emphasizing the participation of the human element in the phenomenon and understanding the complexity of the problem to consider intervention alternatives.

By following the evolutive prototyping methodology extrapolated toward investigation and Systems Dynamic methodology, four models were created, each one with a greater degree of complexity, starting off of a first simple model in which the factors that interact are perceive like most of people perceive them, continuing until a fourth model that shows those complex factors that are significant for all but those people with deep knowledge in the different areas related to the global change.

---

\* Graduation Work.

\*\* Faculty of physics and Mechanical Engineering. School of Engineering of Systems and Computer Science. Tutor: Andrade Sosa, Hugo Hernando.

A Dios

A mi Familia por todo su apoyo durante toda mi vida, en especial a mis padres, Laura Esther Cortés Valderrama y Gustavo Gélvez Manco, a quienes considero ejemplo de virtud humana y fuente de toda la bondad presente en mis actitudes.

A la familia Giraldo Mesa, la que me acogió como a un miembro más.

A todos mis amigos, quienes comparten conmigo este escenario que es la vida.

A la familia Murillo Suárez por el apoyo brindado para la realización de este proyecto, y además por su paciencia.

Y a muchas otras personas que no puedo mencionar en este texto, que en su propia medida y de manera similar a las ya mencionadas, han influenciado mi vida, ayudándome a convertirme en quien soy.

Gracias Totales.

**SERGIO AUGUSTO GÉLVEZ CORTÉS**

A Dios

A mi familia por su colaboración y apoyo incondicional durante toda mi vida.

A Stella, mi novia, por su comprensión y compañía.

A la familia Gélvez Cortés por acogerme en su hogar durante toda esta larga jornada.

A todos aquellos amigos en quienes confío y que han hecho posible, con sus voces de aliento y apoyo absoluto, no solo la realización de este trabajo sino también mi crecimiento como persona y como profesional.

**OSCAR MAURICIO MURILLO SUÁREZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Hugo Hernando Andrade Sosa, Msc. en Informática y Director del grupo de investigación SIMON y de esta tesis de grado, por su participación activa, por aportar su visión y por su voto de confianza al creer en nosotros.

Carlos Fernando Guerra Hernández, Ingeniero Químico, Coordinador de la Especialización en Ingeniería Ambiental UIS y Codirector de esta tesis de grado, por su apoyo y confianza mostrada durante todo el desarrollo del proyecto.

John Katzenberger, Director del Instituto del Cambio Global de Aspen, por el apoyo e interés manifestado en la realización de este proyecto.

Roberta Balstad, P.Hd. y Directora del CIESIN, por la ayuda brindada dentro del proyecto.

Camilo Rueda, Psicólogo; Edgar Omar Rueda, Demógrafo vinculado al DANE; Elsida Ramírez Sierra, Psicopedagoga del departamento de Bienestar Universitario de la Universidad Industrial de Santander y José Alberto Pinto, Economista M.Sc. Docente de la Universidad Industrial de Santander; por sus correspondientes aportes y enseñanzas sobre temas específicos que se trataron dentro de esta tesis de grado.

Freddy Sarmiento Villamizar y Cesar Augusto Rivera Palacios, Ingenieros de Sistemas, por ser guías y colaboradores en la realización de este proyecto.

Eduart Luis Doria y Rolando Beltrán, estudiantes de ingeniería de sistemas de la Universidad Industrial de Santander, por haber aportado con sugerencias para la realización de los prototipos usados en el proyecto.

## TABLA CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION .....	16
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	17
3. OBJETIVOS .....	20
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETIVOS .....	20
4. JUSTIFICACIÓN .....	22
5. METODOLOGÍA .....	24
5.1. PROPUESTA DE DESARROLLO DE PROTOTIPOS.....	25
5.2. PROPUESTA DE ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO .....	26
5.3. PLAN DE PRUEBAS PARA LA VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO.....	26
6. MARCO TEÓRICO .....	29
6.1. CAMBIO GLOBAL.....	29
6.2. TIERRA COMO SISTEMA: EL SISTEMA TERRESTRE.....	30
6.2.1. Sistema .....	30
6.2.2. La Tierra como sistema .....	33
6.2.3. El diagrama de Bretherton.....	36
6.3. DIAGRAMA DE ASPEN .....	40
6.3.1. Población .....	43
6.3.1.1. Crecimiento Poblacional .....	43
6.3.1.2. Dinámica poblacional: Tasas Crecientes.....	44
6.3.1.3. Teoría de la Transición Demográfica.....	45
6.3.1.4. Estabilizando la Población Mundial .....	47
6.3.2. Sistemas Naturales Físicos .....	48
6.3.3. Factores de Producción y Tecnología .....	48
6.3.4. Sistema Económico .....	49
6.3.5. Sistema Político .....	49
6.3.6. Fondo de Conocimiento, Expectativas y Preferencias.....	50
6.4. RECOPIACIÓN DE MODELOS SOBRE EL CAMBIO GLOBAL .....	52
7. PRIMER PROTOTIPO .....	53
7.1. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA.....	53
7.2. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS .....	55
7.3. DIAGRAMA FLUJO-NIVEL .....	56
7.4. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS .....	59
7.5. VALIDACIÓN DEL MODELO .....	62
7.5.1. Análisis en el Consumo de Alimentos en el Mundo .....	64
7.5.2. Análisis en el Consumo de Recursos No Renovables en el Mundo .....	64
7.5.3. Análisis en el Cantidad de Recurso Hídrico en el Mundo .....	65
8. SEGUNDO PROTOTIPO.....	67
8.1. RECOMENDACIONES A IMPLEMENTAR EN EL SEGUNDO PROTOTIPO.....	67
8.2. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA.....	68
8.3. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS .....	70

8.4. DIAGRAMA FLUJO-NIVEL .....	72
8.5. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS .....	73
8.6. VALIDACIÓN DEL MODELO .....	79
8.6.1. Análisis del Nivel Económico.....	80
8.6.2. Análisis de la Explotación de Madera.....	81
9. TERCER PROTOTIPO .....	82
9.1. RECOMENDACIONES A IMPLEMENTAR EN EL TERCER PROTOTIPO .....	82
9.2. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA.....	82
9.3. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS .....	85
9.4. DIAGRAMA FLUJO NIVEL .....	85
9.5. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS .....	90
9.6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD .....	100
9.6.1. Análisis del Consumo de Recursos no Renovables y Sistema Económico.....	101
9.6.1. Análisis del Nivel de Alimentos.....	102
10. VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO .....	105
10.1. FASE I DEL PLAN DE PRUEBAS .....	105
10.1.1. Prueba de Idoneidad de los límites .....	105
10.1.2. Evaluación de la Estructura .....	109
10.1.3. Análisis de Consistencia Dimensional.....	110
11. CUARTO PROTOTIPO.....	111
11.1. RECOMENDACIONES A IMPLEMENTAR EN EL CUARTO PROTOTIPO.....	111
11.2. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA.....	111
11.3. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS .....	113
11.4. DIAGRAMA FLUJO NIVEL .....	114
11.5. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS .....	116
11.6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD .....	120
11.6.1. Análisis de la Cantidad de Recursos Renovables.....	121
11.6.2. Análisis de Sensibilidad Sobre el Nivel de Recursos No Renovables .....	121
11.6.3. Análisis de la Tierra disponible para Agricultura .....	122
11.6.4. Análisis en la Acumulación de Basuras.....	123
12. VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO – SEGUNDA PARTE .....	125
12.1. FASE II DEL PLAN DE PRUEBAS .....	125
12.1.1. Prueba de error en el paso de Integración.....	125
12.1.2. Evaluación de Parámetros.....	125
12.2. FASE III DEL PLAN DE PRUEBAS .....	128
12.2.1. Reproducción de Comportamiento .....	128
12.2.2. Prueba de Comportamiento Anómalo .....	129
12.2.3. Comportamiento Sorpresa.....	133
12.3. FASE IV DEL PLAN DE PRUEBAS.....	134
13. RECOMENDACIONES PARA EL PROTOTIPO N.....	135
14. APLICACIONES DEL MODELO.....	136
15. CONCLUSIONES .....	137
16. RECOMENDACIONES.....	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

## TABLA DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 1: Explicación de los Bloques del Diagrama de Aspen .....	18
Figura N° 2: Prototipado Evolutivo .....	24
Figura N° 3: Diagrama del plan de pruebas.....	28
Figura N° 4: Sistemas y subsistemas - Nivel de resolución. ....	32
Figura N° 5: El diagrama de Bretherton.....	38
Figura N° 6: El diagrama de Procesos Sociales o diagrama de Aspen .....	42
Figura N° 7: Las Fases de la Transición Demográfica. ....	45
Figura N° 8: Diagrama de influencias del primer prototipo. ....	56
Figura N° 9: Sector Población – Primer Prototipo. ....	56
Figura N° 10: Sector Emisiones Gases Invernadero – Primer Prototipo.....	57
Figura N° 11: Sector Ozono – Primer Prototipo.....	57
Figura N° 12: Sector Recurso Hídrico – Primer Prototipo .....	58
Figura N° 13: Sector Energía – Primer Prototipo.....	58
Figura N° 14: Sector Alimentos – Primer Prototipo. ....	59
Figura N° 15: Sector Basuras – Primer Prototipo. ....	59
Figura N° 16: Comportamientos sobre la población bajo diferentes escenarios para el prototipo I. ....	64
Figura N° 17: Consumo de Alimentos en el Mundo.....	64
Figura N° 18: Cantidad de Recursos No Renovables Consumidos en el Mundo. ....	65
Figura N° 19: Cantidad de agua destinada para el consumo humano en el mundo.....	66
Figura N° 20: Diagrama de Influencias del Segundo Prototipo .....	71
Figura N° 21: Sector Cambio de Uso de Tierras .....	72
Figura N° 22: Sector Recurso Forestal.....	72
Figura N° 23: Sector Nivel Económico.....	73
Figura N° 24: Sector Población.....	73
Figura N° 25: Nivel económico en la población. ....	81
Figura N° 26: Cantidad de madera explotada. ....	81
Figura N° 27: Sector Ciencia y Tecnología.....	86
Figura N° 28: Sector Población.....	86
Figura N° 29: Sector Sistema Político.....	87
Figura N° 30: Sector Externalidades.....	88
Figura N° 31: Sector Expectativas y Preferencias.....	90
Figura N° 32: Gráfica del análisis de sensibilidad de la población para el tercer prototipo. ....	101
Figura N° 33: Gráfica del análisis de sensibilidad de los recursos no renovables. ....	102
Figura N° 34: Gráfica del análisis de sensibilidad del sistema económico.....	102
Figura N° 35: Nivel de alimentos en el mundo. ....	103
Figura N° 36: Consumo de alimentos. ....	104
Figura N° 37: Producción de alimentos. ....	104
Figura N° 38: Diagrama de Sectores del cuarto prototipo. ....	114
Figura N° 39: Sector Alimentos.....	114
Figura N° 40: Sector Ambientes Naturales .....	115
Figura N° 41: Sector Basuras .....	115
Figura N° 42: Sector Energía .....	116
Figura N° 43: Escenarios para el análisis de sensibilidad de la población en el cuarto prototipo. ....	121
Figura N° 44: Cantidad de Recursos Renovables.....	121
Figura N° 45: Cantidad de Recursos No Renovables. ....	122

Figura N° 46: Cantidad de tierras aptas para la agricultura.....	123
Figura N° 47: Acumulación de basuras. ....	123
Figura N° 48: Comportamiento de la población en el prototipo final .....	129
Figura N° 49: Gráfica de Nacimientos y muertes después de anulada la relación entre nivel económico y fecundidad.....	130
Figura N° 50: Gráfica de tierra virgen y tierra de agricultura después de anulada la relación entre tierra de agricultura y tierra destruida. ....	130
Figura N° 51: Gráfica de producción y consumo de alimentos después de anulada la relación entre conducta y consumo de alimentos.....	131
Figura N° 52: Gráfica de ejecución de las políticas después de anulada la relación entre conducta y políticas. ....	131
Figura N° 53: Gráfica de consumo recursos no renovables después de anulada la relación entre conducta y ciencia y tecnología. ....	132
Figura N° 54: Gráfica de Producción de recursos renovables después de anulada la relación entre producción de recursos renovables y ciencia y tecnología. ....	133
Figura N° 55: Gráfica de Producción de recursos renovables después de anulada la relación entre producción de recursos renovables y ciencia y tecnología. ....	133

## LISTADO DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla N° 1: Fases del plan de pruebas.....	27
Tabla N° 2: Componentes del Sistema Terrestre .....	34
Tabla N° 3: Crecimiento Poblacional .....	44
Tabla N° 4: Definición de los elementos del Primer Prototipo .....	62
Tabla N° 5: Definición de los elementos del segundo prototipo .....	79
Tabla N° 6: Definición de los elementos del tercer prototipo.....	100
Tabla N° 7: Definición de los elementos modificados para el cuarto prototipo. ....	120
Tabla N° 8: Relación de los parámetros a revisar del cuarto prototipo. ....	128

## TABLA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO N° 1: PROTOTIPOS EN FORMATO DIGITAL.....	142
ANEXO N° 2: INTEGRACIÓN CON EL CURSO DE DINAMICA DE SISTEMAS.....	142

## 1. INTRODUCCION

A lo largo de la historia el cambio producido por el hombre ha sido limitado en alcances y localización; ahora no es así, ya que a partir de la revolución industrial la capacidad del hombre para modificar su ambiente ha ido en aumento, siendo capaz de generar un cambio global. Éste se constituye en una problemática, ahora que amenaza con cambiar las condiciones de vida en el planeta de una forma que pone en peligro la subsistencia de nuestra especie y en general de todas las especies vivientes. Por la anterior razón, se puede notar que el cambio global es un problema de gran importancia en la actualidad, y reclama una mayor dedicación hacia el estudio de sus causas.

Al estudiar el cambio global se destacan dos factores principales, los sistemas humanos y los sistemas físicos naturales; este trabajo se refiere a la relación entre estos elementos. A primera vista suena extraño separar a los sistemas humanos de los sistemas naturales, siendo que los primeros están incluidos en los segundos al ser el hombre un ser viviente, pero es necesario hacerlo debido a la gran capacidad del hombre para producir cambio en los sistemas naturales físicos. Por esa capacidad, y además por la ya gran complejidad que presenta los sistemas humanos, es que se hace esa división.

La intención de este estudio es modelar el conocimiento acerca de las relaciones que conforman la dinámica de cambio global y así poder obtener conclusiones de tipo general sobre el papel que juega la especie humana en el sistema terrestre. Para la creación de los modelos se usó como base el conocimiento representado en el diagrama de Aspen, siendo éste una buena síntesis de los factores influyentes en el cambio global. Además, esta síntesis, debido a que la misma constituye una perspectiva sistémica para la comprensión del problema, es coherente con el paradigma de la Dinámica de Sistemas, utilizado para la realización del modelo, y presenta unos objetivos claros al servir como marco conceptual para el estudio de fenómenos relacionados con el cambio global.

La propuesta desarrollada continúa con el carácter de modelo conceptual que presenta el diagrama de Aspen, al obtener un modelo que ayuda al entendimiento del proceso del cambio global, así como la influencia de las fuerzas motrices del mismo en casos particulares del área de los estudios ambientales. Además, el trabajo realizado tiene una aplicación educativa, de forma directa al recrear el conocimiento acerca del cambio global y permitir la experimentación sobre él, y a través de una herramienta educativa concebida como medio para la enseñanza de la D.S. aplicada a los estudios ambientales, en la que el proyecto constituye su ejemplo principal.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El cambio global es una problemática cada día más preocupante pues pone en peligro la subsistencia de las especies vivientes que conocemos, entre estas la nuestra. Se entiende por cambio global la variación en el conjunto de procesos terrestres en cualquiera de sus elementos (agua, tierra, aire, vida), generando un cambio en las condiciones generales del sistema tierra; más específicamente se refiere al comportamiento anómalo en estos procesos desembocando en una acelerada transformación de las condiciones mencionadas.

El sistema terrestre está sometido a constante cambio, lo preocupante de la situación actual es que el cambio que se produce ahora, está siendo acelerado por la acción humana; muchos trabajos se han realizado ya para sustentar esta hipótesis, pero son relativamente pocos los trabajos en el área de la ingeniería que abordan esta problemática desde una perspectiva social, lo cual parece contradictorio pues se reconoce a la raza humana como importante agente catalizador de las transformaciones globales. Si los esfuerzos por analizar el factor humano en el área de ingeniería son algo escasos, los que afrontan la problemática desde una perspectiva sistémica lo son aún más, ya que hasta el momento la mayoría de trabajos se han enfocado en estudiar las causas directas del cambio global de manera independiente. Parece ser que se requiere un mecanismo que permita el estudio conjunto de estas causas y permita relacionarlas con el factor humano y a su vez con los procesos terrestres afectados teniendo en cuenta su naturaleza intrínsecamente compleja.

El grupo SIMON ha realizado varios trabajos sobre procesos ambientales utilizando la metodología de la dinámica de sistemas para comprender algunos de los fenómenos que se presentan dentro de este campo de estudio. La bondad del uso de esta metodología para afrontar este tipo de problemáticas esta siendo reconocida, y ya ha sido aceptada en el caso del estudio de ciertos fenómenos sociales. Este proyecto se plantea como una iniciativa para aprovechar el conocimiento con la que cuenta el grupo de investigación SIMON en dinámica de sistemas para afrontar la tarea de analizar desde una perspectiva sistémica el sistema terrestre y como éste se ve afectado por la acción humana, con el fin de lograr un conocimiento mayor del fenómeno del cambio global acelerado; además proponer, si es posible, principios de solución a la problemática. Como base de este análisis se cuenta en principio con el conocimiento logrado por el CIESIN<sup>1</sup>. Producto de esta conocimiento es el diagrama de Aspen, síntesis de los acuerdos logrados por un grupo de especialistas de diversas ramas del saber, interesados todos en la problemática del cambio global.

El diagrama de Aspen es el siguiente:

---

<sup>1</sup> Center for International Earth Science Information Network, parte del Earth Institute adscrito a la Universidad de Columbia. El CIESIN trabaja en la intersección de las ciencias sociales, naturales, y de la información, y se especializa en la investigación interdisciplinaria relacionada a las interacciones humanas en el ambiente.

## El Cambio Global en el Medio Ambiente: El Diagrama de Aspen

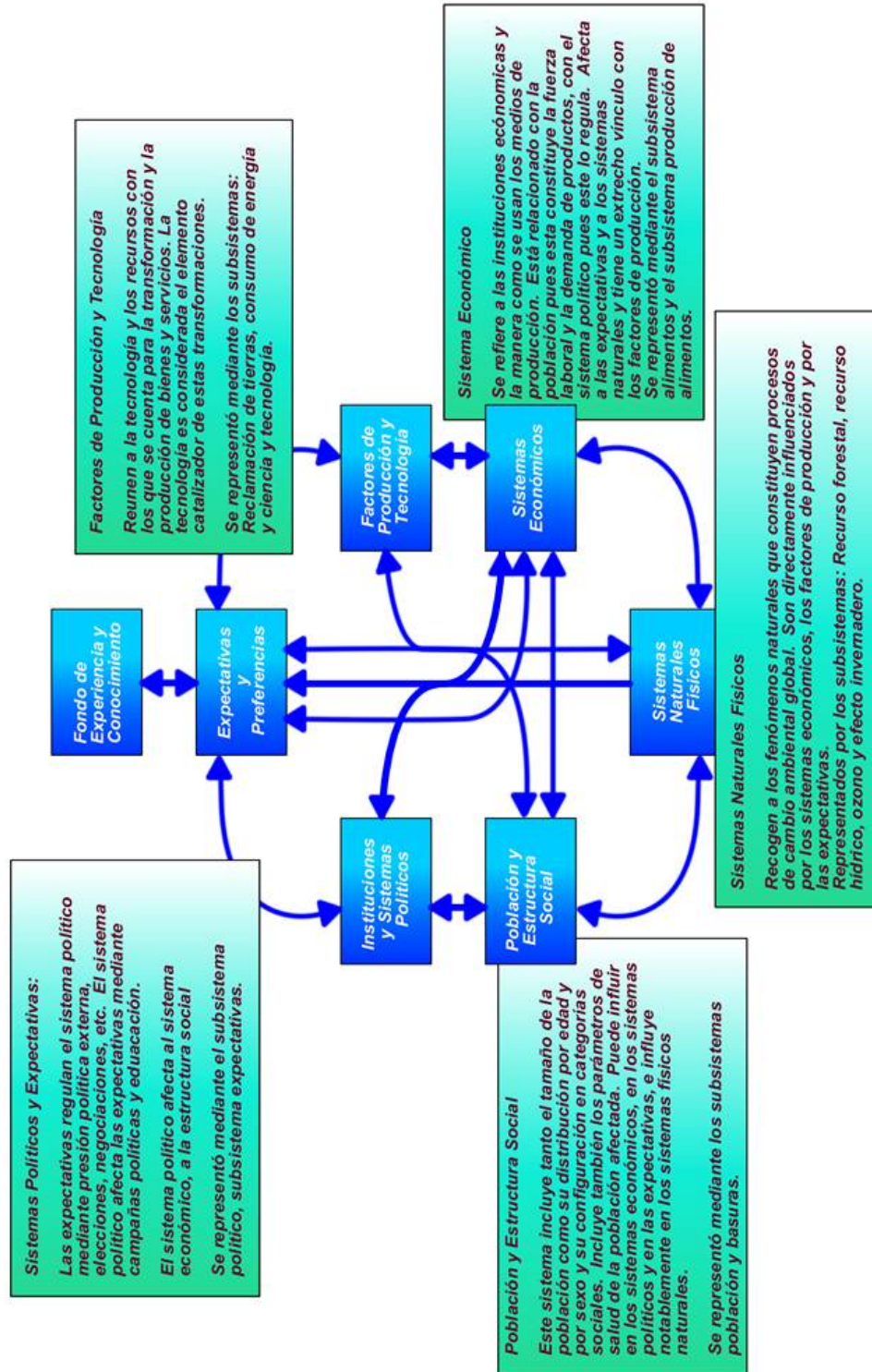


Figura N° 1: Explicación de los Bloques del Diagrama de Aspen

La complejidad del sistema terrestre ha motivado su estudio por separado durante mucho tiempo. Las relaciones entre los sistemas humanos y los sistemas físicos naturales se han estudiado, en el campo de la ingeniería, solo en sus aspectos más directos sin profundizar en la complejidad de las mismas. Es importante entonces afrontar un estudio de la problemática desde una perspectiva integradora que tenga en cuenta los resultados obtenidos en las diferentes áreas, para así obtener una imagen del fenómeno más enriquecedora para nuestra comprensión del mismo, y que nos permita pensar en posibles soluciones. Estas soluciones deben estar enmarcadas en la obtención de un desarrollo socialmente sostenible y viable económicamente, que no comprometa la capacidad del ambiente para sustentar las generaciones venideras.

Aparte de la necesidad de estudiar el fenómeno del cambio global como problemática de interés intrínseco, también existe el interés de utilizar el estudio a realizar sobre este fenómeno como medio de transmisión de conocimiento respecto a la metodología de la dinámica de sistemas y a su aplicación en las ciencias ambientales. Así como los trabajos relacionados con las ciencias ambientales realizados en el grupo de investigación dan fuerza a un posible estudio del sistema terrestre y la influencia humana en el mismo, así también es importante para grupo la utilización de este trabajo como medio de fortalecer el conocimiento que se ha venido generando, de forma que se pueda utilizar en un proceso de enseñanza y aprendizaje. Un estudio de dinámica de sistemas sobre la problemática y con estas características se constituye en el ejemplo perfecto para ser usado en una iniciativa educativa enfocada a la aplicación de la dinámica de sistemas a los fenómenos ambientales. Así pues, el proyecto se utiliza como solución a dos problemáticas diferentes: La de la comprensión del fenómeno, y la de la transmisión del conocimiento acerca de la metodología a usar para abordar el estudio del fenómeno.

Otro factor a tener en cuenta es que, como una metodología que no se usa frecuentemente para abordar este tipo de problemática [la del estudio de fenómenos ambientales complejos, y la del estudio del sistema terrestre], es posible que el estudio aporte observaciones y conclusiones importantes que puedan enriquecer la praxis de la dinámica de sistemas, ya que al abordar otros tipos de problemáticas es posible encontrar deficiencias o fortalezas de la metodología en el campo tratado.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Basados en el Diagrama de Aspen realizar un análisis y desarrollar un modelo de simulación en el que se ilustren los problemas del sistema terrestre relacionados con el cambio global en el medio ambiente; con la intención de señalar la participación del elemento humano en el mismo y comprender la complejidad del problema para considerar alternativas de intervención. El trabajo y sus resultados serán además usados como base para la creación de material educativo sobre dinámica de sistemas aplicada a las ciencias ambientales.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar un modelo utilizando la dinámica de sistemas y desarrollarlo a través de prototipos con niveles de complejidad cada vez mayor a fin de lograr una representación adecuada del fenómeno, basados en las ideas planteadas en el diagrama de ASPEN. Para esto se debe realizar una revisión y análisis crítico de trabajos sobre el medio ambiente con dinámica de sistemas, en particular “La relación entre los sistemas humanos y los sistemas físicos naturales: el diagrama de Aspen”<sup>2</sup>, así como de diversas fuentes relacionadas con el cambio global incluyendo el trabajo del diagrama de Aspen mismo<sup>3</sup>.
- Integrar el modelo implementado al desarrollo de un curso de dinámica de sistemas aplicado a las ciencias ambientales que servirá como un apoyo a las actividades académicas del grupo SIMON, y en general, a los grupos especializados en el campo de la ingeniería ambiental.

#### **3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETIVOS**

Para la realización de este proyecto se tendrán en cuenta algunos trabajos realizados con anterioridad y relacionados con el área del factor humano y su impacto en el sistema terrestre. Este proyecto se basará particularmente en una propuesta diseñada para el curso Sistemas Dinámicos II en el año 2003 y presentado como póster en el Segundo Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, en el año 2004. De esta forma el proyecto no parte de la nada, se apoya en un trabajo previo lo que garantiza que se llevará más a profundidad el desarrollo del tema.

Se debe construir una representación adecuada del fenómeno, lo que quiere decir que se destaque en él la participación del elemento humano en el cambio global. Dentro del proceso de desarrollo de este modelo está incluida su validación con el fin de revisar lo adecuado del mismo. Los criterios de evaluación y validación del mismo se crearan durante el desarrollo del proyecto. Se considera la entrega del modelo expresado en los cinco lenguajes contemplados en la metodología de la dinámica de sistemas manejada por el grupo SIMON, esta representación, ampliada para que satisfaga los requerimientos de un proyecto de grado, se constituirá en el entregable principal del proyecto.

Al término del proyecto se desarrollaran posibles políticas y directrices como conclusiones del proyecto, con el objeto de diseñar una intervención positiva en el fenómeno, teniendo en cuenta

---

<sup>2</sup> Desarrollado en el contexto del curso de Sistemas Dinámicos II, que en el programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander, dirige el profesor Hugo Hernando Andrade Sosa.

<sup>3</sup> Refiriéndose acá al trabajo del CIESIN mencionado con anterioridad.

que no se podrá contrastar su impacto total dentro del fenómeno real intervenido. De igual forma se propone un planteamiento claro y asequible en general del modelo y sus alcances para generar un interés en la población que no está relacionada con el campo de la dinámica de sistemas dentro del marco de los estudios ambientales. Estas directrices no serán llevadas a un alto nivel de profundidad, debido a que no se pueden contrastar y poner en práctica, incluyendo también el hecho que un análisis profundo sobrepasaría los alcances de un proyecto de pregrado.

Entre los objetivos se encuentra la integración del modelo con un curso de dinámica de sistemas para el entendimiento de fenómenos ambientales. Dicho curso es el producto de otro proyecto realizado también dentro del grupo SIMON. El modelo, producto del presente proyecto, se constituye en la base del material para el curso, así el proyecto encargado del curso a su vez es el responsable de la interacción directa entre el usuario del curso y los modelos guías. Es importante mencionar que cuando se construye el modelo, en el lenguaje de las ecuaciones, es posible crear una sencilla interfaz a través de la herramienta EVOLUCION 3.5, para facilitar la parte de la experimentación del modelo, variando posibles escenarios al mismo tiempo.

En la realización del modelo es necesario complementar la representación del fenómeno plasmado en el modelo apoyándonos en diversos puntos de vistas provenientes de algunos campos del conocimiento tales como la economía, sociología, entre otros; y así plantear, una vez la culminación del prototipo final, un conjunto de lineamientos-guía que permitan la creación en el futuro<sup>4</sup> de un modelo de desarrollo sostenible partiendo de la experiencia del modelo aquí tratado, para en un futuro compararlo con otros modelos de desarrollo sostenible.

---

<sup>4</sup> Fuera de los alcances de este proyecto. Es un trabajo preparatorio realizado con la intención de ser continuado en estudios superiores.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Se ha especificado en este texto con anterioridad la importancia que este proyecto tiene para el grupo SIMON en función de su utilidad como ente consolidante de los esfuerzos realizados en área de los estudios ambientales y como base para la creación de material educativo, sin olvidar la importancia intrínseca del tema. Es en base a estos tres elementos que la necesidad de realizar este proyecto descansa.

Como consolidante de conocimientos y esfuerzos, se constituye en un trabajo que hace uso de los resultados de varios trabajos relacionados con el área realizados por el grupo SIMON, resaltando el hecho de que permite dar continuidad al proyecto de clase “La relación entre los sistemas humanos y los sistemas físicos naturales: el diagrama de Aspen” mencionado en los objetivos; al usar los resultados de otros trabajos consolida el esfuerzo destinado a los mismos, incrementando la validez de la realización de los mismos.

El trabajo “La relación entre los sistemas humanos y los sistemas físicos naturales: el diagrama de Aspen” dejó varias inquietudes tanto en cuanto al fenómeno como al proceso de modelado del mismo, inquietudes que se abordaran en este proyecto. Es desarrollo de estos interrogantes resultará enriquecedor para el grupo y para los interesados en el área de los estudios ambientales.

Como base para la creación del material educativo resulta sumamente importante la creación del modelo del mundo como sistema, debido a que el mismo ilustra de manera adecuada la que intuitivamente parece la mejor aplicación de la dinámica de sistemas a los estudios ambientales: la representación (y posible replanteamiento) de explicaciones construidas en base al conocimiento

La importancia intrínseca del proyecto descansa en gran medida en el reconocimiento del problema ambiental como una realidad que demanda la atención tanto de los sectores productivos y gubernamentales, así como de la academia; más el reconocimiento de la problemática por si solo no constituye un factor decisivo, como si lo constituye el interés creciente en aplicar metodologías de corte holístico a la comprensión e intervención en el mismo, lo que hace oportuna la realización de estudios en esta área del saber. Ya fueron mencionadas en el apartado definición del problema lo importante de la problemática en si y sus repercusiones sobre el mundo. Resulta sumamente interesante experimentar con un modelo para tratar de obtener posibles mecanismos de intervención en el fenómeno o un mayor conocimiento sobre el mismo. Se utilizó la metodología de la Dinámica de Sistemas debido a que se quiere abordar la problemática desde una perspectiva holística (como ya fue manifestado en la especificación del proyecto) ya que resulta importante comprender el fenómeno como una totalidad, con sus diversos factores interrelacionados. El mayor énfasis sobre la acción humana dentro del fenómeno se debe a que dicha acción es la que se puede controlar, además de ser el factor que se introdujo al sistema más recientemente y que parece ser el ente catalizador de los procesos.

El proyecto se relaciona de manera especial con la ingeniería de sistemas puesto que emplea dos de sus áreas más destacadas y que se encuentran incluidas en el programa que sirvió de marco para la educación de los realizadores. Se considera que, al ser el análisis holístico la parte atractiva de realizar este proyecto como se plantea, el trabajo puede ser desarrollado por ingenieros de sistemas siempre y cuando se busque apoyo de personas con conocimientos en el campo de los estudios ambientales, economía y otras ciencias sociales (lo cual ya esta contemplado dentro de los objetivos). Los ingenieros de sistemas vienen a cumplir la labor de profesionales generalistas que reúnen el conocimiento y lo plasman en un modelo para la experimentación con él, de esta forma mejorando la comprensión del fenómeno estudiado.

Además este proyecto está de acuerdo con los objetivos trazados por la universidad<sup>5</sup> para la formación de los estudiantes de ingeniería de sistemas, entre los que destacan:

- Examinar, formular, analizar, tratar y resolver problemas, fundamentados en una concepción sistémica del mundo y sus fenómenos.
- Acometer la solución de problemas informándose adecuadamente de la naturaleza de los mismos, diciendo cuales son sus objetivos, planteando o seleccionando un modelo y asegurando una forma de ejecución con base en recursos informáticos.
- Adquirir una formación profesional como agente investigador.

Cabe anotar que se presenta este proyecto para ser realizado por dos estudiantes pues resulta muy importante el contar siempre, durante el desarrollo del análisis, con opiniones diversas acerca del objeto del estudio y de la forma como se aborda el mismo, esto debido a que el modelo se ve enriquecido por la variedad, y se da a lugar una primera confrontación de ideas y argumentos. Además el hecho de ser dos los investigadores permite una recolección de conocimientos más rápida y rica, lo que permite que se cumpla el proyecto en el tiempo estipulado en la sección plan de trabajo; con dos personas trabajando se garantiza una selección más amplia y completa de fuentes, así como de síntesis y apropiación más adecuada.

---

<sup>5</sup> Estos objetivos pueden ser consultados a través del sitio web institucional de la UIS: <http://www.uis.edu.co>

## 5. METODOLOGÍA

Después de conocer más a fondo sobre algunas de las metodologías existentes para el desarrollo del presente proyecto, se optó por adoptar un enfoque metodológico aplicado comúnmente al desarrollo de un producto software, el prototipado evolutivo, que consiste en el diseño y refinamiento de un prototipo inicial durante un incierto número de ciclos, hasta obtener un producto tolerable y acorde con las necesidades del usuario.

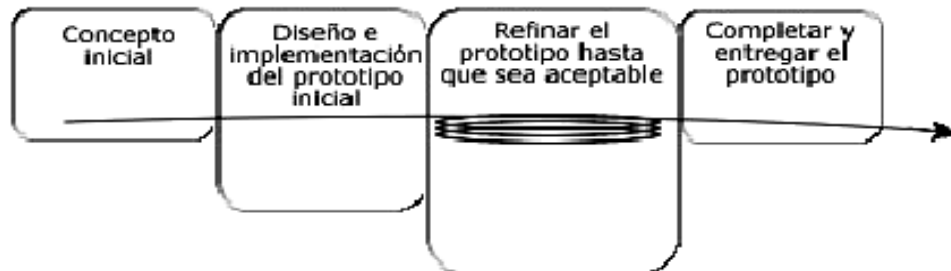


Figura N° 2: Prototipado Evolutivo

La metodología del “prototipado evolutivo” es entonces la más apropiada para el desarrollo de este proyecto, sin embargo se concluyó en usar una extrapolación de este tipo de metodología hacia la investigación, ya que el producto de este proyecto no es obtener un software sino un análisis encaminado a definir unas políticas. Además al utilizar dinámica de sistemas se estaría aplicando implícitamente el prototipado evolutivo ya que se estarían tomando los objetivos principales de cada modelo a desarrollar, como los requisitos necesarios ha alcanzar en un producto software, hasta llegar a un modelo con cierto nivel de fidelidad que se obtendrá bajo el análisis de sensibilidad apropiado.

Otro punto importante que se tuvo en cuenta en el momento de escoger la metodología es la creación y modificación de cada modelo. Al diseñar y desarrollar un modelo específico a este se aplica un análisis de pruebas finales y basándose en los resultados obtenidos se regresa a modificar el modelo hasta obtener un modelo satisfactorio. Es por este motivo que el prototipado evolutivo es la metodología que encaja perfectamente con la necesidad de estar en una fase de análisis y que se nos permita regresar a una fase de modificación y diseño del modelo, sin alterar en ningún momento el desarrollo del proyecto, características esenciales y propias de un trabajo investigativo.

Por otra parte algunos de los otros modelos estudiados cumplen con muchas de las necesidades para el desarrollo y proceso de este proyecto, mas sin embargo se encuentran grandes falencias en ciertos puntos que son bases para llevar a cabo el presente trabajo. El modelo de “codificar y corregir”, podría parecer también muy acorde pero no es muy apropiado para la implementación de un proyecto grande como este, en especial a que no ofrece una buena evaluación de calidad o identificación de riesgos.

El modelo de entrega por etapas, también hubiera sido una buena opción, pero no resultaba tan adecuado debido a que es una metodología que presenta un mejor funcionamiento en proyectos donde cada etapa se desarrolla independiente de la anterior y no es básicamente el objetivo de este proyecto ya que cada fase depende principalmente de su fase inmediatamente anterior en

especial al momento de abordar las etapas de desarrollo de modelos y análisis de resultados de los mismos.

Después de explicar la metodología anteriormente usada para el desarrollo del proyecto se da paso a explicar también la metodología aplicada en el modelado de los diferentes prototipos, La Dinámica de Sistemas.

La metodología de dinámica de sistemas no será explicada en este apartado, para la definición de dinámica de sistemas y una explicación de la utilización de la misma se remitirá al lector al libro "Pensamiento Sistémico, Diversidad en busca de Unidad"<sup>6</sup> en el capítulo 3, página 168. Esta definición refleja la propuesta particular del grupo de Investigación SIMON, que incluye algunos planteamientos además de los originales de Forrester. En este apartado si se explicarán el desarrollo particular de la metodología para este proyecto.

En cuanto a la obtención del conocimiento sobre el fenómeno necesario para el proceso de modelado, se hará una revisión de la literatura que pueda encontrarse apoyada por una consulta a expertos, realizada mediante entrevistas informales. Los expertos que participaron en el proceso fueron: Camilo Rueda (Psicólogo graduado de la UPB), Edgar Omar Rueda (Demógrafo, DANE), Elsida Ramírez Sierra (Psicopedagoga Bienestar Universitario UIS) y José Alberto Pinto (Economista M.Sc. Docente UIS).

### **5.1. PROPUESTA DE DESARROLLO DE PROTOTIPOS**

Debido a la naturaleza altamente compleja del fenómeno a modelar, y a la intención de representación y de educación que motivan la creación del modelo, se ha adoptado una forma especial de desarrollar los prototipos. El proceso de creación de prototipos comenzará representando los factores más fáciles de reconocer como agentes influyentes en el cambio global, y continuará agregando elementos a la representación cada vez de participación menos evidente en el fenómeno. Se reconoce que el término evidente no es muy concreto, pero en este caso la subjetividad se hace interesante como una forma de objetividad: Los modeladores como personas no expertas en el área del cambio global exploran sus propias concepciones como individuos con una forma de ver el problema alejada del conocimiento ambiental, y pueden reproducir de forma satisfactoria la percepción del público general de la problemática. Los prototipos en la medida que crecen en complejidad y profundidad, crecen también en cubrimiento del fenómeno. El proceso de prototipado estará guiado por la estructura de relaciones presentada en el diagrama de Aspen, es decir, la representación construida crece en cubrimiento en la medida en que se acerca a la contemplada en la estructura de bloques de Aspen. El modelo no estará constreñido a la estructura de bloques (fuerzas motrices) en cuanto a representación exacto bloque por sector, pero si debe representarla, así sea de manera indirecta. El proceso de creación de prototipos de profundidad, complejidad y cobertura crecientes termina cuando se logra un nivel de representación que se considera adecuado con respecto al conocimiento que se tiene acerca del fenómeno, y el que se pudo adquirir mediante la consulta a expertos.

Cuando el proceso de creación de prototipos llega a un punto en que se considera satisfactorio el nivel de representación y de detalle alcanzado, en ese momento se inicia el proceso de validación-evaluación del modelo. Una vez logrado una representación satisfactoria, esta debe refinarse, y es en ese momento que el proceso de validación cobra importancia. La validación del modelo puede conducir a cambios en la estructura y los valores de los parámetros del modelo que se constituyen en un refinamiento del mismo. Así, el proceso de prototipado se vale de la validación para construir un prototipo final refinado, lo cual esta contemplado en la metodología por prototipos tradicional y la dinámica de sistemas, con la diferencia de que en este proyecto se uso un plan de

---

<sup>6</sup> ANDRADE, Hugo; DYNER, Isaac; ESPINOSA, Ángela; LÓPEZ, Hernán; SOTAQUIRA, Ricardo. (2001): *Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad*. Ediciones Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

pruebas un tanto diferente con el fin de adecuarse a la naturaleza del fenómeno particular. Cuando se hace el refinamiento final, el proceso termina, y se realiza el análisis de los resultados.

## **5.2. PROPUESTA DE ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO**

El objetivo del análisis de sensibilidad es conocer el comportamiento del modelo bajo ciertas modificaciones en los parámetros, es decir, que tan sensible es el modelo a las posibles variaciones que se presenten en los parámetros existentes dentro del mismo. La importancia del análisis radica en comparar las gráficas obtenidas en la simulación del modelo después de cambiar los valores en las variables externas. Al haber comportamientos similares en las trayectorias, se puede concluir que el modelo es poco sensible al parámetro "x". Si se da un caso contrario, es decir que las gráficas presenten trayectorias diferentes, podemos estar hablando de una gran sensibilidad en el parámetro "x"; este grado de sensibilidad depende de que tan diferentes son las gráficas. La importancia de estos análisis de sensibilidad se fundamenta en conocer aquellos parámetros que modifican de forma significativa los valores resultantes de la simulación y así tener un especial cuidado en la definición de estos dentro del proyecto.

El análisis de sensibilidad aplicado al modelo y los escenarios en que se presenta, se realizan en un intervalo de tiempo de 100 años (desde 1950 al 2050), esto debido a que la gran mayoría de datos e información se obtienen a partir de esta fecha (1950 aproximadamente) y no es aconsejable, además, analizar resultados de fechas futuristas pues estos procesos o modelos de "predicción"<sup>7</sup> no son completamente exactos ni precisos en términos de crecimiento exponencial, como los descritos en la mayoría de procesos que ocurren dentro del modelo. No obstante la recreación de posibles escenarios a los que se enfrentará nuestro sistema, las consecuencias a largo plazo de las posibles soluciones a una problemática, en este caso el impacto de la acción del hombre sobre el cambio global. Es por tanto necesario definir algunos conceptos para familiarizarse con los mismos que se usarán dentro de las pruebas y análisis que se hagan sobre el modelo:

*Las condiciones iniciales:* Incluye entre otros, los valores iniciales de todos los niveles, los valores de las variables predeterminadas (sean flujos o auxiliares) con tantos retardos como contenga la ecuación, y los valores de los parámetros absolutamente invariables.

*Los escenarios:* Determinar un escenario de simulación, en un sentido estricto, supone determinar valores coherentes de todas las variables exógenas ligadas al tiempo período a período, y los valores fijos de aquellos parámetros que se consideran constantes durante la simulación.

Hay un principio general sobre la sensibilidad de los modelos: El comportamiento de sistemas con complejos ciclos de realimentación, por lo general, es poco sensible a variaciones en los parámetros. Esto se debe a que los ciclos de realimentación negativa actúan como reguladores. Las altas sensibilidades se encuentran en modelos con pocos o ningún ciclo de realimentación negativa.

## **5.3. PLAN DE PRUEBAS PARA LA VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO**

Para la validación final del modelo se adoptó una versión modificada de la propuesta de plan de pruebas de Sterman, como se expone en el libro *Business Dynamics*<sup>8</sup>. Las pruebas que sugieren en el texto fueron agrupadas en fases de la siguiente forma:

---

<sup>7</sup> Modelos de simulación que se basan completamente en datos estadísticos para obtener mediante ecuaciones matemáticas un parámetro de repetición a futuro del fenómeno y encontrar un comportamiento ya visto anteriormente dentro de una escala de tiempo. Caso contrario sucede con este modelo donde a pesar que también se basa en ecuaciones matemáticas el análisis más que estadístico es netamente dinámico y su intención principal no es conocer el estado del fenómeno en un futuro sino aprender acerca del comportamiento que tiene el cambio global.

<sup>8</sup> Sterman, John. (2000) "*Business Dynamics: Systems Thinking and modeling*".

<b>Fase I</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Idoneidad de los límites.</li> <li>• Evaluación de la Estructura.</li> <li>• Consistencia Dimensional.</li> </ul>
<b>Fase II</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Error de Integración.</li> <li>• Evaluación de Parámetros.</li> </ul>
<b>Fase III</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reproducción de Comportamiento.</li> <li>• Anomalía en el Comportamiento.</li> <li>• Comportamiento Sorpresa.</li> </ul>
<b>Fase IV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de Sensibilidad.</li> </ul>
<b>Fase V</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora del Sistema.</li> <li>• Análisis de Sensibilidad: Políticas</li> </ul>

Tabla N° 1: Fases del plan de pruebas

La fase I agrupa las pruebas que tienen que ver con la estructura, con la formulación del modelo. Estas pruebas se consideraron realizar juntas para que los cambios en el modelo, producto de la aplicación de ellas se vean reflejados a la vez.

En la fase II se encuentran las pruebas que se encargan de revisar los valores de los elementos del modelo sin afectar su estructura. Estas pruebas son realizadas antes de hacer el análisis de los resultados.

La fase III relaciona las pruebas correspondientes con el comportamiento del modelo. Los resultados de estas pruebas afectan también los valores dentro del modelo; difiere de la fase II debido en que esta fase va después del análisis del comportamiento, es decir que ya se tiene en cuenta el significado del comportamiento con relación al fenómeno que el modelo representa antes de aplicar estas pruebas.

La fase IV consiste en el análisis de sensibilidad. Para el proyecto se diseñó un plan de análisis de sensibilidad diferente del expuesto en el texto de Sterman. Debido a la complejidad del modelo y a los alcances propuestos, no es práctico hacer el análisis para todos los parámetros, pues darían muchas combinaciones. Resulta más adecuado hacer el análisis teniendo en cuenta los parámetros más importantes. Los conceptos básicos del análisis de sensibilidad son explicados en el apartado anterior.

La fase V agrupa los análisis que requieren la implantación de las políticas que resultan del modelo en el sistema real. No se puede realizar estas pruebas pues no hay posibilidad de contrastar la implantación de tales políticas.

El proceso de pruebas para el modelo final se explica en el siguiente diagrama:

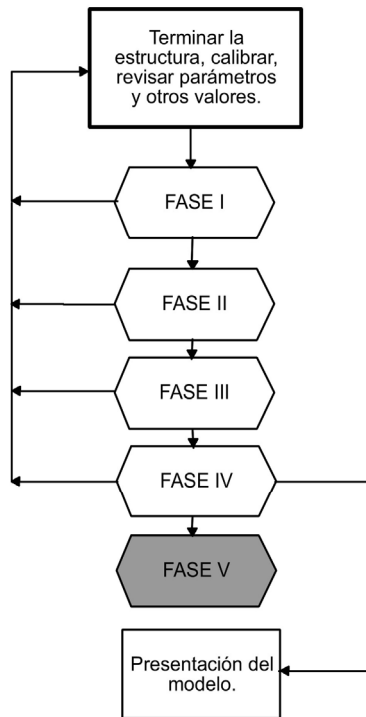


Figura N° 3: Diagrama del plan de pruebas

La figura muestra que una fase debe ser superada para luego poder seguir con la próxima. De esta forma se evita el tener que cambiar la estructura del modelo cuando ya se han evaluado los valores de los parámetros y de las tablas, por ejemplo. En el caso de las pruebas de comportamiento, se harán excepciones a las reglas impuestas por Sterman cuando sea necesario, por ejemplo en el caso de variables que tienen valores abstractos o intangibles.

Las pruebas se realizarán con ese nivel de rigurosidad solo para la validación final del modelo, esto debido a la propuesta de desarrollo de prototipos adoptada para el proyecto. En el caso de los prototipos anteriores, los que incrementan el cubrimiento del modelo, se realizaran pruebas de comportamiento y análisis de sensibilidad, especificados en el apartado dedicado a cada prototipo.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. CAMBIO GLOBAL

Se entiende por cambio global las variaciones en las condiciones del sistema tierra, por ejemplo, en el subsistema climático, en los ciclos biogeoquímicos, en la biosfera, a escala global. Este proceso de cambio global generalmente ocurre por causas naturales, el cambio que constituye un problema es el catalizado por la acción humana; incluso el humano ha generado algunos procesos nuevos, ajenos a los sistemas naturales físicos, como la destrucción de la capa de ozono por los halocarbonos. Entre las causas directas de esta aceleración de los procesos, se encuentran la mala utilización de los recursos renovables y no renovables, los cambios de uso de la tierra y los inadecuados procesos productivos en general. Ludevid da cuenta de lo anterior:

También el hombre ha modificado el sistema terrestre desde su aparición sobre La Tierra, hace ahora más de dos millones de años. Pero durante la mayor parte de este período (al menos hasta hace tres siglos), la influencia humana en el medio ambiente se había mantenido a escala local y en pequeña magnitud. Sólo en la última mitad de este siglo han tenido los seres humanos la capacidad de modificar el medio ambiente a escala global<sup>9</sup>.

Para hacer una definición, un poco más sencilla y específica, del cambio climático global se puede anotar que es un cambio de los patrones de temperatura y de lluvia promedio, tal y como lo define el IAI: "El Cambio Global se refiere a las modificaciones del medio ambiente mundial (incluyendo alteraciones del clima, la productividad de la tierra, los océanos u otros recursos hídricos, la química atmosférica y los sistemas ecológicos) que pueden alterar la capacidad de la tierra para sustentar la vida"<sup>10</sup>.

Una vez entendido, el cambio global, como un proceso de cambio natural en el sistema terrestre que se está acelerando por la acción humana, es importante resaltar la poca información y trabajos en el área de la ingeniería que abordan la problemática desde una perspectiva social. Comúnmente los trabajos se han enfocado en estudiar las causas directas del cambio global de manera independiente y parece ser que se requiere de mecanismos que permitan el estudio conjunto de las causas con una clara consideración del factor humano y contemplando los procesos terrestres afectados, teniendo en cuenta su naturaleza intrínsecamente compleja. Se puede considerar como una de las amenazas ambientales globales más serias de nuestros tiempos y lamentablemente parece inevitable, principalmente por la falta de apoyo, conciencia y tal vez conocimiento del tema por parte de la gran mayoría de la población mundial.

Para un individuo, como sucede en todos los problemas ambientales, el primer paso es tomar conciencia de que existe un problema, que aunque es complejo y de escala mundial se puede contribuir en su solución. Básicamente es tomar conciencia primero que todo y luego actuar en consecuencia desde el nivel más mínimo de las perspectivas humanas, como lo es el bienestar individual hasta llegar a un pensamiento global y más general<sup>11</sup>, desde el punto de vista población.

En conclusión y tratando de abarcar todas las áreas que afecta un solo fenómeno ambiental, como el cambio global, igual que en una fila de fichas de domino que al caer una caen las demás; se puede dar la siguiente definición como una sustentación final de todo lo mencionado hasta ahora:

<sup>9</sup> Menon, G.K. en Ludevid, Manuel *El Cambio Global en el Medio Ambiente* pág. 50.

<sup>10</sup> Definición adoptada por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI).

<sup>11</sup> MEADOWS, Dennis y Otros. (1972) "*Limites del crecimiento*", Pág. 35.

“El cambio global es un término reciente y complejo referente no solo a las transformaciones climáticas o ambientales a nivel mundial, sino también a los cambios en los procesos políticos, económicos y sociales que se interrelacionan con las diferentes capas biológicas que componen al sistema terrestre”.

## **6.2. TIERRA COMO SISTEMA: EL SISTEMA TERRESTRE.**

Podemos definir La Tierra desde diferentes perspectivas, producto de las diferentes aproximaciones al fenómeno desde las diversas necesidades o inquietudes de quienes la observan o estudian. Unos le dicen La Tierra al Tercer Planeta del Sistema Solar, otros le dicen Tierra al hogar de la raza humana, dotando así al significante de un valor instrumental o quizás afectivo: otros incluso llaman Tierra a la madre cósmica de los seres que habitan en y por ella, obteniendo así un carácter espiritual. Es así como un significante puede tener un meta-significado y varias caracterizaciones particulares de significado dependiendo del interés de aquellos que se han dedicado a darle definición al fenómeno asociado. Se escribió meta-significado<sup>12</sup> pues la intención es indicar como diversas definiciones convergen y dan identidad clara a un algo. Se refiere aquí a la convergencia de significados como el asignado a la tierra por la astronomía y por la geografía, o por la astronomía y la geología, en oposición a la total diferenciación frente al significado: “Materia orgánica desmenuzable, de que principalmente se compone el suelo natural”<sup>13</sup>. Esta significación no representa al mismo concepto o fenómeno que las mostradas en la idea anterior, en este caso lo que hay es un caso de palabras homógrafas, claro que se puede aludir a la etimología de la palabra así como a su proceso de evolución histórico, pero este no es el caso de interés... lo importante es ilustrar que un fenómeno puede ser definido de diversas maneras dependiendo de cómo se observe y aún así se puede saber que se trata del mismo fenómeno.

Con La Tierra sucede algo interesante: Varios significantes con significados claros y definidos se unen y se confunden en la percepción de los hombres. Se habla de Tierra y se habla de Mundo, se habla de tierra y se asocia con ambiente, y es así como varias definiciones de diversos conceptos se funden, cuando podrían ser considerados diversas capas de un mismo fenómeno. Resulta así que los diversos conceptos entremezclados en La Tierra podrían considerarse como componentes del mismo, analizados desde una perspectiva holística; de esta forma se llega a intentar definir a La Tierra como un sistema.

Antes de definir la Tierra como sistema es importante definir sistema, y una vez más se obtienen varias posibles definiciones. Se utilizaran las propuestas de sistema de Mario Bunge y Bertalanffy. Estas fueron adoptadas pues son las que se utilizaron dentro del contexto del trabajo.

### **6.2.1. Sistema**

Una, entre tantas posibles y aceptadas, definición de sistema es “un objeto complejo al que puede asociarse un terna {C,E,S} donde C es la composición, E su entorno y S su estructura”<sup>14</sup>. Se puede decir que C es un conjunto finito de elementos que componen al sistema en cuanto a que están presentes dentro del mismo, o sea se puede decir que son sus partes, y se relacionan entre si, es decir influyen a y son influidos por ellos mismos en una trama de relaciones no lineal. Si un elemento que se relaciona con el sistema influye pero no es influido directamente se considera parte del entorno del sistema, si recibe también influencia entonces es parte de la composición. Al entorno del sistema se llama E. Se dice que los elementos de E no hacen parte de la composición

---

<sup>12</sup> Se refiere aquí a un significado que engloba a otros, un significado de significados.

<sup>13</sup> Real Academia Española (2004) Diccionario de la Lengua Española [online] (23va Edición). <http://www.rae.es/>, Diciembre de 2005.

<sup>14</sup> Bunge, Mario en Aracil, Javier. (1986) “*Maquinas, Sistemas y Modelos*” pág. 106.

C del sistema, pero esta caracterización puede cambiar dependiendo de la definición que se haga del sistema, esto debido a que la caracterización que se haga del objeto real depende de un proceso de abstracción y limitación; si estos "límites" cambian, así también la composición C del sistema puede variar, permitiendo que elementos que antes estaban en E ahora entren a ser parte de C. En cuanto a S la estructura, esta es el conjunto de las relaciones entre los elementos de C. Estas relaciones deben ser de carácter más que lineal, como ya se dijo, de carácter "circular", es decir que existan ciclos. Es importante también que estas relaciones afecten a todos los elementos del sistema, que exista una clara interdependencia entre los elementos que forman C. Si no existe esta interdependencia, entonces es objeto se considera más bien un agregado.

Otra definición de sistema, que entra a complementar la anterior, la entrega Bertalanffy:

Sistema puede ser definido como un complejo de elementos interactuantes. Interacción significa que elementos, p, están en relaciones, R, de suerte que el comportamiento de un elemento p en R es diferente de su comportamiento en otra relación R'. Si los comportamientos en R y R' no difieren, no hay interacción, y los elementos se comportan independientemente con respecto a las relaciones R y R'

Esta definición coincide con la anterior casi en su totalidad, definiendo sistema como un conjunto de elementos y relaciones que se pueden identificar con C y S de la anterior propuesta, pero agrega una nueva característica: Si las relaciones, o sea las influencias cambian, el comportamiento del elemento cambia, se puede inferir que las relaciones definen dentro del sistema al elemento. Bertalanffy, y el mismo Aracil, dentro de su texto también menciona la propiedad de emergencia de los sistemas<sup>15 16</sup>. Si no lo hacen lo dejan indicado: El sistema tiene propiedades que la suma de sus elementos por separado, es decir sin relaciones, no posee. Esto se puede inferir de manera ruda, si consideramos R y R' como conjuntos de relaciones, y R' fuese vacío o nulo, es decir no hubiera relaciones entre los elementos, el comportamiento de un elemento p cambiaría. Bertalanffy continúa con una definición un poco más formal de sistema desde la matemática, pero se omite pues se considera que ya se ilustró lo necesario para continuar con el desarrollo del trabajo.

Ludevid da su propia definición de sistema pensando en el problema específico del cambio global y teniendo en cuenta el planeta tierra como sistema. Un sistema es un todo que se comporta como organismo en la medida en que, partiendo de que es un conjunto, sus elementos se comportan "coordinadas de acuerdo a una ley, y contribuyen a un determinado objeto". En este punto se enuncia otra característica asociada a los sistemas, la teleología o para no llegar hasta consideraciones filosóficas de más calibre, la persecución de un fin. En esto es que los sistemas se asemejan a las máquinas, en que tienen un objetivo. Este objetivo es generalmente otorgado por el observador, y a veces puede no parecer un objetivo en sí, si no se le observa desde una perspectiva adecuada. A veces la finalidad del sistema no parece una finalidad en términos de lo que los humanos consideran una. Esta discrepancia puede ser fuente de problemas a la hora de analizar un sistema.

De las definiciones anteriores podemos extraer algo importante, el sistema se comporta a lo largo del tiempo. Para poder caracterizar el sistema se deben definir unas magnitudes asociadas a sus partes, y es mediante el registro de la evolución de estas magnitudes que se puede analizar como es el comportamiento de las mismas, definiendo de esta forma el comportamiento del sistema. Vista hacia atrás se le llama historia de las magnitudes del sistema. Por las propiedades anteriormente mencionadas del conjunto de relaciones de un sistema, se puede inferir que las historias, y también los comportamientos de las partes de un sistema difieren de las del sistema como un todo. A estos comportamientos, vistos tanto como lo que ocurrió como lo que ocurrirá se

---

<sup>15</sup> Aracil, Javier. (1986) "Máquinas, Sistemas y Modelos" pág. 215.

<sup>16</sup> Bertalanffy, Ludwig Von. (1968) "Teoría General de los Sistemas" pág. 70.

les llama en conjunto la dinámica del sistema, que no debe confundirse con dinámica de sistemas (La metodología a usarse para este estudio).

Lo que queda claro de los anteriores apartados es que para caracterizar un sistema hay que definir un conjunto de elementos constitutivos, uno de relaciones entre estos, y un entorno en donde situar el sistema; así también las relaciones deben dar identidad al sistema y este debe tener una finalidad evidenciable. Esta claro, partiendo de lo anterior, que muchos objetos o fenómenos en la naturaleza pueden ser estudiados como sistema, y sobre esto también trataron los autores utilizados en la anterior definición<sup>17</sup>. Lo que compete al trabajo es mostrar por que se define la tierra como un sistema, y una vez que se haya hecho aquello, mostrar una definición base de sistema Tierra sobre la cual se seguirá tratando.

Hay una consideración sobre los sistemas aun por hacer: En los sistemas se pueden definir subsistemas, así como en los conjuntos es posible definir subconjunto. Un subsistema es algo que esta contenido o mejor inmerso dentro de un sistema que posee también las características de uno. Atendiendo la definición de sistema en función de los tres conjuntos  $\{C,E,S\}$ , un subsistema de un sistema dado tiene un  $C' \subset C$  y un  $S' \subset S$ , esto pues las relaciones entre los elementos y los elementos mismos del subsistema ya están considerados como parte del sistema inicial. El entorno  $E'$  del subsistema incluye tanto elementos del sistema original como elementos externos al mismo. Esto se debe que se considera entorno los elementos influyentes que quedan por fuera de la definición de composición del sistema, esto muestra porque elementos que antes se consideraban del sistema ahora quedan como parte del entorno. Una forma de ver de manera claro lo relacionado con sistemas y subsistemas es utilizando un gráfico, que se extrae del trabajo de Aracil<sup>18</sup>

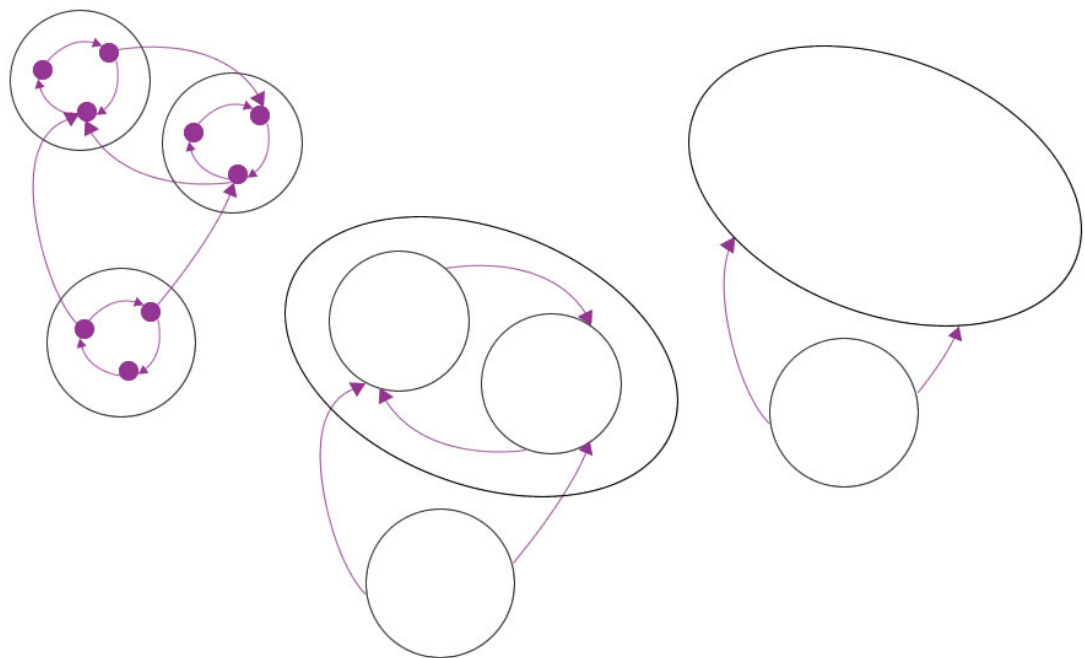


Figura N° 4: Sistemas y subsistemas - Nivel de resolución.

<sup>17</sup> Aracil op. cit. pág. 16,17,18., Bertalanffy op. cit. pág. 1.

<sup>18</sup> Aracil, op. cit., pág. 211.

En el diagrama se pueden notar varias formas de “agrupar” los elementos y relaciones del sistema, dando lugar a diversas definiciones de subsistemas (representados por los círculos). “La estructuración de un sistema en subsistemas conduce [...] al concepto de nivel de resolución”<sup>19</sup>. Entre mayor detalle de un sistema se muestre, mayor resulta el nivel de resolución empleado. ¿Cuándo es conveniente usar un mayor nivel de resolución? ¿Resulta más apropiado organizar un sistema en subsistemas? La respuesta según Aracil es usar un criterio de “oportunidad” de modo que los subsistemas sea conveniente tomarlos como entidades relativas<sup>20</sup>. Un sistema puede ser estratificado cuando su estudio haga conveniente su descomposición en subsistemas coordinados obedeciendo a distintos niveles de abstracción<sup>21</sup>. No solo es posible estratificar, aunque resulta lo más común; es posible organizar un sistema complejo en una estructura jerarquizada de subsistemas de infinitas maneras<sup>22</sup>. La propuesta desarrollada para el trabajo no es estratificada, pero la definición inicial de Tierra si lo es.

### 6.2.2. La Tierra como sistema

Se mencionó en un apartado anterior las diversas formas de definir la tierra que pueden surgir dependiendo del interés de estudio desde el que se aborde esta labor. En este caso la motivación de definir la Tierra es desde la perspectiva del cambio global, así que la definición que se haga de esta debe incluir a los factores de cambio, así como los procesos que evidencian este cambio y a los sistemas terrestres afectados por estos procesos de cambio. ¿Por que se dice que la tierra es un sistema? La principal evidencia es que cuando un cambio opera sobre uno de los componentes de la tierra, este se puede extender al conjunto de la misma. Se mencionó también los sistemas terrestres afectados por el cambio, de ahí surge que el sistema tierra esta conformado por otros sistemas que surgen en el momento en que se definen agrupando de diferentes maneras los componentes de la tierra; esto se dejó entrever cuando se dijo que los límites de definición de un sistema pueden variarse y dar lugar a diversas definiciones de sistema de lo que probablemente sea o sean los mismos objetos o fenómenos.

Como se puede intuir, el problema de definir a la tierra como sistema puede ser abordado desde diversas perspectivas: En este caso se empezará por definir sus componentes.

Del sistema tierra normalmente se mencionan varios componentes, dependiendo de la perspectiva desde la que se realice este proceso. No se refiere aquí a los componentes químicos de la misma, a pesar de que esta composición química es de importancia en las relaciones de los diferentes sistemas (o subsistemas) terrestre. Se refiere a lo que podrían ser sus elementos constituyentes, aunque estos si tienen una diferenciación clara a la hora de considerar lo que podría considerarse su “sustancia”<sup>23</sup> particular, en este caso se refiere a cuatro componentes principales fácilmente distinguibles: Aire, Tierra, Agua y Vida, y de esta forma se obtienen cuatro sistemas bien definidos: Atmósfera, Litosfera, Hidrosfera y Biosfera.<sup>24</sup> Los tres primeros usualmente se agrupan dando lugar a la geosfera, y de esta forma se puede establecer una división parte viva – parte inerte.

La anterior definición de los elementos constitutivos de la tierra pone en evidencia una fuerte demarcación entre las diferentes esferas terrestres. A través de la historia, estas han sido estudiadas por separado, cada cual con su o sus ciencias específicas; claro esta que ahora eso ha

---

<sup>19</sup> *Ibíd.*, pág. 212.

<sup>20</sup> *Ibíd.*, pág. 214.

<sup>21</sup> *Ibíd.*, pág. 216, 217.

<sup>22</sup> *Ibíd.*, pág. 216.

<sup>23</sup> En este caso la conformación de los elementos se realizó de tal forma que estos tienen composiciones químicas y características físicas bien definidas y bastante diversas, sin llegar a la especificidad de que elementos o compuestos químicos están presentes en cada elemento.

<sup>24</sup> Esta composición de la tierra es la sugerida por Ludevid en: Ludevid Anglada, Manuel. (1997) “*El cambio Global en el Medio Ambiente*”.

venido cambiando por las nuevas tecnologías que permiten un estudio del sistema tierra de forma global, como los sistemas de información geográfica, los sensores remotos y el modelamiento a gran escala entre otros. De esta forma, se esta logrando estudiar la tierra de manera unificada, holísticamente se podría decir siendo optimistas. El caso es que las nuevas tecnologías permiten la observación y toma de datos unificada, y ahora el análisis de estos datos y la formulación de teorías debe poder seguir avanzando hacia lo sistémico. Esta nueva forma de estudiar la tierra que se ha venido desarrollando se podría llamar el enfoque de la ciencia planetaria, de las "ciencias de la tierra", y los avances que se han realizado en este sentido han permitido identificar las relaciones entre los diferentes subsistemas terrestres, y han permitido también notar que muchos de los procesos más importantes son de carácter global, aquí en el sentido planetario.

Los elementos que a grandes rasgos constituyen el sistema tierra se pueden resumir así, junto a las disciplinas originalmente dedicadas al estudio de cada uno:

Tierra	Geosfera	Tierra	Litosfera	Procesos geológicos: tectónica, volcanes, sísmica, etc.	Geología
		Agua	Hidrosfera	Procesos oceánicos: Corrientes superficiales y submarinas, olas, disipación de calor oceánico, etc.	Oceanografía
		Aire	Atmósfera	Procesos climáticos, vientos, formación de nubes, etc.	Meteorología
	Biosfera	Vida	Biosfera	Ecosistemas, poblaciones, cadenas alimenticias, ciclo de energía, etc.	Biología, genética, ecología, etc.

Tabla N° 2: Componentes del Sistema Terrestre

Cada elemento es un sistema en si mismo, como puede inferirse gracias a la quinta columna del cuadro anterior que ilustra alguno procesos que caracterizan la dinámica interna de cada elemento. Estos procesos también ayudan a definir algunas de las relaciones internas de estos sistemas, por ejemplo, en la biosfera hay relaciones entre los seres vivos, por ejemplo la relación de depredador-presa y otras similares que dan lugar a las redes tróficas. Es, una vez mas, importante tener en cuenta que se pueden definir varios sistemas dentro de un sistema más general, en este caso las mismas redes tróficas son sistemas en si, pero hacen parte de un sistema mayor, la biosfera. Otras relaciones al interior de los elementos que constituyen el sistema tierra pueden ser más sutiles pero con eso no menos importantes: La relación que hay entre las corrientes submarinas y la temperatura de los océanos parece trivial pero es una de las cosas más estudiadas ahora por aquellos interesados en el calentamiento global, ya que se sospecha son muy importantes para definir cambios en el mediano plazo de la temperatura en la tierra.

Aparte de las relaciones anteriormente mencionadas hay unas posiblemente más interesantes y son las que le dan realmente el carácter de sistema a la Tierra. Las anteriores relaciones eran internas con respecto a los elementos constitutivos de esta, las que se mencionaran ahora relacionan procesos de diversos componentes terrestres. Incluso existen procesos que relacionan elementos de todos los subsistemas. Ejemplos de estas relaciones son las que generan los procesos climáticos, en los cuales intervienen factores de la hidrosfera, litosfera, atmósfera y en algunos casos biosfera: Las lluvias son un ejemplo claro de esto. La relación entre el consumo de combustible fósil es otro ejemplo que relaciona varios factores: El hombre (biosfera), las reservas de combustible fósil (litosfera y biosfera del pasado)

Los elementos inertes (los pertenecientes a la atmósfera, litosfera e hidrosfera) están profundamente relacionados entre si y con el elemento viviente por mecanismos de transferencia de materia y energía. El sistema de transferencia de calor global, por ejemplo, integra elementos de la atmósfera (aire, vientos, vapor de agua), hidrosfera (masas de agua), litosfera (relieve) y esta influenciando la biosfera con los cambios que producen en el entorno de los seres vivientes. La relación inversa es menos obvia, pero eso no quiere decir que no sea importante, existen implicaciones de los seres vivos en la conformación de la atmósfera, como los humanos por ejemplo. Un proceso donde se evidenció la importancia de estas implicaciones es el de la formación de la atmósfera actual, la cual no tendría la composición que conocemos, sino estaría compuesta por gases tóxicos para las plantas y los animales actuales; fueron los seres vivos primitivos (o primigenios) los que modificaron las condiciones de la atmósfera (bacterias anaeróbicas)<sup>25</sup>.

De las definiciones dadas en la sección anterior de sistema se puede inferir que, debido a las propiedades de emergencia y a la estructura relacional de uno, una característica de estos es que un cambio operado sobre un componente se propaga a través de la red de relaciones, y termina afectando la totalidad del fenómeno<sup>26</sup>. Esta característica puede entonces extrapolarse al sistema tierra<sup>27</sup>, una evidencia de lo anterior, por ejemplo, es la acción de los volcanes<sup>28</sup>, aunque no es la única.

Pero alegando una vez más a la posibilidad que tiene el observador de definir los límites del sistema y el objetivo del mismo, a si como sus elementos, se puede cambiar la definición del sistema tierra, o más bien crear una definición más adecuada para los propósitos del trabajo. Quiere decir lo anterior que se va a utilizar una definición del sistema tierra que no va a incluir todos los subsistemas anteriormente mencionados, es decir, no los va a incluir en su totalidad. Esto se hace de esa forma pues estos elementos son sistemas en si mismos, lo que genera un alto nivel de complejidad a la hora de construir el modelo, y este debe ser un útil que ayude a mejorar la comprensión del fenómeno. Por ejemplo no se incluirán la tectónica de placas, pues es un fenómeno que tiene un ritmo temporal muy lento es comparación con la mayoría de procesos que interesan para el estudio del cambio global acelerado. Así también, los volcanes y el sol se consideraran elementos externos al sistema, el sol por obvias razones, y los volcanes pues ellos influyen pero no son influidos por los procesos contemplados dentro del estudio del cambio global.

Continuando con los procesos que serán estudiados ya se dijo que algunos no se consideran relevantes, o más bien estudiables, a causa de las escalas temporales en las que se desarrollan, que resultan mayores a las que afectan a las actividades humanas. Existen otros casos en los que simplemente el conocimiento que se tiene sobre los procesos no es suficiente para poder incluirlos en el estudio de la tierra como sistema. Teniendo en cuenta esto, hay fenómenos como los

---

<sup>25</sup> Facultad de Agroindustria UNNE (1998-2004) *Origen e Historia evolutiva de la vida* [online]. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, <http://fai.unne.edu.ar/biologia/introduccion/origen.htm>, 3 de Mayo de 2006.

<sup>26</sup> Bertalanffy, op. cit., pág. 68.

<sup>27</sup> Ludevid Anglada, Manuel. (1997) *"El cambio Global en el Medio Ambiente"* pág. 12.

<sup>28</sup> *Ibíd.*, pág. 12.

acontecidos en el manto y núcleo terrestres, y el fondo de los océanos, por ejemplo, que deben ser excluidos; algunos de estos fenómenos de los cuales no se sabe mucho, como las corrientes submarinas por ejemplo, se estudian intensamente para poder incluirlas pues se especula tienen gran importancia en el fenómeno del cambio global. Los fenómenos más conocidos son los que operan en el suelo y de ahí hasta la estratosfera, incluyendo la hidrosfera al mismo nivel, y por lo tanto son los que más aportan al estudio de la tierra como sistema.

Teniendo en cuenta los procesos que operan en escalas temporales diferentes, los procesos relativamente desconocidos y los procesos de difícil contratación debido a otros inconvenientes, es necesaria una reformulación. Esta reformulación del sistema tierra que tiene como objeto facilitar el estudio del cambio global en el medio ambiente será definida en función del elemento humano, pues como ya se mencionó, el interés del proyecto radica en mostrar la importancia de este elemento en el proceso de cambio global. Como el ser humano es parte de la biosfera es importante mostrar las relaciones entre los diferentes factores con la parte viva del sistema tierra. Ejemplo de sistemas que se inscriben dentro del sistema tierra y son contemplados con la parte viva como central por la observación humana son los ciclos biogeoquímicos y el sistema climático<sup>29</sup>; La biogeoquímica marina, los ecosistemas terrestres y la química de las capas bajas de la atmósfera. En los ciclos biogeoquímicos entran a funcionar como subsistemas la biogeoquímica marina, los ecosistemas terrestres y la química de las capas bajas de la atmósfera (ejemplo, el ciclo del nitrógeno, el ciclo de carbono, etc.)<sup>30</sup>. De lo anterior se hace evidente la participación de elementos de los cuatro subsistemas que se mencionaron inicialmente del sistema tierra. En el sistema climático tienen parte los océanos, los vientos y la corteza terrestre. Los vientos y la corteza ayudan a distribuir el calor proveniente de la luz solar, la que tiene que pasar por diversos filtros gaseosos de la atmósfera<sup>31</sup>, desde las latitudes ecuatoriales hacia las templadas<sup>32</sup> y el océano ayuda a distribuir de manera similar pero de una forma retardada, ya que el océano funciona como almacenamiento de energía<sup>33</sup>; también influyen en el sistema climático la capa viva, por ejemplo los árboles que modifican las condiciones pluviométricas de las zonas, y con esta influyen la transferencia de calor por medio del vapor de agua<sup>34</sup>. Esta definición de los subsistemas se hará más detallada en otro apartado, lo interesante de las anteriores afirmaciones es notar como un sistema complejo se puede dividir en varios subsistemas o más bien un conjunto de objetos y fenómenos complejo puede modelarse como sistema de varias formas y desde diversos niveles de abstracción.

La definición anterior de los sistemas principales relacionados con el cambio global dentro del sistema tierra proviene del diagrama de Bretherton y este será tratado en el apartado siguiente.

### 6.2.3. El diagrama de Bretherton

De la formulación inicial de sistema tierra para ser estudiado en el marco del cambio global acelerado en el medio ambiente se tuvieron en cuenta factores de los componentes de la tierra y enmarcados en las directrices sobre escalas temporales mencionadas en la sección anterior. Se consideraron procesos de la litosfera que vienen a tener importancia en los ecosistemas terrestres y en el cambio de uso del suelo, además de en la química troposférica como la erosión<sup>35</sup>, erupciones y los terremotos. Así también se tuvieron en cuenta procesos de la tierra fluida (atmósfera, hidrosfera) agrupados en dos grandes sistemas: Los Ciclos Biogeoquímicos y El

---

<sup>29</sup> *Ibid.*, pág. 15.

<sup>30</sup> *Ibid.*, pág. 27.

<sup>31</sup> *Ibid.*, pág. 15.

<sup>32</sup> *Ibid.*, pág. 15, 16.

<sup>33</sup> *Ibid.*, pág. 17.

<sup>34</sup> *Ibid.*, pág. 17.

<sup>35</sup> Que resulta ser un proceso en el que intervienen factores de otros componentes terrestres aparte de la litosfera, pero que se incluye aquí en como propio de ella, pues afecta directamente la tierra sólida y es más fácil relacionarlo con esta.

Sistema Climático. Esta agrupación tuvo lugar pues estas definiciones engloban procesos físicos y químicos relacionados entre sí, y con una escala temporal similar. Estos sistemas se relacionan entre ellos mediante procesos físicos y químicos, con especial importancia aquellos relacionados con el agua, sus cambios de estado, su desplazamiento, su dinámica, etc. Estos sistemas se revisten de especial importancia actualmente, pues fue su observación lo que desató la alarma científica sobre el cambio global.

A mediados de los ochentas, un grupo de científicos naturales construyeron un diagrama para mostrar las interacciones entre los diferentes procesos naturales que tienen influencia en el cambio global en el medio ambiente. El grupo de trabajo que desarrolló el diagrama se dio cuenta que el entendimiento de las relaciones entre las disciplinas científicas (naturales) era crucial para estudiar el aspecto natural (más orientado a la física y química ambientales) del cambio global.

El diagrama muestra que sus componentes, los dos grandes sistemas, están a su vez conformados por otros componentes, que a su vez son sistemas-sujeto de estudio para las disciplinas científicas naturales. El diagrama muestra que datos, información y conocimiento de un subsistema o de una disciplina que lo estudia es necesaria para analizar procesos en otros sistemas. El diagrama es un marco de trabajo en el que los científicos pueden apoyarse para determinar si y cuáles son los procesos relevantes que es necesario evaluar para poder comprender mejor un fenómeno particular de cambio global<sup>36</sup>.

El trabajo de Bretherton es una ayuda para la investigación, así como una síntesis del conocimiento acerca de los procesos naturales del cambio global que se tenía al momento de su creación. Como producto del conocimiento se constituye en un esfuerzo integrador al interior del conjunto de las ciencias naturales que aumenta a su vez la comprensión de los fenómenos estudiados por estas. Podría considerarse el primer esfuerzo destinado al estudio sistémico del cambio global, a pesar de sus limitaciones.

El resultado del trabajo es el siguiente:

---

<sup>36</sup> A.A.D.D. (1992) *Pathways of Understanding*, pág. 8.

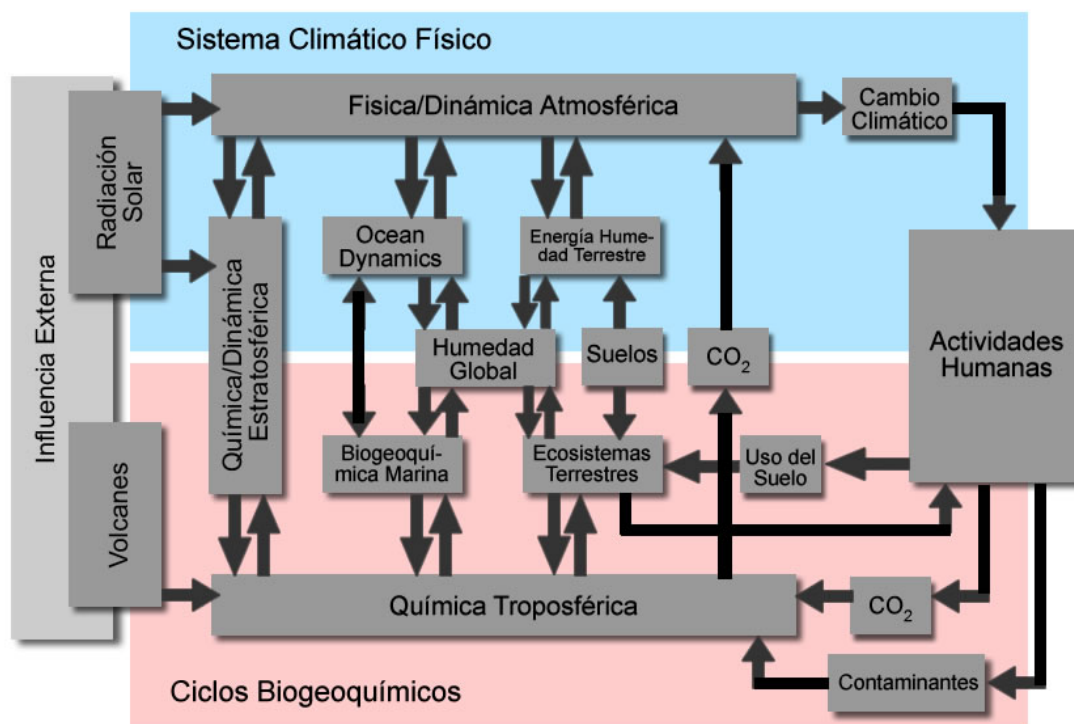


Figura N° 5: El diagrama de Bretherton.

En el diagrama se puede observar el funcionamiento de estos sistemas

El sistema climático vincula a la atmósfera, los océanos, la corteza terrestre y los seres vivos. La principal influencia externa y la vez la fuente de energía que permite su funcionamiento es la radiación solar. Esta radiación cuando llega a la tierra es reflejada directamente por las nubes, otra parte cae a la superficie y es nuevamente reflejada por esta, de vuelta hacia el espacio; Una parte también es absorbida por la atmósfera. De la energía que llegó a la superficie una parte fue absorbida por la corteza y otra por la hidrosfera, el océano<sup>37</sup>, donde permite la evaporación. A manera de resumen:

Atmósfera: Refleja radiación (nubes), absorbe radiación (ozono, nubes, CO<sub>2</sub>), deja pasar radiación.  
Superficie: Hidrosfera (océano): Absorbe (agua), genera vapor. Litosfera (Corteza): Absorbe y luego irradia de vuelta al espacio (por medio de rayos infrarrojos).

Eso es lo que sucede con la energía entrante, proveniente de la radiación solar. La energía irradiada por la corteza puede quedar atrapada en las capas de la atmósfera (Nubes, CO<sub>2</sub>, vapor de agua). Esta energía atrapada se irradia de nuevo, con una parte volviendo hacia la superficie (a más baja temperatura). El ciclo es continuo, lo que permite a la tierra atrapar calor, ese proceso es conocido como "efecto invernadero"<sup>38</sup> y es de suma importancia para la vida en la tierra<sup>39</sup>. La

<sup>37</sup> Se dice océano en este trabajo generalmente para referirse a todos los océanos. Es importante anotar que solo existe un océano, esto resulta al reconocer que todos los océanos de la tierra están conectados.

<sup>38</sup> Ludevid, op. cit., pág. 16.

<sup>39</sup> El problema actual con el efecto invernadero es que se ha intensificado, no es el efecto en si. Las condiciones atmosféricas de Marte y Venus generan también este efecto, pero es muy débil o muy fuerte. El de la tierra esta en un punto en el que permite la vida.

energía depositada en la tierra por la radiación solar no es uniforme en todos los puntos de la superficie. La mayor cantidad de energía absorbida en el ecuador es dispersada hacia las regiones más frías del planeta, transportada por las corrientes oceánicas y los vientos. La evaporación, a través del vapor ascendente, deposita energía en la atmósfera. Cuando las corrientes cálidas viajan hacia zonas más frías, el vapor empieza a condensarse, dejando calor en la atmósfera y precipitándose en forma de lluvia; de esta forma el calor acumulado en el ecuador se distribuye al resto del globo. En el proceso de regulación de la temperatura también tiene gran importancia la capa vegetal, los árboles, que producen evaporación, la que ayuda a liberar calor de la superficie. El océano ayuda a almacenar calor proveniente de la atmósfera, pero tiene una dinámica retardada que dificulta el estudio de los procesos de transmisión de calor al interior de este. Actualmente es uno de los fenómenos más desconocidos y por tanto, temido a veces<sup>40</sup>

Los ciclos biogeoquímicos “describen los movimientos y las interacciones de los elementos químicos esenciales para la vida a través de la geosfera y la biosfera”<sup>41</sup>. Dentro de estos ciclos vienen caracterizados procesos químicos, físicos y biológicos. Los hay abiertos, como el ciclo de la energía<sup>42</sup>, cuya fuente es externa (el sol), y cerrados, como los ciclos de los elementos químicos básicos para la vida (carbono, nitrógeno, hidrogeno, fósforo, sulfuro, potasio). Estos ciclos de elementos son muy interesantes debido a que representan el ejemplo más claro y a la vez más sofisticado de reciclaje; cada producto parte de la utilización de los desechos del nivel anterior<sup>43</sup>.

En el sistema climático (ver figura N° 4), la dinámica de transporte de energía, por medio de los vientos y el vapor de agua, se puede caracterizar como parte de la dinámica y física atmosféricas. La dinámica oceánica se refiere a la absorción y transmisión de calor por el océano, así como los procesos que involucran las corrientes oceánicas; y la energía y humedad terrestre representa los procesos de evaporación que suceden en la corteza, vegetación incluida<sup>44</sup>

En el caso de los ciclos biogeoquímicos (ver figura N° 4) también existen tres factores principales La Biogeoquímica Marina, Los Ecosistemas Terrestres y La Química Troposférica; revisando los ciclos de elementos, como el nitrógeno por ejemplo, se puede comprender como funcionan en conjunción estos elementos<sup>45 46</sup>.

El enlace entre los dos sistemas, se mencionó con anterioridad, es constituido por los procesos físicos y químicos relacionados con el agua, representados en el diagrama por el elemento Humedad Global (ver figura N° 4). Es importante anotar que hay relaciones directas entre los subsistemas mencionados (un ejemplo resulta entre la dinámica oceánica y la biogeoquímica marina). Otros procesos que son comunes a los dos subsistemas son los dos relacionados con la dinámica y química estratosférica, así como las actividades humanas. De estas se tratará con mayor énfasis mas adelante, ya que el problema de estudio del trabajo está definido en función de estas.

Durante la exposición acerca del sistema climático se mencionó al sol como fuente de la energía utilizada en sus procesos (generadora de calor, y de ahí convertida en energía cinética para la dinámica atmosférica y marítima). También es la fuente de energía para todos los procesos biológicos, de ahí la inclusión del ciclo de la energía como parte de los ciclos biogeoquímicos<sup>47</sup>. De esta forma se constituye en la principal influencia externa, en un componente del entorno para el

---

<sup>40</sup> Se dice temido pues se desconoce como puede influir. Es posible que su dinámica de retardo sea negativa o positiva para la conservación de las condiciones del planeta; el peligro reside en que sus efectos pueden ser súbitos e impactantes.

<sup>41</sup> Ludevid, op. cit., pág. 19.

<sup>42</sup> Se incluye este ciclo entre los ciclos biogeoquímicos debido a que la energía es necesaria para las transformaciones químicas al interior de los seres vivientes.

<sup>43</sup> *Ibíd.*, pág. 19.

<sup>44</sup> *Ibíd.*, pág. 29.

<sup>45</sup> *Ibíd.*, pág. 29.

<sup>46</sup> Para una introducción al funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos consultar: Ludevid, op. cit. pág. 19-27.

<sup>47</sup> *Ibíd.*, pág. 19.

sistema tierra definido de esta forma presentada hasta ahora. La segunda gran influencia son los volcanes, que aportan materiales al sistema a consecuencias de las erupciones. Se consideran externos pues ninguno de los elementos considerados en diagrama tiene influencia directa en ellos<sup>48</sup>.

En el diagrama aparecen otros factores como uso de los suelos, CO<sub>2</sub>, contaminantes y cambio climático, que aparecen ahí para representar las influencias de y para el hombre con respecto a los otros factores. Ya se mencionó la importancia de las actividades humanas en el proceso del cambio global y por eso aparecen estos factores destacados, por la peculiar e importante relación de la especie humana con respecto al sistema tierra.

Esta propuesta de sistema tierra es la adoptada para el trabajo, aunque en ocasiones será reformulada parcialmente a conveniencia del proceso de modelado. De esta estructura explicada en el diagrama de Bretherton se llega a la conclusión que cambios en un factor pueden afectar al sistema tierra en su totalidad. De ahí se desprende la importancia de estudiar las actividades humanas, ya que estas son las susceptibles de intervención para intentar solucionar la problemática del cambio global acelerado. Hay que tener en cuenta que en este diagrama las actividades humanas aparecen como una caja negra que deberá ser explicada para poder entender la problemática del cambio global y proponer soluciones (aunque esto resulte ambicioso). La propuesta que fue creada con el fin de desarrollar la caja negra correspondiente a las actividades humanas es también un diagrama, el Diagrama de Procesos Sociales o Diagrama de Aspen<sup>49</sup>. De este se mencionará algo en el siguiente capítulo y al ser la influencia humana en el cambio global el verdadero problema a desarrollar en este estudio, será desarrollado durante el resto del desarrollo del trabajo.

### **6.3. DIAGRAMA DE ASPEN**

En el apartado anterior se expuso la necesidad de estudiar la tierra como un sistema debido a las complejas interacciones que existen entre los diversos componentes de la misma. Se puso en evidencia también la pertenencia del elemento humano a esa compleja trama de relaciones que gobierna el comportamiento del planeta. Por último se presentó el diagrama de Bretherton como una herramienta conceptual para apoyo de la investigación en el área del campo global con perspectiva de los sistemas físicos naturales, tanto en su función de representación general del conocimiento acerca de la estructura de los factores y procesos ambientales naturales asociados al campo global, como en la marco metodológico para apoyar el estudio interdisciplinario del cambio global.

El proceso de creación del diagrama de Bretherton y su divulgación fue seguido por una preocupación por extender este enfoque a la dimensión humana del estudio del cambio global, la cual adolece de los mismos problemas metodológicos que la dimensión física natural. La investigación del cambio global sufre por la elevada especialización de los que intervienen en ella. Se tiene un fenómeno complejo, con factores de diversas naturalezas profundamente relacionados entre ellos, y las personas capacitadas para realizar los estudios necesarios son expertos en determinada área del conocimiento: Todos pueden realizar esfuerzos pero entonces el problema ahora es de comunicación entre ellos; no importa los profundamente que se estudio uno de los factores; como están relacionados entre si, se debe entender de todos ellos para poder caracterizar adecuadamente uno. Como es imposible que los estudiosos sean expertos en todas la áreas del conocimiento asociadas a la problemática del cambio global, la solución esta relacionada con la coordinación de los esfuerzos y con el apoyo a la comunicación y al trabajo interdisciplinario.

---

<sup>48</sup> Se dice directa teniendo en cuenta las consideraciones sobre escalas temporales.

<sup>49</sup> El nombre "Diagrama de Aspen" es el utilizado por Ludevid, y es también el adoptado para el resto del desarrollo del trabajo.

Respondiendo a la necesidad de comunicación e integración, el CIESIN<sup>50 51</sup> definió un paso a desarrollar antes de intentar entender conceptualmente las interacciones entre los seres humanos y el ambiente: Documentar las interacciones entre las actividades humanas y documentar como estas interacciones afectan y son afectadas por el cambio global. Para acometer esta tarea, el CIESIN comisionó 12 científicos, llamados el grupo de trabajo de interacciones humanas (Human Interactions Working Group) para que se reunieran en el Instituto del Cambio Global de Aspen, en Aspen Colorado en agosto de 1991. El resultado del trabajo realizado en la reunión es el diagrama de Aspen.<sup>52 53</sup>

El diagrama de procesos sociales<sup>54</sup> muestra los principales procesos de cambio global relacionados con el hombre, las denominadas fuerzas motrices y las relaciones entre éstas. Al presentar el conjunto de fuerzas motrices y sus puntos de unión, el diagrama permite a los investigadores no perder de vista la imagen amplia de la situación, de esta forma ayuda a la consolidación de esfuerzos de investigación en el área de las ciencias sociales. Además de su función integradora a alto nivel, es decir, de las disciplinas propiamente dichas, cumple un papel integrador a bajo nivel, indicarles a los investigadores que datos, información, y/o conocimientos específicos deben adquirir de las disciplinas afines para estudiar los procesos relacionados (a su área de interés) con el cambio global. Podría decirse que el diagrama dice “qué” deben preguntar los expertos y a “quién”, y en “donde”<sup>55</sup>. Las fuerzas motrices del diagrama de Aspen y sus relaciones se muestran en la figura N° 6.

---

<sup>50</sup> Consortium for International Earth Science Information Network, <http://www.ciesin.org/>.

<sup>51</sup> El CIESIN en el año 1992 era parte del Sistema de Observación de la tierra EOS de la NASA. Tiempo después el CIESIN pasó a ser parte del instituto de la tierra (Earth Institute) de la Universidad de Columbia.

<sup>52</sup> A.A.D.D. (1992) *Pathways of Understanding*, pág. 8.

<sup>53</sup> El Profesor Manuel Ludevid Anglada, escritor del libro *El Cambio Global en el Medio Ambiente* asistió en calidad de participante a dicha reunión.

<sup>54</sup> Es el nombre con el que normalmente es mencionado el diagrama de Aspen en la literatura científica en inglés.

<sup>55</sup> En *Pathways of Understanding*, pág. 18-33.

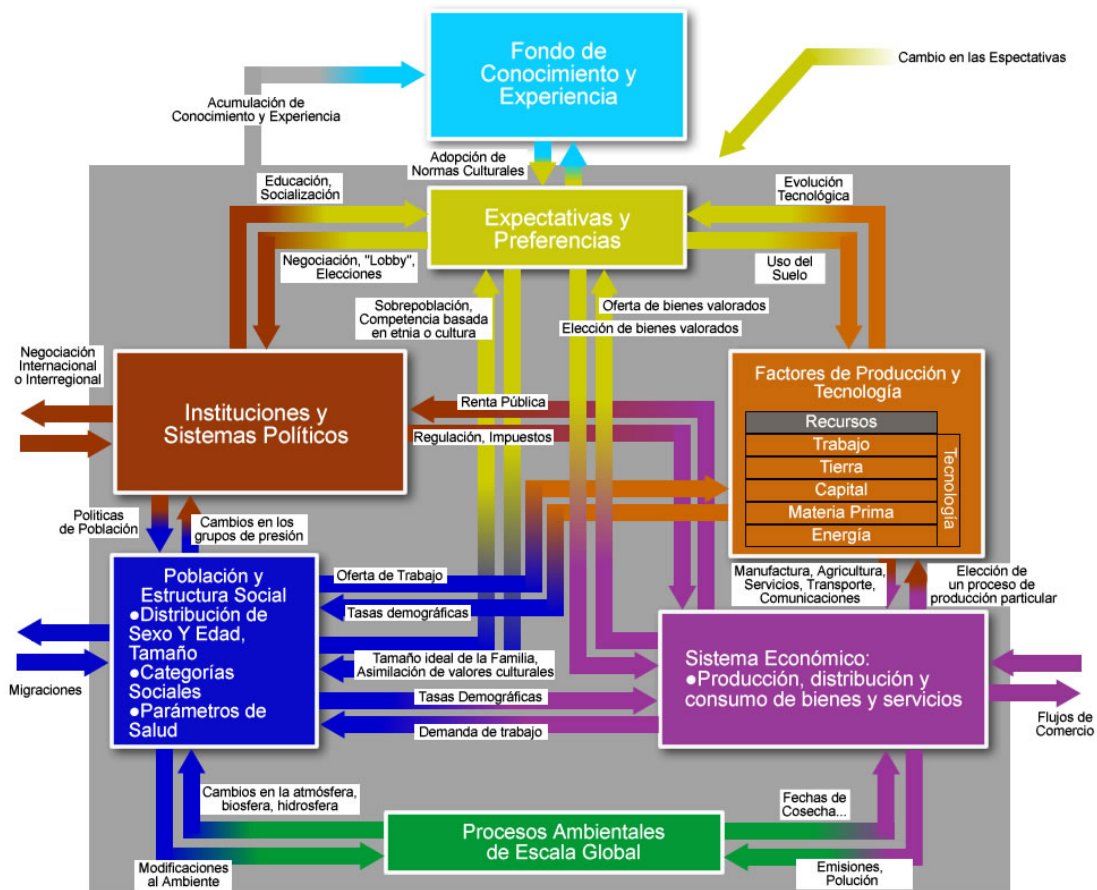


Figura N° 6: El diagrama de Procesos Sociales o diagrama de Aspen

El diagrama está dividido en siete bloques constitutivos, que representan las fuerzas motrices, es decir las causas profundas del cambio global<sup>56</sup>. Estas fuerzas son la Población, el Sistema Económico, el Sistema Político, los Factores de Producción y Tecnología, los Sistemas Naturales Físicos, las Expectativas y Preferencias de la gente y el Fondo de Experiencia y Conocimiento. Entre estas fuerzas motrices se relacionan entre sí mediante procesos y estos procesos se constituyen en la estructura del sistema, el conjunto de relaciones entre los elementos.

El conjunto de relaciones entre los elementos constitutivos del diagrama dan forma a la estructura del sistema; partiendo de la base de estas interacciones, el modelo conceptual de Aspen se puede transformar en un modelo dinámico. En el diagrama se ven ejemplos de los procesos que enlazan las fuerzas motrices; el trabajo a realizar es definir que procesos deben ser representados en el modelo y de esta forma se obtendrá el diagrama de influencias del mismo. Como conclusión de lo anterior se puede afirmar que el objeto del proyecto es agregar una tercera funcionalidad al diagrama: constituir como base conceptual para el modelado con objeto de simulación de los procesos de cambio global relacionados con el medio ambiente.

En la definición de los procesos de cambio global son muy importantes las dimensiones temporales y espaciales en las que operan estos procesos. Los procesos pueden ser a escala global,

<sup>56</sup> Ludevid Anglada, op. cit., pág. 263.

continental, regional, nacional o local, de escala de tiempo larga, corto, o media. Un problema con los procesos de cambio global es que tienen escalas de tiempo muy diferente a las que manejan las posibles intervenciones humanas para frenar o revertir el comportamiento. Hay que anotar que los procesos a representar en un modelo dinámico del cambio global, se tendrán en cuenta en una escala espacial global, y en una escala temporal de mediano plazo en términos humanos: un par de generaciones.

A continuación se desarrollaran cada una de las fuerzas motrices, en ese desarrolló, se hablará de los procesos que unen los diversos bloques constitutivos del diagrama. Al caracterizar el diagrama se notará porque se constituyó en la base de este esfuerzo de simulación del cambio global.

### **6.3.1. Población**

El termino población se refiere al conjunto de personas teniendo en cuenta la cantidad de estas, su clasificación y sus características desde un punto de vista de agregado. Para referirse a la organización de la población en el campo de sistemas y estructuras que generan diversas dinámicas donde la información es clave, se utiliza el término sistema social o político (estos subsistemas serán detallados más adelante), en este apartado solo se tienen en cuenta los procesos o dinámicas que afectan la cantidad, clasificación y distribución de los individuos. El análisis que aquí se hace es de orden demográfico (o demótico), debido a que la demografía es exactamente la ciencia que se encarga del estudio de las poblaciones humanas. Bajo un punto de vista cuantitativo, la demografía dinámica, profundiza sobre la dimensión, estructura, evolución y demás características propias de la dinámica de un sistema complejo como lo es la población humana.

Es oportuno, en este punto, antes de avanzar un poco más, señalar algunas tasas y términos demográficos que se usarán durante el desarrollo del proyecto y que son precisos de un estudio poblacional.

*Crecimiento Demográfico:* Es una estimación que se realiza teniendo en cuenta la diferencia que hay entre el número absoluto de nacimientos y el número absoluto de muertes. Esta diferencia se relaciona con el número total de personas y se obtiene finalmente una tasa que permite observar si la población aumenta o disminuye, incluso al ritmo a que lo está haciendo.

*Fecundidad:* Mide la relación que hay entre los nacimientos provenientes de mujeres en edad fértil (actualmente, de 15 a 49 años)<sup>57</sup> con respecto al número total de mujeres en edad reproductiva.

*Tasa de Natalidad:* Esta tasa es referente a la relación que existe entre el total de los nacimientos en un periodo y la población total existente en el mismo periodo de tiempo. La tasa de natalidad se convierte en una medida de cuantificación de la fecundidad.

*Tasa de Mortalidad:* Este indicador señala el número de muertes o defunciones sobre la población total existente, durante un periodo de tiempo específico.

#### **6.3.1.1. Crecimiento Poblacional**

“Hace unos 2000 años se calcula que los habitantes de la tierra serían unos 200 millones y no fue hasta 1804 cuando se llegó a los 1000 millones. A partir de entonces, según los datos de la ONU la marcha de la población fue: “<sup>58</sup>

---

<sup>57</sup> World Population Prospect. <http://www.unpopulation.org/>

<sup>58</sup> Ibíd.

1000 millones	1804
2000 millones	1927 (123 años después)
3000 millones	1960 (33 años después)
4000 millones	1974 (14 años después)
5000 millones	1987 (13 años después)
6000 millones	1999 (12 años después)

Tabla N° 3: Crecimiento Poblacional

Estas cifras aunque exorbitantes son reales y se observa claramente como la población ha aumentado en 1000 personas cada vez en un periodo menor de tiempo. Este crecimiento récord nutrió las predicciones sobre el juicio final de un mundo abrumado por la raza humana. Que el rápido y exagerado crecimiento poblacional ha afectado profundamente el medio ambiente y creado un desequilibrio en el ecosistema mundial, es casi imposible de poner en duda. Lo verdaderamente complejo es entender como ha sucedido este fenómeno sin darse cuenta a tiempo para generar las medidas necesarias para su control. Es interesante ver como el conjunto de personas, desde esta perspectiva, afecta directamente la base de recursos naturales con que cuenta el planeta: A mayor número de personas más recursos se necesitarán para proveerles sustento y posiblemente bienestar. En este punto los fenómenos que afectan la magnitud de la población se intersecan con los que influyen en el manejo de recursos, su producción, distribución y aprovechamiento. Por otra parte y basándose en la evidencia con la que se cuenta que nos indica el rápido crecimiento de la población (en algunos países mas que en otros) incrementando así la sobreexplotación de los recursos naturales, muchas veces en busca de soluciones equívocas a problemas económicos; es decir que a mayor población, y a causa de la explotación de más recursos necesarios para la misma, más presión se pone sobre los sistemas físicos naturales, generando mayor deterioro ambiental. Esta presión que la sociedad humana aplica sobre los sistemas físicos naturales, constituye el principal interés de estudio en esta sección, y para poder entender este fenómeno, es preciso estudiar un poco las dinámicas poblacionales humanas, así como los factores y el consumo asociados a ellas.

### 6.3.1.2. Dinámica poblacional: Tasas Crecientes.

La dinámica poblacional se refiere a los cambios en las cantidades de individuos humanos a través del tiempo y a los procesos que gobiernan estos cambios<sup>59</sup>. Es un hecho que la población humana ha aumentado (*“El rápido aumento de la población mundial es un fenómeno muy reciente en la historia de la humanidad. Un fenómeno que sólo cuenta con 250 años de vida”*)<sup>60</sup> y que el proceso de cambio muestra tendencias marcadas en diferentes espacios de tiempo<sup>61</sup>. Efectivamente, en relación a lo que menciona Manuel Ludevid, desde al año 0 d.c. hasta la revolución industrial, la población creció muy poco con respecto a los ritmos de crecimiento actuales, en efecto la población no sobrepasó los mil millones de habitantes en el período de tiempo 0 – 1700 d.c. Fue cuando surgió un factor decisivo que venía tomando fuerza con anterioridad y encontró en la revolución industrial su punto crítico de mayor auge, esto es nada más que la tecnología y sus avances: *“Durante miles de años el hombre ha luchado por elevarse del nivel de subsistencia. A través de este periodo, la tecnología, a pesar de su crudeza, ha sido su principal agente”*<sup>62</sup>. La tecnología, y específicamente los grandes avances científicos, se han convertido en el principal apoyo que ha tenido el hombre para mejorar sus niveles de vida y obtener, por ende, una mejor

<sup>59</sup> Se le llamará indistintamente dinámica poblacional al conjunto de los factores, tanto el comportamiento (referido a la variable temporal, sus registros y previsiones), como a los procesos que gobiernan esta evolución. Esta ambigüedad se relaciona con la discusión de los términos *sistema dinámico* y *dinámica del sistema*, ya que la población se puede representar como un sistema dinámico.

<sup>60</sup> Ludevid, op cit, pág. 107.

<sup>61</sup> L. Arizpe, R. Costanza, W. Lutz en Ludevid, *Ibid.*, pág. 107.

<sup>62</sup> MEADOWS, Dennis y Otros. (1972) *“Limites del crecimiento”* pág. 22.

condición humana. Solo se pudo llegar a los 1000 habitantes hasta el año 1804, tal y como se observa en la tabla de datos mostrada al principio. Esto se debía a la ineficiencia demográfica de las sociedades antiguas (el *ancien regime*, como en ocasiones se les llama), que tenían tasas de fecundidad media de aproximadamente 6 hijos para lograr el nivel de reemplazo generacional. Se conoce como nivel de reemplazo generacional a la tasa de fecundidad necesaria para garantizar que la magnitud de la población se mantenga estable (idealmente, que el número de habitantes permanezca igual, medido por períodos de referencia). Este alto nivel de fecundidad necesario para mantener el reemplazo generacional se debía a que gran parte de la población de recién nacidos morían muy jóvenes producto del hambre, la desnutrición, epidemias y batallas con otros seres humanos y con animales salvajes, (*“Las mujeres debían tener una media de 6 hijos para poder llegar al nivel de reemplazo generacional. Esto era así porque entre la mitad y la tercera parte de los hijos nacidos morían antes de alcanzar la edad reproductiva”*). Entonces, ¿Cómo fue posible el crecimiento demográfico actual?, ¿Qué pudo modificar las altas tasas de mortalidad? Existe una teoría, llamada la teoría de Transición Demográfica, enunciada en 1953 por Frank Notestein<sup>63</sup>, y actualmente es aceptada como postulado por casi todos los estudiosos del área, que puede que contenga solución o parte de ella a estas inquietudes.

### 6.3.1.3. Teoría de la Transición Demográfica

Es un proceso de cambio en los comportamientos de las variables poblaciones debido a cambios en los medios de producción, mejoras en la salubridad, nuevas tecnologías y otros; que se caracteriza por el descenso en primera instancia de las tasas de mortalidad, en particular la mortalidad infantil, y de la tasa de fecundidad para lograr el nivel de reemplazo, sucedido por un descenso posterior en las tasas de fecundidad y natalidad. El proceso tiene varias fases, que suceden a medida que cambian las condiciones económicas, sociales y culturales. La Transición Demográfica puede entenderse mejor si se explican sus fases<sup>64</sup>:

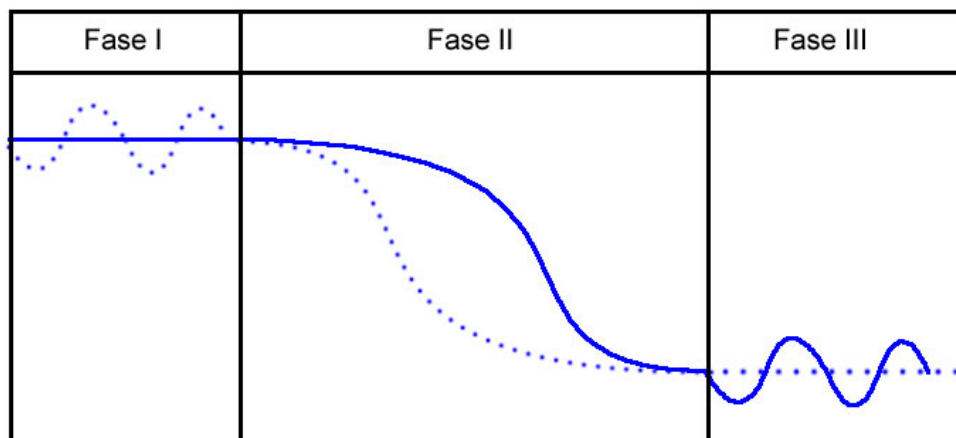


Figura N° 7: Las Fases de la Transición Demográfica.

FASE I: El índice en la tasa de mortalidad baja debido a las mejoras en la medicina y control de enfermedades, además de los progresos de la organización económica pero sobre todo gracias a

<sup>63</sup> La teoría fue enunciada originalmente en: Notestein, Frank. 1953. "Economic Problems of Population Change". En *Proceedings of the Eighth International Conference of Agricultural Economists*, pág. 13 a 31. Londres: Oxford University Press. Ahora este trabajo se constituye en referencia obligatoria para los trabajos en demografía.

<sup>64</sup> Ludevid, op cit., pág. 111.

los factores culturales y sociales que desempeñan un papel sumamente importante en esta primera fase.

A pesar de la existencia de países con grandes índices de mortalidad infantil<sup>65</sup> la baja en la tasa de mortalidad, a nivel mundial, ha sido mucho más rápida en los países pobres hoy en día de lo que fue en los países europeos en su momento, debido a que en la actualidad ya existen técnicas de tratamiento masivo e incluso no se requiere mucho dinero ni gente calificada para el manejo de estas técnicas y especialmente no hacen necesaria la implicación activa de toda la población, cosa de lo cual varía de las técnicas del control de la natalidad, que si pueden requerir de esta implicación. Es por esto que por medio de un control del descenso en la tasa de mortalidad se puede crear indirectamente una disminución en la tasa de fecundidad y por ende a una disminución en la natalidad; tal como si se hablara de un regulador del crecimiento poblacional (refiriéndose a la tasa de mortalidad) que da vida e inicio a un proceso de transición demográfica.

FASE II: En esta fase principalmente, luego de la baja en el índice de mortalidad presentado en la fase I, se muestra un descenso en la natalidad, que como se mencionó anteriormente se debe a una disminución de la tasa de fecundidad, mostrando conjuntamente un adelanto social pero sobre todo un desarrollo económico notable.

Conociendo entonces que la fecundidad es el factor base para la tasa de natalidad, es indispensable enfocar en este punto el estudio hacia el análisis actual de la fecundidad y así entender como es posible disminuir los índices de natalidad en el mundo. Mientras que en países de Europa (que ya está en una etapa final de la transición demográfica) y América latina el cambio en los índices de fecundidad cada vez son menores y con buenos pronósticos; en zonas como África y Asia (especialmente China que aunque bajo su tasa de fecundidad, lo hizo con métodos restrictivos que representan un grave peligro hacia un futuro) donde los cambios en la fecundidad son nulos o muy pocos.

En la figura 7, esta fase se divide en 3 partes. La primera sección indica un rápido descenso en la tasa de mortalidad pero que todavía no se ve reflejado en la tasa de natalidad. Esto debido a que el impacto de una tasa sobre la otra no es inmediato y en este momento se hace notable un crecimiento de la población. En la segunda sección se experimenta una desaceleración del crecimiento poblacional, ya que la mortalidad empieza a mantenerse estable en un índice muy bajo, mientras que la natalidad comienza a presentar un descenso progresivo buscando mantener un nivel de reemplazo. En la última parte de esta segunda fase la tasa de mortalidad se mantiene estable en un valor bastante bajo (con respecto al índice del principio), por lo que la tasa de natalidad reacciona con una caída rápida hasta llegar a un equilibrio poblacional. Durante todas las etapas de la segunda fase, se observa un crecimiento demográfico importante.

FASE III: En esta última fase la tasa de natalidad baja hasta el nivel aproximadamente igual al de mortalidad, aunque con algunas fluctuaciones a través del tiempo. Estas irregularidades en la natalidad pueden ser debidas a agentes netamente de tipo económico, incluso se resalta también la participación de los desarrollos científicos y tecnológicos. En esta fase el crecimiento de la población es muy poco casi nulo.

Hay que tener en cuenta que las sociedades en transición demográfica manejaban un esquema de altas tasas de mortalidad y natalidad, muchas veces oscilantes debido a las difíciles y cambiantes condiciones de vida, como el hambre y las enfermedades. Esta situación producía crecimientos demográficos prácticamente nulos, prueba de esto es el lento crecimiento de la cantidad de población antes de 1700. Cuando la sociedad alcanza la fase final del proceso de transición demográfica se obtienen una vez más crecimientos demográficos casi nulos, esta vez por la estabilización de las tasas de natalidad y mortalidad, pero ahora a niveles bajos.

---

<sup>65</sup> Ibíd., pág. 113. cuadro a.III.1.

Las causas más probables de este fenómeno son las mejores condiciones de vida (alimentarias y medico-sanitarias) que, como ya se dijo, bajan las tasas de mortalidades una primera instancia, pero estas también tienden a descender la natalidad, por la sensación de seguridad que producen las mejores condiciones de vida. Los seres más “débiles”<sup>66</sup> en los ecosistemas usualmente utilizan la estrategia de la alta fecundidad como mecanismo para mantener la especie; este es un hecho que los naturalistas han advertido desde la antigüedad<sup>67</sup>.

#### **6.3.1.4. Estabilizando la Población Mundial**

Una vez conocido el fenómeno actual del crecimiento poblacional se llega al punto de analizar y estudiar las consecuencias y problemas que trae consigo el crecimiento ilimitado de la población y de igual magnitud el incontrolado consumo de recursos naturales.

El crecimiento de la población es un fenómeno tan complejo de manejar, que hasta después de un par de décadas se estima que llegue a un punto de equilibrio, esto basado en los modelos del crecimiento de la población humana más optimistas<sup>68</sup>. El problema del crecimiento poblacional tiene otro agravante que lo hace aún más delicado: las migraciones.

La distribución de la población en el mundo se está volcando hacia los países más pobres y de menores recursos; y a pesar de que se tenga, actualmente y para un futuro, una gran reserva de recursos, la verdad es que con la desequilibrada distribución de la población, la tasa de consumo de tales recursos es mucho más alta que la tasa de recuperación de los mismos; es decir si el crecimiento de las personas sigue igual o en aumento en algunas partes del mundo más que en otras, de igual forma aumentará la necesidad del consumo de recursos sin darle oportunidad a estos de que se recuperen, acabándolos en poco tiempo.

Serios estudios de expertos sobre el fenómeno, han llegado a desglosar el problema en tres teorías que explican la posible razón del conflicto población-recursos.

La primera teoría considera al crecimiento de la población como el principal factor del problema que vive el mundo y motor del cambio global. La solución única esta envuelta en el control de la fecundidad, por consiguiente se obtiene un manejo sobre la natalidad, especialmente en los países pobres. De esta forma lo cita R. Jackson en Ludevid:

”Déjenme afirmar los dos principales puntos que he señalado. Primero, que la acción para reducir la tasa de crecimiento de la población debe comenzar ahora mismo, si queremos tener alguna posibilidad de satisfacer las necesidades de alimentos del mundo dentro de 25 años. Segundo, la planificación familiar y las políticas de población son asuntos que corresponden a cada gobierno, pero al mismo tiempo existe una clara necesidad de una acción internacional.”

La segunda teoría es la seguida por los tecno-optimistas y tratan de encontrar una solución al abastecimiento de alimentos para los países pobres y basa la posible solución en las nuevas tecnologías aplicadas correctamente a la agricultura.

---

<sup>66</sup> Se entiende por debilidad en este contexto, baja expectativa de vida, o alta tasa de mortalidad. Las bacterias son débiles en este caso pues mueren muchas con los cambios en el medio y tienen cortas vidas. El hombre fue más débil en el principio de la historia, ahora se considera fuerte pues su esperanza de vida ha mejorado considerablemente. También hay que tener en cuenta otros factores, como la fecundidad necesaria para que la especie pueda preservar su información genética frente a los cambios en el medio.

<sup>67</sup> Vidart, Daniel. (1986) *Filosofía Ambiental, el Ambiente como Sistemas*” pág. 273.

<sup>68</sup> Ludevid, op cit. pág. 163.

La última teoría señalada ataca directamente el sistema de producción. Un buen modelo de producción es el encargado de dar la correcta influencia al aprovechamiento de los recursos y al intercambio de estos entre los países pobres.

### **6.3.2. Sistemas Naturales Físicos**

Los procesos físicos, químicos y biológicos y sus interacciones que afectan el cambio global son representadas por el diagrama de Bretherton, y en el diagrama de Aspen están contenidos en el bloque sistemas naturales físicos. A través de este bloque en el diagrama de Aspen y del bloque llamado sistemas humanos en el de Bretherton es que se realiza el acople entre los dos diagramas, y al acoplarse los dos diagramas se puede documentar las interrelaciones entre los sistemas naturales y los sistemas humanos.

En los apartados 6.2.2. y 6.2.3. se mostró que procesos de entre los que están en el sistema tierra son los más importantes para el estudio del cambio global. De la caracterización del sistema tierra que se hizo, se resaltan como más importantes para el estudio los procesos de acumulación de gases invernadero, de halocarbonos, de gases causantes de lluvia ácida y el cambio de uso de la tierra y la pérdida de biodiversidad. El desarrollo del proyecto esta basado sobre esos procesos, ya que son los que más se conoce su influencia en el fenómeno del cambio global.

Los demás bloques constitutivos del diagrama de Aspen afectan a los sistemas naturales, mostrando el efecto de los sistemas humanos sobre el cambio global, así como estos sistemas naturales influyen sobre los otros bloques, señalando el efecto del cambio global sobre los procesos y sistemas humanos.

Para el estudio del cambio global realizado en este trabajo, no se tuvieron en cuenta las interacciones entre los sistemas naturales. Los procesos netamente naturales son parte del campo del diagrama de Bretherton, así que se salen del objeto de estudio; desde el principio se dijo que objeto de este proyecto es estudiar las causas humanas del cambio global.

### **6.3.3. Factores de Producción y Tecnología**

Esté bloque representa los recursos y la tecnología que la gente usa para producir bienes y servicios. Entre estos se encuentran el trabajo, la tierra, el capital y la materia prima. La producción de bienes y servicios y el consumo actúan como las entradas y salidas del sistema económico. Este elemento es importante por que sin él, no existe proceso productivo, y este es necesario para sustentar la población; si dejaran de existir algunos de estos recursos, se pondría en peligro la continuidad de la especie en el planeta.

Este elemento esta profundamente relacionado con las demás causas, y en realidad es una especie de categoría que solo existe desde el punto de vista humano: La tierra es en realidad un constituyente de los sistemas físicos naturales, pero el hombre le da valor de recurso, al igual que el agua por ejemplo; el trabajo es una medida de la población, que también puede considerarse como un recurso.

El problema con estos factores de producción es que al tratarse de recursos, estos son limitados, y llegará el momento en que no podrán satisfacer a toda la población mundial; de hecho, ya hay una distribución desigual de los recursos, con países que explotan los recursos de otros, amparados en un mejor dominio de la tecnología y en el poder político y económico; esto produce una explotación desigual, donde los países con más posibilidades de producción se aseguran aún más medios para la misma, con perjuicio para los países en desarrollo.

Aparte de lo anteriormente mencionado, los factores de producción y tecnología afectan el proceso de cambio global de diferentes formas: Con mejores procesos productivos y mejor explotación de

los recursos, se puede suavizar el impacto de la producción en el cambio global. También es posible que nuevas tecnologías conlleven a cambios en el sistema económico y político, e incluso en las expectativas y preferencias.

#### **6.3.4. Sistema Económico**

El sistema económico se refiere a las diferentes formas de sistemas económicos como tal que pueden existir en diversos países, naciones, u otro tipo de conglomerados de personas; el bloque en el diagrama representa los posibles sistemas. Un sistema económico se puede considerar como la forma de producir los bienes y servicios requeridos para que el grupo humano pueda satisfacer sus necesidades; mientras que los factores de producción y tecnología hablan de los recursos y los métodos para la producción, el sistema económico trata sobre la forma como se distribuyen los mismos, de la planeación estratégica de esta producción, además de tratar de la forma como se distribuyen todos los tipos de riqueza.

Los sistemas económicos pueden ser de varias clases: sistemas orientados a mercado, como el sistema liberal, sistemas de mercado mixto o planeados centralmente, en los que hay control del gobierno, y economías de países en desarrollo, con fuerte participación del sector agrario. Lo importante para este estudio no es hablar de estos sistemas como tal, si no de la posibilidad de estos sistemas ser incluidos dentro de este bloque, y de la función que el bloque tiene dentro del sistema completo.

El sistema económico es el regulador de los factores de producción y tecnología. Si se explotan muchos recursos, o estos resultan insuficientes en su apropiación, la causa está en el sistema económico. Además el sistema económico influye en el sistema político y en los sistemas naturales físicos, ejerciendo presión sobre las políticas y sobre los ambientes naturales a través de la explotación de los recursos. El sistema económico influye fuertemente en las expectativas y preferencias de la gente, modelando conductas que favorezcan los valores económicos del momento. Las relaciones inversas están presentes por supuesto: Las expectativas, los recursos faltantes o en exceso, las políticas lentamente pueden producir un cambio en los sistemas económicos.

Un concepto muy importante con relación al sistema económico es el de externalidad. Se puede definir externalidad como los efectos o el costo de una actividad, en este caso productiva, que no se ve reflejada en el precio de la misma, por ejemplo la contaminación, el costo de oportunidad de usar los recursos no renovables ahora, etc. Las externalidades no se tienen en cuenta en el sistema económico al no ser fácilmente cuantificables, y son lo que más afectan el medio ambiente. Es posible que sea necesario cambiar el sistema para solucionar el problema del cambio global desde esta perspectiva.

#### **6.3.5. Sistema Político**

Dado q se suele considerar el medio ambiente como conjunto de bienes colectivos, se tiende a depositar en las instituciones que expresan la voluntad popular la responsabilidad esencial de su adecuada conservación.

Las instituciones políticas definen el modo en que los intereses individuales se traducen en objetivos sociales, en leyes o en normas reguladoras.

Las instituciones políticas también tienen impacto en el control de la distribución de los recursos y de la riqueza. Afectan, por ejemplo, a los derechos de propiedad, y pueden modular los niveles relativos de igualdad o desigualdad de sus respectivos países.

Los gobiernos y estados son los principales reformadores de las políticas que afectan al cambio global<sup>69</sup>. Lo mejor para el futuro de la población y su cómoda estadía en la tierra, sería que los gobiernos en cada país, tuvieran una acción directa en el cambio global mediante y se trataran problemas relacionados con éste. Sin embargo como todo sistema que al crecer tiende a generar caos, el político no puede ser la excepción y en una perspectiva negativa, el crecimiento del poder político con respecto al cambio global beneficiaría de alguna forma a los países más ricos, pero no ayudaría mucho a los países de bajos recursos. Un caso claro de lo anterior podría darse con la producción de alimentos, puede que se genere suficiente alimento para que la población subsista por unos 20 años, sin embargo no es lo que se ve en muchos países donde sus habitantes mueren de hambre constantemente. Esto no es debido a la falta de alimentos, sino a la mala distribución de los mismos que se deriva de un mal manejo de políticas gubernamentales.

Pero existe un problema en el manejo del sistema político y es que la realización de todas las políticas y leyes que estipula una nación en pro del medio ambiente no es tan sencillo como se piensa. Hasta el momento se han implantado muchas políticas que rigen todavía y con buenos resultados pero que pronostican un futuro no muy agradable. En cuanto a la formulación de nuevas políticas es un proceso disparejo, debido al carácter necesariamente internacional de todos los acuerdos y es esto lo que hace que un convenio sea conveniente para muchos países pero perjudicial para otros cuantos. Pero tal vez el proceso mas complicado dentro del desarrollo de políticas ambientales es la aplicación de estas. Para la población es muy complicado dejar de hacer o de ser por que un simple decreto así lo determina y sus arraigadas costumbres en su forma de vivir no los deja ver más allá de lo que esto significa y encontrar el verdadero beneficio que se pretende encontrar en un futuro.

### **6.3.6. Fondo de Conocimiento, Expectativas y Preferencias**

Este es uno de los dos bloques más complejos y difíciles de comprender de todas las siete estructuras que conforman el diagrama de ASPEN. Esta complejidad presente en el entendimiento del papel funcional que cumple dentro del proceso del cambio global se ve reflejada en su representación dentro del modelo. El fondo de experiencia y conocimiento no es un proceso del cual se pueda obtener una cantidad tangible o incluso medible, por una simple razón y es que los resultados de este proceso no son efectos cuantitativos sino netamente cualitativos que más tarde al entrar a modificar otros procesos que dependen del fondo de experiencia y conocimiento, se van a convertir en proporciones de cantidad.

Una definición clara y sencilla de lo que se ha de entender como fondo de experiencia y conocimiento tiene que ser necesariamente referente al entendimiento y asimilación por parte de la población humana sobre su contorno natural, social y cultural en el que se desenvuelven, incluso los conocimientos científicos y tecnológicos que se han adquirido, dependiendo de su relevancia<sup>70</sup> (refiriéndose por relevancia, en este caso, al nivel de importancia debido al aporte que haga dicho avance científico al fondo de experiencia y conocimiento. Esto lo define la adquisición cultural que se obtenga por el conocimiento o experiencia obtenida).

A través del tiempo y en diferentes partes del mundo las personas han desarrollado nuevas tecnologías, reformado completamente la economía de un país, creado instituciones políticas y organizaciones gubernamentales para la implantación y abolición de nuevas y obsoletas reglas para la sociedad. La razón para todos estos cambios culturales, sociales, políticos, económicos y hasta tecnológicos se fundamenta en la búsqueda natural del ser humano para percibir e interactuar, cada vez mejor y con mayor eficacia, con el entorno en que se desenvuelve, que puede llegar a ser tan fortuito como el futuro de la misma raza humana pero tan indispensable para la elaboración del mismo que se hace necesario dejar sin oportunidades al destino del azar. Estos

---

<sup>69</sup> *Ibid.*, pág. 207.

<sup>70</sup> *Pathways of Understanding*, op. cit., pág. 25.

cambios y sus conocimientos aprendidos (a pesar de que en muchos momentos de la historias estas experiencias han dejado marcas físicas en la población y en el mismo “sistema terrestre”, no pasan a ser más que abstracciones mentales o conocimientos imposibles de medir bajo un estándar) por la población humana a través de la historia del hombre es lo que conforman el complejo fondo de experiencia y conocimiento. Es entonces el conocimiento una serie de niveles que se dan paso a través del tiempo y entre los cuales se mueve la información desde el nivel mas bajo (en el que se da a conocer la información) hasta el más alto de los niveles (entendido como el cambio de conducta por parte de la población).<sup>71</sup>

El fenómeno del cambio global es un tema bastante incierto para la población humana del que se tiene muy poco conocimiento, tal vez por esto la información que llega al nivel de conducta no es la suficiente para generar un cambio como consecuencia del proceso de conocimiento, de esta misma forma es expresada por Ludevid:

La gente no acostumbra a tener actitudes formadas por este tema por la sencilla razón de que no suele saber que es el cambio global en el medio ambiente.<sup>72</sup>

Además de ser poca la información que se tiene también es un tema muy abstracto que no permite hacer una fácil representación del fenómeno en la imaginación y son estas representaciones mentales las que ayudan a percibir mejor la información sobre el fenómeno.

Las representaciones mentales que posee el hombre sobre el cambio global, en realidad son bastantes complejas y muchas veces las actitudes del hombre procedentes de sus pensamientos carecen de racionalidad, un ejemplo claro es las adicciones negativas que comúnmente sobresalen en la población. Todo el mundo tiene información sobre la nocividad, de algún vicio, pero ninguno opta por dejarlo a un lado.

Estas deficiencias en la población son conocidas como limitantes de la racionalidad humana y son parte del problema cognitivo del ser humano para actuar debida y oportunamente ante los efectos del cambio global. Este conjunto de variadas limitaciones afectan directamente la percepción y comprensión, por parte de la población, hacia fenómenos tan ajenos e inciertos para el hombre como lo son los procesos relacionados con el cambio global.<sup>73</sup>

Luego de conocer la limitada parte cognitiva del hombre dentro del proceso de conocimiento y percepción sigue la parte afectiva, responsable de la formación de las actitudes y valores. Las actitudes humanas muestran nuestra predisposición a actuar en uno u otro sentido.<sup>74</sup>

En la formación de las actitudes tanto la percepción como los valores se convierten en aspectos fundamentales. La combinación entre lo que la gente alcanza a comprender y percibir de un fenómeno en particular y el conjunto de cualidades o criterios que la gente aplica como parámetros para dar valor a las situaciones que afectan constantemente su entorno.

No obstante la percepción y en especial los valores, usados al emitir juicios y actitudes, son notablemente diferentes dependiendo de cada individuo y la cultura en que se ha formado como persona.

Finalmente como última transición en este bloque, expositor del proceso de conocimiento y las expectativas humanas, se encuentra el comportamiento poblacional o conducta humana que en teoría debe ser siempre afectado por los valores y actitudes presentes en el hombre. Pero no es

---

<sup>71</sup> Ludevid, op. cit., pág. 168.

<sup>72</sup> *Ibíd.*

<sup>73</sup> *Ibíd.*, pág. 172.

<sup>74</sup> *Ibíd.*, pág. 182.

esta una regla general para la población en el mundo real, pues existe una considerable dificultad para generar un cambio propicio en sus conductas referente al problema del cambio global.<sup>75</sup>

#### **6.4. RECOPIACIÓN DE MODELOS SOBRE EL CAMBIO GLOBAL.**

El estudio en cuanto al modelado del cambio global se enfoca más hacia la parte del modelado del mundo, más sin embargo son pocos los trabajos que se pueden encontrar sobre este tema.

World dynamics es uno de estos libros dedicados al estudio de la estructura dinámica de los sistemas sociales tal y como lo plantea Forrester al plasmar en este libro la idea de interpretar la dinámica del comportamiento no lineal del sistema social en términos de la variación. El modelo mundial de Forrester se compone de cinco niveles muy unidos: población, inversión capital, recursos naturales, partes del capital dedicados a la agricultura y polución. Una conclusión muy importante que destaca Forrester en su libro es la acumulación exagerada de alimentos que en un futuro se convertirá en el factor limitante en el crecimiento de la población y tendrá un impacto directo en las inversiones de capital y las limitaciones de productividad.<sup>76</sup>

Otro libro importante y destacado a nivel mundial catalogado como el precursor de World Dynamics es The Limits to Growth. El contenido de este estudio, desarrollado principalmente por Donella Meadows, está orientado no tanto hacia el capital sino a los servicios sociales resultando por esto más aceptado que el análisis de Forrester. Uno de las conclusiones importantes en The Limits to Growth es plantear una adecuada política para el control de la natalidad y no un esfuerzo para un incremento del rendimiento industrial y tal vez evitar así un definitivo colapso global en la calidad de vida.<sup>77</sup>

---

<sup>75</sup> Ibíd., pág. 194.

<sup>76</sup> Deutsch, Karl. Problemas para el modelo del mundo. Pág. 32.

<sup>77</sup> Ibíd., pág. 33.

## 7. PRIMER PROTOTIPO

### 7.1. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA

Para la caracterización del sistema se seleccionaron varios elementos de referencia del mismo que fueron considerados fundamentales, pues son los que mayor impacto aparente tienen, además de ser elementos básicos pues los demás requieren de estos para tener sentido dentro del modelo. Además, cumpliendo con los parámetros de modelado definidos para todos los prototipos, este primero considera de mayor impacto aquellos elementos que la gente en general puede percibir con mayor facilidad, luego no habrá elementos abstractos en consideración. El elemento pivote para el modelado es la población, pues es bastante conocido su modo de comportamiento, así como son fáciles de reconocer y caracterizar sus procesos. Otro motivo importante para haber escogido la población para el rol central es el problema a modelar como tal y la relación de este con el elemento población. La intención principal de modelado es mostrar al elemento humano como fuerza motriz de los procesos de cambio global, y este elemento humano esta sustentado en la población (que debiera llamarse dinámica poblacional); de manera análoga a la pirámide de Maslow de las necesidades, con las necesidades fisiológicas en la base, se deben primero caracterizar los procesos básicos de la población (muertes, nacimientos, cantidad, etc.) antes de poder hacerlo con los epifenómenos de esta (instituciones, preferencias y valores, etc.)

La población se modelará, en este prototipo, utilizando el modelo más común, el de crecimiento exponencial, con una tasa de mortalidad y una tasa de natalidad tomadas de las estadísticas de la división de población de la ONU<sup>78</sup>. De esta forma se usan definiciones para la tasa de natalidad y mortalidad más cercanas al pensamiento del común de la gente, que no necesariamente relacionan estos parámetros con otras condiciones como las sociales o económicas de la manera correcta<sup>79</sup>. Este acercamiento desde lo estadístico a la definición de los parámetros de la población, a su vez se relaciona con la concepción de caja negra que a la gente le gusta manejar. De esta forma se facilita la comprensión del modelo, relacionando directamente causas con consecuencias lo cual no es 100% correcto en dinámica de sistemas, pero se puede permitir teniendo en cuenta el ajuste del nivel de detalle del modelo que se presupuestó. Ya utilizando el lenguaje dinámico sistémico, la población es afectada positivamente por los nacimientos y negativamente por las muertes, cada uno de estos factores contando con su propia tasa según lo expresado al principio del modelo. A mayor población más nacimientos, y a mas nacimientos mayor población, lo que se repite para las muertes.

También como referente en este modelo aparecen los sistemas naturales físicos representados en procesos como la acumulación de gases de invernadero y de gases halocarbonos nocivos para la capa de ozono, así como el recurso hídrico.

En el caso del recurso hídrico se parte del supuesto que toda el agua dulce de la tierra está disponible para el consumo humano directo, agrícola e industrial y que no se hace distinción directa de estos usos. Se consideraron como entradas de agua dulce las precipitaciones y el proceso de evaporación de de las plantas, que se constituyen en los principales aportantes a los cuerpos de agua dulce. En el caso de la evaporación de las plantas esta depende de la cantidad de agua disponible, así que hay un caso de realimentación; en el caso de las precipitaciones, se utilizo un valor estimado fijo al año. Para las salidas se consideraron el agua que se evapora, se consume o pasa a las freáticas, así como la se pierde por fuentes de agua contaminadas; la que se pierde por

---

<sup>78</sup> *World Population Prospect*. <http://www.unpopulation.org/>

<sup>79</sup> La gente tiene concepciones muy superficiales con respecto a esta relación, el común de la gente no maneja conceptos como transición demográfica.

contaminación de las fuentes es una tasa de la que hay disponible, así que depende de la cantidad existente así como la cantidad existente se va a ver afectada por esta pérdida, mientras que el paso a freáticas y la evaporación se consideraron constantes teniendo en cuenta un estimado. Esta representación del recurso hídrico refuerza la intención de modelado desde las ciencias humanas, ya que resalta el papel del agua utilizable en las actividades humanas como un recurso, una mirada más afín a la de la economía, sin olvidar la importancia de las fuentes de agua como parte integral necesaria para el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos, el del agua específicamente. En este prototipo se excluye el agua oceánica de consideración, pues de todas formas está más orientado a representar el agua como un recurso, y el agua oceánica tiene mayor importancia en el estudio de los procesos del sistema climático por su papel en la regulación térmica. Para ilustración en cuanto a valores de parámetros se consultaron varios documentos<sup>80</sup>.

La representación de la acumulación de los gases de invernadero y gases nocivos para la capa de ozono se basó en una serie de directrices. Para este primer prototipo no se tuvieron en cuenta los efectos de esta acumulación, eso se dejará para un prototipo más avanzado; es decir, no se representó el mecanismo de destrucción del ozono atmosférico, ni el efecto de los gases invernadero en la temperatura global (esto es particularmente difícil pues no hay un consenso entre los expertos con relación a este tema). Por otra parte se seleccionó un mecanismo de acumulación que depende indirectamente de la población para los gases invernadero, y uno que depende directamente de la población para los halocarbonos. En el caso de los halocarbonos se estimó una tasa de producción de los mismo con relación a la cantidad de personas, y haciendo uso de esa tasa se calcula la cantidad que se acumula al año; hay que tener en cuenta que no se consideraron salidas de halocarbonos, ya que no se conoce un factor que retire esos gases de la atmósfera. En el caso de los gases invernadero, más exactamente el CO<sub>2</sub>, se estimó una función lineal (por medio de una regresión) que relaciona la producción energética total con la emisión de estos gases; la producción energética total constituye un subsistema y se explicará más adelante. La salida de gases invernadero del sistema se pensó, pero se dejó para un prototipo más avanzado, ya que en este no se ha considerado el recurso forestal.

La inclusión de los procesos de acumulación de gases invernadero y gases nocivos para la capa de ozono en el prototipo es necesaria debido a que actualmente son de los procesos “más”<sup>81</sup> percibidos por la gente en general. Los fenómenos resultan atractivos para la gente en común. Para este primer prototipo se tendrán en cuenta como representación de la acción del hombre sobre los sistemas naturales físicos y como indicadores de cambio. La información sobre mediciones de las variables asociadas a estos, como gases invernadero y halocarbonos emitidos por ejemplo, se consultaron en diversas fuentes como GEIA<sup>82</sup>, CDIAC<sup>83</sup> y EIA<sup>84</sup>.

Cuando al principio del tema se hablaba que habían elementos que dependían de otros para tener sentido dentro del modelo se refería a elementos como el subsistema de alimentos, que depende de la población para tener sentido. Es natural que exista una relación directa entre alimentos y

---

<sup>80</sup> El más importante y el que al final se constituyó en base: Gleick, Peter H. (2004) Basic Water Requirements for Human Activities [online]. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, International Water Resources Association. [http://www.pacinst.org/reports/basic\\_water\\_needs/basic\\_water\\_needs.pdf](http://www.pacinst.org/reports/basic_water_needs/basic_water_needs.pdf). Accesado: 3 de Marzo de 2006.

<sup>81</sup> Se dice “más” puesto que no hay una verdadera percepción del fenómeno, simplemente se le ha dado más tiempo en los medios de comunicación

<sup>82</sup> Global Emissions Inventory Activity, parte del International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP, principal entidad de integración científica entorno al estudio de las relaciones entre los procesos biológicos, químicos, físicos y humanos en la tierra), se dedica al proceso de datos e información relacionados con los procesos de cambio global. El vínculo entre GEIA y IGBP se hace a través de la iniciativa AIMES del IGBP, que se encarga del análisis, integración y modelado del sistema tierra. Sitio Web oficial de GEIA: <http://www.geiacenter.org/>.

<sup>83</sup> Carbon Dioxide Information Analysis Center, Es el principal centro de análisis de datos e información acerca del cambio global del departamento de energía de los estados unidos; incluye el Centro Mundial de Datos para Gases Traza Atmosféricos. Sitio Web oficial: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>.

<sup>84</sup> Energy Information Administration, entidad gubernamental estadounidense encargada de mantener estadísticas sobre energía. Sitio Web oficial: <http://www.eia.doe.gov/>.

población, pues la población hace uso de estos alimentos y además es la que, mediante la fuerza laboral (no incluida directamente en el modelo) ayuda a producirlos. En el modelo la producción de alimentos depende del agua empleada y de la cantidad de tierra. Para este primer prototipo se empleó una relación sencilla que incluye los tres valores y se calibró para dar resultados consistentes. La tierra de cultivo en este caso se considera constante y se asume que toda la que puede ponerse a producir produce al 100% de su capacidad. Así la entrada de alimentos depende de la tierra y el agua excluyendo momentáneamente la población; la salida de alimentos depende de la población teniendo en cuenta una tasa de consumo medio por persona. Es importante notar que en este primer prototipo el sistema de alimentos no tiene un ciclo de realimentación: depende de los ciclos de realimentación del recurso hídrico y la población.

Otro subsistema que depende de población es el de basura, que en el caso de la acumulación depende enteramente de la población, pues se estimó una tasa que depende de esta, y para el caso de la salida de basura se considero el reciclaje como única alternativa (la disposición final y la incineración no las tuvimos en cuenta, pues no se considera que los desechos dejen de ser desechos en esos casos, contrario al reciclaje), y este reciclaje depende de la basura existente y de una tasa de reciclaje, y al aumentar la cantidad reciclada, disminuye la basura, luego hay una realimentación negativa.

En un apartado anterior se mencionó la producción energética total como causa de la acumulación de gases invernadero. Para este primer prototipo se considero crucial representar el consumo de combustibles no renovables como el carbón, petróleo, gas y uranio y otros materiales radioactivos. Como son combustibles no renovables es necesario considerar las reservas de estos y la producción (extracción y beneficio) de los mismos, para lo cual existe un problema: Todos estos combustibles se miden de maneras diferentes al ser de naturalezas distintas, y no es posible homogenizarlos usando sus magnitudes físicas (peso, volumen, etc.) pues no sería un aproximación correcta de sus capacidades para producir energía. La solución planteada fue utilizar el sistema de equivalentes caloríficos, que consiste en convertir las medidas expresadas en magnitudes físicas a unidades de calor (btu); esto fue posible gracias a que existen estimaciones de estas equivalencias. De esta forma, lo que se hizo fue convertir los datos de producción, consumo y reservas de todas las fuentes de energía a unidades equivalentes caloríficas (btu) y después convertirlas en toneladas equivalentes de petróleo. Una tonelada equivalente de petróleo equivale a 41.868 GJ, y como su nombre lo insinúa, es la cantidad de energía liberada al hacer combustión una tonelada métrica de petróleo. El supuesto del modelo es que existen reservas de energía (solo se consideró importante la no renovable) que deben ser explotadas y refinadas para su posterior utilización, y que esos procesos dependen de la cantidad de población: A mayor población más demanda de energía, y a mayor demanda de energía, mayor producción de la misma. De esta forma al aumentar la población aumenta la extracción y así disminuyen las reservas y aumenta la energía disponible, y al aumentar la población aumenta el consumo y disminuye la energía disponible; es acá donde se da la relación con la emisión de gases invernadero, pues el consumo de energía es causa de esta (no que la producción no lo sea, pero no se consideró en este prototipo). La población y la producción y consumo de energía se relacionan mediante tasas por persona de producción y consumo que fueron estimadas a partir de datos históricos, en este caso se utilizaron también las estadísticas de la EIA.

Revisando lo incluido en el modelo y la representación de esto en el mismo se puede notar que, de acuerdo a la intención de modelado, se representaron los factores mejor percibidos por el público; relaciones más sutiles entre estos, además de otros se incluirán en los siguientes prototipos.

## **7.2. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS**

El diagrama de influencias correspondiente al primer prototipo es el siguiente:

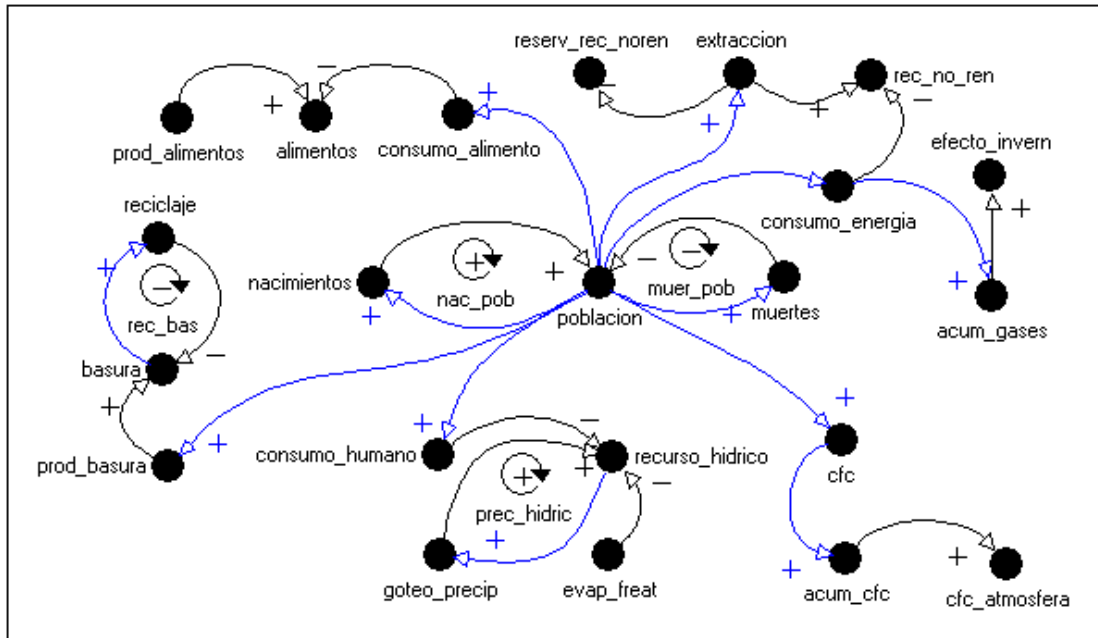


Figura N° 8: Diagrama de influencias del primer prototipo.

### 7.3. DIAGRAMA FLUJO-NIVEL

Para la mejor comprensión del modelo, el diagrama flujo nivel fue organizado mediante sectores, y fue siete el número de estos, dividiendo el modelo teniendo en cuenta los factores principales expuestos en la caracterización en prosa. Los sectores fueron:

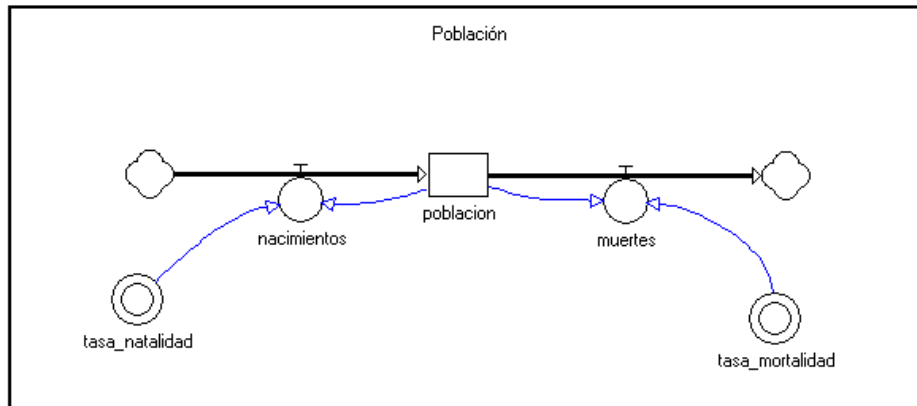


Figura N° 9: Sector Población – Primer Prototipo.

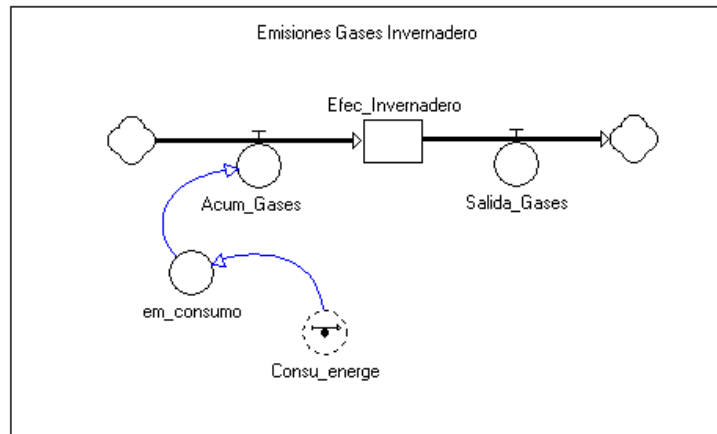


Figura N° 10: Sector Emisiones Gases Invernadero – Primer Prototipo.

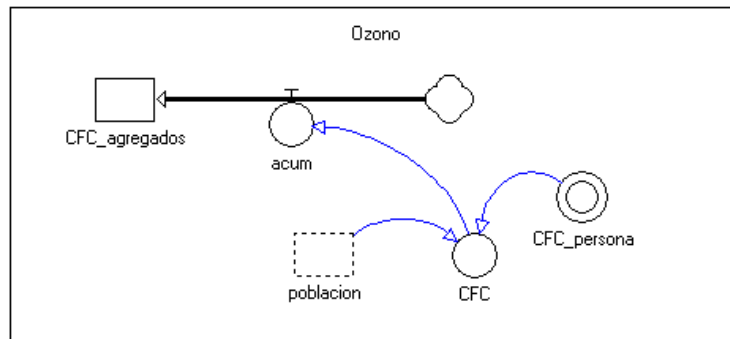


Figura N° 11: Sector Ozono – Primer Prototipo.

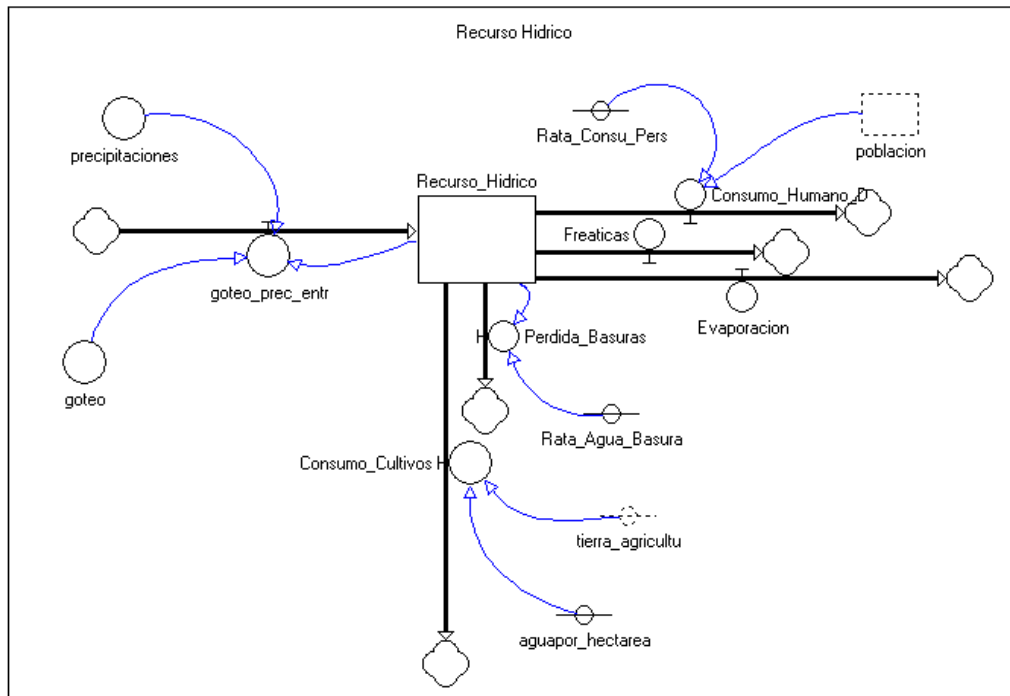


Figura N° 12: Sector Recurso Hídrico – Primer Prototipo

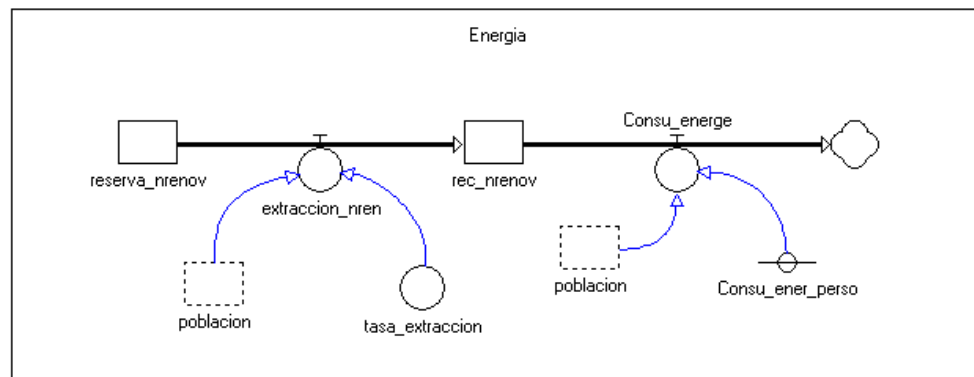


Figura N° 13: Sector Energía – Primer Prototipo

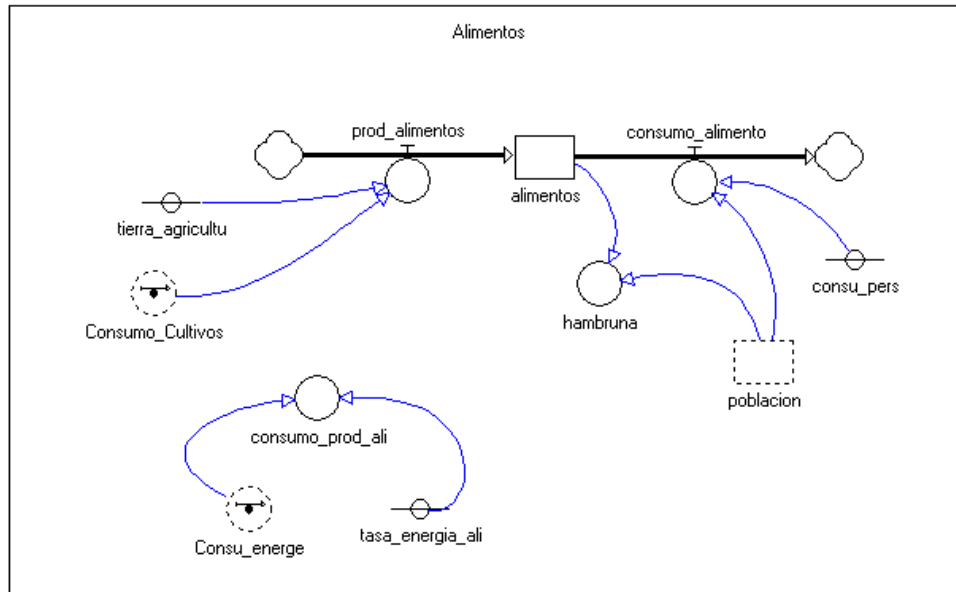


Figura N° 14: Sector Alimentos – Primer Prototipo.

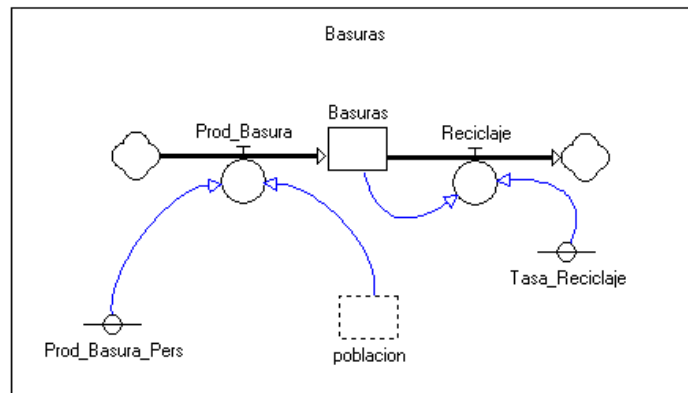


Figura N° 15: Sector Basuras – Primer Prototipo.

#### 7.4. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS

La definición de los elementos que constituyen el modelo se presenta a continuación, junto con una breve descripción complementaria a lo expuesto en la caracterización en prosa para cada uno y una descripción de las unidades en que se mide la correspondiente magnitud.

Nombre.	Definición.	Descripción.	Unidad De Medida.	Tipo De Elemento
Acum_Gases	em_consumo	Cantidad de gases que va subiendo a acumularse en la atmósfera por año.	[Tm]	Flujo
Basuras	$(2519470 * 521.2380952) /$	Cantidad de basuras acumuladas por año.	[Tm]	Nivel

	1000			
CFC	$\text{poblacion} * \text{CFC\_persona}$	Cantidad de CFC que se produce anualmente.	[Tm]	Auxiliar
CFC_agregados	0	Cantidad de CFC acumulados en la atmósfera. Aproximamos el valor a 0 pues los CFC son netamente antropogénicos.		Nivel
CFC_persona	Ver al final de la tabla.	Cantidad de CFC producida por persona al año.	[Tm]	Exógena
Consu_ener_perso	1.295299632	Tasa de consumo de energía a partir de combustibles por persona al año.	[ ]	Parámetro
Consu_energe	$\text{Población} * \text{Consu\_ener\_perso}$	Consumo de combustibles al año. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo.	[Tm. Equiv. Petróleo]	Flujo
Consumo_Cultivos	$\text{aguapor\_hectarea} * \text{tierra\_agricultu}$	Agua usada en la producción de cultivos.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Consumo_Humano_D	$\text{Rata\_Consu\_Pers} * \text{poblacion}$	Agua usada para el consumo humano.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Efec_Invernadero	1.785E15	Cantidad de gases acumulados.	[Tm]	Nivel
Evaporacion	$71 * 1000000000000$	Cantidad de agua que se pierde por evaporación.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Freaticas	$36 * 1000000000000$	Cantidad de agua que se pierde a causa de las freáticas.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Perdida_Basuras	$\text{Rata\_Agua\_Basura} * \text{Recurso\_Hidrico}$	Cantidad de agua que se pierde a causa de las basuras.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Prod_Basura	$(\text{Prod\_Basura\_Pers} * \text{poblacion}) / 1000$	Cantidad de basuras producidas por persona al año.	[Tm]	Flujo
Prod_Basura_Pers	521.2380952	Producción de basuras por persona. Datos de municipalidades de 45 países del mundo. Estimado suave.	[kg]	Parámetro
Rata_Agua_Basura	0.0001	Tasa que indica el porcentaje de agua que se pierde a causa de los desechos sólidos.	[ ]	Parámetro
Rata_Consu_Pers	$(50 * 365) / 1000$	Porcentaje de agua utilizada en el consumo humano.	[m <sup>3</sup> ]	Parámetro
Reciclaje	$\text{Basuras} * \text{Tasa\_Reciclaje}$	Cantidad de basuras recicladas por año.	[Tm]	Flujo
Recurso_Hidrico	$3.5E16 * 10 / 100$	Cantidad de agua dulce excluyendo los polos (90% del agua dulce está en los polos).	[m <sup>3</sup> ]	Nivel
Salida_Gases	0	Salida de gases. Se dejó este espacio previendo que surja algún mecanismo que permita la extracción de gases de la atmósfera.	?	Flujo
Tasa_Reciclaje_acum	$0.1 \text{ CFC}$	Tasa de reciclaje.	[ ]	Parámetro
		CFC acumulados por año.	[Tm]	Flujo

aguapor_hectarea	8000	Tasa que indica la cantidad de agua usada por hectárea para la agricultura.	[m <sup>3</sup> / ha]	Parámetro
alimentos	2227980030	Cantidad de alimentos disponibles para consumo por año.	[Tm]	Nivel
consu_pers	0.00001 * 1000000	Consumo de alimentos por persona.	[Tm / Personas]	Parámetro
consumo_alimento	consu_pers * población * 1000	Consumo de alimentos por año.	[Tm]	Flujo
consumo_prod_ali	Consu_energe * tasa_energia_ali	Consumo de energía para la producción de alimentos.	[Tm.Equiv Petróleo]	Auxiliar
em_consumo	1.05294E9 + 0.57572 * Consu_energe	Representa la relación entre el consumo de energía y la producción de gases.		Auxiliar
extraccion_nren	Población * tasa_extraccion	Producción de combustibles al año. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo.	[Tm. Equiv. Petróleo]	Flujo
goteo	0.005	Porcentaje que define la cantidad de goteo.		Auxiliar
goteo_prec_entr	(Recurso_Hidrico * goteo) + precipitaciones	Cantidad de agua que entra debido a las lluvias y al goteo.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
hambruna	Alimentos / poblacion	Indicador de hambre por persona. Indica cuando no hay suficientes alimentos para alimentar toda la población como se requiere.	[Tm / Personas]	Auxiliar
muerres	(tasa_mortalidad * poblacion) / 1000	Cantidad de muertes de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad.	[Miles de Personas]	Flujo
nacimientos	(población * tasa_natalidad) / 1000	Cantidad de nacimientos de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad.	[Miles de Personas]	Flujo
poblacion	2519470	Cantidad de personas en el mundo.	[Miles de personas]	Nivel
precipitaciones	107 * 1000000000000	Cantidad de agua que entra al nivel debido a las precipitaciones por año.	[m <sup>3</sup> ]	Auxiliar
prod_alimentos	-1 * 1458582377 + (281.0648085 * Consumo_ Cultivos) + (317.761039 * tierra_agricultu)	Cantidad de alimentos producidos en un año.	[Tm]	Flujo
rec_nrenov	3.75401E9	Combustibles no renovables acumulados. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos	[Tm. Equiv. Petroleo]	Nivel

		equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo.		
reserva_nrenov	3.48512E+12	Reservas de combustibles no renovables en el año de 1950. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo.	[Tm. Equiv. Petróleo]	Nivel
tasa_energia_ali	0.1064	Tasa de energía necesaria para la producción de alimento.	[Tm.Equiv Petróleo]	Parámetro
tasa_extraccion	1.49	Valor de producción de energía por recursos no renovables por persona. Hallada por regresión y promedio.	[Tm]	Auxiliar
tasa_mortalidad	Ver al final de la tabla.	Tasa de mortalidad. Falta dividir por 1000.	[ ]	Exógena
tasa_natalidad	Ver al final de la tabla.	Tasa de natalidad. Falta dividir por 1000.	[ ]	Exógena
tierra_agricultu	4467533*1000	Cantidad de tierra destinada para la agricultura.	[ha]	Parámetro

Tabla N° 4: Definición de los elementos del Primer Prototipo

Definiciones que quedaron por fuera de la tabla a causa del formato:

Definición de CFC\_persona:

INTSPLINE(2,1934,1,126.5562,182.5681,304.2204,457.0778,608.3615,905.1999,1137.565,1504.394,1761.155,2150.271,2837.302,3584.858,6239.728,9487.891,11142.81,12296.02,13846.96,15561.71,17062.89,19830.25,22661.44,25792.06,30207.09,33562.9,33327.6,35586.6,42843.27,49352.06,57509.95,67251.15,77280.17,85738.83,94160.64,104324.5,115326.6,128038.7,139229.7,148222.9,160798.6,177115.8,189722.9,181114.7,177152.168391,155392.4,148382.6,144274.3,144711.8,143246.3,147087.4,153637.4,155853.7,158979.8,160551.6,157033.2,139188,118337.1,105615.1,97641.48,90311.97,70480.92,63537.52,57812.59,51282.91,44976.11,39042.3,34321.84,29601.37,23066.23,12901.74)

Definición de tasa\_mortalidad:

INTLINEAL(2,1950,5,19.5,17.3,15.5,13.3,11.5,10.8,10.3,9.7,9.5,9.1,9,8.9,8.8,8.8,8.8,8.9,9.1,9.5,9.8,10.1)

Definición de tasa\_natalidad:

INTLINEAL(2,1950,5,37.5,35.7,35.3,33.7,30.9,28.1,27.6,26.9,24.6,22.5,21.1,20.3,19.5,18.5,17.2,16.2,15.5,15,14.5,13.8)

## 7.5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para el análisis de sensibilidad aplicado a este primer prototipo se utilizarán solo cambios en el subsistema de población, es decir q solo se modificará los parámetros de natalidad y mortalidad para conocer el comportamiento no solo de la población, sino también la conducta este subsistema reflejada en el consumo de alimentos e incluso e incluso en el manejo de los recursos no renovables. Los cambios realizados a las variables de natalidad y mortalidad representan

escenarios diferentes en los que se recrea una posible situación del crecimiento poblacional pero en tres formas diferentes:

- **Por Defecto:** Donde tanto la tasa de natalidad y la de mortalidad presentan descensos acorde con la teoría de la transición demográfica. En la figura N° 16 es la trayectoria de color morado.
- **Población en Crecimiento:** Este escenario muestra un crecimiento constante en la población, sin encontrar una tasa de reemplazo. En la figura N° 16 es la trayectoria de color azul.
- **Descenso Rápido en la Fecundidad:** En este escenario se presenta un ambiente donde la tasa de fecundidad baja mucho más rápido de lo debido manteniendo un descenso normal en la tasa de mortalidad. En la figura N° 16 es la trayectoria de color rojo.

Las variables analizadas bajo estos tres contextos son:

1. Consumo de alimentos por persona.
2. Recursos no renovables.
3. Cantidad de recurso hídrico.

Los resultados esperados en las gráficas han de ser muy predecibles pues en cada una de estas variables (subsistemas) analizados, la participación de la población es directa y con muy pocos otros factores que influyan sobre el mismo punto donde recae la acción de la población.

Estas no son las únicas variables que se pueden analizar en este prototipo inicial, pero si son las que demuestran comportamientos de mayor importancia con respecto a los cambios en la población y justamente es este subsistema al que mayor atención se debe prestar en este primer prototipo ya que hasta ahora los demás procesos o subsistemas no interactúan de forma directa entre sí.

Al hacer una comparación entre las tres gráficas obtenidas, al efectuar la simulación del modelo, se puede observar que las gráficas son de un comportamiento similar (las tres gráficas tienden al crecimiento de la población) pero con cambios significativos. La trayectoria azul muestra un crecimiento exponencial, un comportamiento para nada realista pero que es importante como punto de referencia para presentar una comparación con los demás escenarios.

Por su parte la trayectoria de color rojo presenta algo más real donde se observa que la tasa de natalidad baja rápidamente (más que todas las anteriores) y la mortalidad presenta un comportamiento más normal. La población rápidamente deja de tener más hijos pero los índices de muertes no cambian, esto hace que la población aumente pero su velocidad de aumento se reduzca considerablemente.

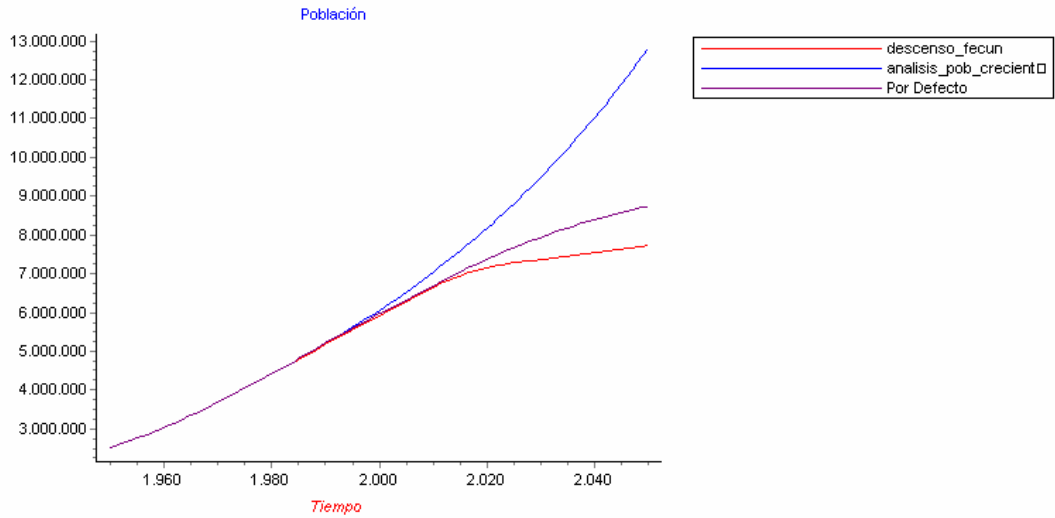


Figura N° 16: Comportamientos sobre la población bajo diferentes escenarios para el prototipo I.

### 7.5.1. Análisis en el Consumo de Alimentos en el Mundo

El comportamiento de esta variable es idéntico al comportamiento observado en las gráficas de población, lo que varía son los valores por cada año. Los valores se aumentan diez veces más que los valores mostrados en la grafica de población, ya que se está graficando años contra cantidad de alimento consumido en el mundo y como se esta simulando con una tasa de 10 [Tm] por ración de alimento por persona los resultados de ambas graficas son iguales en cuanto comportamiento pero lógicamente los valores proporcionales.

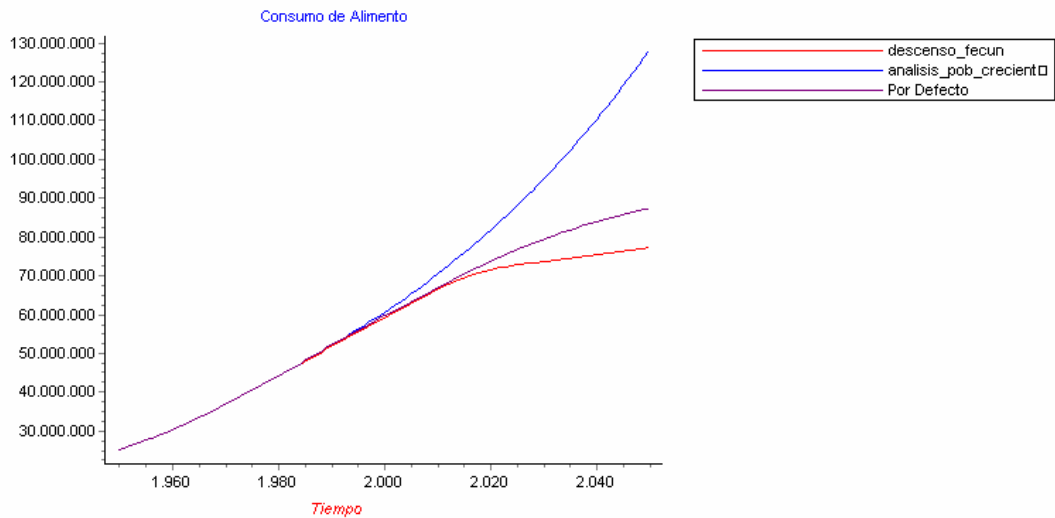


Figura N° 17: Consumo de Alimentos en el Mundo.

### 7.5.2. Análisis en el Consumo de Recursos No Renovables en el Mundo

En esta gráfica se puede apreciar como el consumo de recursos no renovables es sensible a los cambios ocurridos en el comportamiento de la población. A pesar de que en cualquiera de los tres escenarios el comportamiento tiende a ser el mismo (crecimiento exponencial) las trayectorias al final de su recorrido se separan un poco reflejando en forma indirecta la cantidad de población existente dentro de cada uno de los respectivos escenarios. Por lo tanto a mayor cantidad de personas, mayor es también la cantidad consumo de energía, representada en el consumo de los recursos no renovables.

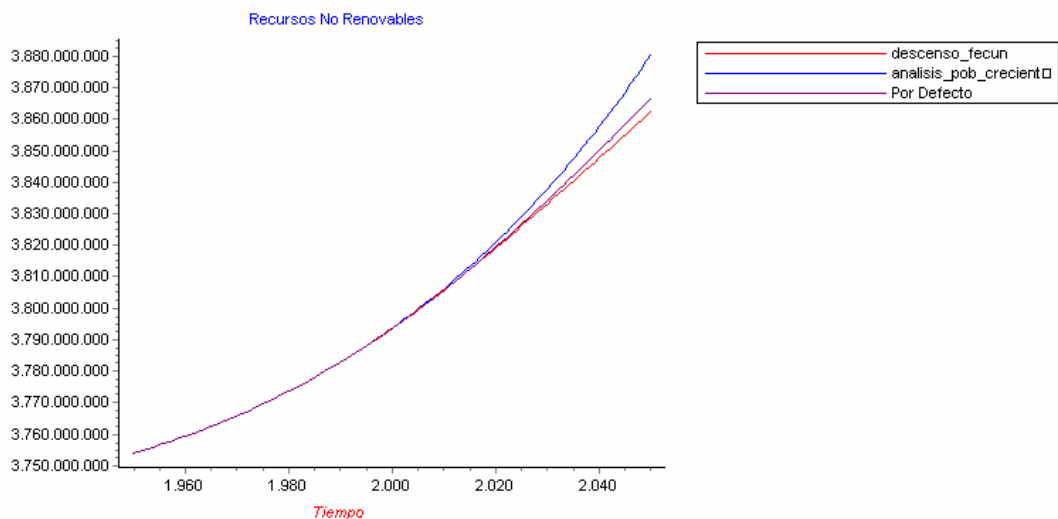


Figura N° 18: Cantidad de Recursos No Renovables Consumidos en el Mundo.

### 7.5.3. Análisis en el Cantidad de Recurso Hídrico en el Mundo

Con respecto a la cantidad de agua que se tiene acumulada en el mundo<sup>85</sup> se observa un comportamiento predecible igual para todos los escenarios simulados de la población. El nivel en el consumo del agua necesaria por persona presenta un descenso continuo debido a que el crecimiento en la población es tal (para cualquiera de los tres escenarios simulados) que lo más normal es que el agua presente una curva rápida y en forma descendente. No obstante cabe anotar que debido a que las gráficas de población son diferentes se han de esperar también diferentes cambios en los valores de la Figura N° 19 pero son tan mínimos que no se alcanzan a ver reflejados en la trayectoria de la curva.

<sup>85</sup> Para propósitos de modelado dentro de este proyecto solo se tiene en cuenta la cantidad de agua dulce en el mundo.

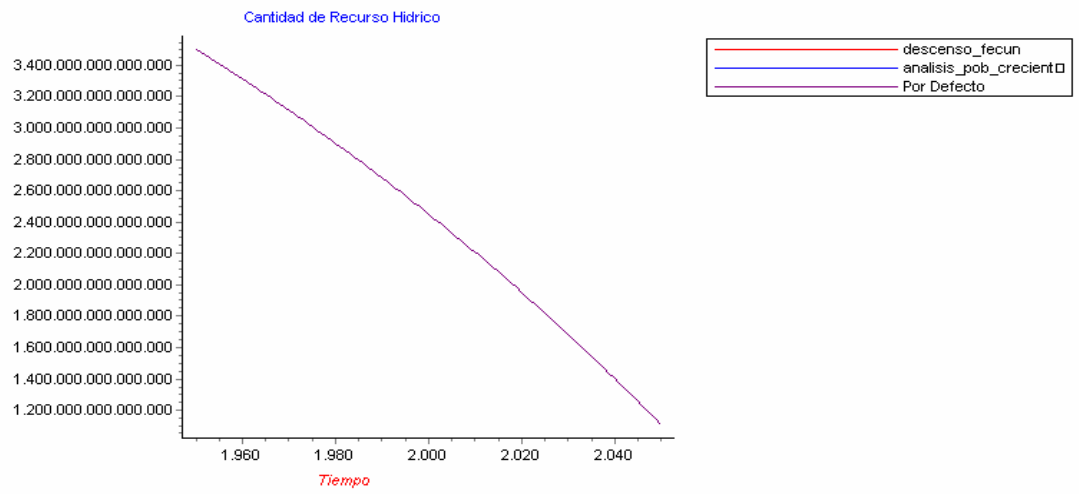


Figura N° 19: Cantidad de agua destinada para el consumo humano en el mundo.

## 8. SEGUNDO PROTOTIPO

### 8.1. RECOMENDACIONES A IMPLEMENTAR EN EL SEGUNDO PROTOTIPO

El primer prototipo incluyó los siguientes factores:

- La población, representada por medio de una estructura de nacimientos-muertes con tasas de natalidad y mortalidad representadas por medio de exógenas.
- Sistemas naturales físicos:  
La acumulación de gases de invernadero, dependiente del consumo energético.  
Acumulación de Gases halocarbonos, tomando las emisiones por persona como un valor exógeno.  
Recurso hídrico, representado por un nivel al que le entran flujos de precipitaciones y evapotranspiración (goteo), y le salen flujos de evaporación, paso a freáticas, consumo humano, consumo cultivos y pérdida por contaminación.
- Alimentos, con la producción de alimentos dependiente del recurso hídrico y de la tierra disponible para el cultivo (una constante) y el consumo dependiente de la población.
- Basura. La generación de basura depende de la población, y el reciclaje es dependiente de una tasa de reciclaje.
- Producción de Energía en base a recursos no renovables. Existen unas reservas finitas y son explotadas. La explotación y el consumo dependen de la población.

Con el fin de incrementar el nivel de representación del modelo es necesario implementar algunos cambios. Después de revisar la estructura del modelo y el comportamiento obtenido se consideró adecuado implementar los siguientes cambios en los sectores del modelo:

- Población: Cambiar el modelo de las tablas exógenas por el modelo en el que la natalidad y la mortalidad dependen de la economía o de la calidad de vida. Es importante implementar el indicador de hambruna.
- Alimentos: Cambiar la producción de alimentos para que incluya la población, ya que a mayor población existe más potencial de trabajo para producir más alimentos. Se debe reflejar también que a mayor alimento más productividad. El consumo de alimentos debe depender de la cantidad disponible de alimentos, ya que si hay una cantidad suficiente de alimentos, la gente come como es debido, mientras que si la cantidad es menor hay racionamiento.
- Recurso Hídrico: Debe corregirse – la variable precipitación debe depender de la variable evaporación. Evaporación a su vez debe depender de recurso hídrico, pues hay que tener en cuenta que se consideran pérdidas en el nivel de este, luego un valor constante de evaporación no es consistente. La misma consideración ha de hacerse para las aguas que pasan a freáticas; se debe incluir también una entrada de agua al sistema por concepto de la que es extraída de la capa freática para consumo humano.
- Energía: Es necesario agregar al sistema una representación de el consumo de combustibles hechos con biomasa y otros recursos renovables. Es importante tenerlos en cuenta pues constituyen la fuente de energía para casi la mitad de la población del mundo. Debe reflejarse su influencia, pequeña pero existente, en la acumulación de gases invernadero.

Además de los cambios a los sectores ya implementados, se deben agregar los siguientes sectores:

- **Recurso forestal:** Se debe relacionar con los subsistemas de producción de alimentos, población y tierras para reflejar el efecto que produce la deterioración de la tierra.
- **Subsistema Económico:** Iniciación del sistema económico para que se pueda implementar el modelo de natalidad dentro del sistema de población.
- **Cambio de uso de la tierra:** Hasta el momento se ha considerado la tierra de cultivo como un parámetro. Es importante representar la mecánica de destrucción de las tierras vírgenes y el agotamiento de las tierras de cultivo para así poner un factor limitante a la producción de alimentos.

## **8.2. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA**

Para la caracterización del segundo prototipo del modelo se parte de explicar los cambios realizados en el modelo y por que se realizaron; lo importante es mostrar lo que se representó del fenómeno con esos cambios, y como estos afectan el comportamiento esperado del modelo.

El sistema de población fue modificado para convertirlo en un factor endógeno, reemplazando las tablas de natalidad y mortalidad por variables que dependen del sistema económico, él que será explicado en breve. La idea detrás de este cambio es poder implementar un modelo de transición demográfica en el sector de población. Las tasas de natalidad y mortalidad no son variables exógenas de las que se desconocen las causas de su dinámica, ahora son variables que representan una teoría que trata de explicar los cambios en estas tasas. La hipótesis es que el mejoramiento en el nivel económico reduce las tasas de mortalidad, por las mejoras en salubridad y salud, y también las de natalidad, por lo poco deseables que se hacen los hijos en un sistema capitalista moderno. La teoría de la transición demográfica ya se explicó en un apartado anterior, y este planteamiento del sector población pretende ser un acercamiento a la representación de dicha teoría. La mecánica de variación de estas tasas se represento con multiplicadores que a medida que el nivel económico aumenta, hacen bajar las tasas de natalidad y mortalidad. Otro factor que fue representado fue el retardo del efecto del aumento en el nivel económico sobre las tasas de natalidad y mortalidad; esto es importante pues se sabe que el proceso de mejora de las condiciones de vida cuando hay recursos para llevarla a cabo es lento, y que el cambio en las conductas con respecto a la natalidad cuando el nivel de vida mejora lo es aun más (ver apartado 6.3.1.3). Así la influencia del sistema económico sobre la población se puede resumir como que a medida que el nivel económico aumenta, las tasas de natalidad y mortalidad descienden en una relación no lineal, cada una a su propio ritmo, pero el efecto del aumento en el nivel económico sufre un retardo antes del influir sobre las tasas.

El sistema de población tiene ahora otra relación con el sistema de alimentos. Existe una variable llamada Hambruna que tiene un efecto sobre la dinámica poblacional: Cuando los alimentos existentes no son suficientes para alimentar a la población, la mortalidad debe aumentar. Así la variable hambruna revisa la cantidad de alimentos existentes, la compara con la demanda de la población (calculada mediante un parámetro que representa la cantidad de alimento necesaria por persona) y si es menor la cantidad de alimentos aumenta inmediatamente la tasa de mortalidad. Esto se hace con el fin de representar las muertes por inanición cuando hay escasez de alimentos.

En el sector Alimentos se realizó un cambio en la forma como se calcula la producción de alimentos. En el anterior prototipo la producción dependía de la tierra disponible para el cultivo y del consumo de agua en agricultura; en este prototipo se consideró, después de revisar las

estructura del anterior, que incluir el factor tierra no es necesario, eso debido a la forma como se calcula el agua para cultivos, que depende enteramente de la tierra disponible.

El subsistema Recurso Hídrico sufrió varias alteraciones con el fin de hacerlo más fiel a la realidad. Algunos supuestos de modelado ahora se consideran incorrectos o más bien poco adecuados para este prototipo. La evaporación se considera igual a las precipitaciones, partiendo del supuesto de un sistema cerrado de precipitaciones. El agua que se perdía por paso a freáticas se considera despreciable además de poco interesante para los propósitos del modelo. La entrada de agua ahora por evo-transpiración (goteo) es variable con una tasa de goteo. La dinámica del recurso hídrico se resumiría de la siguiente manera: El recurso hídrico es afectado por las precipitaciones y la evaporación que son valores equivalentes al considerarse estas como un sistema cerrado (el agua evaporada no sale del sistema). El recurso hídrico se agota por consumo humano, que depende de la cantidad de población, por consumo para cultivos, que depende de la tierra disponible para los mismos, y por destrucción de fuentes hídricas debido a la basura mal eliminada. El recurso hídrico aumenta debido a la evo-transpiración de las plantas. El recurso hídrico tiene influencia en la producción de alimentos.

En el sector Energía debe ahora incluir una representación de la energía producida con combustibles de biomasa. Para este fin se creó el sistema recurso forestal, que representa la fuente de combustible de biomasa más común, la madera. Este sector se explicará en breve y se mostrarán sus relaciones con los otros sectores. También hay que incluir la representación de los combustibles con biomasa en el sector de emisiones de gases invernadero, ya que estos también son causa de emisiones de este tipo.

Se incluyeron tres sectores nuevos que vienen a incrementar la representación del fenómeno en el modelo. El primero de los sectores es el de cambio de uso de la tierra que representa la dinámica de transformación de tierras vírgenes o baldías en tierras de cultivo y el posterior deterioro de estas, convirtiéndolas en tierras improductivas. La transformación es gobernada por tasas de reclamación de las tierras, que teniendo en cuenta que se consideran por aparte tierras vírgenes forestales y llanuras no usadas para cultivo, son diferente para cada tipo de tierra a reclamar. El proceso de transformación de las tierras es afectado por un retardo. Las tierras de cultivo que se producen por cada reclamación se consideran de características diferentes, siendo la principal de estas que las tierras forestales normalmente se degradan más rápido. El siguiente proceso es el de transformación de las tierras de cultivo en "desiertos", tierra agotadas, debido a la degradación de las mismas. Acá la estructura se repite, existen tasas de desertificación y la transformación es afectada por un retardo. El proceso de cambio de uso de la tierra afecta la tierra disponible para cultivo, la cual va afectar la producción de alimentos.

El segundo sector que se incluye en el prototipo es llamado recurso forestal, y representa el proceso de tala con el fin de obtener madera para combustible o como materia prima. El uso como materia prima no fue caracterizado en el modelo, pero el uso como combustible sí, y es el que afectará el sector energía. Se considera que una parte de la madera se obtiene cuando se transforma la tierra forestal en tierra de cultivo, y otra parte se obtiene de bosques maderables normales. Existe una tasa de explotación de madera por persona para la madera extraída de los bosques maderables y se calcula la extracción de madera de los bosques transformados, y toda la madera extraída se divide en madera para combustible y materia prima mediante una tasa. La madera para combustible es tenida en cuenta en el sector energía, donde agrega energía al sistema, afectando nivel llamado recursos renovables. Esta energía producida a partir de la madera produce emisiones de gases invernadero que se suman a las producidas por combustibles fósiles.

El último sector agregado es el correspondiente al nivel económico. Se creó con el fin de registrar el comportamiento general de las actividades productivas, y como regulador del proceso de transición demográfica. Consiste en un balance de ingresos y egresos, que dependen de las

actividades productivas. Se consideran ingresos las actividades consideradas un servicio prestado o un bien vendido y en este caso son: El consumo de alimento, la utilización de madera como recurso, la utilización de madera como combustible, el reciclaje y el consumo de energía producto de combustibles fósiles. Se consideran egresos las actividades que implican producción de los bienes y servicios, ya que en esas actividades es que se invierte, se consideran costos de producción, por ejemplo: Reclamación de tierras forestales y llanuras baldías, el consumo de recurso hídrico para los humanos y para la agricultura, la explotación de la madera y la extracción de los recursos no renovables y la producción de alimentos. En ambos casos hay la necesidad de usar parámetros para transformar los valores de las diversas actividades en unidades económicas. La dinámica es muy simple, los ingresos suman al nivel y los egresos restan. Hay una mejora en el nivel económico cuando las actividades productivas están dando ganancia, o sea se gana más de lo que se invierte en dichas actividades. Es importante aclarar que las unidades usadas en el nivel económico son unidades económicas abstractas pues se quería evitar un análisis monetario fuera del alcance de los conocimientos de los modeladores.

Teniendo en cuenta los cambios producidos en el modelo se puede concluir que la representación del modelo se hace más consecuente con la realidad interrelacionada del fenómeno del cambio global, aunque aún le hace falta tener en cuenta varias interrelaciones entre los factores. El prototipo resulta más complejo y profundo que el primero, y da sus primeros pasos para alejarse de la concepción de la gente del común con respecto a la problemática.

### **8.3. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS**

El diagrama de Influencias del segundo prototipo es el siguiente:

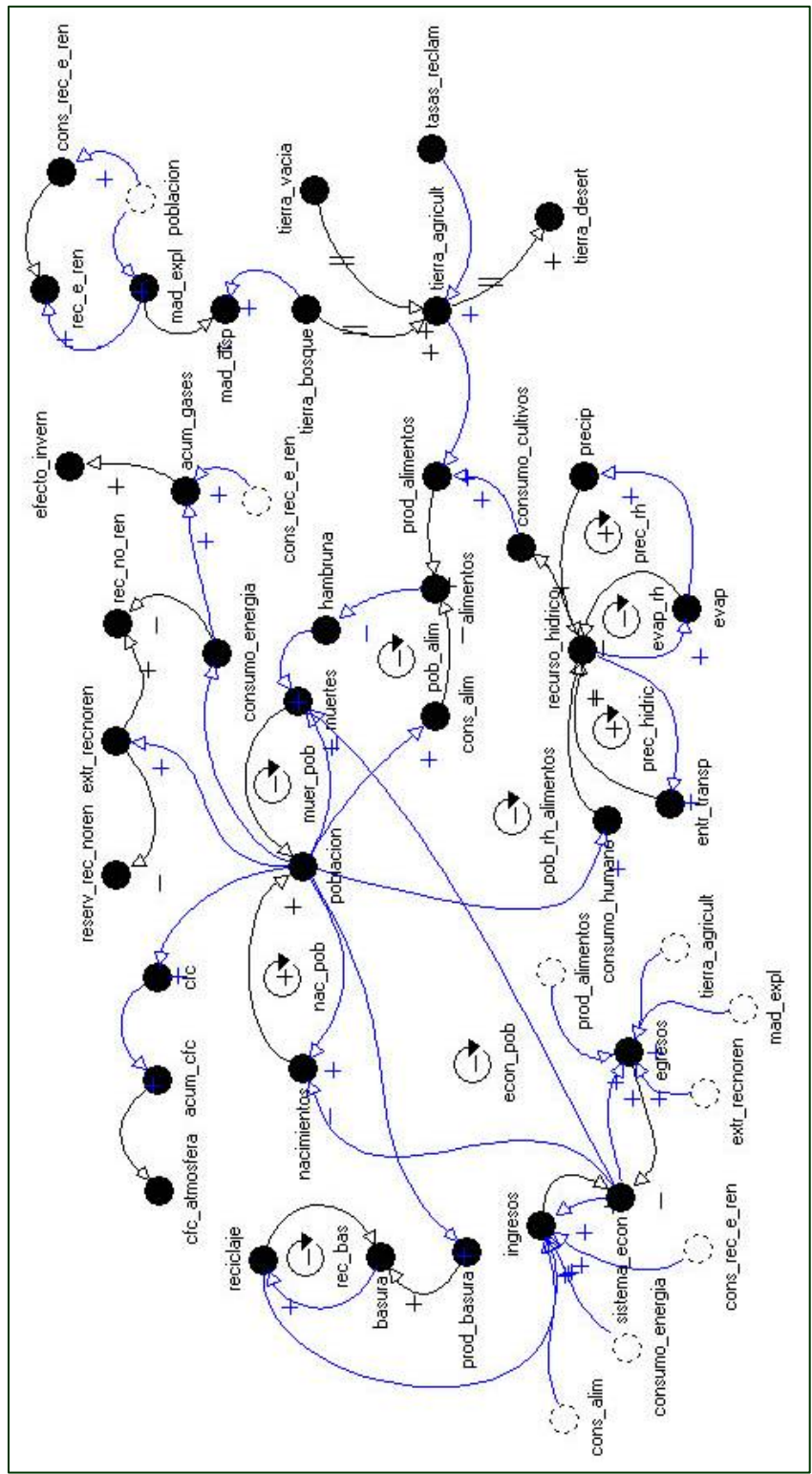


Figura N° 20: Diagrama de Influencias del Segundo Prototipo

#### 8.4. DIAGRAMA FLUJO-NIVEL

Se expondrán los cambios más significativos realizados al modelo, y para poder mostrarlos en este apartado, se dividió el diagrama en sectores, los cuales se verán a continuación:

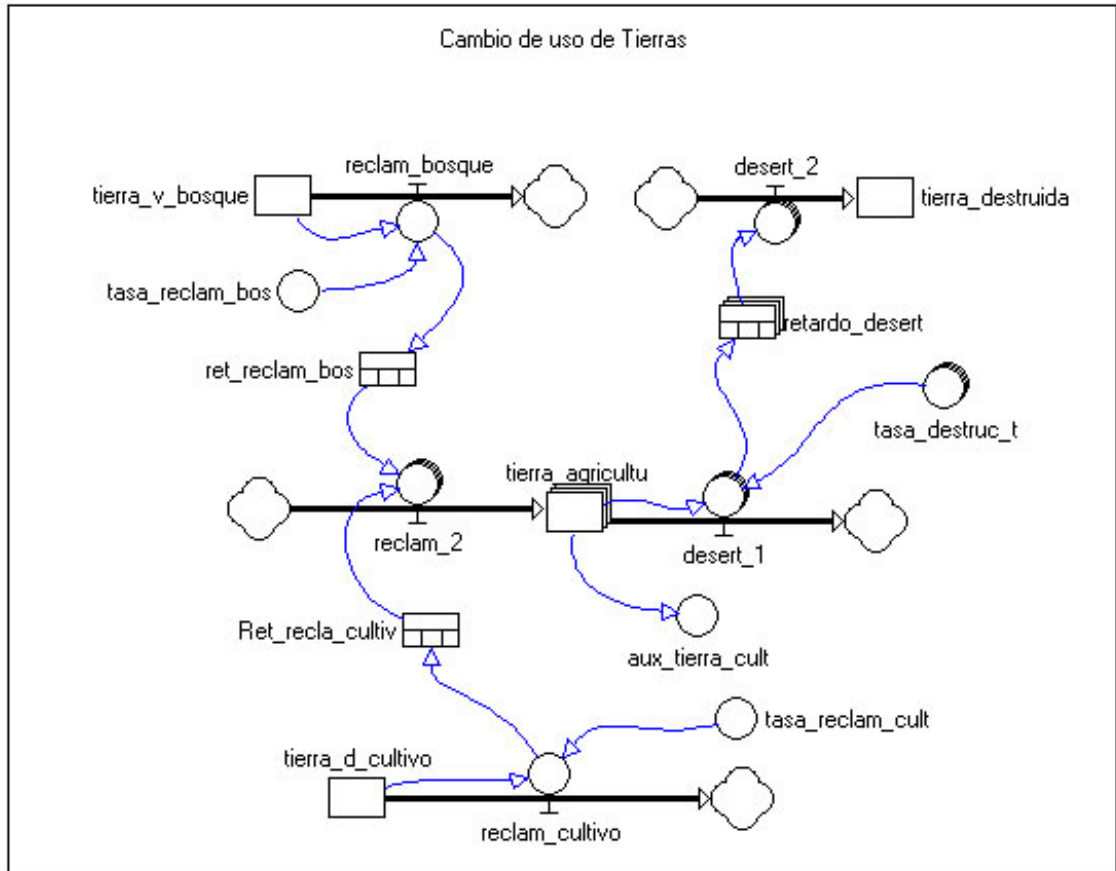


Figura N° 21: Sector Cambio de Uso de Tierras

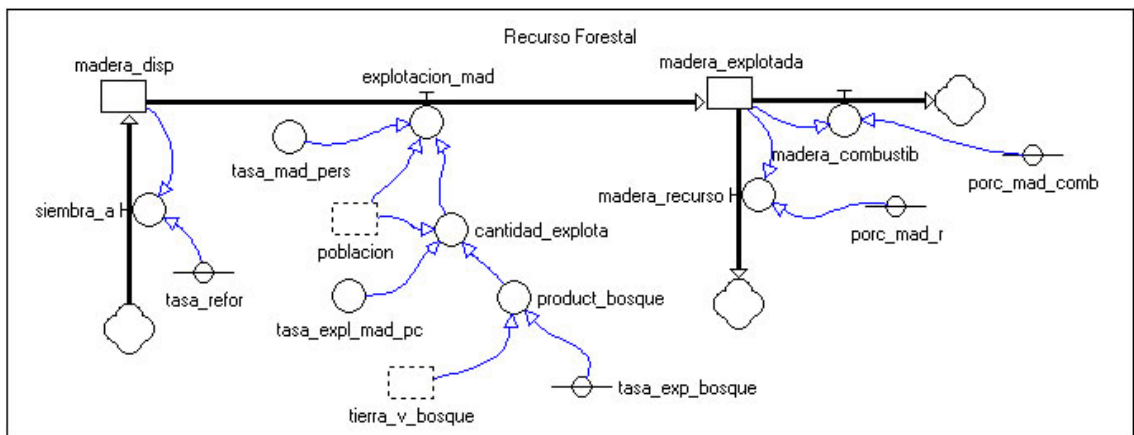


Figura N° 22: Sector Recurso Forestal

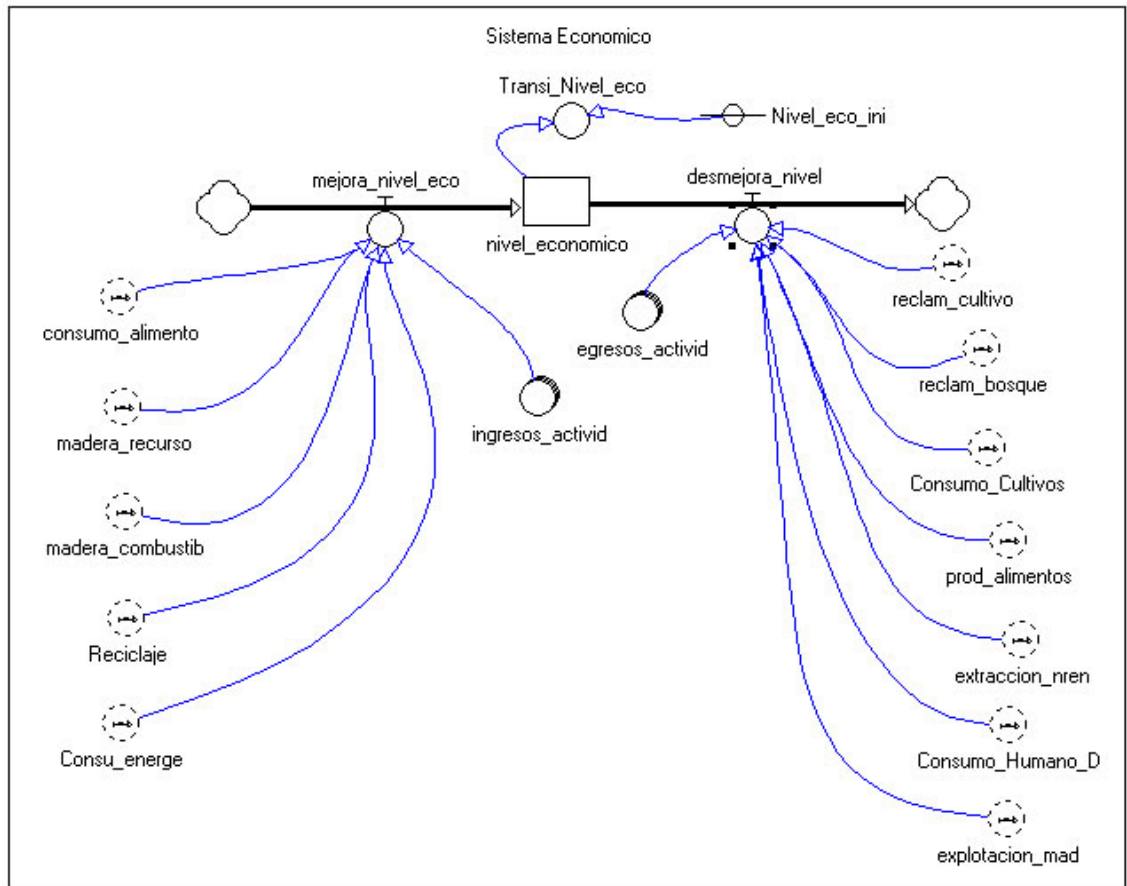


Figura N° 23: Sector Nivel Económico

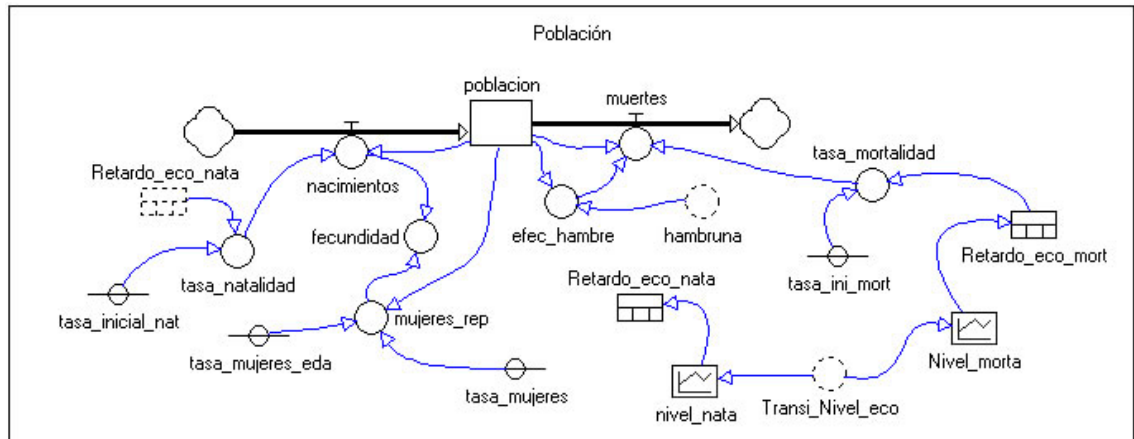


Figura N° 24: Sector Población

Los sectores incluidos son los que se acaban de incluir en el modelo, y el sector población que tuvo un cambio grande en su estructura. Para ver los cambios realizados a otros sectores, remítase al anexo correspondiente al segundo prototipo.

### 8.5. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS

La definición de los elementos que constituyen el modelo se presenta a continuación, junto con una breve descripción complementaria a lo expuesto en la caracterización en prosa para cada uno y una descripción de las unidades en que se mide la correspondiente magnitud. En este caso se incluyeron los elementos nuevos o que cambian de definición con respecto al primer prototipo.

Nombre.	Definición.	Descripción.	Unidad De Medida.	Tipo De Elemento
Consumo_Cultivos	Aguapor_hectarea * aux_tierra_cult	Agua usada en la producción de cultivos.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Consumo_Humano_D	Rata_Consumo_Persona * poblacion	Agua usada para el consumo humano.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Evaporacion	prop_evapor * Recurso_Hidrico	Cantidad de agua que se pierde por evaporación.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Nivel_eco_ini	1000000	Cantidad de nivel económico inicial.		Parámetro
Nivel_morta	Ver al final de la tabla	Relación entre el nivel económico y la tasa de mortalidad.		Tabla
Ret_recla_cultiv	RETARDO(reclam_cultivo,1,1, 0)	Retardo en el proceso de reclamar la tierras de cultivo y que esten preparadas para cultivar.		Retardo
Retardo_eco_mort	RETARDO(nivel_morta,10, 3,1)	Retardo o tiempo que demora en que se refleje el impacto que tiene el nivel económico sobre la mortalidad.		Retardo
Retardo_eco_nata	RETARDO(nivel_nata, 1, 1,1)	Retardo o tiempo que demora en que se refleje el impacto que tiene el nivel económico sobre la natalidad.		Retardo
Transi_Nivel_eco	(nivel_economico / Nivel_eco_ini) / 1e6	Variable que refleja la transición del nivel económico. Alzas y bajas que sufre el nivel económico con respecto al inicial.		Auxiliar
alimentos	2519470*10	Cantidad de alimentos disponibles para consumo por año	[Tm]	Nivel
aux_tierra_cult	tierra_agricultu[1] + tierra_agricultu[2]	Variable auxiliar que toma el valor del nivel de tierras utilizadas en la agricultura.	[Ha]	Auxiliar
cantidad_explota	IF(tasa_expl_mad_pc*poblacion<product_bosque,tasa_expl_mad_pc*poblacion,product_bosque)	Regulador que controla el paso de la madera explotada, ya sea para consumo por persona o como explotación de bosques.	[m <sup>3</sup> ]	Auxiliar
cons_cult_simp	(1713.7217*Consumo_Cultivos) / (1E9)	Variable que se usa para la calibración del valor que se obtiene del consumo de cultivos para producción de alimentos.	[Tm]	Auxiliar
cons_recrenov	prod_recrenov	Cantidad de recursos que se	[Tm. Equiv. Pet]	Flujo

		consumen al año. Se asume que es igual para este prototipo		
desert_1(2)	tierra_agricultu * tasa_destruc_t	Cantidad de tierra que se va destruyendo debido al uso de las mismas para la producción de cultivos.	[Ha]	Flujo
desert_2	retardo_desert[1] + retardo_desert[2]	Cantidad de tierra desertizada que entra al año.	[Ha]	Flujo
desmejora_nivel	Ver al final de la Tabla.	Desmejoramiento en el nivel económico.		Flujo
efec_hambre	if(hambruna>0,1 0/1000*poblacion, 0)	Variable que actua sobre las muertes, aumentandolas en caso de que no hayan suficientes alimentos para la población.		Auxiliar
egresos_activid	[3,5.6*7.11,0,0, 2,2,116]	Egresos debido a la producción de alimentos, extracción de recursos no renovables, consumo humano de agua, consumo de cultivos, explotación de madera y reclamacion de bosques y llanuras.		Auxiliar
entrada_agua	(Recurso_Hidrico * transpiracion) + precipitaciones	Cantidad de agua que entra debido a las lluvias y al goteo.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
explotacion_mad d	cantidad_explota + (tasa_mad_pers * poblacion)	Cantidad de madera explotada.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
extraccion_nren	Población * tasa_extraccion * 1000	Producción de combustibles al año. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo.	[Tm. Equiv. Petroleo]	Flujo
fecundidad	(nacimientos / mujeres_rep) * 1000	Numero de Hijos por mujer en edad reproductiva sobre el total de la población. Proporción de nacimientos más adecuada para el estudio de los procesos demográficos.		Auxiliar
hambruna	IF(alimentos >= (consu_pers * poblacion),0,1)	Indicador de hambre por persona. Indica cuando no hay suficientes alimentos para alimentar toda la población como se requiere.	[Tm/perso na]	Auxiliar
ingresos_activid	[1,500,200,0.5, 50*7.11]	Ingresos respectivos que se tienen por consumo de alimentos, consumo de		Auxiliar

		madera como recurso, consumo de madera como combustible, reciclaje y consumo de energía		
Madera _combustib	madera_explotad * porc_mad_comb	Extracción de madera (ya explotada y lista para usar) como combustible.		Flujo
madera_disp	4467533000/3 * 12	Cantidad de madera disponible.	[m <sup>3</sup> ]	Nivel
madera_explota da	0	Cantidad de madera explotada en el mundo cada año.	[m <sup>3</sup> ]	Nivel
madera_recurso	madera_explotad * porc_mad_r	Extracción de madera (ya explotada y lista para usar) como recurso.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
Mejora nivel_eco	Ver al final de la tabla.	Mejoramiento en el alza del nivel económico.		Flujo
muerres	(tasa_mortalida d*poblacion) / 1000 + efec_hambre	Cantidad de muertes de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad.	[Miles de Personas]	Flujo
mujeres_rep	tasa_mujeres * población * tasa_mujeres _eda	Cantidad de mujeres en edad reproductiva en el mundo.	[Miles de personas]	Auxiliar
nivel_economic o	1000000	Nivel económico debido a los ingresos y egresos en la producción y consumo de recursos, entre otros factores.		Nivel
nivel_nata	Ver al final de la tabla.	Relación entre el nivel económico y la tasa de natalidad.		Tabla
porc_mad_com b	0.40	Porcentaje de la madera total explotada utilizada como combustible.		Parámetr o
porc_mad_r	0.6	Porcentaje de la madera total explotada utilizada como recurso.		Parámetr o
precipitaciones	Evaporacion	Cantidad de agua que entra al nivel debido a las precipitaciones por año.	[m <sup>3</sup> ]	Auxiliar
prod_alimentos	cons_cult_simp	Cantidad de alimentos producidos en un año.	[Tm]	Flujo
prod_recrenov	madera_combu stib * valor_energ_ma d	Cantidad de recursos renovables debido al CO2 que libera la madera como combustible.	[Tm. Equiv. Pet]	Flujo
product_bosque	tierra_v_bosque * tasa_exp_bosqu e	Porcentaje o cantidad de madera extraída de los bosques.	[m <sup>3</sup> ]	Auxiliar

prop_evapor	0.02029	Proporción de agua que sale del sistema por evaporación. Puede volver a través de lluvias.		Auxiliar
rec_E_renov	0	Combustibles renovables acumulados. Se homogenizó utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo.	[Tm. equiv. Petroleo]	Nivel
reclam_2	[ret_reclam_bos ,Ret_recla_cultiv ]	Cantidad de tierra que se convierte en tierra de cultivo debido a la reclamación de bosques y llanuras.	[Ha]	Flujo
reclam_bosque	tierra_v_bosque * tasa_reclam_bos	Cantidad de tierras vírgenes que se utilizan para el cultivo. Reclamación de tierras.	[Ha]	Flujo
reclam_cultivo	tasa_reclam_cult * tierra_d_cultivo	Cantidad de tierras propias para cultivar que se reclaman al año.		Flujo
ret_reclam_bos	RETARDO(reclam_bosque,2, 1, 0)	Retardo en el proceso de reclamar las tierras vírgenes y que estén preparadas para cultivar.		Retardo
retardo_desert	RETARDO(desert_1, 4, 1, 0)	Retardo que refleja el proceso de desertización de la tierra.		Retardo
siembra_a	tasa_refor * maderas_disp	Cantidad de árboles sembrados anualmente.	[m <sup>3</sup> ]	Flujo
tasa_destruc_t	[0.005,0.001]	Porcentaje de tierras que se van deteriorando o destruyendo al año, debido a la agricultura.		Auxiliar
tasa_em_biomas	0.1719	Tasa de emisión de gases debido a la madera.		Auxiliar
tasa_exp_bosque	25	Tasa de explotación de la madera existente en las tierras vírgenes.	[m <sup>3</sup> /Ha]	Parámetro
tasa_expl_mad_pc	1	Cantidad de madera explotada necesaria por persona.		Auxiliar
tasa_ini_mort	19.7	Tasa de mortalidad inicial, el valor que tendría al inicio de la simulación suponiendo condiciones económicas estables.		Parámetro
tasa_inicial_nat	37.5	Tasa de Natalidad inicial, el valor que tendría al inicio de la simulación suponiendo condiciones económicas estables.		Parámetro

		estables.		
tasa_mad_pers	100	Porcentaje de madera necesaria o consumida por persona.		Auxiliar
tasa_mortalidad	Retardo_eco_mort * tasa_ini_mort	Tasa de mortalidad calculada a partir de la influencia del sistema económico. Representa muertes sobre la población total.		Auxiliar
tasa_mujeres	0.4988	Proporción de mujeres en la población.		Parámetro
tasa_mujeres_edad	1/2	Proporción de mujeres en edad reproductiva (15-49 años).		Parámetro
tasa_natalidad	Retardo_eco_nata * tasa_inicial_nat	Tasa de Natalidad calculada a partir de la influencia del sistema económico. Representa nacimientos sobre población total.		Auxiliar
tasa_reclam_bos	0.01	Porcentaje que indica la cantidad de tierra virgen que se reclama para la producción de cultivos.		Auxiliar
tasa_reclam_cult	0.03	Porcentaje que indica la cantidad de tierra de cultivo o apta para cultivar que se reclama anualmente.		Auxiliar
tasa_refor	0.025	Indicador de la tasa de reforestación realizada anualmente.		Parámetro
tierra_agricultu	[4467533000 * 0.1 , 4467533000 * 0.9]	Nivel de tierras utilizadas para la agricultura.	[Ha]	Nivel
tierra_d_cultivo	4467533000	Cantidad de tierras aptas para la agricultura. Llanuras y tierras no boscosas.	[Ha]	Nivel
tierra_destruida	4467533000/2	Acumulación de tierra que viene de un proceso de desertización debido al cambio de uso de la tierra.	[Ha]	Nivel
tierra_v_bosque	4467533000/3	Cantidad de tierra virgen o bosques que no han sido adaptados para la agricultura.	[Ha]	Nivel
transp_inicial	0.005	Tasa usada como valor inicial en el porcentaje definido para la cantidad de goteo.		Parámetro
transpiracion	transp_inicial	Porcentaje que define la cantidad de goteo.		Auxiliar
valor_energ_mad	0.228626187	Equivalente de energía de la madera quemada.		Parámetro

Tabla N° 5: Definición de los elementos del segundo prototipo

Definición de Nivel\_morta:

INTSPLINE(2,1,100,1,0.9378536,0.7096585,0.195,0.1833333,0.1716666,0.1599999,  
0.1483332,0.1366665,0.1249998,0.1133331,0.1016664,0.0899997)

Definición de desmejora\_nivel:

egresos\_activid[1]\*prod\_alimentos+egresos\_activid[2]\*extraccion\_nren+egresos\_activid[3] \*  
Consumo\_Humano\_D+egresos\_activid[4]\*Consumo\_Cultivos+egresos\_activid[5] \*  
reclam\_bosque+egresos\_activid[6]\*reclam\_cultivo+egresos\_activid[7]\*explotacion\_mad

Definición de Mejora\_nivel\_eco:

ingresos\_activid[1]\*consumo\_alimento+ingresos\_activid[2]\*madera\_recurso+ingresos\_activid[3]\*m  
adera\_combustib+ingresos\_activid[4]\*Reciclaje+ingresos\_activid[5]\*Consu\_energe

Definición de nivel\_nata:

INTSPLINE(2,1,100,1,0.9665816,0.8,0.36799564,0.35635964,0.34472364,0.33308764,0.32145164  
,0.30981564,0.29817964,0.28654364,0.27490764,0.26327164,0.25163564,0.23999964,0.2399996  
4)

## 8.6. VALIDACIÓN DEL MODELO

En el análisis de sensibilidad de este prototipo se seguirá teniendo en cuenta los mismos tres escenarios descritos en el prototipo I, pues como se mencionó en algún apartado anterior, la población y su interacción social con los demás subsistemas son el eje principal para el análisis de este proyecto. Los tres escenarios son:

- **Por Defecto:** Donde tanto la tasa de natalidad y la de mortalidad presentan descensos acorde con la teoría de la transición demográfica. En la figura N° 24 es la trayectoria de color rojo.
- **Población en Crecimiento:** Este escenario muestra un crecimiento constante en la población, sin encontrar una tasa de reemplazo. En la figura N° 24 es la trayectoria de color azul.
- **Descenso Rápido en la Fecundidad:** En este escenario se presenta un ambiente donde la tasa de fecundidad baja mucho más rápido de lo debido manteniendo un descenso normal en la tasa de mortalidad. En la figura N° 24 es la trayectoria de color morado.

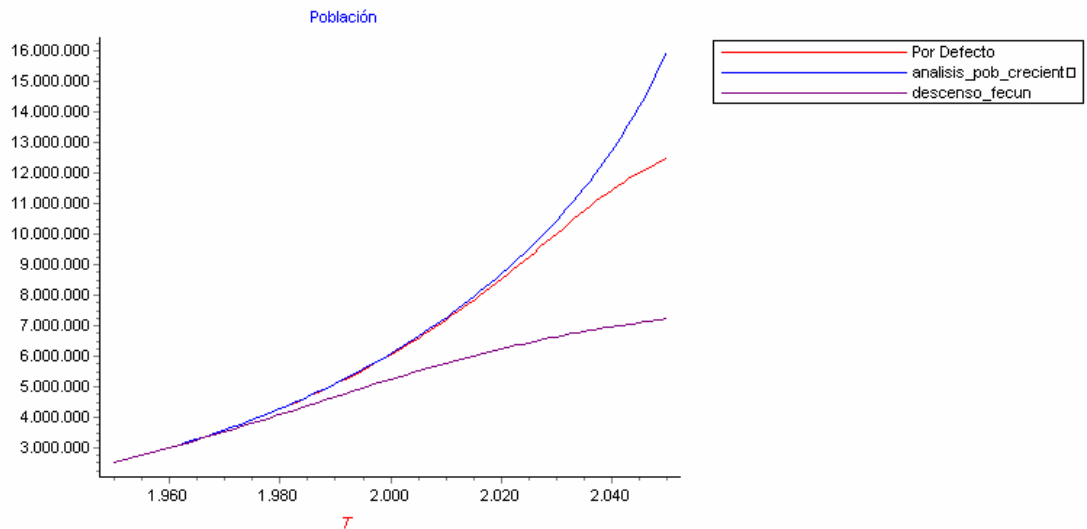


Figura N° 24: Población bajo diferentes escenarios para el prototipo II.

Las variables que se considerarán para este análisis serán las relacionadas con los nuevos subsistemas incluidos para este prototipo:

1. Nivel económico.
2. Explotación de madera.

Solo se tuvieron en cuenta estas dos variables debido a que el prototipo II no difiere mucho en cuanto a la estructura con respecto al prototipo I y por lo tanto sería inoficioso analizar subsistemas como alimentos o recursos no renovables, pues su comportamiento seguiría siendo exactamente el mismo.

### 8.6.1. Análisis del Nivel Económico

Esta variable presenta un comportamiento similar al de los recursos no renovables, esto debido a que la población al ir en aumento no tiene ningún regulador que detenga el también creciente aumento del nivel económico poblacional. Las tres trayectorias son claras y se observa como a mayor cantidad de población mayor es el nivel económico.

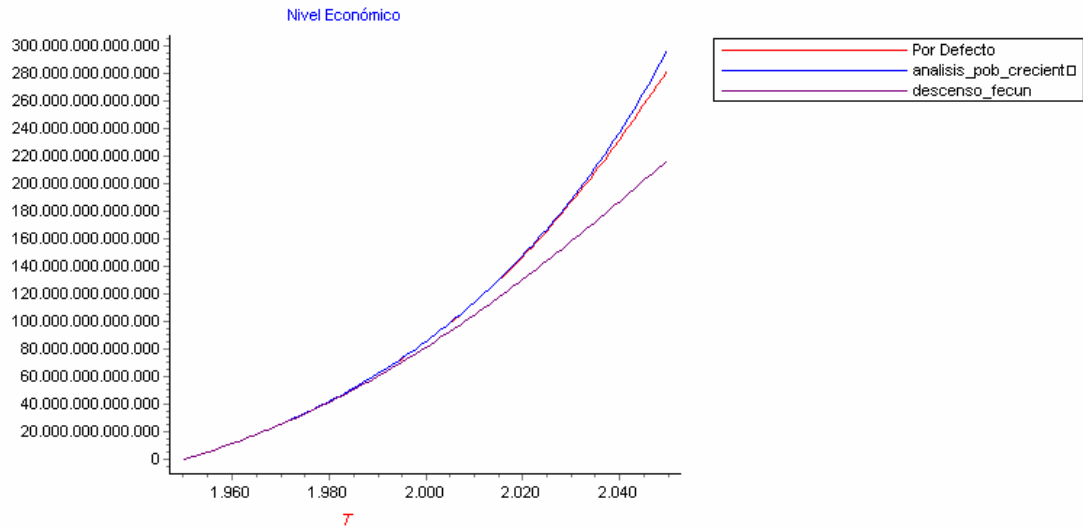


Figura N° 25: Nivel económico en la población.

### 8.6.2. Análisis de la Explotación de Madera

Las tres trayectorias graficadas muestran que tanto es el aumento de la población en cada escenario, pues la explotación de madera esta ligada directamente con el crecimiento poblacional (al igual que la mayoría de variables analizadas).

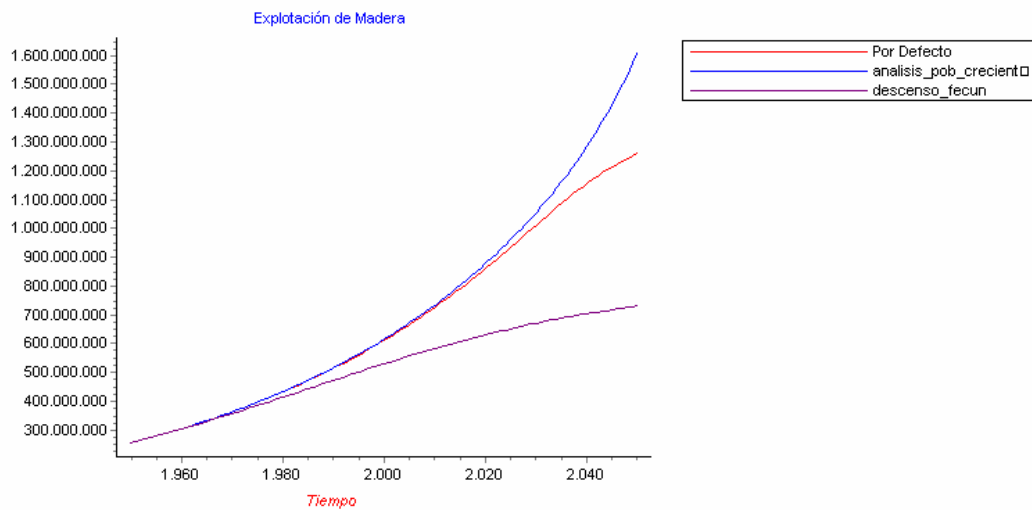


Figura N° 26: Cantidad de madera explotada.

## 9. TERCER PROTOTIPO

### 9.1. RECOMENDACIONES A IMPLEMENTAR EN EL TERCER PROTOTIPO

El proceso de creación de prototipos planteado exige que cada prototipo aumente los factores representados en el modelo. Para este prototipo se consideró implementar las fuerzas motrices del diagrama de Aspen que hacen falta, además de hacer unas modificaciones conceptuales a algunos sectores ya representados. Después de revisar los comportamientos arrojados por el prototipo anterior y de revisar la documentación acerca de los fenómenos, se concluyó implementar los siguientes cambios:

Realizar una mejora en el subsistema de población, implementado el modelo utilizando el parámetro fecundidad en lugar de la tasa de natalidad. Esto debido a que la fecundidad es un indicador más completo de la dinámica poblacional, ya que incluye información acerca de la distribución de género y edad. Además en el prototipo anterior fue encontrado un error en la implementación del retardo entre el nivel económico y el valor de la tasa de natalidad y mortalidad; en el nuevo prototipo no habrá tasa de natalidad para calcular los nacimientos, pero la forma de influir el nivel económico en la fecundidad es similar, así que se debe implementar el cambio.

Se debe implementar el cálculo de externalidades en el subsistema económico. Las externalidades tienen valor educativo a la hora de analizar la producción sin límites y las limitaciones del sistema económico actual. Ellas representan esos costos que la gente no tiene que pagar por producir o consumir los bienes y servicios. De esta forma se puede monitorear el valor a futuro de los bienes y servicios considerados relevantes por nuestra sociedad.

Es necesario implementar el subsistema de expectativas y preferencias el fondo de experiencias y conocimientos. Gracias al conocimiento obtenido mediante la revisión de los textos guías<sup>86</sup> y a lo indicado por el psicólogo que poya el proyecto, se ha podido trabajar en la construcción de un submodelo que representa las expectativas y preferencias de la gente, así como el fondo de experiencia y conocimiento. En este prototipo se presenta por primera vez este submodelo, el cual fue difícil de construir al no existir representaciones matemáticas del fenómeno.

Dentro del bloque de Aspen de recursos y tecnología hasta el momento no se ha implementado la influencia de esta sobre el resto de factores del modelo. En este prototipo es necesario implantar este factor y relacionarlo con los elementos pertinentes. Una propuesta de ciencia y tecnología modelada en D.S. se había presentado en el trabajo "La Relación entre los Sistemas Naturales Físicos y los Sistemas Humanos: El Diagrama de Aspen"<sup>87</sup>, los autores del presente proyecto habiendo sido también de entre los autores del trabajo mencionado. Esa propuesta fue revisada para ser incluida en el estudio y se presenta en este prototipo.

Es importante representar la influencia del sistema político en el sistema. Se diseñó un subsistema que representa la ejecución de políticas y los efectos de estas en el fenómeno.

### 9.2. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA

Continuando con el proceso de modelado se incluyeron nuevos factores en el modelo, además de la influencia de estos sobre los ya existentes. Se explicará a continuación los sectores nuevos y su

<sup>86</sup> Ludevid, op. cit. y *Pathways of Understanding*.

<sup>87</sup> GÉLVEZ Sergio, FONSECA Gustavo, MURILLO Oscar. (2004) "Relación entre los Sistemas Humanos y los Sistemas Físicos Naturales: El Diagrama de Aspen" Ponencia presentada en el II Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. Santa Marta. Colombia.

funcionamiento, a la vez que se explican sus influencias sobre los ya incluidos en el prototipo anterior.

El primer cambio incluido en el tercer prototipo fue la mejora a la representación de la población, que consistió en el cambio del cálculo de los nacimientos a partir de una tasa de natalidad a uno realizado a partir de la tasa de fecundidad. Se considera una mejora porque primero la tasa de fecundidad encierra más información que la tasa de natalidad y segundo es más adecuada para la propuesta del modelo al estar más relacionada con el nivel económico.

La tasa de fecundidad lleva implícitamente información acerca de la distribución de género y edades debido a la forma en la que es calculada<sup>88</sup>, ya que se tiene en cuenta el número de mujeres en edad reproductiva (15-49). Además existen dos tipos de tasas de fecundidad, la fecundidad general y la fecundidad total; la definición mostrada en el apartado de población en el marco teórico<sup>89</sup> es la de la tasa de fecundidad general. La fecundidad total se calcula a partir de las tasas de fecundidad específicas por grupos de edades, y representa la cantidad de hijos tenidos por una mujer durante la duración de edad reproductiva: De esta forma se constituye en un mejor indicador de la dinámica poblacional, al tener en cuenta el papel de gestación de la mujer<sup>90</sup>. Teniendo en cuenta la tasa de natalidad, si existen  $n$  individuos el crecimiento demográfico va a ser  $n * \text{tasa de natalidad}$ , sin importar como esté conformado el grupo. La tasa de fecundidad puede representar mejor situaciones en que el número de mujeres sea limitado, y provee una mejor explicación de los cambios en la distribución de edades y sus consecuencias para la dinámica poblacional<sup>91</sup>.

La principal razón para incluir la tasa de fecundidad como generador de nacimientos es su relación con el nivel de vida. La seguridad en cuanto a la alimentación, el control de enfermedades y en general todas las situaciones que mejoran la confianza con respecto a la vida hacen disminuir el número de hijos por mujer. De esta forma es conceptualmente más válido decir que al aumentar el nivel económico, considerado en este caso un indicador del nivel de vida, disminuye la tasa de fecundidad; lo es pues es semejante a decir que el número de hijos por mujer disminuye, cosa que no sucede al tener en cuenta la natalidad.

El número de nacimientos se calcula multiplicando la tasa de fecundidad por la población multiplicada por la proporción de mujeres en edad reproductiva, obtenida multiplicando la población por la tasa de mujeres por la proporción de mujeres en edad reproductiva<sup>92</sup>. Para el cálculo de la tasa de fecundidad se tuvo en cuenta la vida promedio de una mujer<sup>93</sup> con el que se corrige el valor de la tasa de fecundidad total para poder calcular el valor por un año.

La tasa de fecundidad es afectada por el nivel económico mediante un multiplicador que disminuye el valor de ésta, partiendo de un valor inicial obtenido de las estadísticas<sup>94</sup>, emulando el fenómeno de descenso contemplado en la teoría de la transición demográfica. El efecto del nivel económico es afectado por un retardo, que representa la inercia poblacional. De esta forma el nivel económico afecta la tasa de fecundidad, al igual que a la tasa de mortalidad, produciendo un descenso gradual en la misma. La fecundidad y la mortalidad gobiernan los nacimientos y las muertes, configurando la dinámica poblacional. La tasa de natalidad se calcula como un indicador.

---

<sup>88</sup> Ver el apartado sobre población del marco teórico, 6.3.1.

<sup>89</sup> *Ibid.*

<sup>90</sup> Extraído de la consulta a expertos. El Demógrafo fue especialmente enfático en manifestar la importancia de la tasa de fecundidad.

<sup>91</sup> *Ibid.*

<sup>92</sup> La tasa de mujeres es una constante reconocida en demografía y se mide contando los niños varones al nacer. Es un valor constante para la raza humana. La proporción de las mujeres en edad reproductiva se infiere estadísticamente. Ambas tasas nos fueron señaladas por el experto.

<sup>93</sup> Una vez más, por indicación del experto.

<sup>94</sup> World Population Prospect. <http://www.unpopulation.org/>.

El prototipo incluye además el cálculo de las externalidades. Una definición simple de externalidad sería el costo de una actividad que no se ve reflejada en el precio de la misma, en este caso las actividades productivas. Para el modelo se calcularon externalidades producidas por la acumulación de basura, por la acumulación de gases invernadero y halocarbonos, por la pérdida de tierras de cultivo y vírgenes, por la contaminación del recurso hídrico y por el agotamiento del mismo, y por la explotación de los recursos no renovables. El cálculo de las externalidades se hizo de la forma similar para cada factor, estableciendo un costo en cada caso y multiplicando por un indicador la actividad. El costo está asociado al perjuicio que puede causar la actividad al ambiente o las a personas, caso de las basuras, emisión de gases halocarbonos e invernaderos y cambio de uso de las tierras, o a la no disponibilidad futura de un recurso, caso del recurso hídrico y los recursos no renovables; en el caso de los recursos no renovables se tuvo en cuenta un recargo a ese costo por extraer un recurso cada vez más escaso. Debido a la naturaleza de la situación a modelar hubo necesidad de definir arbitrariamente estos valores, ya que es muy difícil estimarlos, sobrepasando ampliamente esta labor los conocimientos de los modeladores en el área. Para este fin se utilizó el concepto de unidad económica abstracta, de manera similar a como se usó en la definición del nivel económico. Las externalidades en este modelo juegan el papel de indicador, ya que muestran el comportamiento de otros factores reflejado en ellas pero no afectan otros factores. Esto se debe a que el efecto de las actividades productivas ya está representado directamente en el caso en el que se pudo representar, y las externalidades como tales no influyen en ningún proceso realmente, al menos en el status quo. El sistema económico y político actual no las tiene en cuenta; si los sistemas políticos y económicos tienen en cuenta el efecto de una actividad nunca lo hacen como externalidad, como un costo que se debe tener en cuenta. En algunas teorías económicas, como la economía ambiental, el concepto se usa pero no es parte estructural, en otras, como la economía ecológica, se consideran directamente como un costo a tener en cuenta. El análisis de la influencia de las externalidades como concepto económico en las actividades productivas esta muy por encima de los alcances del proyecto.

En el prototipo se incluyen por primera vez la ciencia y la tecnología como factores influyentes en el fenómeno. Al ser la ciencia y tecnología dos factores difíciles de cuantificar, y habiendo pocas representaciones en modelos dinámicos de estas, fue necesario construir una representación, a manera de hipótesis, de las mismas de forma que sus comportamientos siguieran los de estos factores en la vida real y fueran útiles para los propósitos del modelo. Siendo parte de los objetivos la revisión del trabajo "La relación entre los sistemas humanos y los sistemas físicos naturales: el diagrama de Aspen", se partió de la representación de la ciencia y tecnología propuesta en este trabajo para la construcción del subsistema; se revisó y se hicieron cambios en la forma como estos afectan a los otros subsistemas. Los principios de los que se partió para la construcción de la representación fueron: Se requiere cierto nivel económico para la que la ciencia avance, a más ciencia la ciencia crece más (el ritmo puede diferir pero esto no se tuvo en cuenta directamente), la tecnología depende de la ciencia para crecer y el nivel de avance en el sentido de la profundidad de la tecnología siempre debe ser menor que el de la ciencia; el efecto de la ciencia y tecnología sobre los diversos elementos se considera en conjunto, pues ambas afectan los procesos, ya sea cambiando medios de producción o formas de hacer las cosas, o el conocimiento empleado por ellos y que los define. La influencia de las dos es combinada en un multiplicador que esta relacionado con los factores cuyo comportamiento es afectado por ellas, el cual se definió teniendo en cuenta que ellas no crecen indefinidamente. La influencia de estos factores afecta varios sectores: El de cambio de uso de la tierra, disminuyendo la destrucción de las tierras y la reclamación de nuevas al mejorar los métodos de explotación agrícola; en el recurso hídrico disminuye el consumo humano al mejorar los sistemas de distribución y sanitarios; en las basuras aumenta el reciclaje y disminuye la producción al mejorar las técnicas de disposición de basuras y la rentabilidad del reciclaje; en la acumulación de gases invernadero y halocarbonos mejorando los procesos productivos asociados; en la producción y consumo de los recursos no renovables mejorando los métodos de producción y disminuyendo los consumos debido a tecnología más eficientes; y en el recurso forestal al mejorar la explotación y el uso del recurso. También afecta a las expectativas y preferencias, relación que se explicará más adelante.

En el prototipo actual se implementó también el sistema político a la manera de la ejecución de políticas reguladoras. Debido a lo complejo que puede ser modelar un sistema político completo, se utilizaron las políticas en lugar de un modelo de sistema político general. Se asumieron tres tipos de políticas, que fueron modeladas por medio de niveles que representan la intensidad de aplicación de las mismas: Política ambiental, política de apoyo a la producción, y política de acción social. La política ambiental se encarga de preservar el ambiente, reducir la intensidad de las actividades que atacan el mismo, en lo que guarda parecido con las políticas ambientales actuales, orientadas a la mitigación. La política de apoyo a la producción aumenta las actividades productivas cuando hay descensos en el nivel económico. La política de acción social eleva actividades productivas relacionadas con lo social y disminuye la natalidad y mortalidad, así como disminuye el consumo suponiendo una repartición progresivamente más igualitaria de los recursos. La acción de las tres políticas se da al mismo tiempo, a veces oponiéndose una al efecto de la otra. A las políticas las afecta tanto el nivel económico como las expectativas de la gente.

Las expectativas y preferencias de la gente, así como el fondo de experiencia y comportamiento están representadas en este prototipo. No se encontró en la bibliografía consultada una representación en modelo dinámico de estas, luego se implementó una propuesta original para el proyecto. Para la caracterización de esta se contó con el apoyo de Camilo Rueda, Psicólogo, quien sentó las bases para el desarrollo del subsistema. Las características que debía tener la representación fueron: Influencia de los valores en la percepción de la realidad, valores dependientes de las características del status quo, influencia de la divulgación científica como principal influencia de la situación ambiental en la percepción y dependencia de la actitud de la percepción aunque no proporcional. Además se planteó la influencia de la ciencia y la tecnología en los retardos entre percepción y divulgación científica e información acerca de la situación ambiental<sup>95</sup>. El supuesto que permitió la determinación del sistema y su influencia fue que se tuvo en cuenta directamente solo la actitud hacia el ambiente. La influencia de las expectativas se ejerce mediante un multiplicador que hace bajar los consumos en los diversos factores. Se parte que el indicador que hace disparar la actitud ambiental es el aumento de los consumos y sus repercusiones en el sistema<sup>96</sup>. Por su parte el fondo de experiencias y conocimientos no fue modelado directamente, pero se representó mediante la estructura: Las actitudes se acumulan, emulando un fondo de experiencias de forma que si es relevante para los individuos el ambiente la acción sobre los consumos permanecerá, y para que deje de serlo, debe haber una acción que cause disminución en la actitud; este planteamiento está de acuerdo con lo expresado en el diagrama de Aspen para el fondo de experiencia y conocimiento. La influencia de las expectativas llega a muchos sectores del modelo, lo que se notará en el mapa de sectores, en el diagrama de influencias y en el modelo mismo.

Con la inclusión de los factores anteriormente descritos el prototipo representa elementos de toda la estructura mostrada en el diagrama de Aspen, además de completar lo que se considera un nivel de representación adecuado para los alcances del proyecto. A este prototipo se le aplicará el plan de pruebas previsto en la metodología, y se refinará para obtener el prototipo final.

### **9.3. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS**

Debido a lo complejo del diagrama de influencias y del tamaño que tiene, se incluyó en el archivo de evolución que acompaña el proyecto como un anexo.

### **9.4. DIAGRAMA FLUJO NIVEL**

---

<sup>95</sup> Como ya fue mencionado, se obró de acuerdo a las indicaciones del psicólogo que apoya el proyecto.

<sup>96</sup> Esto fue sugerido por el director del proyecto y resulta compatible con el planteamiento inicial.

Se expondrán los cambios más significativos realizados al modelo, y para poder mostrarlos en este apartado, se dividió el diagrama en sectores, los cuales se verán a continuación:

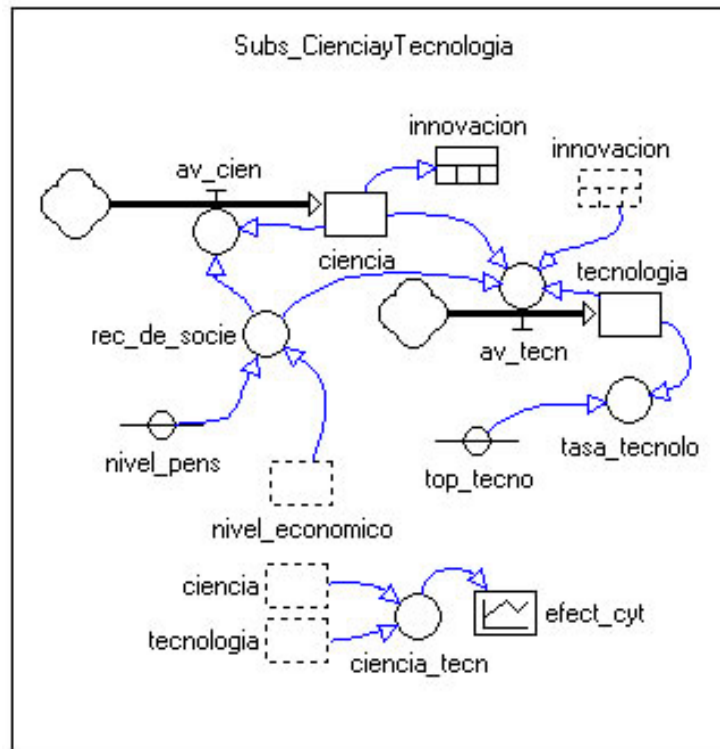


Figura N° 27: Sector Ciencia y Tecnología.

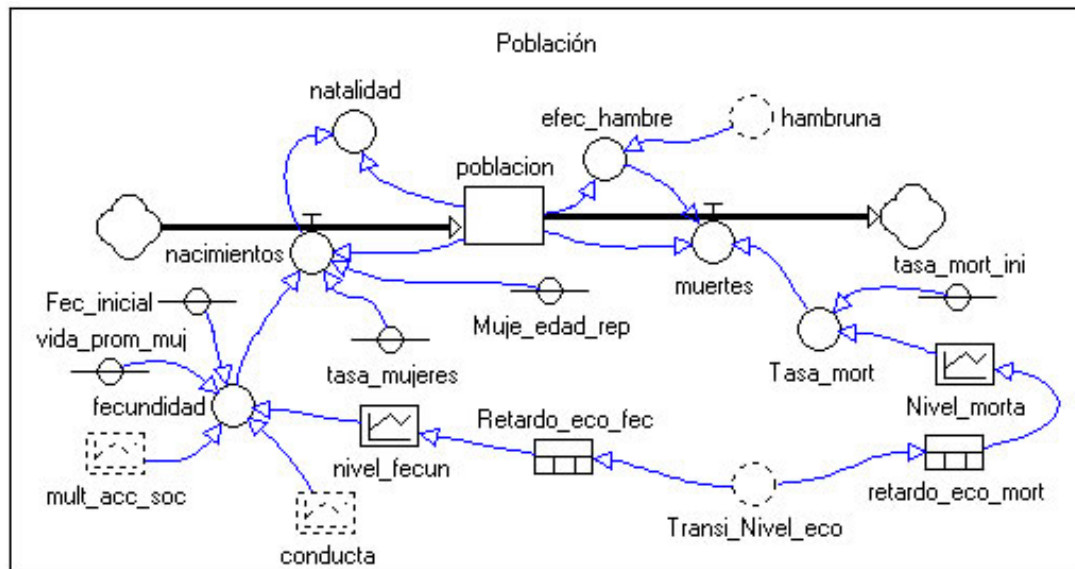


Figura N° 28: Sector Población

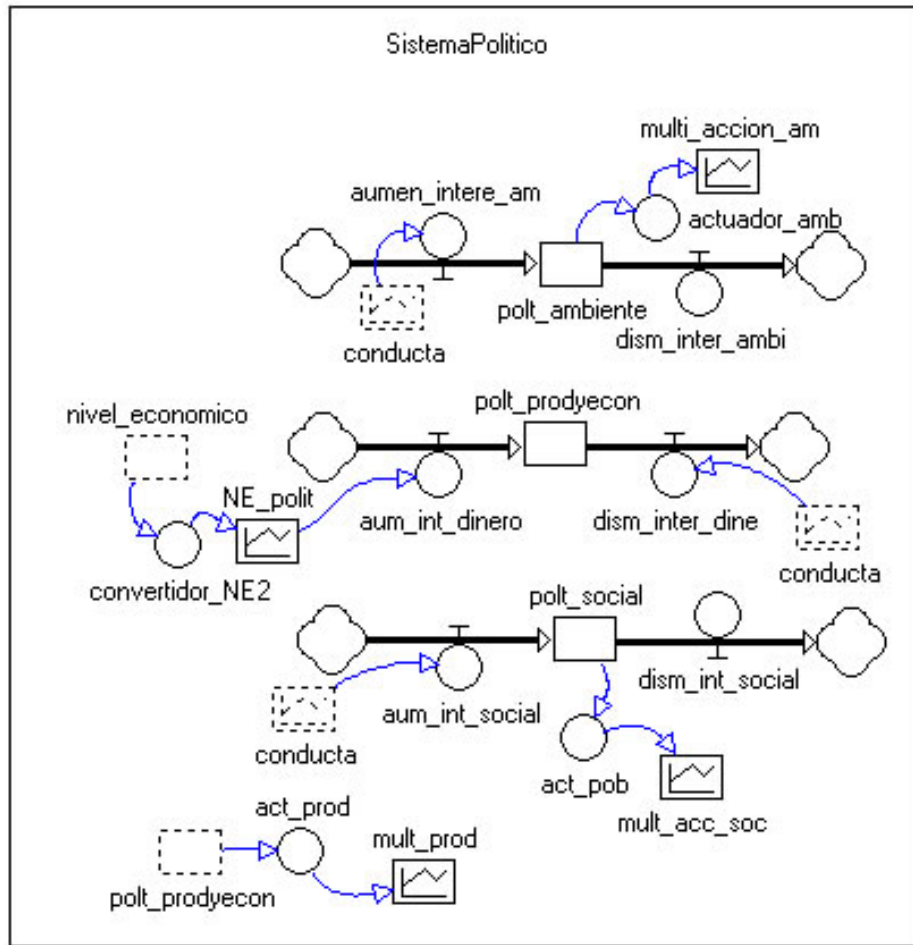


Figura N° 29: Sector Sistema Político

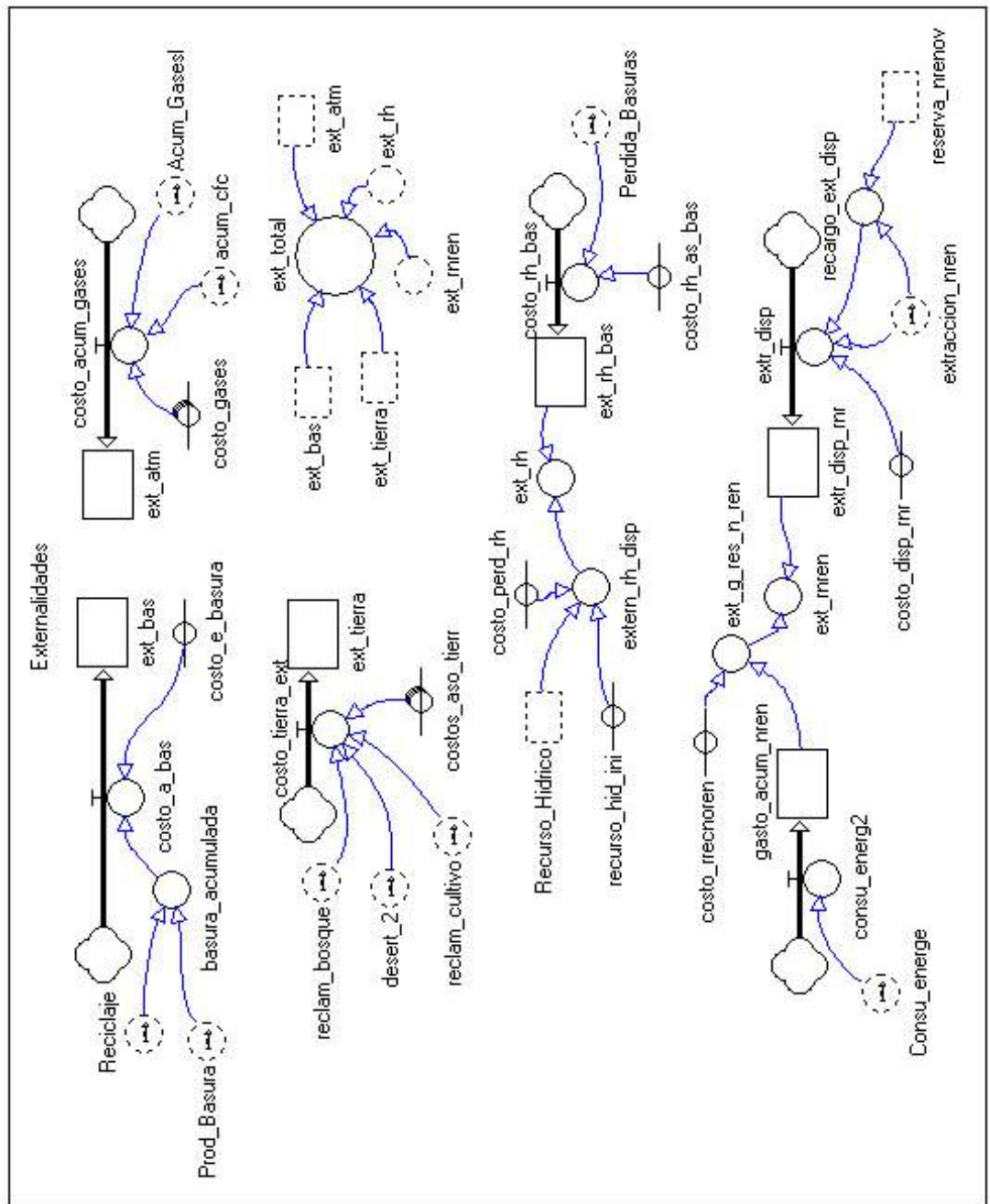


Figura N° 30: Sector Externalidades.

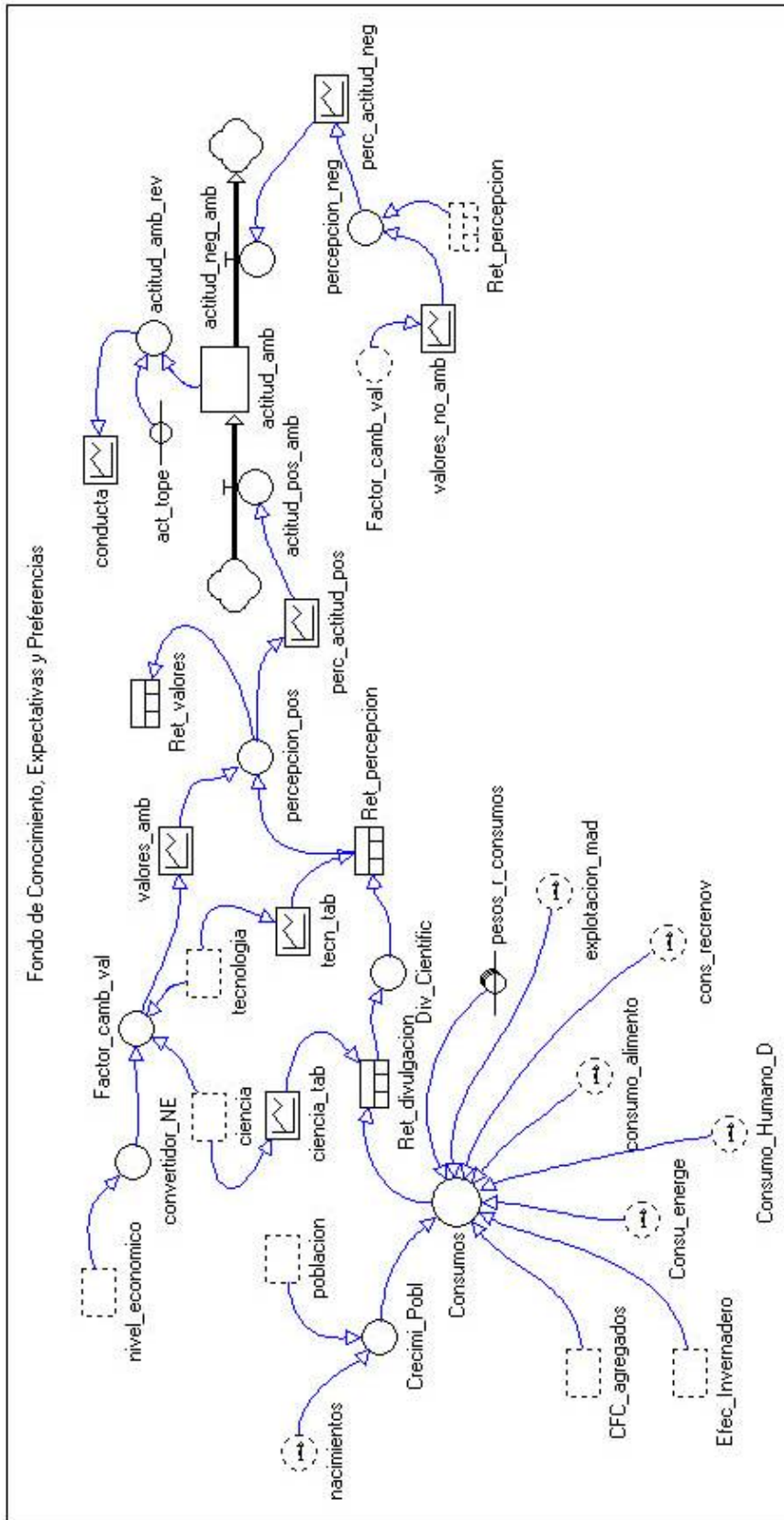


Figura N° 31: Sector Expectativas y Preferencias

Los sectores incluidos son los que se acaban de agregar al modelo, y el sector población que tuvo un cambio grande en su estructura. Para ver los cambios realizados a otros sectores, remítase al modelo incluido como anexo del prototipo.

### 9.5. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS

La definición de los elementos que constituyen el modelo se presenta a continuación, junto con una breve descripción complementaria a lo expuesto en la caracterización en prosa para cada uno y una descripción de las unidades en que se mide la correspondiente magnitud. En este caso se incluyeron los elementos nuevos o que cambian de definición con respecto al segundo prototipo.

<b>Nombre</b>	CFC
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$poblacion * CFC\_persona * conducta * efect\_cyt * (1 - multi\_accion\_am)$
<b>Descripción</b>	Cantidad de CFC que se produce anualmente [Tm]

<b>Nombre</b>	Consu_energe
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	$poblacion * Consu\_ener\_perso * 1000 * conducta * efect\_cyt * (1 - multi\_accion\_am)$
<b>Descripción</b>	Consumo de combustibles al año. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo. [Tm. Equiv. Petroleo]

<b>Nombre</b>	Consumo_Cultivos
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	$aguapor\_hectarea * aux\_tierra\_cult * (1 - multi\_accion\_am)$
<b>Descripción</b>	Agua usada en la producción de cultivos. [m3]

<b>Nombre</b>	Consumo_Humano_D
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	$Rata\_Consu\_Pers * poblacion * conducta * efect\_cyt * efec\_politica$
<b>Descripción</b>	Agua usada para el consumo humano. [m3]

<b>Nombre</b>	Consumos
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$(pesos\_r\_consumos[1] * Crecimi\_Pobl + pesos\_r\_consumos[2] * Efec\_Invernadero + pesos\_r\_consumos[3] * CFC\_agregados + pesos\_r\_consumos[4] * Consu\_energe + pesos\_r\_consumos[5] * cons\_recrenov + pesos\_r\_consumos[6] * explotacion\_mad + pesos\_r\_consumos[7] * consumo\_alimento + pesos\_r\_consumos[8] * Consumo\_Humano\_D) / 1e17$
<b>Descripción</b>	Valor total de los consumos de la población.

<b>Nombre</b>	Crecimi_Pobl
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$IF(nacimientos / poblacion > 0.40, 1, 0)$
<b>Descripción</b>	Crecimiento poblacional.

<b>Nombre</b>	Div_Cientific
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	Ret_divulgacion
<b>Descripción</b>	Divulgación científica.

<b>Nombre</b>	evaporacion
<b>tipo</b>	Flujo

<b>Definición</b>	Prop_evapor*Recurso_Hidrico
<b>Descripción</b>	Cantidad de agua que se pierde por evaporación.[m3]

<b>Nombre</b>	Factor_camb_val
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$((ciencia+tecnologia)/2)*convertidor\_NE)-0.8$
<b>Descripción</b>	Factor de cambio de los valores individuales de la población, afectados directamente por el nivel económico, la ciencia y la tecnología.

<b>Nombre</b>	Fec_inicial
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	5
<b>Descripción</b>	Tasa de fecundidad inicial, el valor que tendría al inicio de la simulación suponiendo condiciones económicas estables.

<b>Nombre</b>	Muje_edad_rep
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	0.494
<b>Descripción</b>	Cantidad de mujeres en edad reproductiva dentro de la población total de mujeres.

<b>Nombre</b>	NE_polit
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTSPLINE(2,0,1,0,0.03414634,0.09756098,0.1902439,0.3121951,0.50,0.75,1)
<b>Descripción</b>	Acción del nivel económico dentro de las políticas de producción y economía.

<b>Nombre</b>	Nivelmorta
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTSPLINE(2,1,1,1,0,9,0.7096585,0.4562219,0.3285854,0.2202837,0.1516794,0.124439,0.1199148,0.1,0.09,0.08,0.07)
<b>Descripción</b>	Relación entre el nivel económico y la tasa de mortalidad.

<b>Nombre</b>	Prod_Basura
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	$((Prod\_Basura\_Pers* población)/1000)*conducta*efect\_cyt*(1-multi\_accion\_am)*(1-mult\_acc\_soc)$
<b>Descripción</b>	Cantidad de basuras producidas por persona al año.[Tm]

<b>Nombre</b>	Reciclaje
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	$(Basuras*Tasa\_Reciclaje)/((1+conducta)*(1+efect\_cyt)*(1+mult\_prod)*(1-multi\_accion\_am)*(1-mult\_acc\_soc))$
<b>Descripción</b>	Cantidad de basuras recicladas por año.[Tm]

<b>Nombre</b>	Ret_divulgacion
<b>tipo</b>	Retardo
<b>Definición</b>	RETARDO(Consumos,ciencia_tab, 1, 0)
<b>Descripción</b>	Retardo en el tiempo en que se puede divulgar la información o investigación científica.

<b>Nombre</b>	Ret_percepcion
<b>tipo</b>	Retardo
<b>Definición</b>	RETARDO(Div_Cientific, tecn_tab, 1, 0)
<b>Descripción</b>	Retardo en la percepción de la población sobre la información transmitida por la divulgación científica.

<b>Nombre</b>	Ret_valores
---------------	-------------

<b>tipo</b>	Retardo
<b>Definición</b>	RETARDO(percepción_pos,5,2,0)
<b>Descripción</b>	

<b>Nombre</b>	Retardoeco_fec
<b>tipo</b>	Retardo
<b>Definición</b>	RETARDO(Transi_Niveleco,25,3,1)
<b>Descripción</b>	Retardo o tiempo que demora en que se refleje el impacto que tiene el nivel económico sobre la fecundidad.

<b>Nombre</b>	Tasa_mort
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	tasa_mort_ini*Nivelmorta
<b>Descripción</b>	Tasa de mortalidad calculada a partir de la influencia del sistema económico. Representa muertes sobre la población total.

<b>Nombre</b>	act_pob
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	polit_social/100
<b>Descripción</b>	Refleja la acción que comienza a realizar una política social, pero después de un corto tiempo de retardo.

<b>Nombre</b>	act_prod
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	polit_prodyecon/100
<b>Descripción</b>	Refleja la acción que comienza a realizar una política económica o de producción, pero después de un corto tiempo de retardo.

<b>Nombre</b>	act_tope
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	10
<b>Descripción</b>	Medida tope que tiene la población para producir un cambio en su conducta.

<b>Nombre</b>	actitud_amb
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	1
<b>Descripción</b>	Nivel de la actitud de la población con respecto al medio ambiente.

<b>Nombre</b>	actitud_amb_rev
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	IF(actitud_amb<act_tope,actitud_amb,act_tope)
<b>Descripción</b>	Valor de la actitud en que es necesario para la población cambiar en su conducta con respecto a los factores que se están consumiendo o explotando.

<b>Nombre</b>	actitud_neg_amb
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	-1*perc_actitud_neg
<b>Descripción</b>	Flujo saliente en la actitud que ayudan a disminuir el nivel de actitud, lo cual conlleva evitar los cambio en la conducta de la población.

<b>Nombre</b>	actitud_pos_amb
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	perc_actitud_pos
<b>Descripción</b>	Flujo entrante a la actitud que ayudan a determinar los cambio en la conducta de la población.

<b>Nombre</b>	actuador_amb
---------------	--------------

<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	polit_ambiente/100
<b>Descripción</b>	Refleja la acción que comienza a realizar una política ambiental, pero después de un corto tiempo de retardo.

<b>Nombre</b>	aum_int_dinero
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	NE_polit*10
<b>Descripción</b>	Aumento del interés económico y productivo que conlleva a la generación de políticas implantadas por el gobierno.

<b>Nombre</b>	aum_int_social
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	1-conducta
<b>Descripción</b>	Aumento del interés social que conlleva a la generación de políticas o reformas de políticas anteriores implantadas por el gobierno.

<b>Nombre</b>	aumen_intere_am
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	1-conducta
<b>Descripción</b>	Aumento del interés ambiental que conlleva a la generación de políticas implantadas por el gobierno.

<b>Nombre</b>	av_cien
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	ciencia*(rec_de_socie)
<b>Descripción</b>	Avances científicos por año, que se dan debido a los recursos de sociedad y debido a ella misma.

<b>Nombre</b>	av_tecn
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	( Innovación/ciencia)*rec_de_socie*tecnología
<b>Descripción</b>	Avances tecnológicos por año, que se dan debido a los recursos de sociedad, a la ciencia e incluso debido a la misma tecnología.

<b>Nombre</b>	basura_acumulada
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	Prod_Basura-Reciclaje
<b>Descripción</b>	Basura que se deja acumular por período [Tm]

<b>Nombre</b>	ciencia
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	100
<b>Descripción</b>	Cantidad básica de conocimiento y teorías científicas para el desarrollo de la población.

<b>Nombre</b>	ciencia_tab
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,0,100,20,19,18,17,16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1)
<b>Descripción</b>	Multiplicador de la ciencia.

<b>Nombre</b>	ciencia_tecn
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	((0.35*ciencia)+(0.65*tecnología))
<b>Descripción</b>	Valor conjunto de la ciencia y la tecnología.

<b>Nombre</b>	conducta
---------------	----------

<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,1,1,1,0.997561,0.995122,0.9853659,0.9682927,0.9365854,0.8902439,0.8195122,0.6731707,0.5)
<b>Descripción</b>	Multiplicador o efector de los cambios en el consumo de recursos de la población.

<b>Nombre</b>	consu_energ2
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	Consu_energe
<b>Descripción</b>	Consumo energético asociado a recursos no renovables por período. Se usa para calcular las externalidades asociadas a este consumo. [equiv. Tm Petroleo].

<b>Nombre</b>	consumo_alimento
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	consu_pers* oblación*conducta*efect_cyt*(1-mult_acc_soc)
<b>Descripción</b>	Consumo de alimentos por año. [Tm]

<b>Nombre</b>	convertidor_NE
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	(nivel_economico/1e16)
<b>Descripción</b>	Convertidor de las unidades de nivel económico.

<b>Nombre</b>	convertidor_NE2
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	(nivel_economico/1e15)
<b>Descripción</b>	Convertidor del nivel económico para ajustarlo a las unidades correspondientes.

<b>Nombre</b>	costo_a_bas
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	costo_e_basura*basura_acumulada
<b>Descripción</b>	Costo que se genera por permitir basura acumulada, representando problemas de espacio, salud, sociales, estéticos, etc. En unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	costo_acum_gases
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	costo_gases[1]* cum_cfc+costo_gases[2]* cum_GasesI
<b>Descripción</b>	Costo asociado al permitir la emisión de gases invernadero o halocarbonos. Se refiere al costo a futuro, ya que tiene consecuencias para los sistemas humanos. En unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	costo_disp_rnr
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	355.5
<b>Descripción</b>	Costo de extraer un equiv Tm. Petróleo. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	costo_e_basura
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	5
<b>Descripción</b>	Costo que se genera por permitir 1 tonelada de basura acumulada, representando problemas de espacio, salud, sociales, estéticos, etc. En unidades económicas abstractas/Tm.

<b>Nombre</b>	costo_gases
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	[100,60]
<b>Descripción</b>	Costo en que se incurre por permitir la emisión de una tonelada de gases

	invernadero o halocarbonos. Se refiere al costo a futuro de haber permitido la emisión. En unidades económicas abstractas sobre tonelada. [ozo,co2]
--	---

<b>Nombre</b>	costo_perd_rh
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	10
<b>Descripción</b>	

<b>Nombre</b>	costo_rh_as_bas
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	15
<b>Descripción</b>	Costo por permitir que se destruyan las fuentes de agua debido a la contaminación. Costo por m3 perdido. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	costo_rh_bas
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	Perdida_Basuras*costo_rh_as_bas
<b>Descripción</b>	Costo por permitir que se destruyan las fuentes de agua debido a la contaminación. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	costo_rrecnoren
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	355.5
<b>Descripción</b>	Costo en que se incurre por gastar una Equiv. Tm Petroleo, teniendo en cuenta que luego no estará disponible, así como los costos en que se incurren por permitir ese consumo. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	costo_tierra_ext
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	costos_aso_tierr[1]*reclam_bosque+costos_aso_tierr[2]*desert_2+costos_aso_tier[3]*reclam_cultivo
<b>Descripción</b>	Costo asociado a la destrucción de tierras, tanto tierras vírgenes como de cultivo.

<b>Nombre</b>	costos_aso_tierr
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	[3,5,1]
<b>Descripción</b>	Costo por Ha por la destrucción de tierras vírgenes y de cultivo. En unidades económicas abstractas. [rb, desert, rc]

<b>Nombre</b>	dism_int_social
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Disminución o eliminación de políticas.

<b>Nombre</b>	dism_inter_ambi
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Disminución o eliminación de políticas.

<b>Nombre</b>	dism_inter_dine
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	1-conducta
<b>Descripción</b>	Disminución o eliminación de políticas.

<b>Nombre</b>	efec_politica
<b>tipo</b>	Auxiliar

<b>Definición</b>	$(1 - \text{mult\_acc\_soc}) * (1 - \text{multi\_accion\_am}) * (1 + \text{mult\_prod})$
<b>Descripción</b>	Efecto conjunto de las tres políticas (ambiental, social y económica) sobre el consumo humano diario del recurso hídrico.

<b>Nombre</b>	efect_cyt
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	$\text{INTLINEAL}(2, 1, 1, 1, 0.9983513, 0.9975269, 0.9950538, 0.9892833, 0.9777422, 0.9571331, 0.9249828, 0.8776205, 0.8310053)$
<b>Descripción</b>	Multiplicador que representa el efecto de la tecnología y el avance científico.

<b>Nombre</b>	ext_atm
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Costo asociado al permitir la emisión de gases invernadero o halocarbonos. Se refiere al costo a futuro, ya que tiene consecuencias para los sistemas humanos. En unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	ext_bas
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Costo acumulado por permitir basura acumulada, representando problemas de espacio, salud, sociales, estéticos, etc. En unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	ext_g_res_n_ren
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$\text{gasto\_acum\_nren} * \text{costo\_rrenoren}$
<b>Descripción</b>	Costo en que se incurre por haber consumido recursos no renovables. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	ext_rh
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$\text{extern\_rh\_disp} + \text{ext\_rh\_bas}$
<b>Descripción</b>	Suma de los dos costos relacionados con recurso hídrico, el de agotamiento de las reservas y el de destrucción de las fuentes. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	ext_rh_bas
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Costo acumulado por permitir que se destruyan las fuentes de agua debido a la contaminación. Unidades económicas abstractas.

<b>Nombre</b>	ext_rren
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$\text{ext\_g\_res\_n\_ren} + \text{extr\_disp\_rnr}$
<b>Descripción</b>	Suma de los costos relacionados con los recursos no renovables.

<b>Nombre</b>	ext_tierra
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Acumulación de los costos asociados a la destrucción de tierras, tanto tierras írgenes como de cultivo.

<b>Nombre</b>	ext_total
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	$\text{ext\_tierra} + \text{ext\_bas} + \text{ext\_atm} + \text{ext\_rh} + \text{ext\_rren}$
<b>Descripción</b>	Valor de la acumulación total de todas las externalidades consideradas.

	Unidades económicas abstractas.
<b>Nombre</b>	extern_rh_disp
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	(recurso_hid_ini-Recurso Hidrico)*costo_perd_rh
<b>Descripción</b>	Costo en que se incurre por agotar las reservas de recurso hídrico. Se entiende que se incurre en un costo por no dejar reservas para el futuro. Unidades económicas abstractas.
<b>Nombre</b>	extr_disp
<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	costo_disp_rnr*(1+recargo_ext_disp)* xtracción_nren
<b>Descripción</b>	Costo por extraer recursos no renovables cuando las reservas se están agotando. Es más costoso extraer a futuro un recurso escaso. Unidades económicas abstractas.
<b>Nombre</b>	extr_disp_rnr
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Acumulación de costos por agotamiento de las reservas. Unidades económicas abstractas.
<b>Nombre</b>	fecundidad
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	((nivel_fecun*Fec_inicial)/vida_prom_muj)*((conducta*(1-mult_acc_soc)))
<b>Descripción</b>	Numero de Hijos por mujer en edad reproductiva sobre el total de la población. Proporción de nacimientos más adecuada para el estudio de los procesos demográficos.
<b>Nombre</b>	gasto_acum_nren
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	0
<b>Descripción</b>	Acumulación de los consumos de recursos no renovables por período. [equiv. Tm. Petroleo]
<b>Nombre</b>	innovación
<b>tipo</b>	Retardo
<b>Definición</b>	RETARDO(ciencia,5, 1,0)
<b>Descripción</b>	Es el retardo que refleja la demora en que una idea en la ciencia se convierta en tecnología completamente.
<b>Nombre</b>	mult_acc_soc
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTSPLINE(2,0,1,0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7)
<b>Descripción</b>	Cuantifica el cambio que genera dicha por la política social.
<b>Nombre</b>	mult_prod
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,0,1,0,0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6)
<b>Descripción</b>	Cuantifica el cambio que genera dicha por la política económica.
<b>Nombre</b>	multi_accion_am
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTSPLINE(2,0,1,0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6)
<b>Descripción</b>	Cuantifica el cambio que genera dicha por la política ambiental.
<b>Nombre</b>	nacimientos

<b>tipo</b>	Flujo
<b>Definición</b>	fecundidad* población*tasa_mujeres*Muje_edad_rep
<b>Descripción</b>	Cantidad de nacimientos de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad.[Miles de Personas]

<b>Nombre</b>	natalidad
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	nacimientos/poblacion*1000
<b>Descripción</b>	Valor de la natalidad. Cantidad de nacimientos sobre la cantidad de población.

<b>Nombre</b>	nivel_eco_real
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	nivel_economico-ext_total
<b>Descripción</b>	Refleja el impacto que tienen las externalidades sobre el nivel económico.

<b>Nombre</b>	nivel_fecun
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,1,10,1,0.8728944,0.7367099,0.5914464,0.4598014,0.3463143,0.2419062,0.164735,0.1148006,0.08302424,0.0785742,0.06940579,0.07)
<b>Descripción</b>	Relaciónentre el nivel económico y la fecundidad.

<b>Nombre</b>	nivel_pens
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	1e16
<b>Descripción</b>	Nivel de pensamiento de la población en que se pueden utilizar los recursos de sociedad.

<b>Nombre</b>	perc_actitud_neg
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTSPLINE(2,-1,0.25,-0.25,-0.140625,-0.0625,-0.015625,0)
<b>Descripción</b>	Tabla representante de la actitud negativa.

<b>Nombre</b>	perc_actitud_pos
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTSPLINE(2,0,0.25,0,0.015625,0.0625,0.140625,0.25)
<b>Descripción</b>	Tabla de la actitud positiva.

<b>Nombre</b>	percepción_neg
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	valores_no_amb*Ret_percepcion
<b>Descripción</b>	Percepción que capta la población con respecto a la necesidad de consumir mayor cantidad de recursos para mejorar su calidad de vida, sin importar los daños al medio ambiente.

<b>Nombre</b>	percepcion_pos
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	Ret_percepcion*valores_amb
<b>Descripción</b>	Percepciónpositiva por parte de la población. Es cuando se hace necesario disminuir los consumos debido a que se puede percibir un impacto negativo.

<b>Nombre(8)</b>	pesos_r_consumos
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	[1,1,2,0.5,1.5,1,2,1]
<b>Descripción</b>	Tasas representantes de los valores iniciales en cada uno de los consumos [cp,efeinv,cfc,ce,cernr,em,ca,cbd].

<b>Nombre</b>	pol_t_ambiente
---------------	----------------

<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	100
<b>Descripción</b>	Políticas generadas por el gobierno para el mejoramiento y protección del medio ambiente y la ecología.

<b>Nombre</b>	pol_t_prodyecon
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	100
<b>Descripción</b>	Políticas generadas por el gobierno para el mejoramiento y desarrollo en la producción y en la economía.

<b>Nombre</b>	pol_t_social
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	100
<b>Descripción</b>	Políticas generadas por el gobierno para el mejoramiento y protección de la población y la expansión de la especie.

<b>Nombre</b>	rec_de_socie
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	nivel_economico/nivel_pens
<b>Descripción</b>	Recursos utilizados para el pro de la tecnología y la ciencia.

<b>Nombre</b>	recargo_ext_disp
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	extracción_nren/reserva_nrenov
<b>Descripción</b>	Factor de multiplicación para calcular el costo del agotamiento de las reservas de recursos no renovables. Relaciona la extracción con las reservas.

<b>Nombre</b>	recurso_hid_ini
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	3.5E16*10/100
<b>Descripción</b>	Cantidad inicial de agua disponible en el sector recurso hídrico. [m3]

<b>Nombre</b>	retardo_eco_mort
<b>tipo</b>	Retardo
<b>Definición</b>	RETARDO(Transi_Niveleco,10, 3,1)
<b>Descripción</b>	Retardo o tiempo que demora en que se refleje el impacto que tiene el nivel económico sobre la mortalidad.

<b>Nombre</b>	tasa_reclam_bos
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	0.01*conducta* efecto_cyt*(1-multi_accion_am)*(1+mult_prod)
<b>Descripción</b>	Porcentaje que indica la cantidad de tierra virgen que se reclama para la producción de cultivos.

<b>Nombre</b>	tasa_reclam_cult
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	0.03*conducta*efect_cyt
<b>Descripción</b>	Porcentaje que indica la cantidad de tierra de cultivo o apta para cultivar que se reclama anualmente.

<b>Nombre</b>	tasa_tecnolo
<b>tipo</b>	Auxiliar
<b>Definición</b>	1+ tecnología/top_tecno
<b>Descripción</b>	Razón entre la tecnología actual y el tope máximo donde se hará muy difícil avanzar tecnológicamente, partiendo de la tecnología ya obtenida.

<b>Nombre</b>	tecn_tab
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,0,100,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1)
<b>Descripción</b>	Tabla de tecnología.

<b>Nombre</b>	Tecnología
<b>tipo</b>	Nivel
<b>Definición</b>	100
<b>Descripción</b>	Cantidad básica de conocimiento hechos práctica y teorías idealizadas después de un tiempo para el desarrollo de la población.

<b>Nombre</b>	top_tecno
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	5000
<b>Descripción</b>	Tope máximo de tecnología.

<b>Nombre</b>	valores_amb
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,0,10,0,0.05,0.10,0.20,0.35,0.50,0.75,1)
<b>Descripción</b>	Multiplicador de los valores sobre la conservación y mejoras del medio ambiente que tiene la población.

<b>Nombre</b>	valores_no_amb
<b>tipo</b>	Tabla
<b>Definición</b>	INTLINEAL(2,-70,10,-1,-0.75,-0.5,-0.35,-0.20,-0.10,-0.05,0)
<b>Descripción</b>	Multiplicador negativo de los valores sobre la conservación y mejoras del medio ambiente que tiene la población.

<b>Nombre</b>	vida_prom_muj
<b>tipo</b>	Parámetro
<b>Definición</b>	47.5
<b>Descripción</b>	Tasa que indica el valor de la vida promedio de la mujer.

Tabla N° 6: Definición de los elementos del tercer prototipo

## 9.6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Para el análisis de sensibilidad aplicado a este tercer prototipo se utilizaron, nuevamente los tres escenarios de aumento de la población, usados en los anteriores prototipos. :

- **Por Defecto:** Donde tanto el nivel de fecundidad y el nivel de mortalidad presentan descensos acorde con la teoría de la transición demográfica. En la figura N° 32 es la trayectoria de color rojo.
- **Población en Crecimiento:** Este escenario muestra un crecimiento constante en la población, sin encontrar una tasa de reemplazo. En la figura N° 32 es la trayectoria de color azul.
- **Descenso Rápido en la Fecundidad:** En este escenario se presenta un ambiente donde la tasa de fecundidad baja mucho más rápido de lo debido manteniendo un descenso normal en la tasa de mortalidad. En la figura N° 32 es la trayectoria de color verde.

Las variables analizadas bajo estos tres contextos son:

1. Consumo de recursos no renovables por persona.

2. Comportamiento del sistema económico.
3. Alimentos.

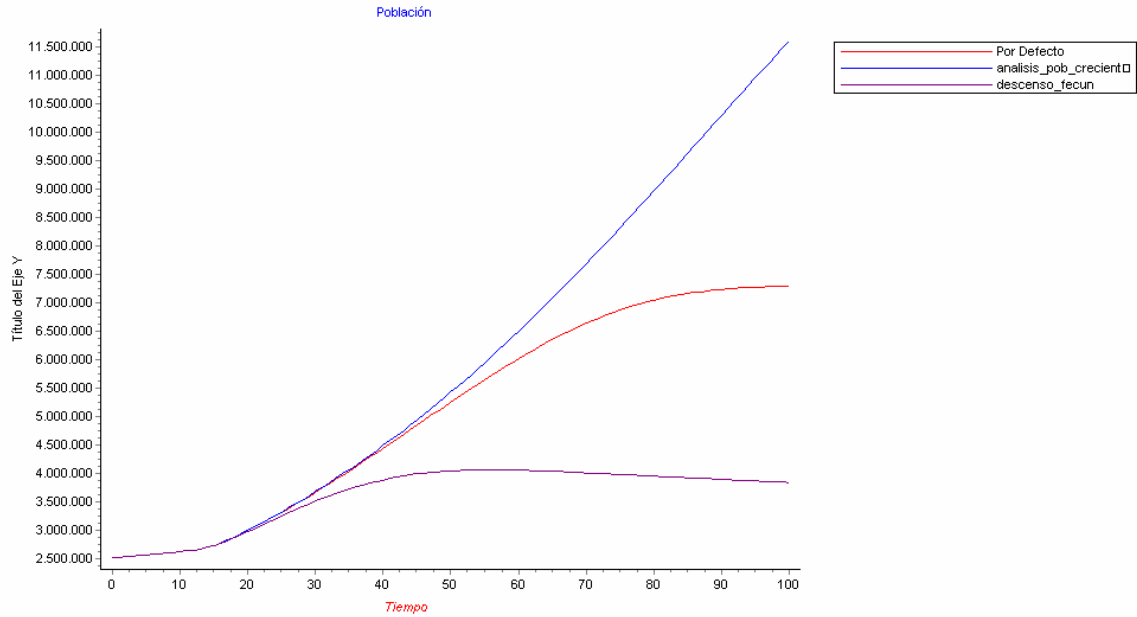


Figura N° 32: Gráfica del análisis de sensibilidad de la población para el tercer prototipo.

### 9.6.1. Análisis del Consumo de Recursos no Renovables y Sistema Económico

Las gráficas del sistema económico y extracción de recursos, presentan ritmos de crecimiento consistentes con respecto a los comportamientos de la población, mostrando curvas ascendentes pero cada una de un crecimiento un poco mayor que la anterior. Tanto los recursos no renovables como el sistema económico demuestran ser sensibles a los cambios ocurridos en la población pero sin presentar algún comportamiento sorpresa:

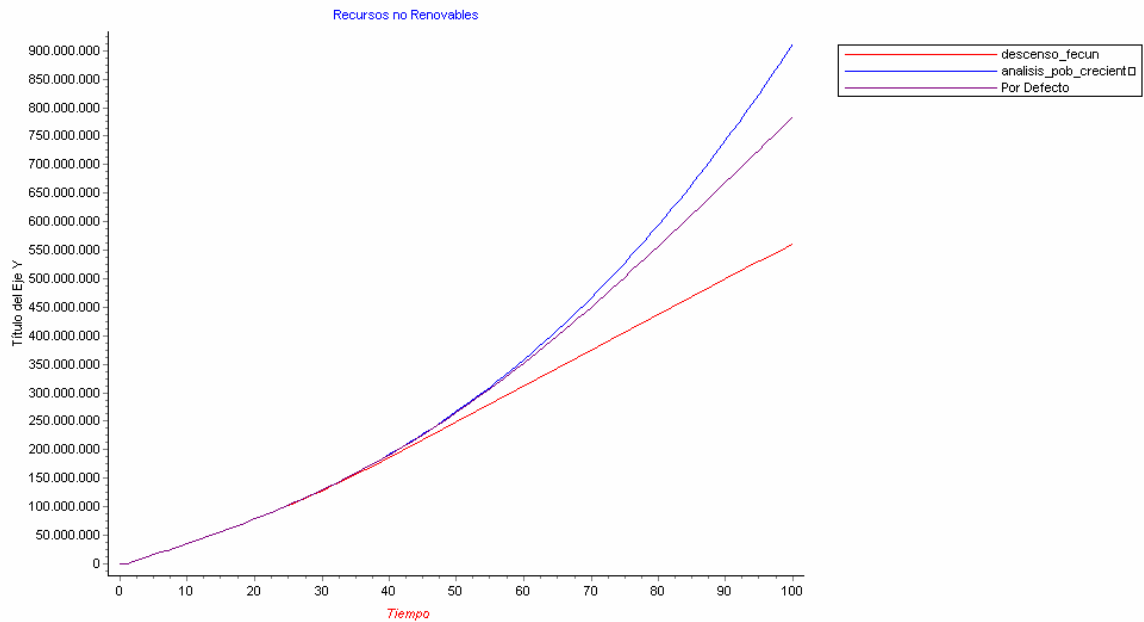


Figura N° 33: Gráfica del análisis de sensibilidad de los recursos no renovables.

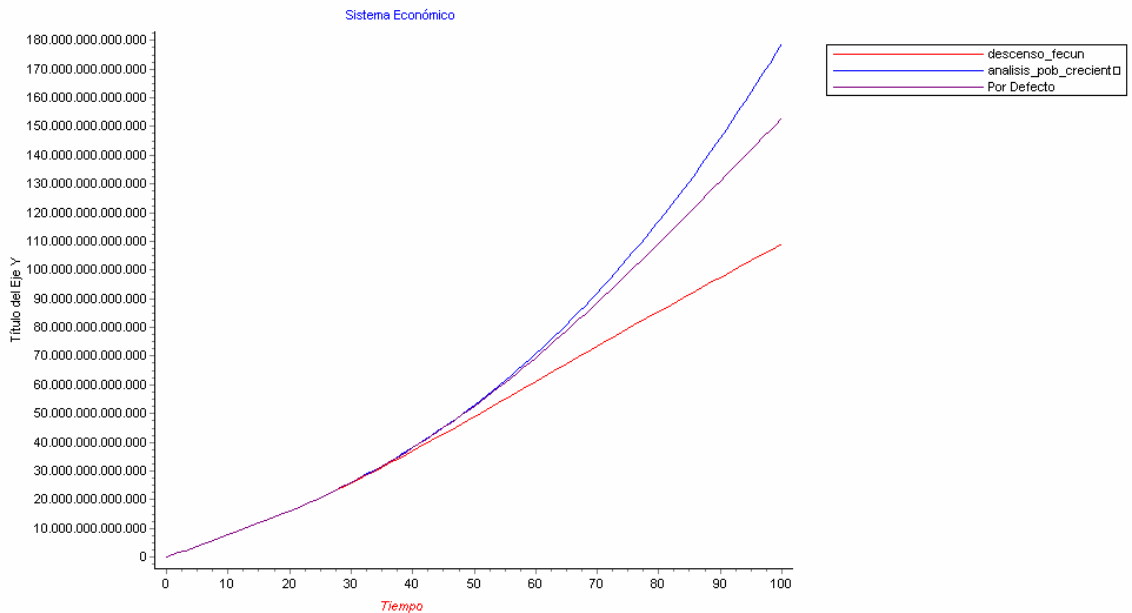


Figura N° 34: Gráfica del análisis de sensibilidad del sistema económico.

### 9.6.1. Análisis del Nivel de Alimentos

El análisis realizado al nivel de alimentos permite observar que aunque las tres trayectorias presentan un comportamiento creciente muy similar, también muestra una sensibilidad mayor, con respecto al análisis anterior, hacia las variaciones hechas en la población.

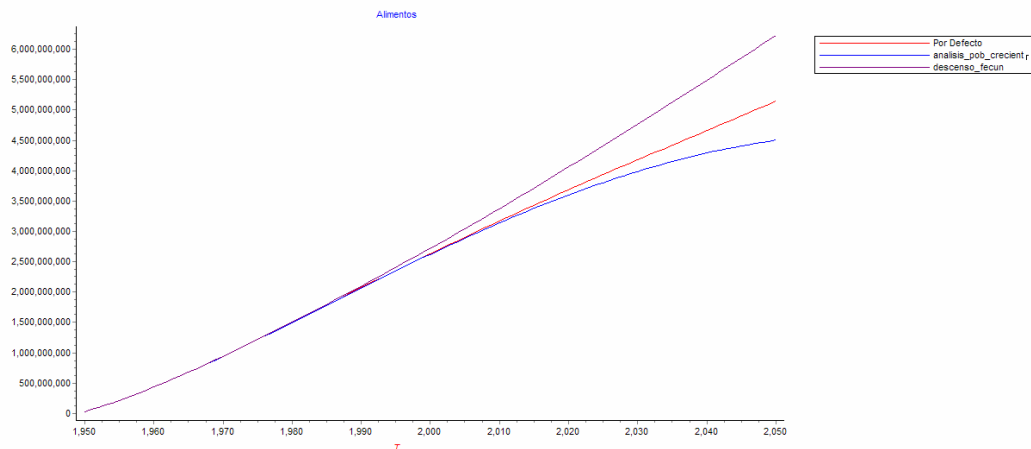


Figura N° 35: Nivel de alimentos en el mundo.

Partiendo de que en los tres escenarios de la población se mantiene una misma producción creciente de alimentos hay que centrar el análisis en el consumo de los mismos para poder dar explicación a estos comportamientos.

La gráfica morada demuestra un consumo de alimentos suave y muy bajo que en algún momento comienza a descender y por lo tanto la producción de alimentos sigue creciendo haciendo crecer al tiempo el nivel de alimentos disponibles para la población. El consumo de alimentos refleja un comportamiento similar al de la población pues están relacionados directamente. A menor población menor consumo.

La gráfica azul que representa el escenario de la población que crece sin límites, demuestra como después de un tiempo la población aumenta tanto que el consumo de alimentos empieza a ser mayor que la producción.

Por último la trayectoria roja presenta un comportamiento mas equilibrado. La población crece y se estabiliza en un determinado punto haciendo que el consumo sea también estable y mantenga un equilibrio entre la cantidad consumida de alimento y la cantidad producida del mismo.

Para este prototipo la producción de alimentos no dependía de la población sino solamente de la tierra de cultivos, por esto mismo a pesar de los cambios en la población y en el consumo de alimentos siempre se sigue manteniendo un mismo nivel de producción tal y como se ve en las siguientes gráficas:

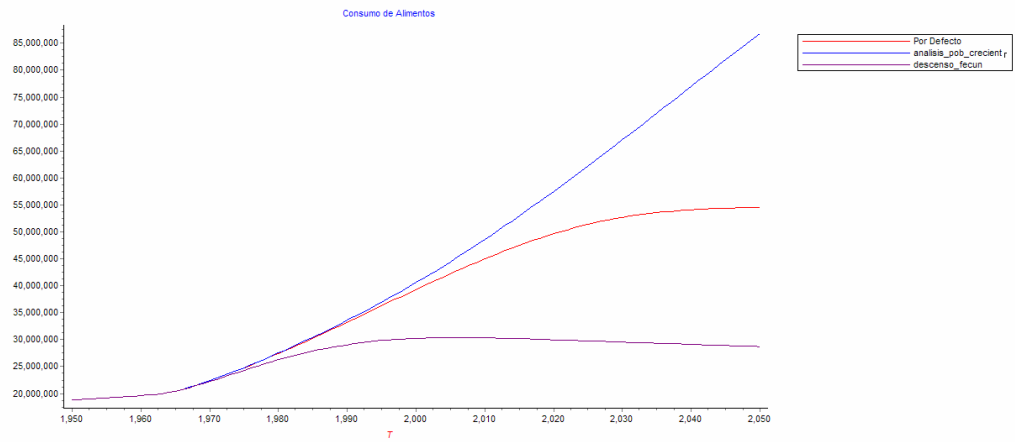


Figura N° 36: Consumo de alimentos.

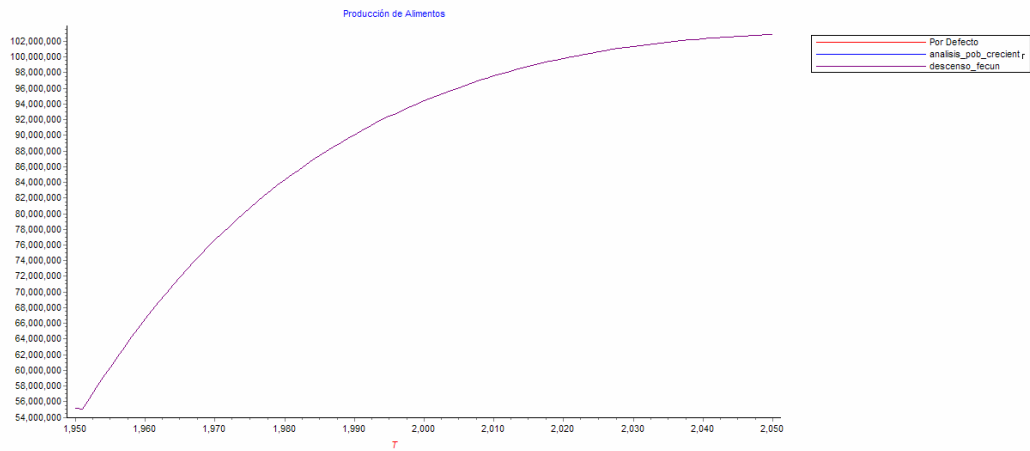


Figura N° 37: Producción de alimentos.

## 10. VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO

### 10.1. FASE I DEL PLAN DE PRUEBAS

#### 10.1.1. Prueba de Idoneidad de los límites

Revisando el mapa de sectores se comparó lo representado allí con lo que se debía reflejar según el planteamiento del diagrama de Aspen, teniendo en cuenta la estructura mostrada.

Teniendo en cuenta los bloques de Aspen se hace una relación de los fenómenos, factores o procesos que no se tuvieron en cuenta en el último prototipo, y se agrega cual es la explicación de la acción tomada en casa caso<sup>97</sup>:

**Factores de producción y tecnología:** (trabajo, materia prima, capital)

La materia prima no se tuvo en cuenta pues los recursos fueron considerados desde el punto de vista energético. Incluso la madera se tuvo en cuenta solo como combustible. Los recursos energéticos se consideraron más importantes porque la tendencia de crecimiento de la tecnología actual esta orientada hacia el consumo intensivo de energía. Además los recursos energéticos tienden a acabarse primero que la materia prima para los procesos de producción.

El capital no se tuvo en cuenta como “materia prima”, se hizo un balance de ingresos y egresos pero el capital no se constituye en un recurso. La explicación de este supuesto se da en el apartado dedicado al sistema económico.

El ni trabajo humano ni la energía disponible afectan los procesos de producción. Se consideró que el trabajo humano va implícito en la estructura, ya que la mano de obra, comparada con otros recursos, nunca va a faltar. En la revisión de estructura se evaluará la conexión faltante entre energía y producción de alimentos.

**Población:** (distribución social, parámetros de salud)

La población no refleja la distribución social ni los parámetros de salud. La distribución por sexo si es incluida para el cálculo de la población en base a la fecundidad. La población se considero un agregado mundial. Los parámetros de salud, como ya se dijo, no fueron incluidos salvo el factor de falta de alimentos (hambre) que modifica la tasa de mortalidad cuando hay menos alimentos de los necesarios para alimentar a la población. La razón para no incluir los parámetros de salud esta relacionada con el nivel de detalle; incluir esos parámetros llevaría a la necesidad de modelar enfermedades, parámetros de salubridad, cobertura médica, etc, lo que incrementaría la complejidad del modelo significativamente pero no modificaría substancialmente su comportamiento. El modelado de la dinámica poblacional completa (análisis tipo pirámide poblacional) también produce un nivel de detalle inapropiado.

**Procesos ambientales de escala global:** (Sistema climático: atmosférico y oceánico, proceso de destrucción de la capa, lluvia acida)

El sistema climático no se modeló por lo complicado de obtener el conocimiento a cerca de su funcionamiento. Las relaciones que hay entre los elementos no están bien caracterizadas. Este proceso no se modeló pues supera ampliamente nuestros conocimientos y no aporta mucho al

---

<sup>97</sup> Los factores marcados entre paréntesis son los de nivel general y después se explican.

propósito del modelo que está enfocado hacia el factor humano. Estas consideraciones se utilizaron también en el caso del proceso de destrucción de la capa de ozono.

La lluvia acida no se incluyó, porque las consecuencias son bastantes localizadas, aunque se podría estimar sus efectos en la destrucción de tierras y de biodiversidad a nivel global.

**Sistema económico:** (características del sistema económico actual, producción y distribución de bienes y consumos)

Se omitió la estructura actual del sistema económico, pues el capital no se incluyó como recurso porque el enfoque inicial del modelo es orientar la parte económica hacia la vigilancia de la dinámica de los recursos “tangibles” y el capital no es realmente un recurso de este tipo, pues es más una representación abstracta de la capacidad de adquisición. El incluir el capital requeriría de la participación de expertos en el tema, pero como modeladores no solo como apoyo, y todo esto excedería los recursos destinados (personal y tiempo) y la intención del modelo.

**Instituciones y sistemas políticos:** (relaciones internacionales)

Las relaciones internacionales no se incluyeron por el carácter de agregado mundial del modelo. Como se representa el mundo entero no se pueden apreciar fácilmente las consecuencias de las interacciones políticas entre los países.

**Fondo de experiencia y conocimientos, expectativas y preferencias** (mas detalle en sus relaciones, realizar un enfoque más amplio y no solo hacia el consumo de recursos)

El factor de la percepción no afecta los valores. La forma como se modelo el sector de expectativas y preferencias asume que los valores tienden a favorecer la intención ambientalista cuando el nivel económico es alto. Un supuesto que se hizo es que la percepción del problema es menos importante que la relación con el sistema económico: A la gente no le va importar el problema ambiental si no tiene un nivel de vida “alto”. Así, se considera despreciable el efecto de la percepción sobre los valores. Además, la escala temporal es corta, y los procesos de cambio en los valores de una sociedad son largos.

Del análisis de los anteriores factores detallados y de las explicaciones se obtienen las siguientes sugerencias para ampliar los límites del modelo. Se evaluará lo adecuado de las mismas teniendo en cuenta los objetivos del modelado: (1)

- No se considera importante incluir la materia prima como un recurso para algunos procesos de producción, debido a que no se quiere llegar a un nivel de detalle tan alto.
- Un indicador de la cantidad de gases productores de lluvia acida se puede incluir, pero debido a que es difícil de caracterizar es el efecto de la misma sobre los ambientes naturales, las especies y la vida humana, la inclusión de este fenómeno no aportaría mucho a la representación.

Estas sugerencias se tendrán en cuenta para la creación del cuarto prototipo, junto con los resultados de los análisis de estructura y consistencia dimensional.

Otra parte del análisis de Límites es la revisión de los parámetros, tablas y variables exógenas del modelo (las que no son afectadas por la dinámica del modelo), ya que el uso de éstas puede dejar por fuera algunas relaciones importantes. A continuación se presenta una relación de elementos de este tipo encontrados “sospechosos”<sup>98</sup> y una explicación de porque se incluyeron de esta forma:

---

<sup>98</sup> Que podrían esconder una relación no tenida en cuenta.

**Variables exógenas:**

CFC\_PERSONA: Cantidad de CFC producida por persona al año. [Tm].

Es exógena por falta de elementos que represente la producción de algunos bienes y consumos. En este caso no se incluyó la relación entre producción de bienes y servicios y emisión de halocarbonos porque no se caracterizó esta producción y además, aún estando representada, la causa de estas emisiones es solo una fracción relativamente aislada de la producción; no todos los procesos productivos generan emisiones de este tipo. Es adecuado en este caso usar una variable exógena para representar esta emisión. Hay que analizar porque se uso una variable de emisiones por persona, y la explicación en este caso es porque se asume que a mayor población se va a necesitar producir más productos de los que generan emisiones de halocarbonos como residuo. De esta forma parece correcta la suposición.

**Parámetros:**

Parámetros relacionados con el sistema de Recurso Forestal:

- Tasa\_refor: Indicador de la tasa de reforestación realizada anualmente. Si esta tasa aparece debe ser variable debido a la situación del reciclaje en el mundo.
- Tasa\_exp\_bosque: Tasa de explotación de la madera existente en las tierras vírgenes. [m3/Ha].
- Porc\_mad\_comb: Porcentaje de la madera total explotada utilizada como combustible.
- Porc\_mad\_r: Porcentaje de la madera total explotada utilizada como recurso.

Revisando la estructura del subsistema recurso forestal se concluyó que se debe hacer un cambio en la estructura; las razones para considerar esto se enuncian en el análisis de estructura del modelo, apartado en el que se explican los cambios a realizar.

Parámetros relacionados con el sistema de recurso Hídrico:

- Transp\_inicial: Tasa usada como valor inicial en el porcentaje definido para la cantidad de goteo. Es otro parámetro que no se usa realmente, puesto que la variable que lo usa nunca cambia el valor.
- Rata\_agua\_basura: Tasa que indica el porcentaje de agua que se pierde a causa de los desechos sólidos.
- Rata\_cons\_persona: Porcentaje de agua utilizada en el consumo humano. [m3]

En el caso de los parámetros Rata\_agua\_basura y Transp\_inicial los problemas detectados evidencian relaciones no tenidas en cuenta, como la dependencia del agua perdida por contaminación de la cantidad de basura acumulada, y en el caso de la transpiración, la relación entre las tierras vírgenes y la evo-transpiración se paso por alto, y debe ser incluida.

Parámetros relacionados con el sistema económico, expectativas y preferencias y ciencia y tecnología:

- **Tope\_tecnología:** Tope máximo de tecnología. Este parámetro es extraño ya que la variable que se calcula en base al no afecta ningún otro elemento. Una vez revisado el funcionamiento del subsistema se noto que esta variable se usa en un prototipo más antiguo, y que el efecto que esta tenía se incluyó en la tabla efecto\_cyt. Esa variable puede retirarse junto con la variable que depende de ella.
- **Nivel\_eco\_ini:** Cantidad de nivel económico inicial. Este es un parámetro usado para calcular el crecimiento económico y así poder hacer los ajustes necesarios en el subsistema población. La validez de este parámetro será evaluada en el análisis de estructura, donde se revisará si hay cambios para el subsistema económico.
- **Nivel\_pens:** Nivel de pensamiento de la población en que se pueden utilizar los recursos de sociedad. Es una constante que se utiliza para representar el nivel de recursos que mínimo debe tener la sociedad para poder avanzar en ciencia y tecnología. Se podría interpretar como un retraso. Esta variable no tiene un significado conceptual claro, más allá de lo explicado, y después de revisar el funcionamiento del subsistema donde actúa, se considero adecuado eliminarla e incluir su efecto como parte de la relación rec\_de\_soc, que representa el vinculo sistema económico – ciencia y tecnología.

Otros Parámetros evaluados:

- **Tasa\_energia\_ali:** Tasa de energía necesaria para la producción de alimento. [Tm.Equiv Petróleo]. La formulación de la dependencia del alimento de la energía no está caracterizada. Ese parámetro es probable deba convertirse en variable. Acerca de esta conexión faltante ya se había hablado en el apartado anterior del análisis, y el hecho de que esta constante aparezca acá es indicio de que si hay que hacer cambios.
- **Tasa\_reciclaje:** Tasa de reciclaje. Hace falta convertirla en variable, ya que el nivel tecnológico y las expectativas de la población pueden hacer cambiar esta tasa.

#### **Tablas:**

La revisión de las tablas del modelo se dividió en dos partes, las tablas relacionadas con los sectores de expectativas y preferencias, de ciencia y tecnología y de políticas; y las tablas de los otros sectores. Las primeras se evaluaron de una forma diferente ya que no se consiguió material de modelado relacionado con ellas, lo que hace que la representación lograda sea original. Las tablas que pueden ameritar cambios son las relacionadas con el subsistema de población:

**Nivel\_fecun:** Relación entre el nivel económico y la fecundidad.

**Nivel\_mort:** Relación entre el nivel económico y la tasa de mortalidad.

Los cambios que se deben realizar son de ajuste de los valores para que reproduzcan el comportamiento esperado en el subsistema población.

De la evaluación de parámetros, variables exógenas y tablas se obtienen las siguientes sugerencias para la creación del prototipo final: (2)

- Revisar la estructura del subsistema recurso forestal.
- Revisar la estructura del subsistema recurso hídrico.
- Eliminar el parámetro Tope\_tecnologia y la variable que depende de éste.

- Ajustar el valor del parámetro Nivel\_eco\_ini.
- Anular el parámetro Nivel\_pens y ajustar la definición de la variable rec\_de\_soc.
- Modificar el parámetro Tasa\_Energia\_Ali para que interactúe con la población.
- Convertir el parámetro Tasa\_Reciclaje en una variable.
- Ajustar los valores de las tablas respectivas de fecundidad y mortalidad en la población.

### **10.1.2. Evaluación de la Estructura**

El siguiente punto en esta primera fase es la revisión de la estructura de cada uno de los sectores, de lo que se obtuvo las siguientes sugerencias a ser tenidas en cuenta para la creación del prototipo final: (3)

#### **Alimentos:**

- Consumo\_prod\_ali no está relacionado con la producción de alimentos, luego se debe representar la influencia de la energía y la población en la producción de alimentos.

#### **Recurso Hídrico:**

- La variable transpiración es en realidad una constante pues no es afectada en ningún momento por otro factor.
- La prop\_evapor es susceptible de variación en caso que se tenga en cuenta el efecto invernadero, de lo contrario no.
- La rata\_agua\_basura debe ser una variable que dependa directamente del nivel basura.
- Debe haber una variable que represente la rata de consumo de agua por persona (rata\_cons\_uers).
- La estructura del subsistema de recurso hídrico es similar a la de cambio de uso de tierras y ambos factores cumplen la misma función dentro del modelo (regular la producción de alimentos). Podrían fusionarse creando el sector ambientes naturales y disminuyendo así la complejidad y extensión del modelo.

#### **Cambio de Uso de la Tierra:**

- Simplificar la estructura de éste subsistema considerando un solo tipo de reclamo de tierras, esto debido a que es un nivel de detalle no adecuado para la propuesta de este modelo.
- Fusionar este sector con el sector de recurso hídrico creando el sector de ambientes naturales.

#### **Energía:**

- Revisar el consumo de recursos renovables y plantear una mejora al subsistema.

#### **Sistema Económico:**

- Optimizar la función del sistema económico en los procesos de producción dentro del modelo, mediante una reforma al subsistema.

#### **Basuras:**

- Integrar el subsistema de basuras con el sector a crear, ambientes naturales.

#### **Recurso Forestal:**

- No es adecuado para el nivel de detalle que se quiere manejar. Se propone reemplazar por una estructura más general como recursos renovables.

**Expectativas y Preferencias:**

- Eliminar la variable `ret_valores`. Esta decisión se tomó en vista de que no se va a tener en cuenta la influencia de la percepción en los valores.

**10.1.3. Análisis de Consistencia Dimensional**

La siguiente prueba al modelo es la verificación y ajuste de unidades y valores en cada uno de los sectores para evitar inconsistencias en el paso de información entre los mismos. Se listan los posibles sectores donde se encontraron algunos problemas con las unidades:

- En el sistema económico el parámetro de ingresos por actividad no tiene los valores adecuados para poder transformar las diversas magnitudes en unidades económicas. Este mismo cambio debe implementarse en egresos por actividad y todo lo correspondiente al sector externalidades.
- El sector de población debe cambiar la unidad base de miles de personas a personas.

## **11. CUARTO PROTOTIPO**

### **11.1. RECOMENDACIONES A IMPLEMENTAR EN EL CUARTO PROTOTIPO**

Continuando con el proceso de creación de prototipos planteado para el proyecto se construye el cuarto prototipo, basado en las recomendaciones arrojadas por la fase I del plan de pruebas. Una tendencia que se impone es hacia la simplificación del modelo, acatando las recomendaciones del director de proyecto. Esta simplificación es importante pues, aunque se podría argumentar va en detrimento de la fidelidad del modelo, incrementa el valor del mismo como herramienta educativa, al hacer más asequible el modelo al público no experto en modelamiento. Como parte de esta simplificación se fusionaron dos sectores, recurso hídrico y cambio de uso de la tierra, en uno llamado ambientes naturales. Otro cambio orientado a la reducción de detalle del modelo fue la integración del recurso forestal, originalmente concebido como representación del combustible hecho con biomasa, al sector de energía en los recursos renovables.

Aparte de los cambios orientados a la simplificación del modelo, se realizaron otros cambios en varios subsistemas, con el fin de corregir algunas relaciones mal representadas: ejemplos de lo anterior se pueden ver en el sector de alimentos, en el que faltaba representar la influencia de la población y la energía en la producción; otro sería la conexión faltante entre basuras y ambientes naturales.

En este cuarto prototipo se intentó modificar lo menos posible la estructura, ya que algunos cambios que podrían hacerse aumentarían el nivel de detalle, yendo en contra de la simplificación, y en muchos casos requerirían conocimientos fuera del alcance de los modeladores. Es importante anotar que la principal motivación detrás de este ejercicio de representación del conocimiento es apoyar el proceso educativo relacionado con la D.S. en el área de los estudios ambientales, no generar un modelo para la prueba de políticas de intervención. Entre más sencillo de comprender más valor gana como herramienta educativa. Además, este es un proyecto de pregrado que debe continuarse en instancias de educación superiores. En el tercer prototipo ya se había alcanzado el nivel de representación deseada, en este lo que se hizo fue simplificar y depurar el modelo para su presentación final. La depuración del modelo trajo además, cambios en los valores de algunas variables y parámetros.

### **11.2. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO EN PROSA**

Al ser este prototipo una simplificación y depuración del tercero, la descripción del modelo en prosa incluirá los factores cuya representación fue modificada; a su vez, las relaciones nuevas o reevaluadas se incluirán también.

El sector recurso hídrico fue eliminado del modelo, pues aumentaba la complejidad en la lectura y el nivel de detalle, aportando un efecto de realimentación que podía ser considerado mediante otras relaciones. El recurso hídrico recibía la influencia del subsistema de población y a su vez influía en la producción de alimentos. Esta relación entre alimentos y recurso hídrico representaba realmente una entre tierras y alimentos debido la manera como se calculaba el consumo agrícola de recurso hídrico: El consumo dependía directamente de la tierra disponible para cultivos. Además durante el proceso de pruebas se notó que lo modeladores habían asumido una relación que es (parcialmente) incorrecta sin bases para hacerlo. El consumo en cultivos estaba del recurso hídrico sin tener en cuenta el proceso de retorno del agua de las plantas al medio; se consideró la evotranspiración pero no basados en ningún dato satisfactorio, además de

considerarla una tasa con respecto al recurso hídrico existente, no teniendo en cuenta la cantidad usada en cultivos. Los modeladores no tuvieron en cuenta en un principio el hecho que las plantas devuelven al medio toda el agua que absorben, y que el agua que se usa para cultivos en su mayoría moja el suelo, no es absorbida por la planta, y al mojar el suelo es susceptible a formar cuerpos de agua de superficie o a evaporarse y volver a la atmósfera. La misma consideración tuvo que haberse hecho acerca del consumo humano, el cual resta del recurso hídrico no por uso del agua sino por la contaminación de la misma.

De esta forma, al realizar la fase I de las pruebas, se detectó que el planteamiento básico del sector recurso hídrico estaba incorrecto, y además el efecto que representaba como regulador de la producción de alimentos realmente representaba era producido por otro sector. Así, se concluyó que el efecto sobre los alimentos debía ser producido por el sector de tierras, al igual que a este debía llegar la influencia de las basuras, que afectaba también el recurso hídrico y que estaba mal enfocada. De esta forma el subsistema de cambio de uso de la tierra recibió las funciones que asumía recurso hídrico dentro de la dinámica del modelo; esto trajo como consecuencia directa el cambio de nombre del sector, para hacerlo más adecuado al nuevo planteamiento: Ambientes Naturales. El nombre se escogió pues tanto la tierra como el agua de una región dan forma a los ambientes naturales de la misma; el nombre puede resultar un tanto general, pero transmite la idea. En cuanto al sector cambio de uso de la tierra, ahora fusionado con recurso hídrico, se simplificó al considerar un solo tipo de tierra a reclamar, de esta manera disminuyendo el nivel de detalle sin sacrificar de manera significativa el comportamiento. Sintetizando, el sector ambientes naturales ahora regula la producción de alimentos, tiene influencia sobre la producción de combustibles renovables y recibe la influencia de la población a través del sector basuras, y la influencia de las políticas, las expectativas y preferencias. La población aumenta la destrucción de las tierras por mal uso de las mismas, mientras que las expectativas ambientales y el efecto de la ciencia y tecnología disminuyen el ritmo de reclamación de tierras vírgenes; Las políticas orientadas al ambiente y de carácter social también disminuyen el ritmo, mientras que la política de crecimiento económico lo aumenta.

En el sector alimentos el cambio propuesto tras las pruebas consistía en relacionar la energía producida con la producción de alimentos. Para poder establecer la relación se tuvo en cuenta la energía utilizada en la producción de fertilizantes, excluyendo de momento de la relación la energía consumida indirectamente, por ejemplo combustible para tractores, camiones, etc; ambas energías ya se consideran producidas y consumidas dentro del subsistema energía. Se toma entonces el valor de energía consumida en fertilizantes, teniendo en cuenta la proporción de energía gastada en dicha producción a partir de la información consultada en IFA<sup>99</sup>. La producción de alimentos depende además de la población y de la tierra disponible; la población viene del sector población y la tierra para agricultura viene del sector ambientes naturales. La relación entre producción de alimentos y población no se establece mediante una tasa de producción por persona, pues un supuesto del modelo es que la mano de obra es suficiente. La relación entre los tres factores se estableció haciendo uso de los datos históricos disponibles: para la producción de alimentos y la tierra utilizada para los cultivos se utilizaron las estadísticas de la FAO<sup>100</sup>; para la población se utilizaron los datos de población de la ONU; para la energía consumida en fertilizantes, la información de la IFA. Usando estos datos históricos se usó la regresión para obtener una relación matemática entre los valores; se hizo esto a pesar que la regresión no es mejor método para establecer relaciones de este tipo, pero se consideró una aproximación adecuada a los alcances del proyecto. Es importante notar que la dinámica de los alimentos se modeló teniendo en cuenta los datos de producción de cereales, considerándose adecuada esta aproximación al ser estos la base de la alimentación mundial. Otro supuesto crucial es que al haberse modelado la población como un agregado de toda la población mundial, la alimentación se tuvo que considerar como un "promedio" de las que tienen las personas de diferentes países y situaciones sociales en la tierra.

---

<sup>99</sup> IFA, International Fertilizer Industry Association, <http://www.fertilizer.org/>

<sup>100</sup> FAO: Organización para los Alimentos y la Agricultura de ONU, división de estadísticas <http://faostat.fao.org/>

En este prototipo se considera que la influencia de la ciencia y tecnología, las expectativas y las políticas, el efecto que tienen sobre la producción y el consumo de alimentos esta relacionada con el mejoramiento de los medios de producción, pero lo más importante, con la distribución de los mismos, la cual debe ser idealmente más adecuada para suplir las necesidades de todos en la tierra. En resumen, la configuración del nuevo sistema de producción de alimentos puede describirse así: La población, la energía y la tierra disponible para el cultivo afectan la producción de alimentos con influencia positiva. Además las expectativas, las políticas, la ciencia y la tecnología disminuyen esta producción así como el consumo, y este consumo depende a su vez de la población.

Otro sector que fue anulado en el cuarto prototipo fue el del recurso forestal, debido a que era demasiado detallado con relación a los demás factores del cambio global representados en el modelo. En la representación deseada no se incluyó como factor limitante la materia prima, así que el recurso forestal solo tenía importancia como fuente de energía. La idea de representar el recurso forestal en el modelo venía de representar los combustibles basados en biomasa; se tomó la madera pues es la fuente de combustible a partir de biomasa más común y más fácil de visualizar para la gente en esta parte del mundo. Para simplificar el modelo, este recurso fue eliminado de la representación, y la consideración de los combustibles de biomasa pasó a ser representada por el factor recursos renovables. Este factor recursos renovables hace parte del sector energía y es afectado por la población, por los ambientes naturales, por las políticas y por las la ciencia y tecnología; estos afectan la producción de los recursos. El consumo de estos recursos es afectado por la población mediante una tasa de consumo, por las expectativas y preferencias, por las políticas y por la ciencia y tecnología. El consumo de los recursos renovables a su afecta las emisiones de gases invernadero.

Cabe mencionar que factores como la lluvia ácida y la inclusión del modelo económico no tuvieron en cuenta. Es difícil caracterizar las relaciones entre la lluvia ácida y los ambientes naturales, pues no existen muchos datos a nivel global sobre el fenómeno y no hay explicaciones asequibles sobre el mismo. En el caso del modelo económico, la tarea requeriría de un economista y además podría considerarse todo un modelo e incluso todo un proyecto en si misma. De esto se desprende que el capital y los bienes y los servicios no se tuvieron en cuenta explícitamente sino implícitamente en todo el proceso de modelado.

Otros cambios que se realizaron en todos los sectores del prototipo fue el de hacer que la influencia ejercida por los factores ciencia y tecnología, expectativas y preferencias y la de las políticas sobre los correspondientes elementos, caigan sobre la tasa de producción o consumo y no sobre el flujo que representa el consumo o producción. De esta forma se representa mejor el hecho que estos factores tienden a afectar el consumo producción per capita o por factor, por ejemplo disminuir la tasa de consumo de recursos no renovables por persona, relacionada con las expectativas y preferencias de la gente; si es por preferencia de la gente, es el consumo per capita el que debe disminuir

Con los cambios explicados anteriormente se logró una simplificación del modelo sin alterar el comportamiento del mismo, haciéndolo un poco más fácil de leer. Después se aplicaran las otras fases del plan de pruebas sobre este nuevo prototipo y de esta forma se concluirá el proceso de modelado.

### **11.3. DIAGRAMA DE INFLUENCIAS**

Debido a lo complejo del diagrama de influencias y del tamaño que tiene, se presenta un diagrama de sectores del prototipo en este texto, donde se pueden ver las influencias que tiene un sector sobre otro, mientras que el diagrama completo se incluye en el archivo de evolución que acompaña el proyecto como un anexo.

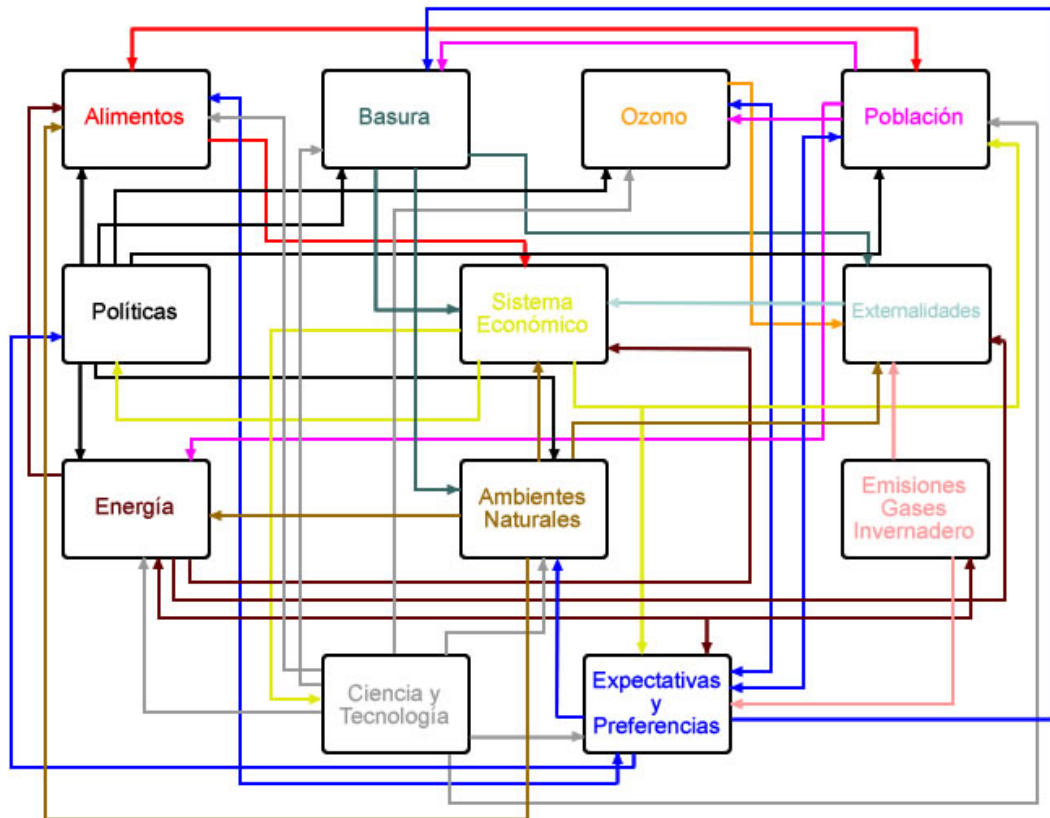


Figura N° 38: Diagrama de Sectores del cuarto prototipo.

#### 11.4. DIAGRAMA FLUJO NIVEL

Se expondrán los cambios más significativos realizados al modelo, y para poder mostrarlos en este apartado, se dividió el diagrama en sectores, los cuales se verán a continuación:

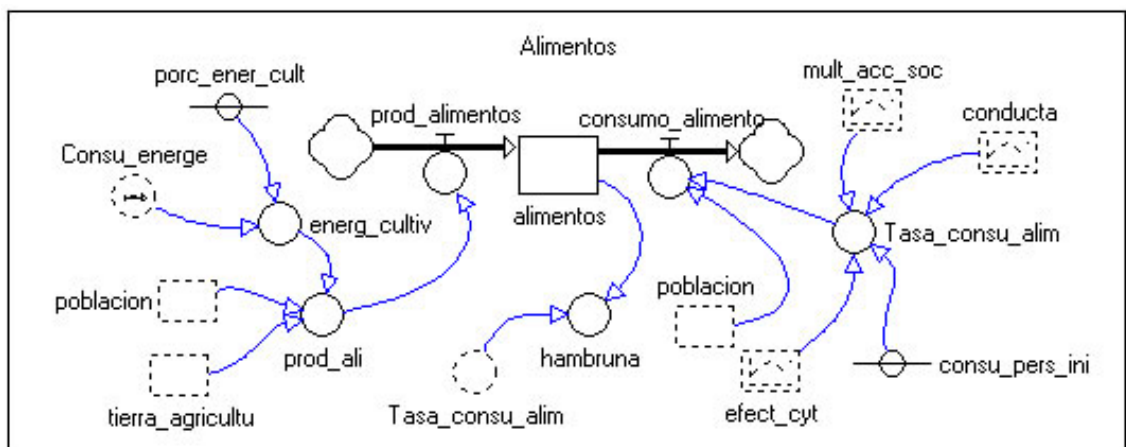


Figura N° 39: Sector Alimentos

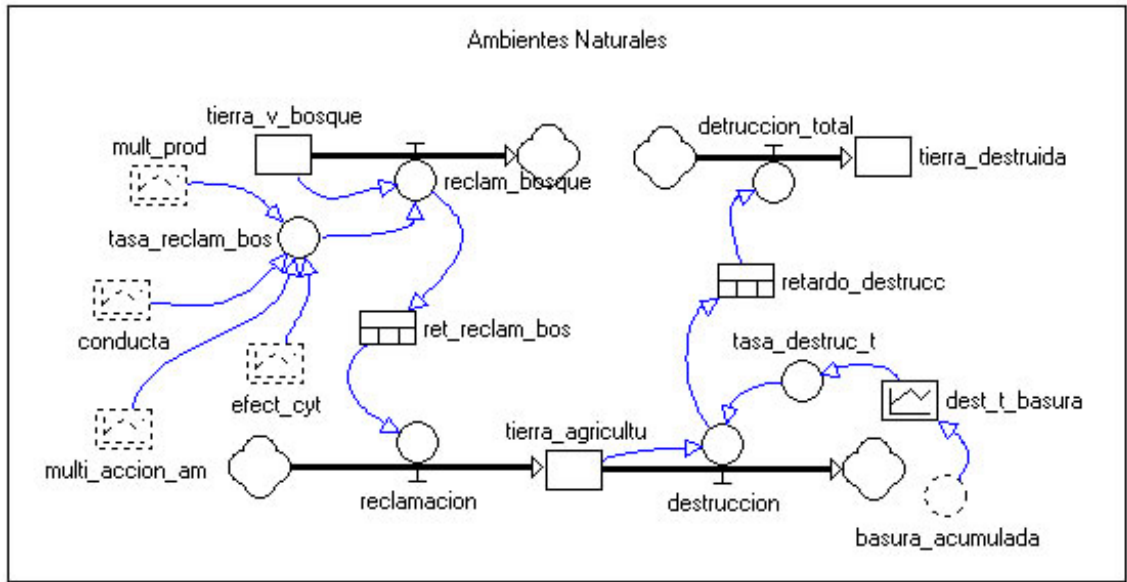


Figura N° 40: Sector Ambientes Naturales

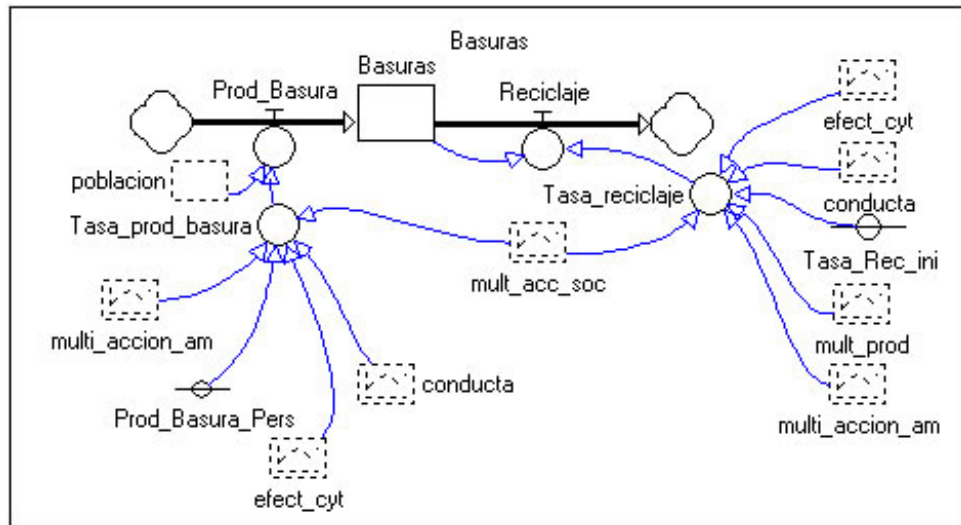


Figura N° 41: Sector Basuras

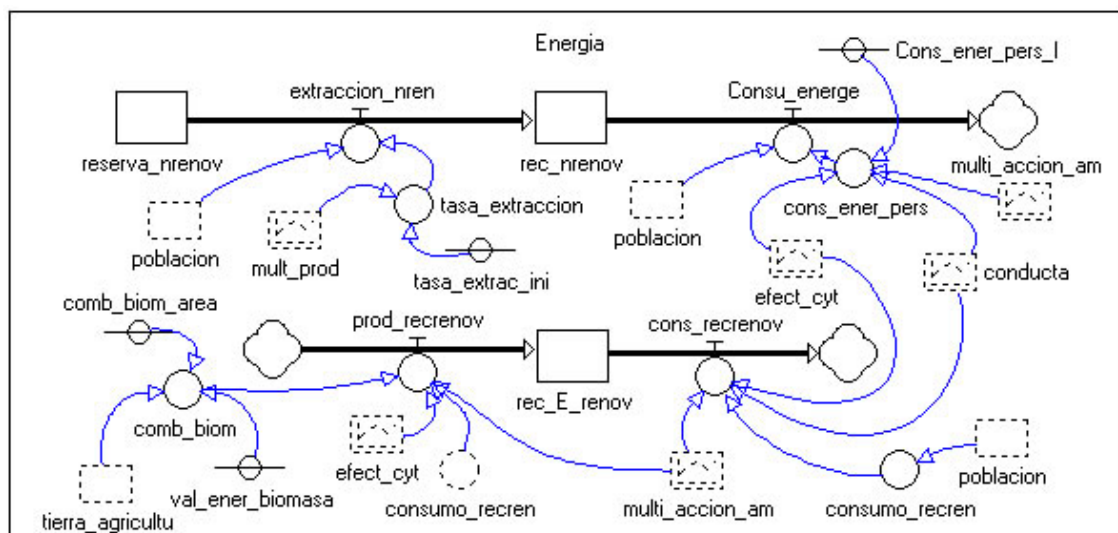


Figura N° 42: Sector Energía.

Los sectores incluidos son los que se modificaron como producto de las recomendaciones de la fase I de las pruebas. Para ver los cambios realizados a otros sectores, remítase al modelo incluido como anexo del prototipo.

### 11.5. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS

La definición de los elementos que constituyen el modelo se presenta a continuación, junto con una breve descripción complementaria a lo expuesto en la caracterización en prosa para cada uno y una descripción de las unidades en que se mide la correspondiente magnitud. En este caso se incluyeron los elementos nuevos o que cambian de definición con respecto al tercer prototipo. La definición de todos los elementos puede encontrarse en el modelo que viene como anexo.

Definición de los elementos:

Nombre	Cons_ener_pers_I
Tipo	Parámetro
Definición	1.295299632
Descripción	Tasa de consumo de energía a partir de combustibles por persona al año.

Nombre	Egresos_activid
Tipo	Parámetro
Definición	[3,5.6*7.11,0,0,2,2,116]
Descripción	Egresos debido a la producción de alimentos, extracción de recursos no renovables, consumo humano de agua, consumo de cultivos, explotación de madera y reclamación de bosques y llanuras.

Nombre	Ingresos_activid
Tipo	Parámetro
Definición	[1,500,200,0.5,50*7.11]
Descripción	Ingresos respectivos que se tienen por consumo de alimentos, consumo de madera como recurso, consumo de madera como combustible, reciclaje y consumo de energía

Nombre	Tasa_Rec_ini
Tipo	Parámetro
Definición	0.1

Descripción	Tasa de reciclaje.
Nombre	Tasa_cons_u_alim
Tipo	Auxiliar
Definición	$consu\_pers\_ini * conducta * efect\_cyt * (1 - mult\_acc\_soc)$
Descripción	Consumo de Alimentos por persona [Tm/Personas]
Nombre	Tasa_prod_basura
Tipo	Auxiliar
Definición	$(Prod\_Basura\_Pers/1000) * conducta * efect\_cyt * (1 - multi\_accion\_am) * (1 - mult\_acc\_soc)$
Descripción	Producción de basura por persona. [Tm/Persona]
Nombre	Tasa_reciclaje
Tipo	Auxiliar
Definición	$Tasa\_Rec\_ini / ((1 + conducta) * (1 + efect\_cyt) * (1 + mult\_prod) * (1 - multi\_accion\_am) * (1 - mult\_acc\_soc))$
Descripción	Tasa de reciclaje.
Nombre	alimentos
Tipo	Nivel
Definición	3008572156.61334
Descripción	Cantidad de alimentos disponibles para consumo por año. [Tm]
Nombre	av_tecn
Tipo	Flujo
Definición	$(innovacion/ciencia) * rec\_de\_socie * tecnologia$
Descripción	Avances tecnológicos por año, que se dan debido a los recursos de sociedad, a la ciencia e incluso debido a la misma tecnología.
Nombre	comb_biom
Tipo	Auxiliar
Definición	$((0.1 * tierra\_agricultu) * comb\_biom\_area) * val\_ener\_biomasa$
Descripción	Cantidad de Biomasa disponible para combustible. [m3]
Nombre	comb_biom_area
Tipo	Parámetro
Definición	25
Descripción	Cantidad de combustible de biomasa que se puede producir potencialmente por Ha. [m3]
Nombre	cons_recrenov
Tipo	Flujo
Definición	$consumo\_recren * conducta * efect\_cyt * (1 - multi\_accion\_am)$
Descripción	Cantidad de recursos que se consumen al año. Se asume que es igual para este prototipo.
Nombre	consu_pers_ini
Tipo	Parámetro
Definición	$(0.234705) * (1000) * (6.80272)$
Descripción	Consumo mínimo de alimento por miles de personas al año. Se inicia en un nivel exagerado de alimento. [Tm]
Nombre	consumo_alimento
Tipo	Flujo
Definición	$Tasa\_consu\_alim * poblacion$
Descripción	Consumo de alimentos por año. [Tm]

Nombre	consumo_recren
Tipo	Auxiliar
Definición	$(0.009199301*1000*poblacion)$
Descripción	Tasa de consumo de recursos renovables por persona.
Nombre	convertidor_NE
Tipo	Auxiliar
Definición	$(Niveleconomico/0.5e16)$
Descripción	Convertidor de las unidades de nivel económico.
Nombre	dest_t_basura
Tipo	Tabla
Definición	INTLINEAL(2,0,100000,0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.1)
Descripción	Multiplicador que representa la destrucción de tierra por las basuras.
Nombre	destruccion
Tipo	Flujo
Definición	$tierra\_agricultu*tasa\_destruc\_t$
Descripción	Cantidad de tierra que se va destruyendo debido al uso de las mismas para la producción de cultivos.
Nombre	detraccion_total
Tipo	Flujo
Definición	retardo_destrucc
Descripción	Cantidad de tierra desertizada que entra al año.
Nombre	efec_hambre
Tipo	Auxiliar
Definición	$if(hambruna>0,10/1000*poblacion,0)$
Descripción	Variable sobre el efecto del hambre que afecta las muertes en el nivel de la población.
Nombre	energ_cultiv
Tipo	Auxiliar
Definición	$porc\_ener\_cult*Consu\_energe$
Descripción	Cantidad de energía usada para la producción de alimentos [Tm. Equiv. Petróleo].
Nombre	extraccion_nren
Tipo	Flujo
Definición	$poblacion*tasa\_extraccion*1000$
Descripción	Producción de combustibles al año. Todos los tipos de energías se homogenizaron utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo. [Tm. Equiv. Petróleo]
Nombre	fecundidad
Tipo	Auxiliar
Definición	$((Nivelfecun*Fec\_inicial)/vida\_prom\_muj)*(((conducta/1)*(1-mult\_acc\_soc)))$
Descripción	Numero de Hijos por mujer en edad reproductiva sobre el total de la población. Proporción de nacimientos más adecuada para el estudio de los procesos demográficos.
Nombre	hambruna
Tipo	Auxiliar
Definición	$IF(alimentos>=(Tasa\_consu\_alim),0,1)$

Descripción	Indicador de hambre por persona. Indica cuando no hay suficientes alimentos para alimentar toda la población como se requiere.[Tm/persona]
Nombre	mejora_Niveleco
Tipo	Flujo
Definición	$\text{ingresos\_activid}[1]*\text{consumo\_alimento}+\text{ingresos\_activid}[3]*\text{cons\_recrenov}+\text{ingresos\_activid}[4]*\text{Reciclaje}+\text{ingresos\_activid}[5]*\text{Consu\_energe}$
Descripción	Alza en el nivel económico.
Nombre	Nivelfecun
Tipo	Tabla
Definición	$\text{INTLINEAL}(2,1,10,1,0.8728944,0.7367099,0.5914464,0.4598014,0.3463143,0.2419062,0.164735,0.1148006,0.10302424,0.098,0.093,0.09)$
Descripción	Relación entre el nivel económico y la fecundidad.
Nombre	porc_ener_cult
Tipo	Parámetro
Definición	0.02
Descripción	Porcentaje de la energía producida que va a la producción de alimentos.
Nombre	prod_ali
Tipo	Auxiliar
Definición	$(-1*2269237715) + (6.485612011*\text{energ\_cultiv}) + (352.8112647*\text{poblacion}) + (3.066780395*\text{tierra\_agricultu})$
Descripción	Consumo de energía para la producción de alimentos.[Tm. Equiv. Petróleo]
Nombre	prod_alimentos
Tipo	Flujo
Definición	prod_ali
Descripción	Cantidad de alimentos producidos en un año.[Tm]
Nombre	prod_recrenov
Tipo	Flujo
Definición	$(\text{consumo\_recren}+\text{comb\_biom})+(\text{consumo\_recren}+\text{comb\_biom})*\text{multi\_accion\_am}+(\text{consumo\_recren}+\text{comb\_biom})*(1-\text{efect\_cyt})$
Descripción	Cantidad de recursos renovables debido al CO2 que libera la madera como combustible.
Nombre	rec_E_renov
Tipo	Nivel
Definición	0
Descripción	Combustibles renovables acumulados. Se homogenizó utilizando equivalentes caloríficos (btu) y luego estos equivalentes caloríficos se convirtieron en toneladas equivalentes petróleo. [Tm. equiv. Petróleo]
Nombre	rec_de_socie
Tipo	Auxiliar
Definición	$\text{Niveleconomico}/1e16$
Descripción	Recursos utilizados para el pro de la tecnología y la ciencia.
Nombre	reclamacion
Tipo	Flujo
Definición	ret_reclam_bos
Descripción	Cantidad de tierra que se convierte en tierra de cultivo debido a la reclamación de bosques y llanuras.
Nombre	tasa_destruc_t

Tipo	Auxiliar
Definición	$0.005+(0.005*dest\_t\_basura)$
Descripción	Porcentaje de tierras que se van deteriorando o destruyendo al año, debido a la agricultura.

Nombre	tasa_extrac_ini
Tipo	Parámetro
Definición	1.49
Descripción	Valor de producción de energía por recursos no renovables por persona [Tm]. Hallada por regresión y promedio.

Nombre	tasa_extraccion
Tipo	Auxiliar
Definición	$(1+mult\_prod)*tasa\_extrac\_ini$
Descripción	Valor de producción de energía por recursos no renovables por persona [Tm].

Nombre	tierra_agricultu
Tipo	Nivel
Definición	5016729000
Descripción	Nivel de tierras utilizadas para la agricultura.

Nombre	tierra_v_bosque
Tipo	Nivel
Definición	3868796000
Descripción	Cantidad de tierra virgen o bosques que no han sido adaptados para la agricultura.

Nombre	val_ener_biomasa
Tipo	Parámetro
Definición	0.228626187
Descripción	Valor energético de la biomasa [Tm. equiv. Petróleo]

Tabla N° 7: Definición de los elementos modificados para el cuarto prototipo.

## 11.6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

En este análisis se utilizó de nuevo los mismos escenarios con que se han hecho los análisis anteriores tan solo que en este prototipo se han realizado algunos cambios sobre la estructura después de someter el tercer prototipo a las respectivas pruebas de validación de modelos. Los escenarios son:

- **Por Defecto:** Donde tanto el nivel de fecundidad y el nivel de mortalidad presentan descensos acorde con la teoría de la transición demográfica. En la figura N° 43 es la trayectoria de color rojo.
- **Población en Crecimiento:** Este escenario muestra un crecimiento constante en la población, sin encontrar una tasa de reemplazo. En la figura N° 43 es la trayectoria de color azul.
- **Descenso Rápido en la Fecundidad:** En este escenario se presenta un ambiente donde la tasa de fecundidad baja mucho más rápido de lo debido manteniendo un descenso normal en la tasa de mortalidad. En la figura N° 43 es la trayectoria de color morado.

Las variables analizadas bajo estos tres contextos son:

4. Cantidad de recursos renovables.

5. Nivel de recursos no renovables.
6. Tierra de dispuesta para agricultura.
7. Acumulación de basuras.

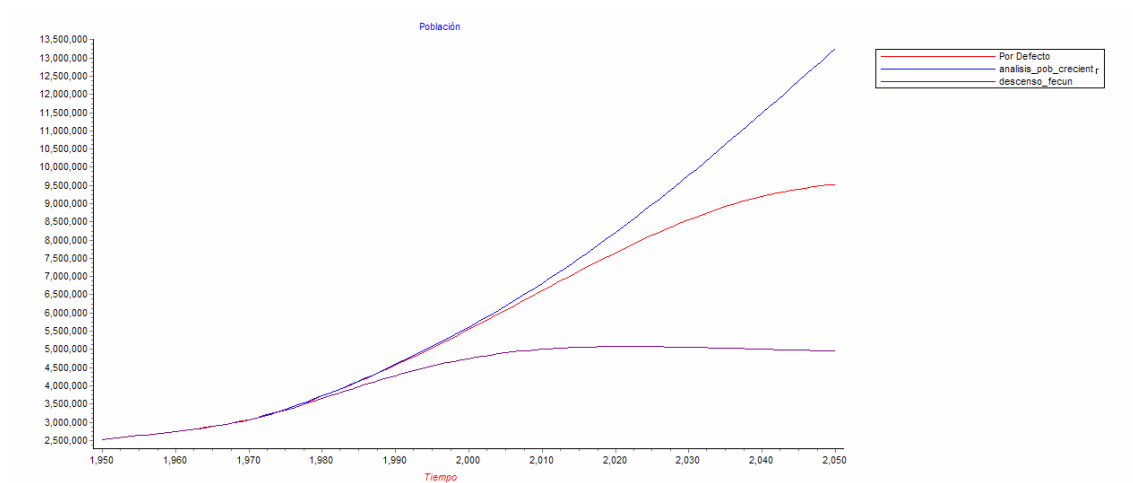


Figura N° 43: Escenarios para el análisis de sensibilidad de la población en el cuarto prototipo.

### 11.6.1. Análisis de la Cantidad de Recursos Renovables

El nivel de recursos renovables muestra un comportamiento de crecimiento similar en cada una de las tres gráficas, al principio un poco rápido pero con una tendencia a estabilizarse en el futuro:

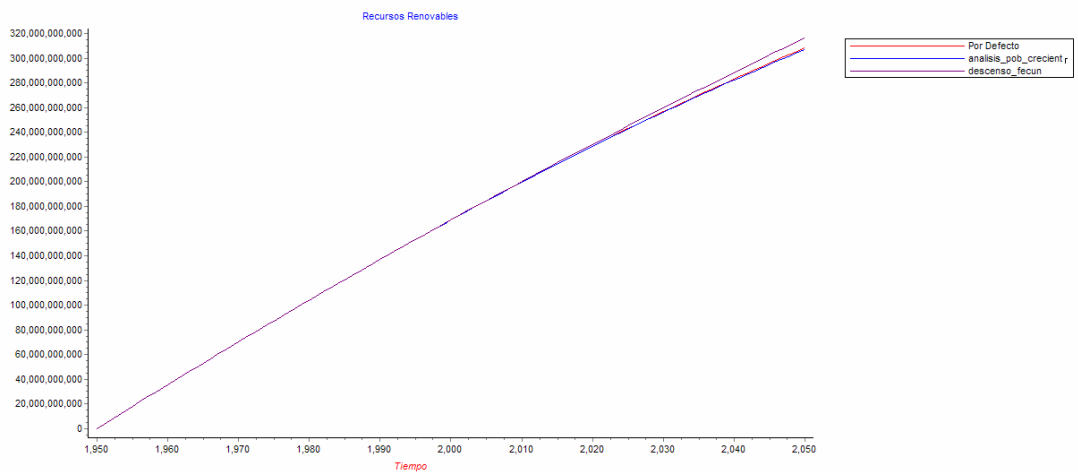


Figura N° 44: Cantidad de Recursos Renovables.

El subsistema de los recursos renovables a pesar de que si se ve afectado por los diferentes tipos de población, es muy poco sensible a tales cambios.

### 11.6.2. Análisis de Sensibilidad Sobre el Nivel de Recursos No Renovables

Al igual que los recursos renovables, estos presentan un comportamiento en aumento, con la diferencia que los recursos no renovables empiezan a crecer de forma lenta pero sin una tendencia al equilibrio:

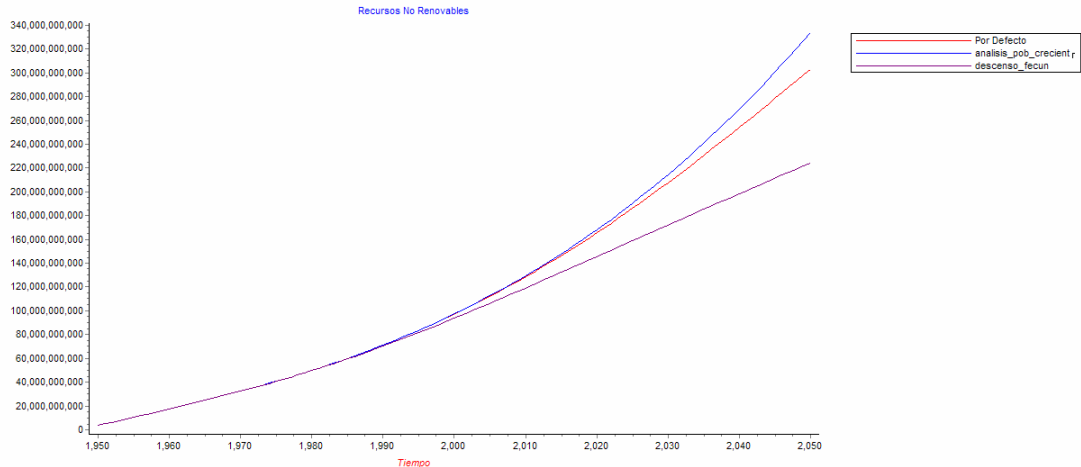


Figura N° 45: Cantidad de Recursos No Renovables.

Este subsistema es mas sensible a los cambios en el subsistema de población que los recursos renovables, tal y como se muestra en la anterior gráfica.

Los cambios de estabilidad y crecimiento ilimitado tanto en los recursos renovables como en los no renovables, se deben también al efecto que ejercen las políticas ambientales, la tecnología y los cambios en la conducta de la población.

### 11.6.3. Análisis de la Tierra disponible para Agricultura

Como es de esperarse el efecto de la población sobre la tierra de agricultura no es nada positivo. A mayor población, que es tal y como se presenta en los tres escenarios, mayor es la producción de basuras que se van a depositar en un porcentaje de la tierra disponible, contribuyendo con la destrucción de la tierra. Además cambios en el comportamiento de otros subsistemas, incluyendo la población, también influyen indirectamente en los efectos de las conductas y políticas ambientales que recaen sobre la disminución de la tasa de reclamación de bosques para convertir en tierras de agricultura:

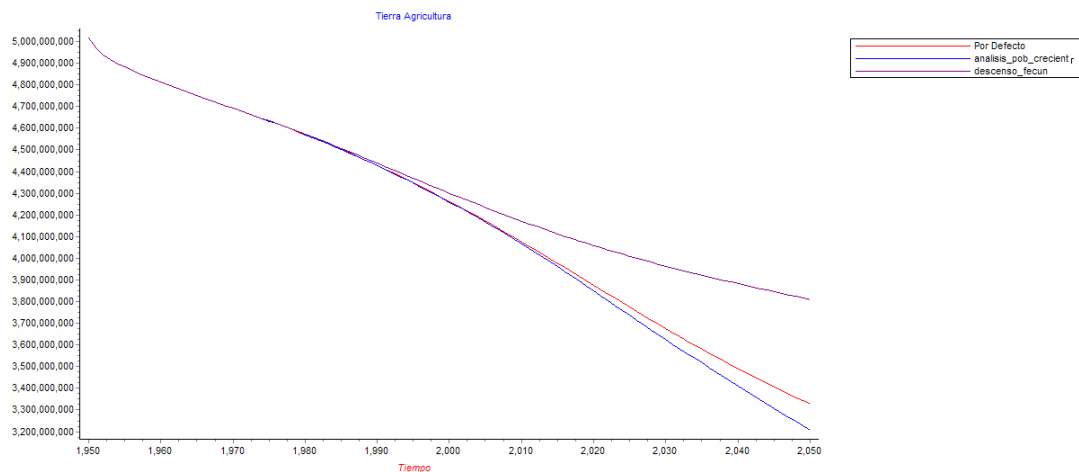


Figura N° 46: Cantidad de tierras aptas para la agricultura.

#### 11.6.4. Análisis en la Acumulación de Basuras

El comportamiento de las gráficas que representan la acumulación de basuras es algo interesante pues presenta fluctuaciones al principio para terminar al final en diferentes trayectorias. El reciclaje y la producción de basura son los parámetros encargados de definir el factor de acumulación de basuras y tal como se observa en la siguiente figura presentan una notable sensibilidad a las variaciones en el subsistema de población:

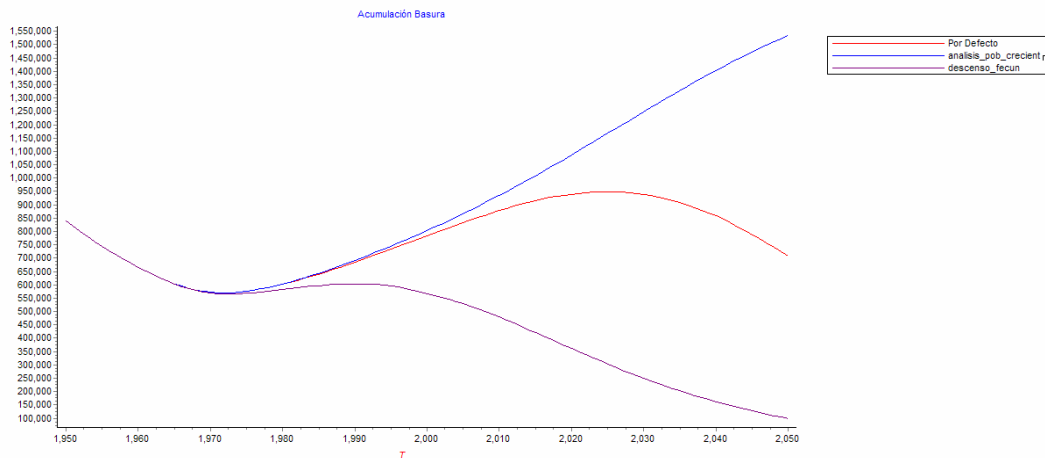


Figura N° 47: Acumulación de basuras.

Las políticas sociales, cambios en la conducta y avances en la tecnología contribuyen al aumento en la tasa de reciclaje lo que hace descender la gráfica al inicio, pero el crecimiento de la población es lo que va a marcar la diferencia en cada una de las trayectorias. En la trayectoria azul está reflejado el paso creciente de la población que desplaza la tasa de reciclaje aumentando la producción de basura. Para la trayectoria roja el crecimiento es algo más moderado pues se presenta una estabilización en la población lo que conlleva a un nuevo ajuste en las políticas y cambio en las expectativas de la población para aumentar la tasa de reciclaje. En la última trayectoria, que representa un descenso rápido en la fecundidad, se observa como baja considerablemente el nivel de basuras debido en este caso no principalmente a variaciones en la

conducta sino a la falta de producción de basura por parte de la poca población que hay en ese escenario.

## 12. VALIDACIÓN FINAL DEL MODELO – SEGUNDA PARTE

### 12.1. FASE II DEL PLAN DE PRUEBAS

#### 12.1.1. Prueba de error en el paso de Integración

Esta prueba consiste en variar los valores del paso de integración para ver si los comportamientos de las variables cambian. Si existen cambios de comportamiento, existen errores en la estructura o los valores de los elementos del modelo. Esta prueba se realizó cambiando el paso de integración y observando las gráficas. Los pasos de prueba fueron:

- Duplicar el paso de integración,
- Reducir a la mitad el paso de integración
- Reducir a una tercera parte el paso de integración
- Utilizar un valor aleatorio para el paso de integración. Se utilizó el valor aleatorio 0.943597, obtenido mediante una función de aleatorios.

Los resultados fueron:

- Duplicar el paso de integración: No hubo cambios significativos en el comportamiento.
- Reducir a la mitad el paso de integración: No hubo cambios significativos en el comportamiento.
- Reducir a una tercera parte el paso de integración: No hubo cambios significativos en el comportamiento.
- Utilizar un valor aleatorio para el paso de integración. Se utilizó el valor aleatorio 0.943597: No hubo cambios significativos en el comportamiento.

Con estos resultados se puede afirmar que el modelo es independiente del paso de integración utilizado.

#### 12.1.2. Evaluación de Parámetros

La evaluación de parámetros consiste en revisar la validez conceptual de cada parámetro, es decir que represente algo dentro del modelo y no sea una forma de corregir errores o relaciones dudosas. Además se debe revisar el procedimiento que se utilizó para obtener el valor, que debe ser o estimación mediante estadística, o consulta de una fuente confiable, o estimación por medio de juicios acerca del fenómeno. Como ya se mencionó en un apartado anterior, muchos de los parámetros de este modelo se infirieron por medio de calibración y por medio de la lógica, es decir se obtuvieron por medio de juicios acerca del fenómeno. A continuación se relacionan los parámetros que tienen un valor discutible, o un significado no muy claro y se explicará porque se usaron y como se estimó su valor; se incluye su valor y la descripción que ellos aparece en el modelo:

<b>Nombre:</b>	Cons_ener_pers_I.
<b>Valor:</b>	1.295299632
<b>Descripción:</b>	Tasa de consumo de energía a partir de combustibles por persona al año.
<b>Explicación:</b>	Este parámetro tiene un significado físico muy claro, y fue inferido mediante métodos estadísticos a partir de los datos históricos sobre consumo de energía de la EIA. Se calculo el promedio de la división de consumos por personas del año 1970 en adelante; ya que los valores

	fueron similares se pudo utilizar el promedio sin agregar mucho error.
<b>Nombre:</b>	Fec_inicial.
<b>Valor:</b>	5
<b>Descripción:</b>	Tasa de fecundidad inicial, el valor que tendría al inicio de la simulación suponiendo condiciones económicas estables.
<b>Explicación:</b>	Este parámetro representa el valor de la fecundidad al inicio de la simulación. Fue obtenido de las estadísticas de la división de población de ONU, unpopulation.

<b>Nombre:</b>	Muje_edad_rep.
<b>Valor:</b>	0.494
<b>Descripción:</b>	Cantidad de mujeres en edad reproductiva dentro de la población total de mujeres.
<b>Explicación:</b>	El dato fue proporcionado por el demógrafo Edgar Omar Rueda.

<b>Nombre:</b>	NE_polit.
<b>Valor:</b>	INTSPLINE(2,0,1,0,0.03414634,0.09756098,0.1902439,0.3121951,0.50,0.75,1)
<b>Descripción:</b>	Acción del nivel económico dentro de las políticas de producción y economía.
<b>Explicación:</b>	Esta tabla representa la influencia del nivel económico sobre las políticas de producción y economía. Este subsistema fue diseñado por los modeladores, y no existen datos para contrastar con el parámetro. Se estimó a partir de juicios sobre el fenómeno.

<b>Nombre:</b>	Nivel_morta.
<b>Valor:</b>	INTLINEAL(2,1,1,1,0.9,0.7096585,0.4562219,0.3285854,0.2202837,0.1516794,0.124439,0.1199148,0.1,0.09,0.08,0.07)
<b>Descripción:</b>	Relación entre el nivel económico y la tasa de mortalidad.
<b>Explicación:</b>	Esta tabla representa la influencia del nivel económico sobre la tasa de mortalidad. Como representa una relación que cae sobre una variable cuyo comportamiento si se puede contrastar, los valores de la tabla se hallaron por calibrado. El caso de Nivel_fecun es análogo a este.

<b>Nombre:</b>	Prod_Basura_Pers.
<b>Valor:</b>	521.2380952
<b>Descripción:</b>	Producción de basuras por persona. Datos de municipalidades de 45 países del mundo. Estimado suave. [kg]
<b>Explicación:</b>	Como está expresado en la descripción el dato se estimó aproximadamente mediante los datos de municipalidades de 45 países.

<b>Nombre:</b>	Tasa_Rec_ini.
<b>Valor:</b>	0.1
<b>Descripción:</b>	Tasa de reciclaje.
<b>Explicación:</b>	Este valor se obtuvo mediante juicios acerca del fenómeno y prueba y error. El valor adoptado produce un comportamiento adecuado, luego se acepta.

<b>Nombre:</b>	comb_biom_area.
<b>Valor:</b>	25
<b>Descripción:</b>	Cantidad de combustible de biomasa que se puede producir

	potencialmente por Ha. [m3]
<b>Explicación:</b>	Es un dato con respecto a la madera, que se extrapola para representar toda la biomasa explotable como combustible. Se obtuvo de una página menor que no constituye garantía, pero se asume como un valor arbitrario que funciona.

<b>Nombre:</b>	consu_pers_ini.
<b>Valor:</b>	(0.234705)*(1000)*(6.80272)
<b>Descripción:</b>	Consumo mínimo de alimento por miles de personas al año. Se inicia en un nivel exagerado de alimento. [Tm]
<b>Explicación:</b>	Se estimó a partir de los datos de consumo de cereales de la División de Estadísticas de la FAO, faostat. Se utilizó un factor de corrección calculado a partir de juicios y calibración para indicar el sobrecosto en producción que hay que asumir para cubrir las pérdidas por inapropiada distribución.

<b>Nombre:</b>	dest_t_basura.
<b>Valor:</b>	INTLINEAL(2,0,100000,0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1,1.1)
<b>Descripción:</b>	Destrucción de tierras por contaminación debido a la acumulación de basuras.
<b>Explicación:</b>	Esta tabla representa la influencia en la destrucción de tierras de la basura acumulada. Esta tabla se creó basándose en el comportamiento que se esperaba, así se creó esta tabla para que regulara el comportamiento de la destrucción de tierras con un modo de comportamiento pensado para lograr ese efecto.

<b>Nombre:</b>	nivel_fecun.
<b>Valor:</b>	INTLINEAL(2,1,10,1,0.8728944,0.7367099,0.5914464,0.4598014,0.3463143,0.2419062,0.164735,0.1148006,0.10302424,0.098,0.093,0.09)
<b>Descripción:</b>	Relación entre el nivel económico y la fecundidad.
<b>Explicación:</b>	El mismo caso de Nivel_mort.

<b>Nombre:</b>	tasa_em_biomasa.
<b>Valor:</b>	0.1719
<b>Descripción:</b>	Tasa de emisión de gases invernadero debido a la madera.
<b>Explicación:</b>	Se estimó teniendo en cuenta las emisiones de los principales tipos de madera y haciendo un promedio ponderado de dichas emisiones. Los datos se obtuvieron de una página no muy reconocida, pero el dato se asume como una aproximación.

<b>Nombre:</b>	tasa_extrac_ini.
<b>Valor:</b>	1.49
<b>Descripción:</b>	Valor de producción de energía por recursos no renovables por persona [Tm]. Hallada por promedio.
<b>Explicación:</b>	Tiene un significado físico muy claro, y fue inferido mediante métodos estadísticos a partir de los datos históricos sobre producción de energía de la EIA. Se calculó el promedio de la división de producción al año sobre personas, del año 1970 en adelante; ya que los valores fueron similares se pudo utilizar el promedio sin agregar mucho error.

<b>Nombre:</b>	tasa_mujeres.
<b>Valor:</b>	0.4988

<b>Descripción:</b>	Porcentaje que indica la cantidad de mujeres dentro de la población.
<b>Explicación:</b>	El dato fue proporcionado por el demógrafo Edgar Omar Rueda. Es un parámetro natural para la raza humana. Se mide contando los hijos varones al nacer.

<b>Nombre</b>	val_ener_biomasa.
<b>Valor</b>	0.228626187
<b>Descripción</b>	Valor energético de la biomasa [equiv. Petróleo]
<b>Explicación</b>	Se obtuvo mediante transformaciones matemáticas de varios valores de producción de energía de la madera. Esta se consideró buen estimador para toda la biomasa.

<b>Nombre:</b>	vida_prom_muj.
<b>Valor:</b>	47.5
<b>Descripción:</b>	Tasa que indica el valor de la vida promedio de la mujer.
<b>Explicación:</b>	Este parámetro representa el valor de la fecundidad al inicio de la simulación. Fue obtenido de las estadísticas de la división de población de ONU, unpopulation.

Tabla N° 8: Relación de los parámetros a revisar del cuarto prototipo.

En los casos en que se usaron valores aproximados o arbitrarios, se consideró adecuado su uso teniendo en cuenta la falta de disponibilidad de datos más exactos y la capacidad de producir un comportamiento como el esperado. Para trabajos de extensión de este proyecto se puede proponer el calcular todos los parámetros por medio de estadística más fuerte, o lo solicitud de los mismos a entidades internacionales involucradas. Para los alcances del proyecto se considera apropiado el uso de estos valores, ya que nunca fue parte de los objetivos el construir un modelo de alta fidelidad.

## 12.2. FASE III DEL PLAN DE PRUEBAS

### 12.2.1. Reproducción de Comportamiento

En la realización de esta prueba el texto de Sterman propone utilizar una de las tantas herramientas o fórmulas estadísticas disponibles para la evaluación de la reproducción del comportamiento de un sistema y así obtener un punto de referencia para comparar con las gráficas del comportamiento obtenidas mediante el modelo. En este caso se realizó una modificación a la prueba propuesta pues se llegó a la conclusión de que este proyecto no refleja un modelo que pretenda ser cuantitativamente exacto, y que por el contrario a lo que propone la prueba de reproducción de comportamiento, los valores cualitativos son el factor más importante. La importancia de este modelo radica en el valor cualitativo que pueda prestar a la comunidad ambiental, es decir el significado que pueda darse a los diferentes comportamientos arrojados bajo diferentes escenarios y que sirvan de apoyo didáctico e ilustrativo para la comprensión del fenómeno.

Sin embargo si se realizó una prueba de “comparación de comportamiento”, si así se puede llamar a la variación de la prueba original; basadas en puntos de referencia existentes y conocidos a nivel mundial como las gráficas representativas de la dinámica poblacional actual<sup>101</sup> o tablas representativas de las emisiones de energía o producción de gases atmosféricos a nivel mundial.<sup>102</sup> Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios pues no solo presentaron un

<sup>101</sup> World Population Prospect <http://www.unpopulation.org/>

<sup>102</sup> Carbon Dioxide Information Analysis Center, Es el principal centro de análisis de datos e información acerca del cambio global del departamento de energía de los estados unidos; incluye el Centro Mundial de Datos para Gases Traza Atmosféricos. Sitio Web oficial: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>.

comportamiento altamente similar sino también fueron muy acordes a los valores obtenidos en cada gráfica.

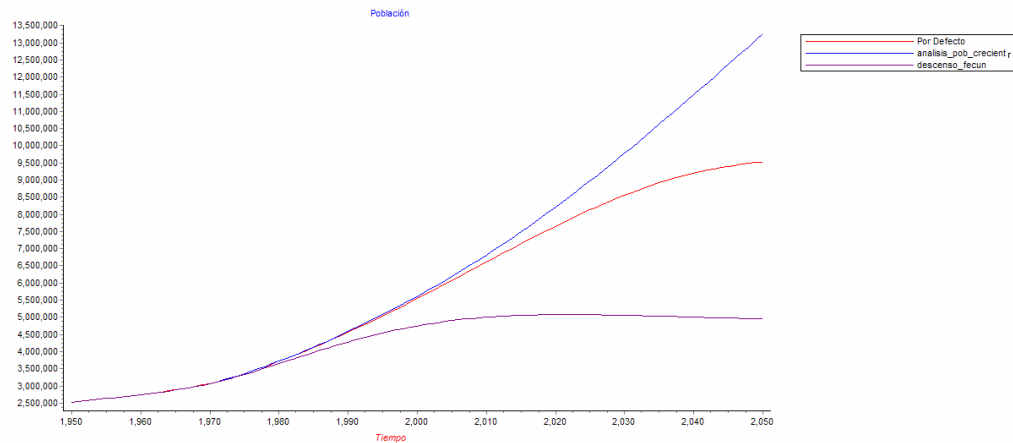


Figura N° 48: Comportamiento de la población en el prototipo final

### 12.2.2. Prueba de Comportamiento Anómalo

En el plan de pruebas se contempló la aplicación de una prueba de comportamiento anómalo. El texto de Sterman sugiere la aplicación de una prueba de knockout, la cual consiste en seleccionar una relación la cual será anulada con el fin de observar el comportamiento resultante. La opción de establecer un tiempo de ajuste de un retardo a infinito no es posible de implementar debido a las características del software de simulación, Evolución. De esta forma solo se hará la prueba borrando algunas relaciones, que se seleccionaran a continuación. Se escogerán relaciones que afecten los factores más importantes y relaciones que se consideren claves por sí mismas. Para evitar alargar el análisis hasta lo impracticable, se seleccionaran siete relaciones a analizar. Se mostrará el comportamiento del factor relacionado después del cambio y se analizará si hubo cambios en otros factores relacionados indirectamente.

Las relaciones a analizar son:

- La relación entre el elemento nivel\_fecun y fecundidad que representa la influencia del nivel económico en la fecundidad.
- La relación entre tierra de agricultura y tierra destruida, representada por el flujo llamado destrucción.
- La relación entre la conducta y tasa de consumo de alimentos.
- La relación entre conducta y las políticas, lo que anularía las políticas ambiental y social.
- La relación entre ciencia y tecnología y consumo energético.
- La relación entre ciencia y tecnología y producción de recursos energéticos renovables.
- La relación entre consumos y el retardo de divulgación científica.

Análisis por relación:

Relación entre el nivel económico y la fecundidad:

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de nacimientos y muertes:

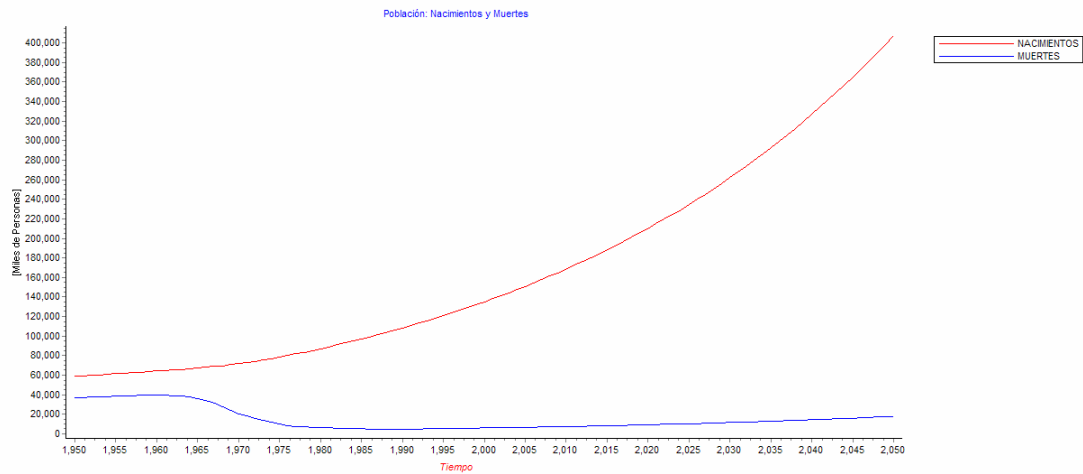


Figura N° 49: Gráfica de Nacimientos y muertes después de anulada la relación entre nivel económico y fecundidad.

Se puede notar un cambio significativo en los nacimientos. Cuando el nivel económico aumenta, la fecundidad disminuye, proporcionando una influencia reguladora que hacía descender significativamente los nacimientos. Al desaparecer esta relación los nacimientos aumentan sin control. Como consecuencia de esto, la población aumenta exponencialmente y el consumo de alimento se hace mayor que la producción al final del tiempo de simulación; un aumento similar ocurre en la acumulación de basura, y en los consumos de recursos energéticos. El resultado de la prueba confirma los planteamientos originales del modelo para el factor.

Relación entre tierra de agricultura y tierra destruida:

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de el cambio de uso de la tierra:

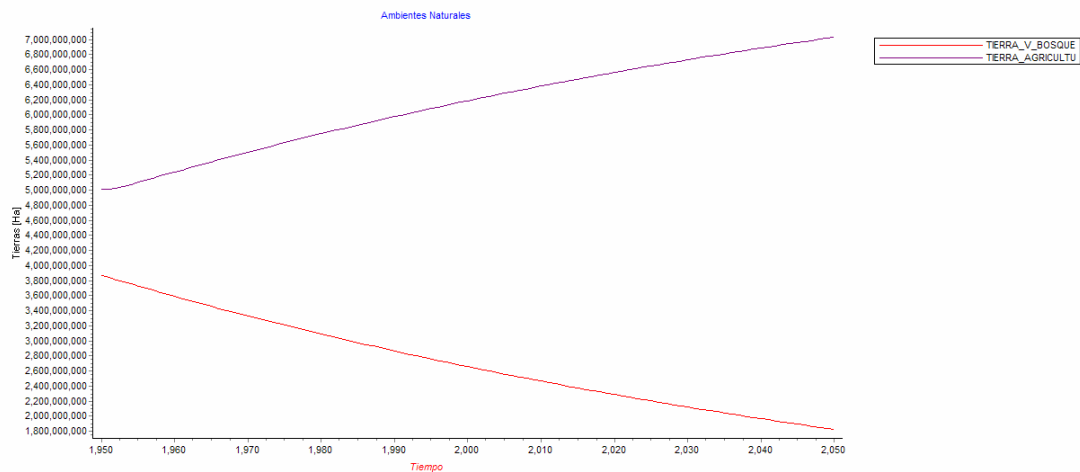


Figura N° 50: Gráfica de tierra virgen y tierra de agricultura después de anulada la relación entre tierra de agricultura y tierra destruida.

Se puede observar que las tierras para agricultura aumentan, mientras que antes disminuían lentamente. Entre los factores relacionados con este se puede notar un crecimiento alto de la producción de alimentos. El resultado de la prueba confirma los planteamientos originales del modelo para el factor.

Relación entre la conducta y tasa de consumo de alimentos.

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de producción y consumo de alimentos:

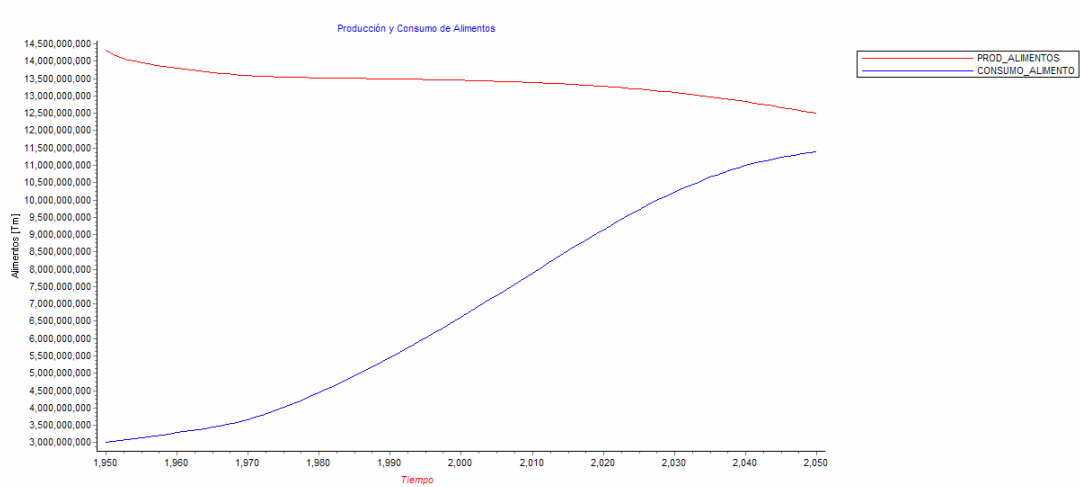


Figura N° 51: Gráfica de producción y consumo de alimentos después de anulada la relación entre conducta y consumo de alimentos.

Se puede observar que no hubo cambio en el modo de comportamiento, el cambio fue cuantitativo y muy bajo. Esto no contradice los planteamientos del modelo con respecto a la conducta, ya que esta lo que hace es regular el valor de las variables que afecta sin cambiar su modo de comportamiento.

Relación entre conducta y políticas

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de producción y consumo de alimentos:

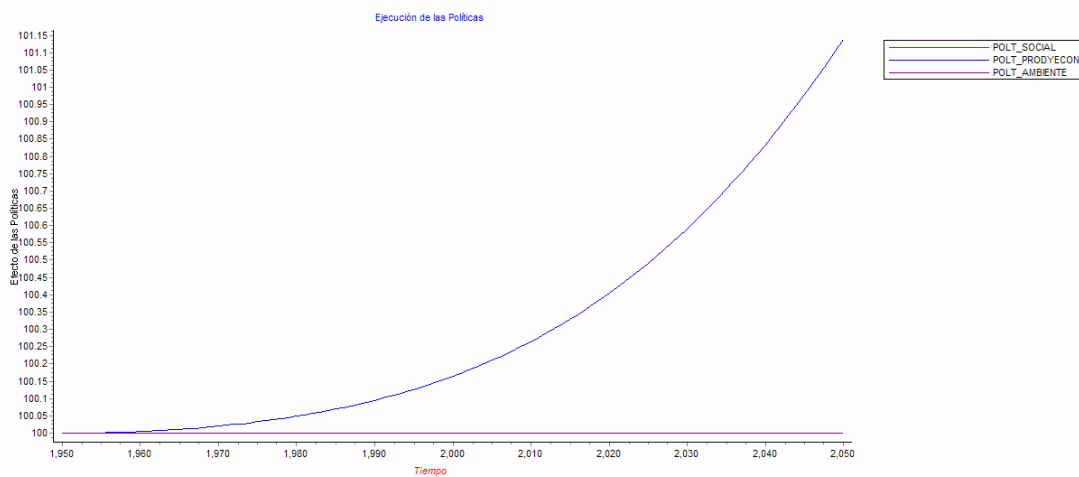


Figura N° 52: Gráfica de ejecución de las políticas después de anulada la relación entre conducta y políticas.

Se nota que las políticas ambiental y de acción social no aumentan, luego no se ejecutan éstas, permitiendo actuar en solitario a la política de crecimiento económico. Las consecuencias en los demás factores son el aumento cuantitativo de los valores de los consumos al perder la regulación de las otras políticas. Una vez más se ve confirmado el planteamiento inicial.

Relación entre ciencia y tecnología y consumo energético:

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de consumo energético:

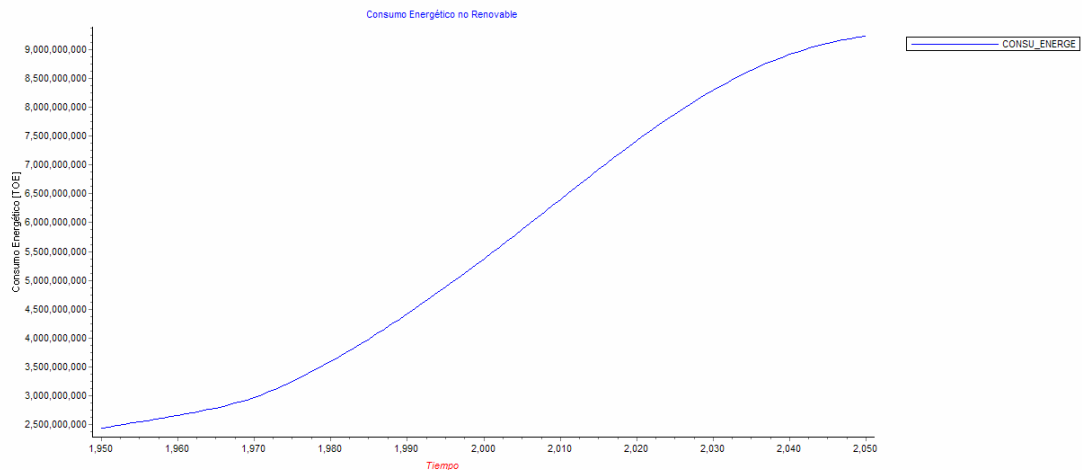


Figura N° 53: Gráfica de consumo recursos no renovables después de anulada la relación entre conducta y ciencia y tecnología.

El caso es muy similar al de conducta y consumo de alimentos. El cambio en la relación no afectó el modo de comportamiento sino los valores, lo que se esperaba.

Relación entre ciencia y tecnología y producción de recursos energéticos renovables:

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de producción de recursos energéticos renovables:

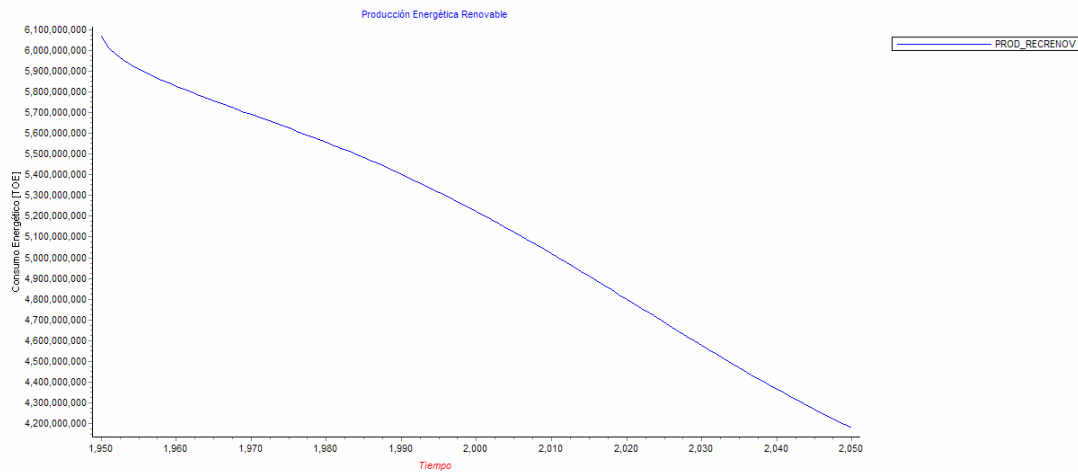


Figura N° 54: Gráfica de Producción de recursos renovables después de anulada la relación entre producción de recursos renovables y ciencia y tecnología.

Caso muy similar al anterior con la diferencia que el cambio cuantitativo es casi del 100%.

Relación entre consumos y el retardo de divulgación científica:

Gráfica del factor correspondiente después de anulada la relación. La gráfica es la de actitud hacia el ambiente:

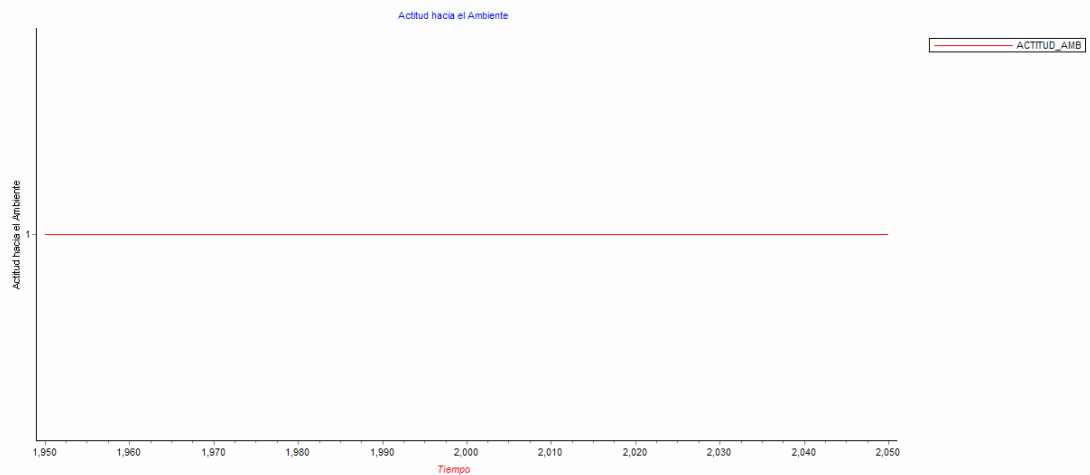


Figura N° 55: Gráfica de Producción de recursos renovables después de anulada la relación entre producción de recursos renovables y ciencia y tecnología.

En este caso la influencia de la actitud y por tanto de la conducta es neutralizada en todo el modelo. Se comporta como la suma de los casos tres y cuatro. En este caso también el comportamiento resultó como se esperaba.

Como conclusión de la prueba se tiene que el modelo responde como se esperaría al destruir una relación entre sus elementos, lo que confirma lo correcto de estas.

### 12.2.3. Comportamiento Sorpresa

El modelo no generó comportamientos no vistos ni reconocidos previamente.

### **12.3. FASE IV DEL PLAN DE PRUEBAS**

Este análisis ya fue realizado para el prototipo final. Se encuentra en el apartado 11.6.

### 13. RECOMENDACIONES PARA EL PROTOTIPO N

Debido a la complejidad del modelo y al ser este un proyecto con limitaciones de tiempo, personal involucrado y nivel educativo para el que se desarrolla, varias consideraciones quedaron por fuera del proceso de modelado. Cabe resaltar las siguientes, las cuales deberían ser implementadas en caso de continuarse el proceso de modelado:

Debe incluirse relaciones importantes relacionadas con los sistemas naturales físicos que quedaron por fuera como la acumulación de CO<sub>2</sub> y temperatura, lluvia acida y la relación entre CFC y la destrucción de la capa de ozono.

Debe diseñarse un mecanismo en el modelo para representar las reacciones en la percepción teniendo en cuenta los diferentes valores que tienen las diferentes culturas y economías del mundo, aunque esto lleve consigo un nivel de detalle más amplio para los propósitos del modelo.

Implementar las características actuales del sistema económico como tal. Esto traería la implementación del capital como un recurso y la implementación de la producción de bienes y servicios directamente en el modelo, no de forma implícita en el proceso como se venía haciendo.

El consumo de alimentos debe depender de la cantidad disponible de alimentos, ya que si hay una cantidad suficiente de alimentos, la gente se alimenta como es debido, mientras que si la cantidad es menor debe existir un racionamiento. Ese razonamiento aplica también para todos los consumos en general, en especial el de recursos no renovables.

Se debería reflejar también que a mayor alimento y nivel económico haya un aumento en la productividad que se registra en los procesos, pues la población adquiere al mismo tiempo un aumento en la calidad de vida.

Implementar mejores métodos estadísticos para la inferencia de los parámetros y algunas relaciones, esto debido a que la regresión lineal sencilla o múltiple no es el método más adecuado.

## 14. APLICACIONES DEL MODELO

Después de la realización de los modelos y el análisis de pruebas al que fueron sometidos se obtuvo un modelo final como resultado. Pero sería un trabajo incompleto el presentar solo un modelo sin presentar además un complemento con una descripción de la utilidad que este ha de brindar y como debe ser orientado para obtener un completo aprovechamiento del mismo. Es por esto que en este capítulo se expone la posible utilidad que tiene el modelo del diagrama de Aspen representado bajo la dinámica de sistemas.

El modelo y los diferentes escenarios que se recrean en el análisis de sensibilidad y la presentación de resultados se convierten en la principal herramienta para la comprensión del comportamiento del fenómeno, si se sigue el proceso de modelado desde el primer prototipo al último, pues la reconstrucción del proceso es la manera en la que se percibe mejor el conocimiento contenido en el modelo. Además, la experimentación sobre el modelo, produciendo nuevas gráficas de comportamiento a partir de la variación de parámetros por parte del interesado en el fenómeno, proporciona una fuente de conocimiento que contribuye a la generación de una representación mental del fenómeno del cambio global, al comprender mejor la dinámica de comportamiento de este.

En el apartado del marco teórico correspondiente al diagrama de Aspen se mencionó al diagrama como un paso intermedio antes de poder caracterizar para comprender las relaciones entre los sistemas naturales físicos y los sistemas humanos; un esfuerzo de representación como el realizado en la construcción de este modelo se puede considerar otro paso intermedio. No se pretende señalar este esfuerzo de modelado como el definitivo, pero si como un avance sobre el que otros interesados en el estudio del cambio global pueden sustentar sus propias investigaciones, teniendo como punto de partida este trabajo, facilitándoles el lograr un nivel de profundidad mayor, siempre tendiendo hacia la construcción de una mejor explicación del fenómeno.

El proyecto "Modelado del cambio global mediante Dinámica de Sistemas" tiene como objetivo la representación del conocimiento acerca del fenómeno del cambio global, entendido este como el producido o modificado por la acción humana; más bien se diría tiene como objeto construir una representación del conocimiento acerca del fenómeno, y por supuesto, no de todo el conocimiento respecto al mismo. Aparte de su objetivo principal, el modelo del cambio global y su proceso de construcción sirven para otro propósito: El de convertirse en herramienta para la enseñanza y el aprendizaje con respecto al fenómeno del cambio global. Este objetivo es cumplido de dos formas diferentes: Directamente, como representación del conocimiento disponible para su estudio y para la experimentación, y como parte de un curso de dinámica de sistemas para fenómenos ambientales, constituyéndose en el ejemplo principal desarrollado al interior del mismo. El material que se incluyó en la propuesta del curso se incluye en el anexo 2.

Este proyecto se convierte en una especie de resultado<sup>103</sup> de la labor de modelado ambiental realizada hasta el momento al interior del grupo SIMON de investigaciones, El proyecto es la primera aproximación al fenómeno del cambio global al interior del grupo, y es el primer intento de modelar algo a gran escala, siendo los anteriores trabajos casos particulares y detallados de problemáticas ambientales.

---

<sup>103</sup>Se dice especie de resultado debido a que el proyecto no es una consolidación de los trabajos, pero es necesario que esos trabajos hayan sido realizados para haber sido posible la elaboración de este.

## 15. CONCLUSIONES

El proyecto deja conclusiones a dos niveles, conclusiones obtenidas del proceso de modelado y conclusiones acerca de los resultados del modelo.

Conclusiones obtenidas de proceso de modelado:

El modelo generado como resultado del trabajo es una representación reducida del fenómeno del cambio global, dada la magnitud del mismo, pero adecuada para percibir sus alcances. El modelo y la reflexión que lo acompaña, muestran la importancia de la dimensión humana en los procesos de cambio global así como las principales limitaciones a la hora de tratar de intervenir en el sistema.

Se conoce relativamente poco acerca de las interacciones entre los factores del cambio global. Construir los modelos requirió plantear muchas hipótesis difíciles de contrastar por lo complicado de obtener datos que resulten adecuados, así como encontrar documentadas estas interacciones a un nivel de profundidad amplio y en un lenguaje compatible con el modelado dinámico.

El proyecto arrojó como resultado el continuar con los objetivos planteados en la realización del diagrama de Aspen: presentar un marco de referencia que sirva como guía a otros proyectos de investigación sin importar si abarcan completamente la complejidad del problema del cambio global o tan solo uno de los bloques o sectores que conforman la estructura del modelo. Se espera que el ejercicio de representación permita a otros interesados en el fenómeno continuar la indagación partiendo de una referencia, adentrándose más en el conocimiento relacionado con el fenómeno, o dedicándose al estudio de la intervención sobre el mismo.

Conclusiones acerca de los resultados del modelo:

Los elementos reguladores del sistema (expectativas y preferencias, políticas) no modifican la tendencia de los consumos y la producción, solo atenúan sus efectos, lo que quiere decir que el proceso de deterioro del ambiente es irreversible bajo las condiciones del status quo. Para poder revertir o más bien frenar las causas directas del cambio global es necesario un cambio en el actual sistema económico y político que modifique la estructura de relaciones representada en el modelo. A pesar de que no puede detener los procesos ya en marcha, la influencia de las políticas y las expectativas y preferencias es significativa en cuanto a la reducción de velocidad de los mismos, lo que sugiere iniciar el cambio de estado por estos factores.

La población seguirá creciendo aunque a una velocidad menor debido a que las tasas de fecundidad y mortalidad bajan y se estabilizan pero la natalidad sigue siendo ligeramente superior, y en el momento en que se estabilizan ya hay una cantidad alta de población lo que permite un crecimiento poblacional alto en magnitud aunque bajo comparativamente. La única forma bajo las condiciones actuales de hacer que la población disminuya es introduciendo cambios artificiales en las tasas de fecundidad; aún sin incluir esos cambios los efectos de la variación de la estructura poblacional y de la inercia poblacional son difíciles de predecir.

Debido al supuesto asumido acerca de la distribución ordenada de los bienes y servicios para la construcción de los modelos, la situación global se percibe mejor de lo que realmente está; aún con esa mejoría artificial el sistema no tiende a la viabilidad. Al analizar esa imagen optimista presentada se concluye que los problemas de escasez de bienes y servicios son más de distribución que de cantidad de los mismos.

No fue posible realizar un análisis tendiente a la formulación de un modelo de desarrollo sostenible debido a que el fenómeno es muy complejo, y se requiere mucho más trabajo e investigación para iniciar el proceso de recopilación detallada y específica para la formación de los lineamientos-guía que darán la pauta de un modelo de desarrollo sostenible.

## 16. RECOMENDACIONES

Para la realización de estudios como este lo más recomendable es enlistar un grupo multidisciplinario, en oposición al uso de expertos externos al proyecto. Muchos de los conocimientos requeridos para la construcción del modelo sobrepasaban la capacidad de los modeladores al provenir de disciplinas tan diferentes a la de ellos; un equipo multidisciplinario esta en mayor capacidad de asumir conocimientos de tan diversas fuentes e integrarlos en una representación del fenómeno mas completa.

Debe analizarse la viabilidad de implementar mecanismos complementarios de representación del conocimiento como la lógica difusa. Esto podría facilitar la representación de fenómenos intangibles como las expectativas y preferencias y las políticas; el modelo incluye un propuesta de representación para estos subsistemas, pero se sabe que no es muy adecuada. Es posible que al aplicar otras formas de representación se gane en fidelidad del modelo.

El impulso tomado en cuanto a la investigación del fenómeno del cambio global debe servir para buscar relaciones con otros entes de investigación para estudios, no solo en este campo, sino también como apoyo a nuevas investigaciones en el campo de ingeniería ambiental. Es importante que se le de continuidad a esta propuesta no solo al interior del grupo sino a nivel institucional.

Implementar un modelo complemento que ayude a contemplar otras perspectivas en la estructura del modelo. Es claro que este modelo está limitado a representar con claridad el status quo, así que un complemento que muestre otras alternativas en cuanto a sistema económico y político puede enriquecer la concepción que se tiene del cambio global y se constituiría en un primer paso para la formulación de políticas de intervención.

El estudio de este modelo y la posterior elaboración de otros relacionados con el fenómeno, deben ir acompañados por un trabajo acerca de la viabilidad y factibilidad de la D.S. como forma de representación de este tipo de fenómenos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- A.A.D.D. (2002). "Cloudy Skies: Assessing Public Understanding of Global Warming" en *Systems Dynamics Review*.
- A.A.D.D. (1987). *GAIA – Implicaciones de una Nueva Biología*. Edición a cargo de Thompson, William Irwin.
- A.A.D.D. (1992) *Pathways of Understanding. The Interactions of Humanity and Global Environmental Change*. CIESIN.
- ANDRADE, Hugo; DYNER, Isaac; ESPINOSA, Ángela; LÓPEZ, Hernán; SOTAQUIRA, Ricardo. (2001): *Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad*. Ediciones Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- ARACIL, Javier. (1986) *Maquinas, Sistemas y Modelos*. Alianza Editorial S.A., Tercera Edición, Madrid, España.
- BERTALANFFY, Ludwig Von. (1968) *Teoría General de los Sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center. [online]. <http://cdiac.esd.ornl.gov/>.
- Center for International Earth Science Information Network, [online]. <http://www.ciesin.org/>.
- DEUTSCH, Karl Wolfgang. (1990). *Problemas para el Modelo del Mundo*. Primera Edición. Fondo Editorial Cerec.
- Energy Information Administration, [online]. <http://www.eia.doe.gov/>.
- Facultad de Agroindustria UNNE (1998-2004) *Origen e Historia evolutiva de la vida* [online]. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, <http://fai.unne.edu.ar/biologia/introduccion/origen.htm>.
- FAO: Organización para los Alimentos y la Agricultura de ONU, división de estadísticas. [online]. <http://faostat.fao.org/>
- GÉLVEZ Sergio, FONSECA Gustavo, MURILLO Oscar. (2004) "Relación entre los Sistemas Humanos y los Sistemas Físicos Naturales: El Diagrama de Aspen" Ponencia presentada en el II Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas. Santa Marta. Colombia.
- GLEICK, Peter H. (2004) *Basic Water Requirements for Human Activities* [online]. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, International Water Resources Association. [online]. [http://www.pacinst.org/reports/basic\\_water\\_needs/basic\\_water\\_needs.pdf](http://www.pacinst.org/reports/basic_water_needs/basic_water_needs.pdf).
- Global Emissions Inventory Activity, parte del International Geosphere-Biosphere Programme. [online]. <http://www.geiacenter.org/>.
- IFA, International Fertilizer Industry Association. [online]. <http://www.fertilizer.org/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *The Scientific Basis – Technical Summary & Summary for Policymakers*.

LUDEVID Anglada, Manuel. (1997). *El cambio Global en el Medio Ambiente*. Alfaomega Grupo Editor.

MARTINEZ Alier, Joan y ROCA Jusmet, Jordi. (1995). *Economía Ecológica y Política Ambiental*. Primera Edición. Fondo de Cultura Económica.

MEADOWS, Dennis y Otros. (1972). *Limites del crecimiento*. Fondo de Cultura Económica.

Real Academia Española (2004) Diccionario de la Lengua Española [online] (23va Edición). <http://www.rae.es/>.

STERMAN, John. (2000): *Business Dynamics: Systems Thinking and modeling*. Mac Graw Hill Editores.

VIDART, Daniel. (1986). *Filosofía Ambiental, el Ambiente como Sistemas*. Editorial Nueva América. Segunda Edición. Bogotá Colombia.

World Population Prospect. [online]. <http://www.unpopulation.org/>

## ANEXOS

### ANEXO N° 1: PROTOTIPOS EN FORMATO DIGITAL.

Los prototipos desarrollados para el modelo se encuentran adjuntos en versión digital en un CD que acompaña el libro. Los archivos son prototipo I.mev, prototipo II.mev, prototipo III.mev, prototipo IV.mev.

### ANEXO N° 2: INTEGRACIÓN CON EL CURSO DE DINAMICA DE SISTEMAS.

El modelo construido para el proyecto “Modelado del cambio global mediante Dinámica de Sistemas” no puede ser utilizado directamente para la presentación de la dinámica de sistemas, al tratarse de un modelo muy complejo. Para poder presentar la dinámica de sistemas usando el fenómeno del cambio global como objeto de modelado, se debe modificar la presentación de la misma por prototipos: Cuando se desarrolló el modelo, se hizo cubriendo niveles de complejidad altos para cada prototipo, pero para presentar la dinámica de sistemas se debe avanzar en la complejidad de una forma mucho más moderada, partiendo de elementos muy sencillos hasta llegar a un nivel de representación significativamente complejo. Los prototipos creados para presentar la dinámica de sistemas no llegaron al final al nivel de complejidad de los usados para el proyecto original; se llegara hasta máximo un nivel de complejidad equivalente al del primer prototipo del proyecto o un poco más. Al final de la presentación, se ofrecerá un resumen del proceso de pensamiento usado para crear los prototipos del proyecto original, para que así el lector del curso pueda indagar más acerca de los prototipos originales, y así pueda aprovechar se de un ejemplo de modelado más real o más bien, menos didáctico.

Los prototipos desarrollados para la integración con el curso de D.S. se encuentran adjuntos en versión digital en un CD que acompaña el libro. El nombre del archivo se muestra junto al título de la explicación de cada prototipo.

#### Primer Prototipo (Protcurso I.mev)

La intención principal del proyecto “Modelado del cambio global mediante Dinámica de Sistemas” es la de conducir este proceso de modelado partiendo de el elemento humano como la fuente más importante de cambio global. De esta forma el primer elemento a representar es la población, siendo esta la base de los demás procesos relacionados con el elemento humano. Para modelar la dinámica poblacional se considera esta bajo el modelo de crecimiento exponencial, es decir se considera dependiente de una tasa de natalidad y una tasa de mortalidad. La población aumenta mediante los nacimientos, que a su vez dependen de la tasa de natalidad, y disminuye con las muertes, que dependen de la tasa de mortalidad. El cálculo de los nacimientos y de las muertes es igual a la población existente en un tiempo determinado, multiplicado por las tasas de natalidad y mortalidad respectivamente; se parte acá del modelo exponencial mencionado anteriormente, utilizado en muchos casos para representar poblaciones. Las tasas de natalidad y mortalidad se consideran de momento, constantes. Si se quisiera representar lo anteriormente expuesto mediante un diagrama de influencias, que representa las relaciones entre los diferentes elementos del sistema, se obtendría algo así:

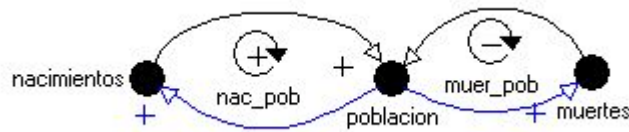


Figura N° 1: Diagrama de Influencias del primer prototipo para el curso

En el diagrama se observan las relaciones de influencia hasta ahora consideradas para el modelo. La población influye las muertes y los nacimientos, y estos influyen la población. Las tasas de natalidad y mortalidad no se representan pues son auxiliares para el cálculo de las muertes y nacimientos y no tienen sentido real, son una ayuda para entender el fenómeno.

El diagrama de influencias mostrado anteriormente es una ayuda para comprender el funcionamiento del sistema, pero no provee toda la información requerida. Para la simulación del fenómeno es necesario considerar las relaciones de carácter matemático que existen entre los elementos, que son las que permiten obtener una cuantificación del comportamiento. Estas relaciones se representan mejor en el diagrama de flujo nivel, y en las ecuaciones del modelo; en conjunto estas dos representaciones permitirán simular el comportamiento del fenómeno.

Las relaciones descritas en el texto y en el diagrama de influencias quedarían representadas de la siguiente manera en el diagrama de flujo-nivel:

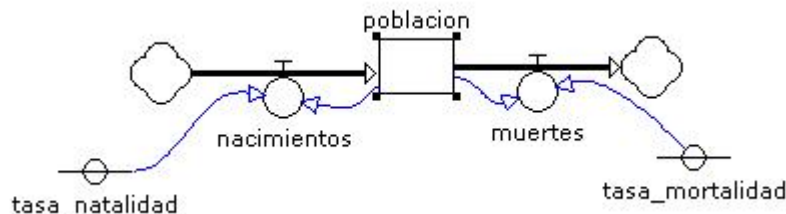


Figura N° 2: Diagrama de flujo nivel del primer prototipo para el curso

La población está representada por un Nivel, elemento usado para representar un factor que tiende a acumularse, y las muertes y los nacimientos mediante Flujos, elementos utilizados para representar el aumento o la disminución de la cantidad del Nivel. La población medra mediante los nacimientos y mengua por las muertes. La cantidad en que aumenta la población, o sea la cantidad de nacimientos, depende de la tasa de natalidad y de la población; esto ya había sido expuesto en la prosa, pero aquí se ve desde la perspectiva del flujo nivel. En el diagrama la tasa de natalidad es representada mediante un Parámetro, que representa un valor constante. Las consideraciones anteriores son idénticas para las muertes. Dentro de cada elemento se escribe una definición que va a permitir la simulación del modelo, lo más usual que los cálculos los realice un software de modelado y simulación, en el caso del proyecto y del curso será Evolución, software desarrollado al interior del grupo de investigación SIMON.

La definición de los elementos es la siguiente:

Niveles:

Nombre: poblacion

Definición:  $poblacion = 2519470$

Descripción: Cantidad de personas en el mundo. [Miles de personas]

Flujos:

Nombre: muertes

Definición: muertes = (tasa\_mortalidad\*poblacion)/1000

Descripción: Cantidad de muertes de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad. [Miles de Personas]

Nombre = nacimientos

Definición: nacimientos = (poblacion\*tasa\_natalidad)/1000

Descripción: Cantidad de nacimientos de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad.[Miles de Personas]

Parámetros:

Nombre: tasa\_mortalidad.

Definición: tasa\_mortalidad = 19.5

Nombre: tasa\_natalidad

Definición: tasa\_natalidad = 37.5

Las definiciones están dadas en forma de igualdades, y de estas definiciones se desprenden las ecuaciones del modelo. El cálculo de los niveles se hace en base a los flujos y la ecuación que gobierna esto tiene la forma:

$$\text{poblacion}(t+\Delta t) = \text{poblacion}(t) + (\text{nacimientos}(t) - \text{muertes}(t)) * \Delta t$$

Esta ecuación se usa para calcular los valores de las magnitudes del sistema, y es parte de un sistema de ecuaciones, el cual es completado por las dos de los flujos, que equivalen a sus definiciones:

$\text{muertes}(t) = (\text{tasa\_mortalidad} * \text{poblacion}(t)) / 1000$

$\text{nacimientos}(t) = (\text{tasa\_natalidad} * \text{poblacion}(t)) / 1000$

Las tasas de mortalidad y natalidad al ser constantes se reemplazan directamente. Mediante estas ecuaciones se puede calcular el comportamiento de las magnitudes del sistema. El objetivo de la dinámica de sistemas es generar estas representaciones cuando no existen relaciones o leyes "duras" entre los elementos, así que el cálculo de las magnitudes pasa a un segundo plano en comparación con la representación del conocimiento que se tiene sobre el fenómeno que se estudia.

Con las definiciones de los elementos se corre la simulación. Para evaluar el comportamiento se debe tener un comportamiento esperado o modo de referencia, que se obtiene mediante inspección de las relaciones y la definición de los elementos. Para el ejemplo que se está desarrollando se espera que el comportamiento sea exponencial creciente si la tasa de natalidad es mayor que la de mortalidad, exponencial decreciente si es menor, y constante si son iguales. La gráfica de este modo de referencia es:

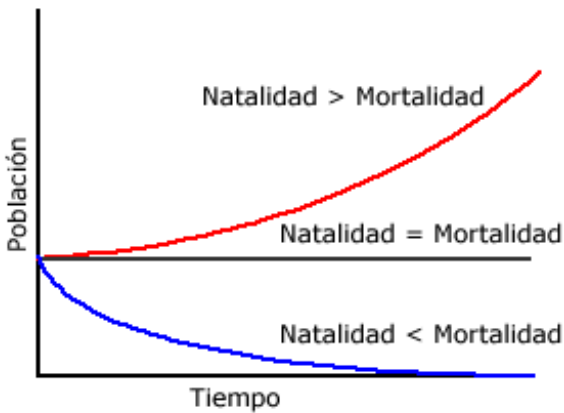


Figura N° 3: Comportamiento de referencia del primer prototipo para el curso

Este modo de comportamiento de referencia es precisamente un modo, es decir, lo que importa es la forma más que los valores. La tendencia del comportamiento es lo importante. Por esto es que se dice que la dinámica de sistemas no busca predecir comportamientos en cuanto a valores; en este ejemplo se podría notar esto al decir que no se puede obtener el valor de la población para un determinado año, lo que se puede es hablar la tendencia del comportamiento en un horizonte de tiempo. El modo de comportamiento de referencia debe ser consistente con el modo de comportamiento que exhibe el fenómeno real; esta es una prueba que se debe realizar antes de terminar el proceso de modelado: Si el modo de comportamiento que esperamos para una magnitud del fenómeno en el modelo no coincide con el modo de comportamiento real de la misma, hay algo considerado de forma incorrecta.

Después de revisar el modo de comportamiento de referencia se simula el fenómeno, teniendo en cuenta horizontes de tiempo adecuados para los fines del modelado. En el caso del ejemplo se simuló desde un tiempo 1950 hasta 2050 con un paso con valor 1. De esta forma cada paso representa un año. Para el ejemplo se obtuvo el siguiente comportamiento:

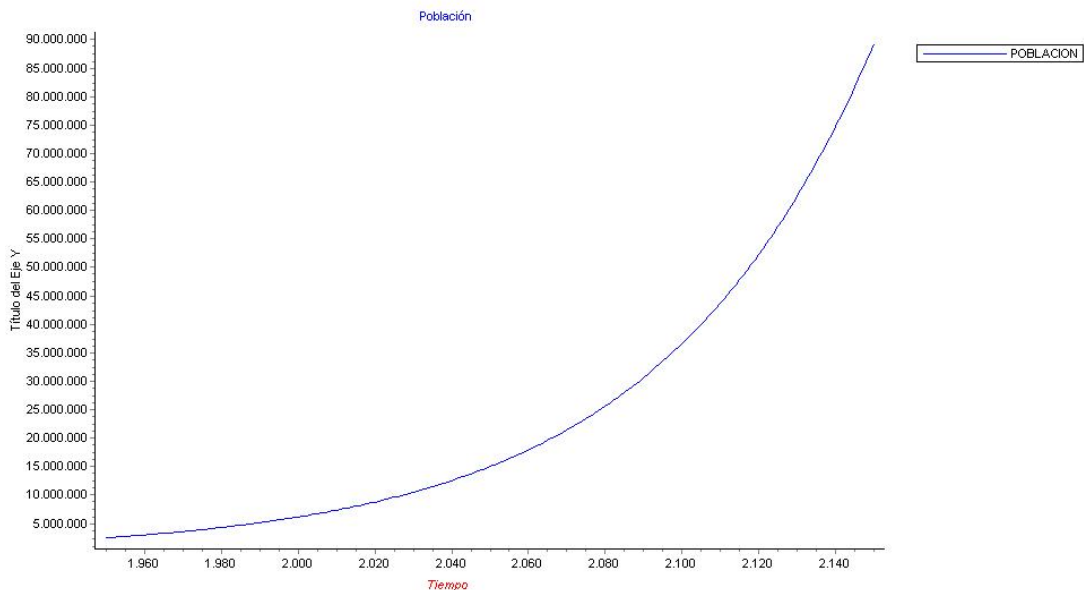


Figura N° 4: Comportamiento de la población en el primer prototipo para el curso

## Segundo Prototipo (Protcurso II.mev)

El primer prototipo muestra la dinámica población partiendo de varios supuestos, como que la población crece de manera exponencial con tasa de natalidad y mortalidad constantes. En el desarrollo del proyecto se utilizó para la dinámica poblacional el concepto de Transición demográfica. Esta transición demográfica es un fenómeno caracterizado por una disminución de la tasa de mortalidad, producida por la mejora en la higiene, la alimentación y los servicios de salud, acompañada por un subsiguiente descenso en la tasa de natalidad producido por el cambio en la situación económica, que hace un número alto de hijos poco deseable, entre otras cosas.

Para poder representar el efecto de la transición demográfica en el modelo se deben agregar nuevos elementos. El primero es el nivel económico, ya que la teoría dice que el descenso en las tasas coincide con la mejora en las condiciones económicas de la población. Para hacer más sencillo este prototipo se considerará que el efecto del nivel económico solo afecta la tasa de natalidad, y se usará una tasa de mortalidad similar a la actual. Esto no se aleja de la teoría ya que en la actualidad los países menos desarrollados han hecho descender mucho las tasas de mortalidad, pero las da natalidad siguen altas ya que no se percibe aumento en el nivel de vida. El aumento en el nivel económico debe producir un descenso en la tasa de natalidad.

Para poder incluir el nivel económico en este prototipo sin aumentar el nivel de complejidad del modelo se asumirá este como un elemento exógeno. Las variables exógenas representan factores considerados externos al sistema. De esta forma se asume no saber como funciona el sistema económico, solo se tiene en cuenta su efecto.

El diagrama de influencias de este prototipo es:

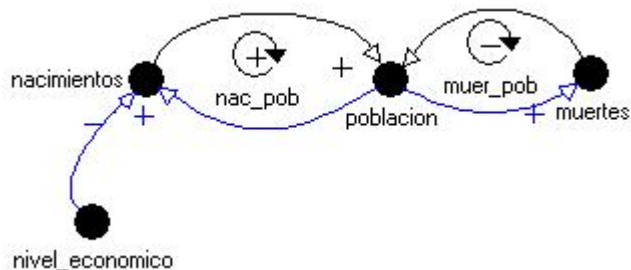


Figura N° 5: Diagrama de Influencias del segundo prototipo para el curso

Los elementos agregados al sistema se traducen en nuevos elementos en el diagrama de flujo nivel. El nivel económico se agregó, como ya se mencionó, como una variable exógena. Estas variables pueden ser representadas en este diagrama, pueden ser definidas como tablas o como variables analíticas. Se creó el elemento Transi\_nivel\_eco para establecer la relación entre el nivel económico actual y uno de referencia. Además se modificó la tasa de natalidad, que ahora es una variable, para que aceptara la influencia del nivel económico.

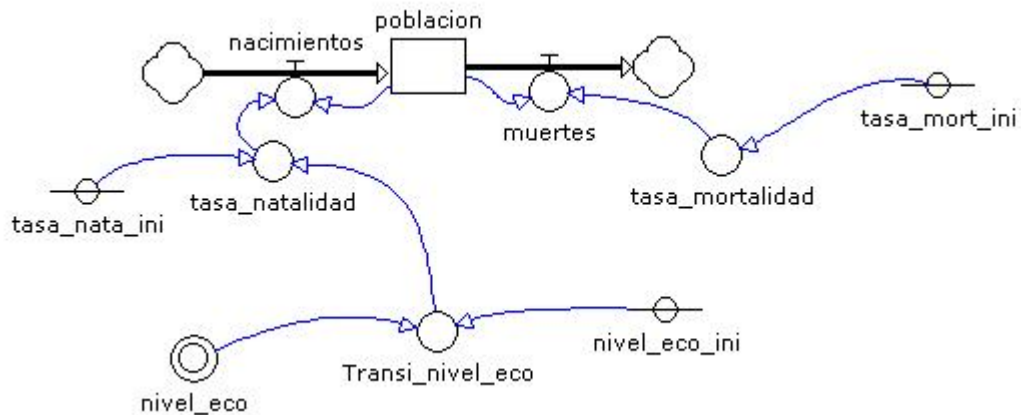


Figura N° 6: Diagrama de flujo nivel del segundo prototipo para el curso

Los elementos que fueron modificados en su definición, así como los nuevos se muestran a continuación:

Nombre: Transi\_nivel\_eco

Definición:  $\text{Transi\_nivel\_eco} = (\text{nivel\_eco} / \text{nivel\_eco\_ini})$

Descripción: Variable que refleja la transición del nivel económico. Alzas y bajas que sufre el nivel económico con respecto al inicial.

Nombre: nivel\_eco

Definición:  $\text{nivel\_eco} = \text{INTLINEAL}(2, 1950, 10, 1000000, 1100000, 1200000, 1300000, 1400000, 1500000, 1600000, 1700000, 1800000, 1900000, 2000000)$

Descripción: Nivel económico debido a los ingresos y egresos en la producción y consumo de recursos, entre otros factores.

Tabla nivel\_eco:

1950	1000000
1960	1100000
1970	1200000
1980	1300000
1990	1400000
2000	1500000
2010	1600000
2020	1700000
2030	1800000
2040	1900000
2050	2000000

Nombre: nivel\_eco\_ini

Definición:  $\text{nivel\_eco\_ini} = 1000000$

Descripción: Cantidad de nivel económico inicial.

Nombre: tasa\_natalidad

Definición:  $\text{tasa\_natalidad} = \text{tasa\_nata\_ini} * (1 - (\text{Transi\_nivel\_eco} * 0.10))$

Descripción: Tasa de Natalidad calculada a partir de la influencia del sistema económico. Representa nacimientos sobre población total.

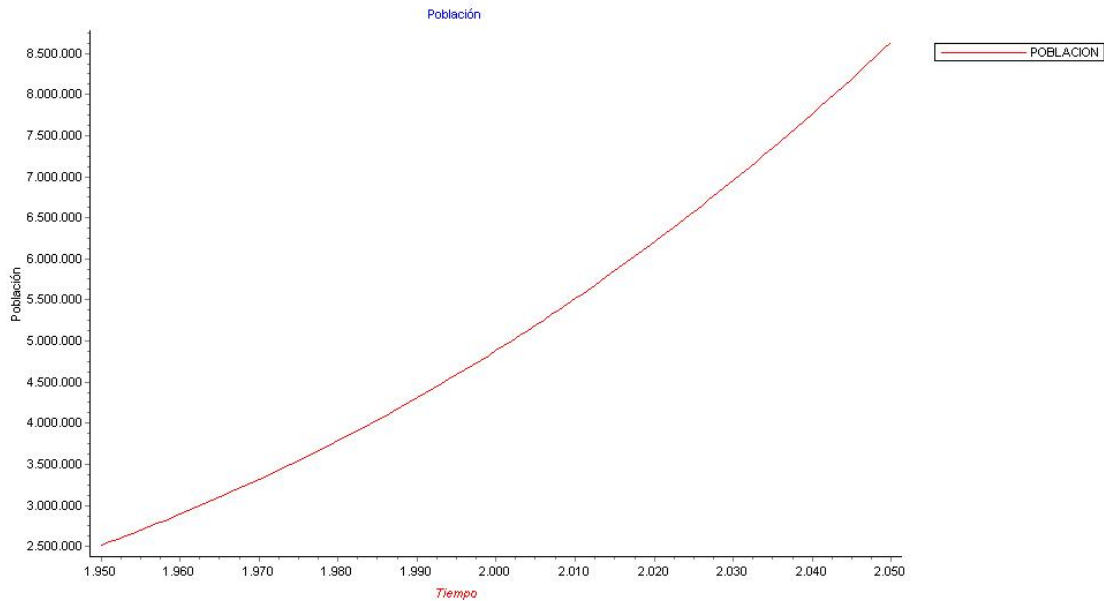


Figura N° 7: Comportamiento de la población en el segundo prototipo para el curso

En este caso se nota un descenso en el ritmo de crecimiento a causa de los cambios introducidos en el modelo. La disminución de la tasa de natalidad es la que genera esta desaceleración del crecimiento.

### Tercer Prototipo (Protcurso III.mev)

Continuando con el refinamiento del modelo en el tercer prototipo hay un cambio de enfoque en cuanto a la representación de la dinámica poblacional. Hasta el anterior prototipo el crecimiento de la población se calculaba mediante una tasa de natalidad. Para el proyecto se conceptuó que la natalidad no era el mejor indicador del crecimiento de la población, pues no incluye información acerca de la distribución de la población por sexo y grupos de edades. La fecundidad si lleva esta información, así que es un mejor indicador. En este prototipo los nacimientos se calculan basados en fecundidad y no en la natalidad, para esto se usan otros parámetros, como la tasa de mujeres, la proporción de mujeres en edad reproductiva y la vida promedio de la mujer. Estos son parámetros que se obtienen por estadísticas y son considerados constantes por los demógrafos. Además la fecundidad es la conceptualmente esta relacionada con la transición demográfica; es la decisión de tener menos hijos de la mujer la que hace disminuir la natalidad, y hay que recordar que la tasa de fecundidad representa el número de hijos por mujer en edad reproductiva.

Hay que notar que la relación entre el nivel económico y la fecundidad se representa mediante una tabla. Las tablas se utilizan para representar multiplicadores o no-linealidades. De esto se hablará en el curso con más detalle. De momento se dirá que estos elementos representan relaciones que no tienen forma lineal.

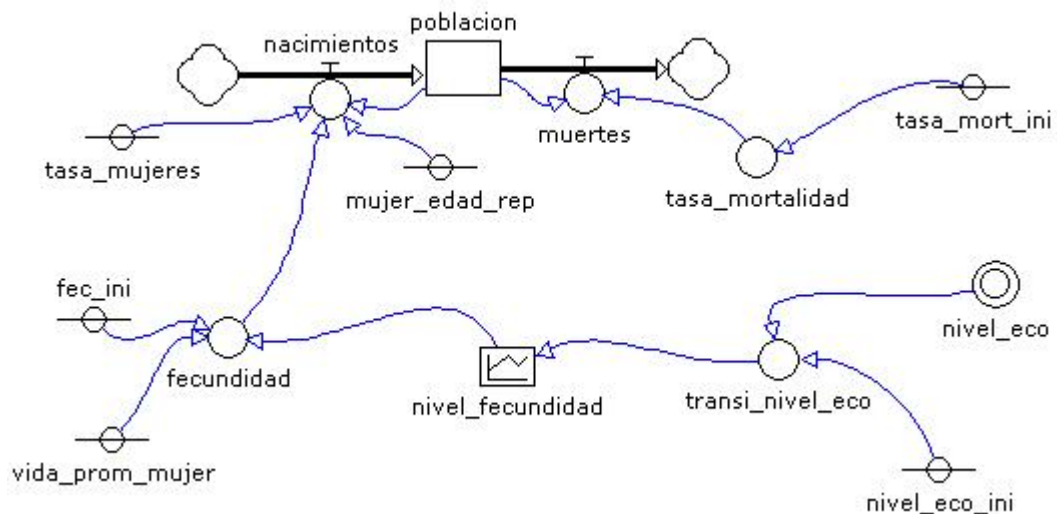


Figura N° 8: Diagrama de flujo nivel del tercer prototipo para el curso

Los cambios introducidos en el modelo son los siguientes, mostrando la definición de los elementos agregados o modificados:

Nombre: fec\_ini

Definición:  $fec\_ini = 5$

Descripción: Tasa de fecundidad inicial, el valor que tendría al inicio de la simulación suponiendo condiciones económicas estables.

Nombre: fecundidad

Definición:  $fecundidad = (nivel\_fecundidad * fec\_ini) / vida\_prom\_mujer$

Descripción: Numero de Hijos por mujer en edad reproductiva sobre el total de la población. Proporción de nacimientos más adecuada para el estudio de los procesos demográficos.

Nombre: mujer\_edad\_rep

Definición:  $mujer\_edad\_rep = 0.494$

Descripción: Cantidad de mujeres en edad reproductiv dentro de la población total de mujeres.

Nombre: nacimientos

Definición:  $nacimientos = fecundidad * poblacion * tasa\_mujeres * mujer\_edad\_rep$

Descripción: Cantidad de nacimientos de personas al año. La división de 1000 se hace para complementar el valor de la tasa de natalidad.[Miles de Personas]

Nombre: nivel\_fecundidad

Definición:  $nivel\_fecundidad = INTLINEAL(2, 1, 10, 1, 0.8728944, 0.7367099, 0.5914464, 0.4598014, 0.3463143, 0.2419062, 0.164735, 0.1148006, 0.10302424, 0.098, 0.093, 0.09)$

Descripción: Relación entre el nivel económico y la fecundidad.

Nombre: tasa\_mujeres

Definición:  $tasa\_mujeres = 0.4988$

Descripción: Porcentaje que indica la cantidad de mujeres dentro de la población.

Nombre: vida\_prom\_mujer

Definición:  $vida\_prom\_mujer = 47.5$

Descripción: Tasa que indica el valor de la vida promedio de la mujer.

En este prototipo el comportamiento de la población parece extraño a primera vista pero hay que recordar el modo de comportamiento esperado: No es normal que la población baje de la forma que lo muestra la figura, pero hay que recordar que los cambios introducidos afectan solo a la fecundidad, o sea a los nacimientos. En este momento nada afecta a la mortalidad que sigue en un valor muy alto con relación a la fecundidad. Así que aunque el comportamiento no es consecuente con el fenómeno real, no quiere decir que lo que se ha hecho hasta el momento sea erróneo, sino que falta aún hacer algo más. En el quinto prototipo se harán los cambios necesarios en la mortalidad.

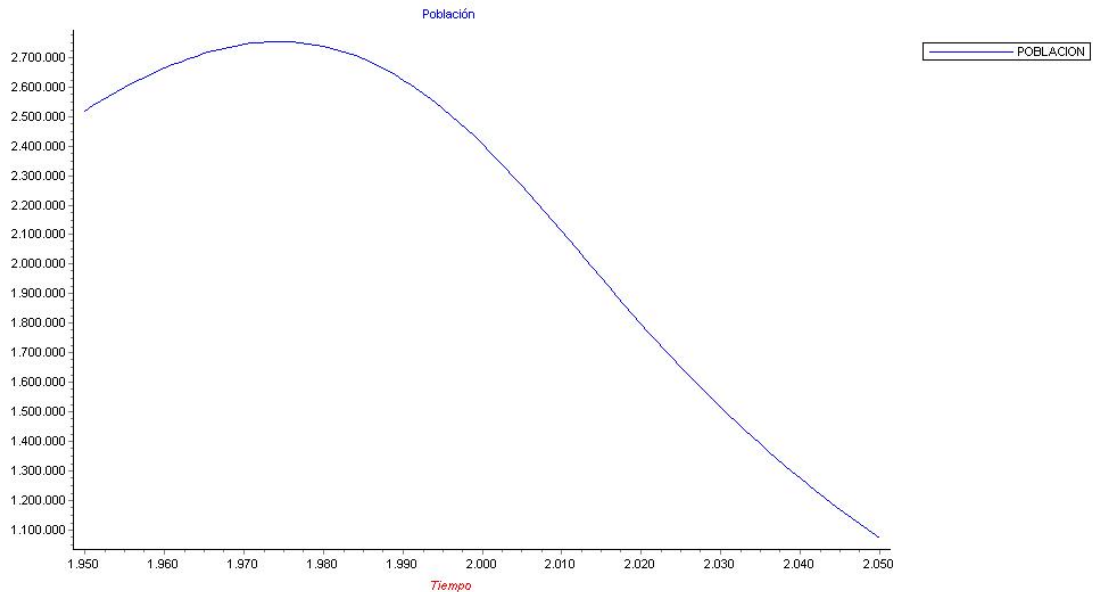


Figura N° 9: Comportamiento de la población en el tercer prototipo para el curso

#### Cuarto Prototipo (Protcurso IV.mev)

En el anterior prototipo se cambio la forma de calcular de los nacimientos y se agregó una tabla multiplicador que regula el comportamiento de la fecundidad. En este nuevo prototipo se agrega otro elemento nuevo que va a representar mejor la relación entre fecundidad y nivel económico, un retardo. Se sabe que el efecto del nivel económico no va a ser inmediato, la gente no va a modificar sus patrones reproductivos de inmediato; el elemento retardo cumple esta función, la de “retardar” el flujo de la información. Con este elemento la representación se hace más similar a la real.

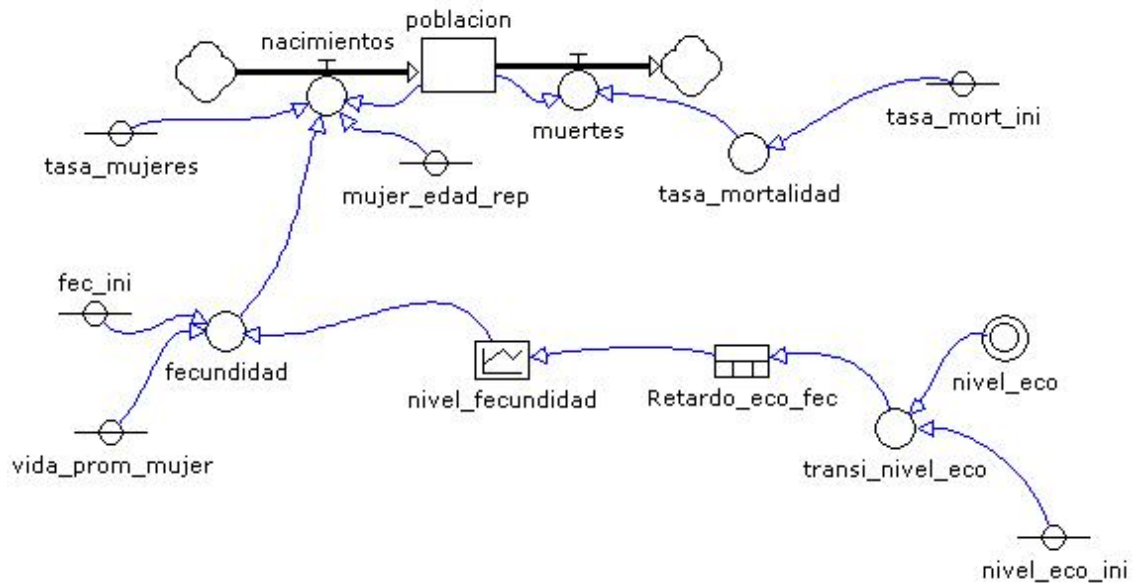


Figura N° 10: Diagrama de flujo nivel del cuarto prototipo para el curso

El único elemento que se agregó al nuevo prototipo fue el retardo, pero es suficiente pues su influencia se hace notar de inmediato. La definición del retardo es la siguiente:

$\text{Retardo\_eco\_fec} = \text{RETARDO}(\text{Transi\_Nivel\_eco}, 25, 3, 1)$

Definición: Retardo o tiempo que demora en que se refleje el impacto que tiene el nivel económico sobre la fecundidad.

La función RETARDO es la encargada de generar el comportamiento retardado. El 25 es el tiempo de ajuste, o sea el tiempo que se va retrasar la influencia. El 3 es el orden del retardo, que representa la forma como las cantidades van saliendo del retardo (ver en el curso) y el 1 es el valor inicial que va a retornar el retardo. Esto quiere decir que la influencia del nivel económico se va demorar 25 años en ser "sentida" totalmente por fecundidad, o sea se va repartir en ese período.

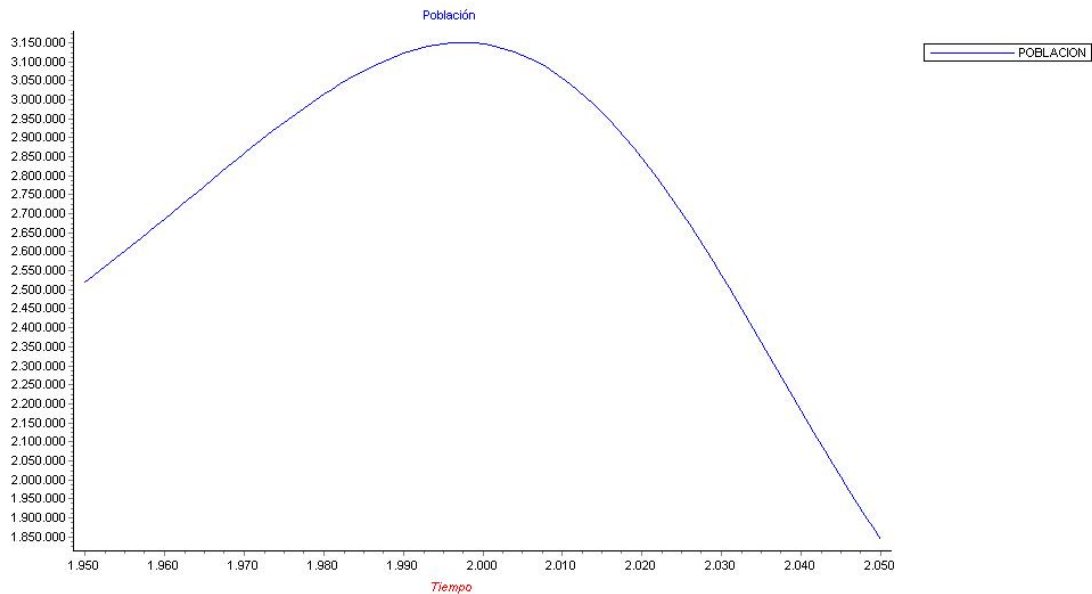
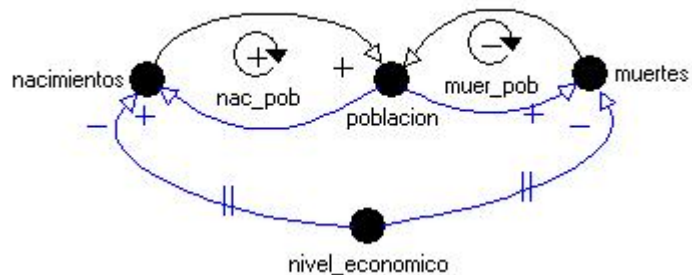


Figura N° 11: Comportamiento de la población en el cuarto prototipo para el curso

El comportamiento de la población refleja la influencia de este retardo: La caída en la población demora más, y por tanto el descenso de los nacimientos demora más en llevarse a cabo. Es tiempo ahora de hacer las modificaciones a la mortalidad.

#### Quinto Prototipo (Protcurso V.mev)

El objetivo de este quinto prototipo es modificar la mortalidad para que ahora también sea influida por el nivel económico. En el diagrama de influencias se pueden ver los cambios realizados. Ahora el nivel económico influye en las muertes al igual que en los nacimientos:



N° 12: Diagrama de Influencias del quinto prototipo para el curso

En el diagrama de flujo nivel se puede notar como ahora la mortalidad es una variable esta relacionada al nivel económico a través de un multiplicador y un retardo. Los valores del multiplicador y el retardo no son iguales a los de sus contrapartes en la fecundidad, ya que ambas variables manejan rangos de valores diferentes, y además el efecto del nivel económico no es igual sobre la natalidad que sobre la mortalidad.

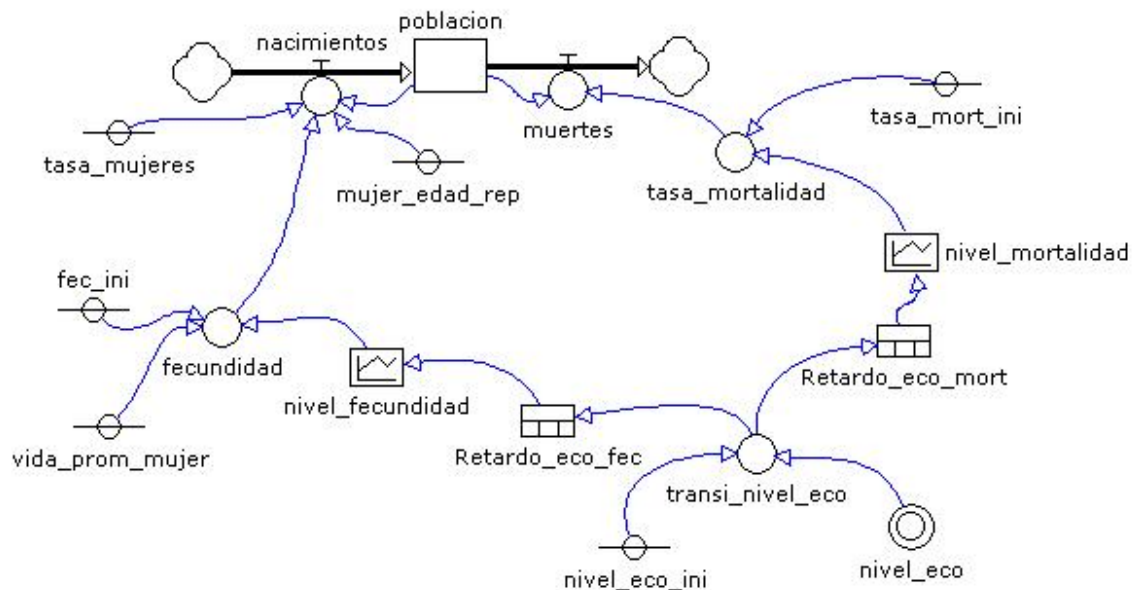


Figura N° 13: Diagrama de flujo nivel del quinto prototipo para el curso

Los nuevos elementos se definen de la siguiente forma:

Nombre = Retardo\_eco\_mort

Definición =  $RETARDO(Transi\_Nivel\_eco, 10, 3, 1)$

Descripción = Retardo o tiempo que demora en que se refleje el impacto que tiene el nivel económico sobre la mortalidad.

Nombre = nivel\_mortalidad

Definición =  $INTSPLINE(2, 1, 1, 1, 0.9, 0.7096585, 0.4562219, 0.3285854, 0.2202837, 0.1516794, 0.124439, 0.1199148, 0.1, 0.09, 0.08, 0.07)$

Descripción = Relación entre el nivel económico y la tasa de mortalidad.

Se puede notar que el retardo de la mortalidad es más corto y que el nivel económico influye más fuertemente la mortalidad: Esto es debido a que con mucha menos inversión es posible disminuir la mortalidad (vacunas, higiene, etc), en cambio mejorar el nivel económico lo suficiente para que hayan cambios en las practicas reproductivas de un pueblo es mucho más difícil.

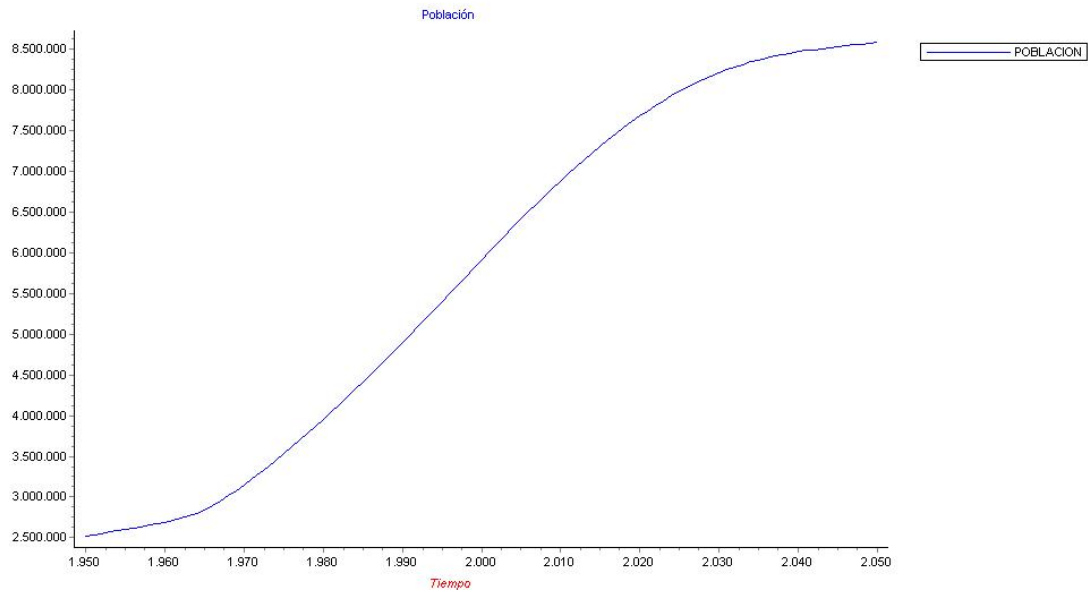


Figura N° 14: Comportamiento de la población en el quinto prototipo para el curso

El comportamiento exhibido ahora por la población se ajusta más a la realidad. La población crece, y tiende a la estabilidad gracias al aumento en el nivel económico.

#### Sexto Prototipo (Protcurso VI.mev)

Hasta el momento el modelo parece más uno de población que uno relacionado con el cambio global, pero era necesario ese refinamiento en el sistema de la población para mostrar de una forma sencilla los diferentes elementos de la dinámica de sistemas. En este sexto prototipo se agregaran otros subsistemas que dependen de la población y que pueden llegar a afectarla. Se incluyen los alimentos, la acumulación de halocarbonos (CFC, nocivos para la capa de ozono), y la extracción y consumo de reservas energéticas no renovables.

La acumulación de gases halocarbonos depende de la población, y la tasa de emisiones por persona es una variable exógena.

La extracción y consumo de las reservas no renovables de energía se caracteriza mediante un subsistema con reservas, recursos extraídos, y consumo. Tanto la extracción como el consumo dependen de la población, y las reservas no tienen entradas, solo salidas.

El consumo de alimentos depende de la población, mientras que la producción depende de la energía utilizada y de la tierra de cultivo, representada por una variable exógena. Los alimentos afectan a su vez a la población, aumentando drásticamente la mortalidad en caso de no haber suficientes alimentos para cubrir la demanda de la población.

El diagrama de influencias es el siguiente:



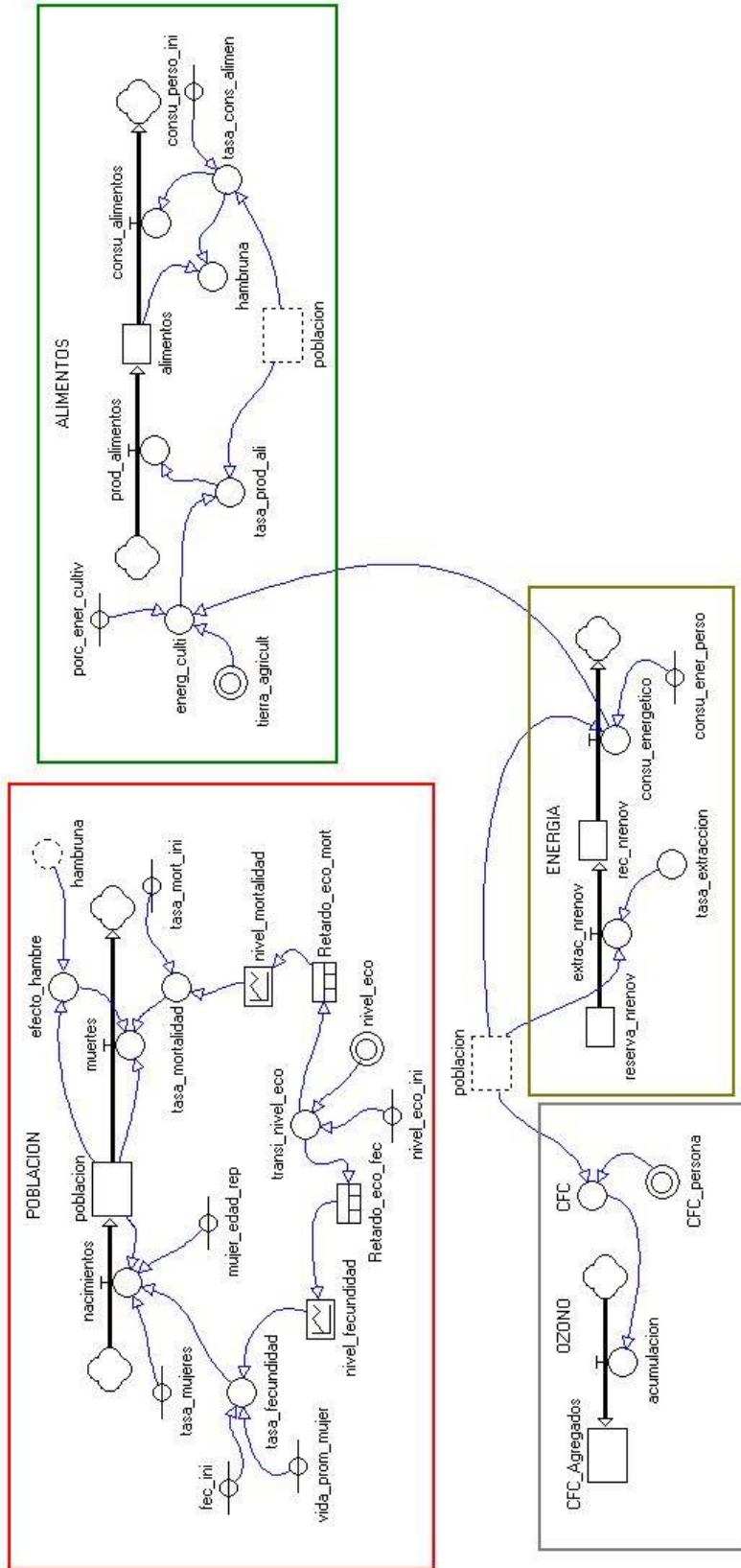


Figura N° 16: Diagrama de flujo nivel del sexto prototipo para el curso

Para ver los cambios realizados a cada elemento se sugiere revisar el modelo que viene como anexo.

Los comportamientos son de acuerdo a lo esperado: La población sigue siendo creciente y al final estable, las reservas de recursos no renovables decaen rápidamente, los CFC se acumulan de manera creciente, y los alimentos son suficientes para la población, al menos en el horizonte de tiempo presupuestado:

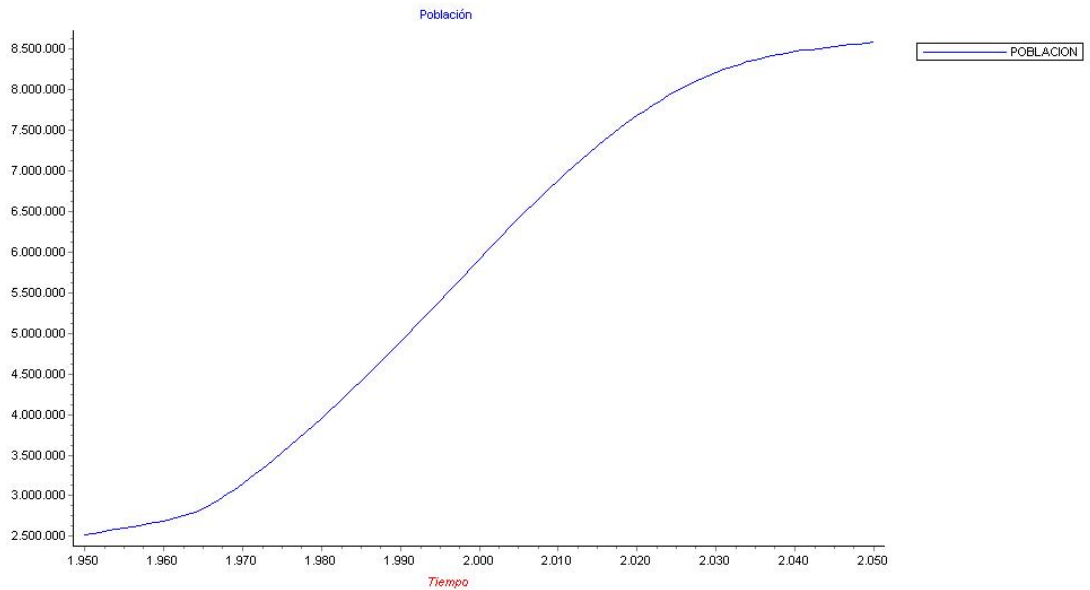


Figura N° 17: Comportamiento de la población en el sexto prototipo para el curso

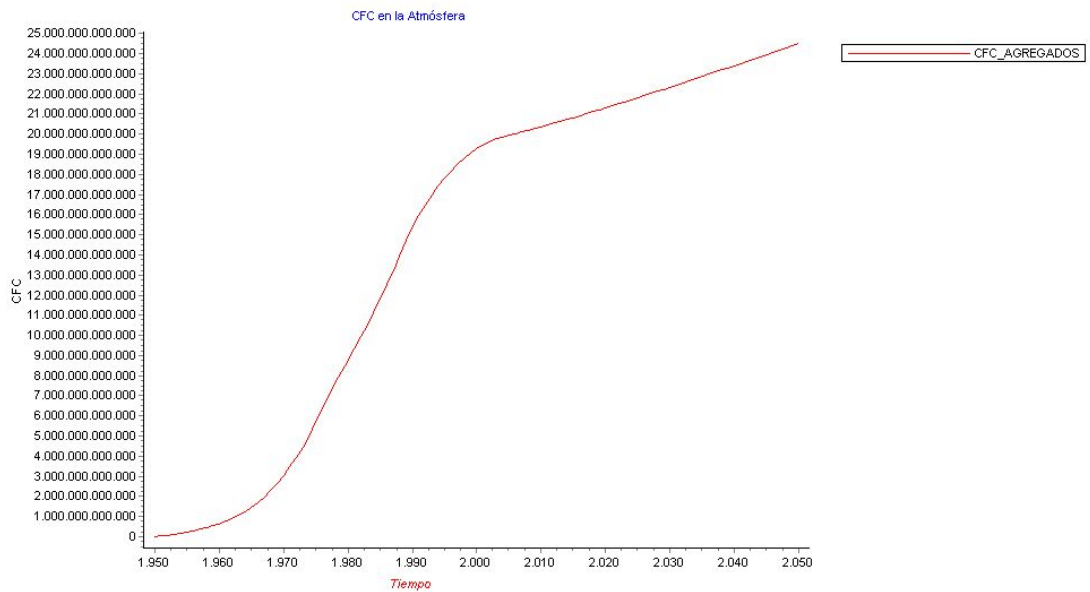


Figura N° 18: Comportamiento de los gases halocarbonos en el sexto prototipo para el curso

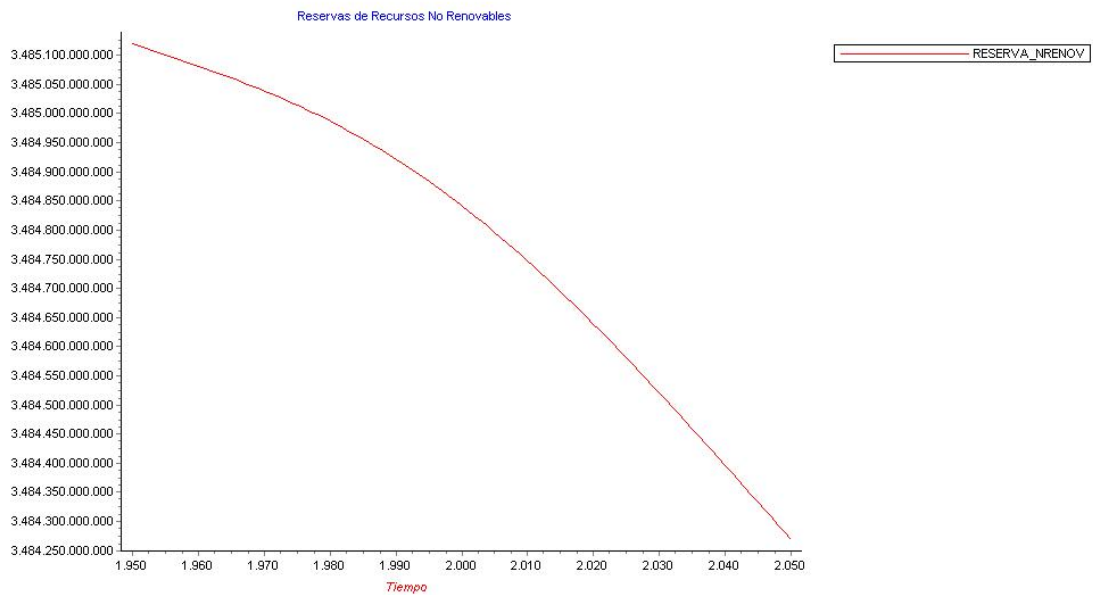


Figura N° 19: Comportamiento de las reservas de recursos no renovables en el sexto prototipo para el curso

Como en casi todas las metodologías de modelado, la dinámica de sistemas admite el análisis de sensibilidad, y es una práctica común y una de las formas más comunes de validar un modelo. El software EVOLUCIÓN permite realizar análisis de sensibilidad por parámetros y por escenarios. Para este prototipo se decidió usar el análisis por escenarios, que se considero más adecuado pues varios factores que influyen. Se modelaron varios cambios en la fecundidad guiados por la propuesta de población de la ONU: uno normal, con los valores fecundidad de la variante media de la población de la ONU (ver proyecto aspen), otro con población creciente, o sea sin cambio en la fecundidad actual, y otro con un descenso inusual en la misma. Los resultados para la población se muestran a continuación:

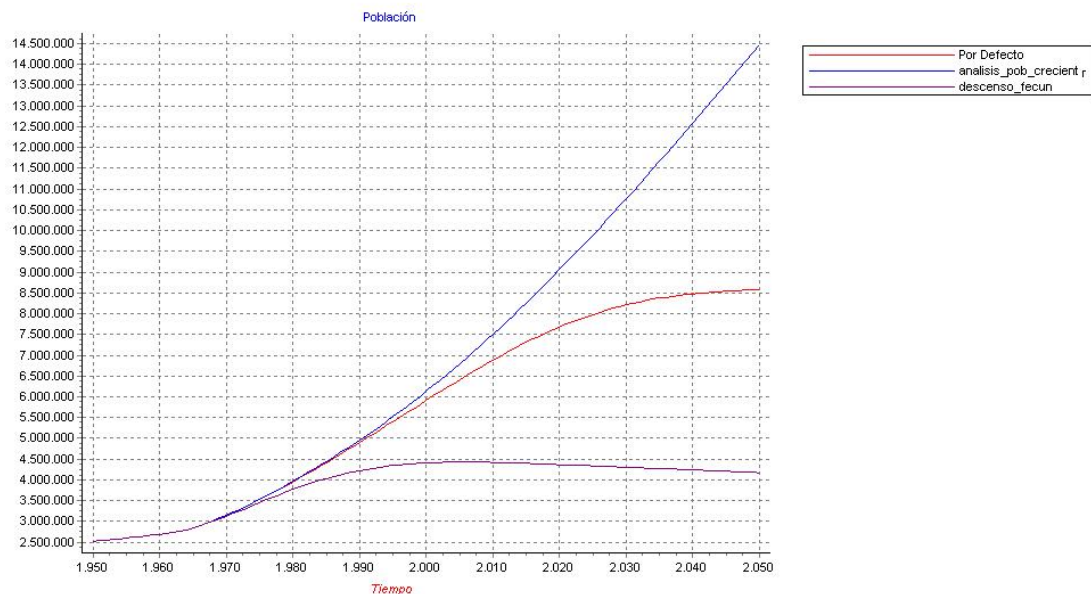


Figura N° 20: Análisis de sensibilidad en el sexto prototipo para el curso

Con esto se termina la exposición del modelado básico del fenómeno del cambio global. Se invita a aquellos que quieran ver el proceso completo de modelado del cambio global a consultar el resumen del modelado que se incluye o a leer el texto del proyecto original.

### Pruebas para la validación del modelo

La validación del modelo es un proceso crucial pues nos permite tener confianza en los resultados del modelado, pero al mismo tiempo es un poco ambiguo, pues nunca será un proceso finalizado, ya que la validez de un modelo es un concepto relativo: No existe ninguna forma de afirmar que un modelo es 100% válido, lo que si es posible es dar un modelo por apropiado si cumple con algunas características definidas por el modelador y por la naturaleza del problema a resolver. Es por esto que en el modelado de dinámica de sistemas se pueden encontrar una gran variedad de pruebas específicas en el momento de querer encontrar fallas y mejoras en los modelos y sus estructuras. Estas pruebas ayudan en gran medida a responder preguntas globales que generalmente tienen todos los modeladores. Una vez más se reitera que estas pruebas no están escritas sobre piedra ni son absolutas: a veces no es necesario un nivel de rigurosidad tan alto, o a veces este nivel no es suficiente.

Una cosa que resulta importante mencionar en este punto: Lo ideal es que el proceso de pruebas sea continuo por una parte, pero al mismo tiempo utilizar la lógica a la hora de realizarlo. No es lo mismo probar un modelo que aun no cumple con la idea de representación del modelador, que probar uno que se considera acabado. Las pruebas usadas en cada momento deben ser las idóneas.

Una propuesta de pruebas utilizada al interior del grupo SIMON es la expuesta en el libro de Sterman (poner cita). Esta propuesta menciona el siguiente conjunto de pruebas:

**Idoneidad de los límites:** Se refiere a la revisión de los conceptos y límites del modelo en busca de problemas endógenos del mismo. Se debe revisar el comportamiento del modelo al cambiar sustancialmente los límites. Se debe convertir constantes y variables exógenas en endógenas y revisar los análisis de sensibilidad.

**Evaluación de la estructura:** En esta prueba se detalla el nivel de agregación del modelo. Muchas veces se pueden extraer elementos que pueden hacer reducir el nivel de complejidad al entender el modelo. Todo cambio que se realice dentro de la estructura del modelo debe seguir cumpliendo con las leyes físicas básicas para no alterar de ninguna forma el comportamiento final.

**Consistencia dimensional:** Consiste en revisar la igualdad y consistencia entre las unidades utilizadas en cada ecuación del modelo. Se puede utilizar algún software de análisis dimensional o por simple inspección de cada uno de los parámetros del modelo.

**Error de integración:** Esta prueba consiste en variar los valores del paso de integración, así como los tipos de integración para ver si los comportamientos de las variables cambian. Si existen cambios de comportamiento es porque existen errores en la estructura o en los valores de los elementos del modelo.

**Evaluación de parámetros:** La evaluación de parámetros consiste en revisar la validez conceptual y numérica de cada parámetro, es decir que represente algo dentro del modelo y no sea una forma de corregir errores o relaciones dudosas. Además se debe revisar el procedimiento que se utilizó para obtener el valor, que debe ser o estimación mediante estadística, o consulta de una fuente confiable, o estimación por medio de juicios acerca del fenómeno. Lo más útil en la corrección de errores de este tipo es realizar pruebas parciales del modelo para calibrar los parámetros.

**Reproducción de comportamiento:** Por medio de esta prueba se revisa que el modelo genere un comportamiento similar al observado por el fenómeno en la vida real. Se recomienda para llevar a cabo esta prueba utilizar una de las tantas herramientas o fórmulas estadísticas disponibles para la evaluación de la reproducción del comportamiento de un sistema y compararla con los datos obtenidos por el modelo.

**Anomalía en el comportamiento:** Consiste en cambiar o eliminar factores dentro de la estructura del modelo o incluso modificar valores dentro de los parámetros, tablas o retardos existentes en el modelo con el fin de esperar algún comportamiento extraño. Si después de realizar algún cambio importante, de los ya mencionados, el comportamiento del modelo es el mismo es necesario revisar la estructura en busca del error.

**Comportamiento sorpresa:** Esta prueba sencillamente se trata de revisar el comportamiento del modelo, y esperar que de un resultado que se espera y no un comportamiento extraño o que no se hubiese reconocido anteriormente en alguna prueba.

**Mejora del sistema:** Se realiza una realimentación acerca de los efectos que tiene el proceso de modelado sobre los modelos mentales, comportamientos y entendimiento del sistema o fenómeno real.

**Análisis de sensibilidad:** La prueba del análisis de sensibilidad se convierte de gran ayuda al momento de identificar las variables o parámetros que más afectan al modelo al cambiar sus valores sobre el rango plausible de incertidumbre. El análisis de sensibilidad puede ser numérico, de comportamiento o de políticas; tal vez este último el más importante a la hora de conocer las políticas más efectivas para llegar a un equilibrio óptimo en el comportamiento del fenómeno.

Para poder revisar un ejemplo de la aplicación de un plan de pruebas es recomendable revisar el trabajo “Modelado del cambio global mediante dinámica de sistemas”, incluido como anexo, donde se aplica un plan de pruebas configurado específicamente para las necesidades del proyecto. Como la mayoría de pruebas resultan triviales para un modelo sencillo, y no ilustran mucho del proceso, se explica acá el plan de pruebas usado y se deja al lector la revisión de los resultados del mismo sobre los modelos de trabajo citado.

### Ejemplo de un plan de pruebas para la validación final del modelo

En el trabajo “Modelado del cambio global mediante dinámica de sistemas” se diseñó un plan de pruebas acorde a las características del modelo. Para la validación final del modelo se tomó como guía el plan de pruebas de Sterman, pero se agruparon las pruebas en cinco fases según el nivel de cambios que exija la estructura del modelo:

<b>Fase I</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Idoneidad de los límites.</li><li>• Evaluación de la Estructura.</li><li>• Consistencia Dimensional.</li></ul>	Cambios en la Estructura del Modelo. Creación o eliminación de relaciones, elementos o sectores.
<b>Fase II</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Error de Integración.</li><li>• Evaluación de Parámetros.</li></ul>	Cambios en la Estructura y en los elementos del Modelo. Modificación de las relaciones o de la definición de elementos.
<b>Fase III</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reproducción de Comportamiento.</li><li>• Anomalía en el Comportamiento.</li><li>• Comportamiento Sorpresa.</li></ul>	Cambio en las definiciones de los elementos del modelo.
<b>Fase IV</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis de Sensibilidad.</li></ul>	Cambio en las definiciones de los elementos del modelo.
<b>Fase V</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mejora del Sistema.</li><li>• Análisis de Sensibilidad: Políticas</li></ul>	Cambios en la estructura de las políticas. Cambios en los elementos relacionados con las políticas.

Tabla N°: Fases del plan de pruebas

La fase I agrupa las pruebas que tienen que ver con la estructura, con la formulación del modelo. Estas pruebas se consideraron realizar juntas para que los cambios en el modelo, producto de la aplicación de ellas se vean reflejados a la vez.

En la fase II se encuentran las pruebas que se encargan de revisar los valores de los elementos del modelo sin afectar su estructura. Estas pruebas son realizadas antes de hacer el análisis de los resultados.

La fase III relaciona las pruebas correspondientes con el comportamiento del modelo. Los resultados de estas pruebas afectan también los valores dentro del modelo; difiere de la fase II debido en que esta fase va después del análisis del comportamiento, es decir que ya se tiene en cuenta el significado del comportamiento con relación al fenómeno que el modelo representa antes de aplicar estas pruebas.

La fase IV consiste en el análisis de sensibilidad. Para el proyecto se diseñó un plan de análisis de sensibilidad diferente del expuesto en el texto de Sterman. Debido a la complejidad del modelo y a los alcances propuestos, no es práctico hacer el análisis para todos los parámetros, pues darían muchas combinaciones. Resulta más adecuado hacer el análisis teniendo en cuenta los parámetros más importantes. Los conceptos básicos del análisis de sensibilidad son explicados en el apartado anterior.

La fase V agrupa los análisis que requieren la implantación de las políticas que resultan del modelo en el sistema real. No se puede realizar estas pruebas pues no hay posibilidad de contrastar la implantación de tales políticas.

Estas fases se ejecutan en secuencia, realizando los cambios pertinentes cada vez que sea necesario. Este es un proceso realimentado: Los cambios que se realizan tienden a ajustar el modelo más a la realidad y se basan en las experiencias anteriores.

En el caso del modelo del cambio global, se hicieron excepciones a las reglas impuestas por Sterman, por ejemplo en el caso de variables que tienen valores abstractos o intangibles. En estos casos es necesario hacerlo, ya que estas variables son inherentemente desconocidas para el modelador y no es lógico exigir formalidad cuando no existen reglas cuantificables. En estos casos siempre es mejor una aproximación preliminar que ninguna, así que se toleran algunas fallas en las pruebas. Para el mismo modelo, las pruebas se realizaron con ese nivel de rigurosidad solo para la validación final del modelo, esto debido a la propuesta de desarrollo de prototipos adoptada para el proyecto. En el caso de los prototipos anteriores, los que incrementan el cubrimiento del modelo, se realizaron pruebas de comportamiento y análisis de sensibilidad, especificados en el apartado dedicado a cada prototipo.

Es importante reconocer que cada modelo es inherentemente diferente a los demás, así que siempre vale más una mente despierta y un criterio firme por parte del modelador que un plan preestablecido por otro. Los planes de prueba siempre deben adaptarse al modelo partiendo de asunciones sólidas y coherentes con el problema a resolver.