

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES**



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®**

**Ciencia y
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



Instituto **Tecnológico**®
de Aguascalientes

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Determinación de Políticas Públicas Sustentables Usando Optimización Multiobjetivo

Tesis

Para obtener el título de:

Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

Alejandro Orozco Calvillo

Director

Dr. Pablo Tenoch Rodríguez González

Co-Director

Sinue Arnulfo Tovar Ortiz

Comité Sinodal:

Dra. Elvia Ruiz Beltran

Aguascalientes, Ags., México., Noviembre 2025



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **30/octubre/2025**

Oficio No. DEPI 671/2025

Asunto: Autorización impresión tesis

C. ALEJANDRO OROZCO CALVILLO
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Maestría, hacemos **constar** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: **"DETERMINACIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS SUSTENTABLES USANDO OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO"**, hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica.
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®*

PRESIDENTE


DR. PABLO TENOCH RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

SECRETARIO


M.C. SINUE ARNULFO TOVAR ORTIZ

VOCAL


DRA. ELVIA RUIZ BELTRÁN

ccp. Archivo
JFLH/yevo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnim.mx
tecnim.mx | www.aguascalientes.tecnim.mx



AUTORIZACIÓN DE USO DE DERECHOS DE AUTOR OTORGADO POR

Alejandro Orozco Calvillo, mayor de edad, con domicilio ubicado en Aguiles Elorduy #1050, Fraccionamiento San Marcos, Aguascalientes, Aguascalientes, en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada Determinación de políticas publicas sustentables usando optimización multiobjetivo quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrá por las clausulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada Determinación de políticas publicas sustentables usando optimización multiobjetivo, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

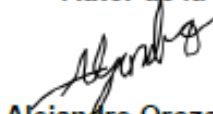
QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de **EL AUTOR Y/O TITULAR**, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA – AUTORÍA: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

Aguascalientes, Aguascalientes, a 30 días del mes de octubre de 2025.

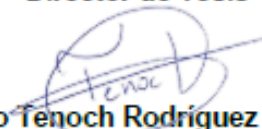
Autor de la Tesis



Alejandro Orozco Calvillo

Nombre y firma

Director de Tesis



Dr. Pablo Tenoch Rodríguez González

Nombre y firma



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., **3/noviembre/2025**
Asunto: Constancia de Originalidad

**CONSEJO DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE**

El director de tesis de **Alejandro Orozco Calvillo**, estudiante de **Maestría en Ciencias de la Ingeniería** con número de control **G23153212**, hace constar que, después de haber realizado la revisión del informe de originalidad generado con la herramienta Turnitin, el trabajo **"DETERMINACIÓN DE POLITICAS PÚBLICAS SUSTENTABLES USANDO OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO"** es original conforme a los criterios establecidos. El porcentaje de similitud es de **8%** y se adjunta resumen del reporte.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica.
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia

Vo.Bo.

DR. PABLO TENOCH RODRÍGUEZ GONZÁLEZ
DIRECTOR DE TESIS

mar d 81

DR. MARIO ALBERTO RODRÍGUEZ DÍAZ
COORDINADOR DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA

ccp. Archivo



2025
Año de
la Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801, Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.desi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



ABET

Tesis Alejandro Orozco - Final.pdf



Alejandro Orozco Calvillo



Alejandro Orozco Calvillo



Tecnológico Nacional de México

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:old::20755.522356063

Fecha de entrega

3 nov 2025, 12:32 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

3 nov 2025, 12:37 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Tesis Alejandro Orozco - Final.pdf

Tamaño del archivo

2.9 MB

81 páginas

22.865 palabras

136.288 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
1046 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
217 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Resumen.

Se presenta un modelo compartimental del ecosistema humano formulado mediante un sistema de ecuaciones diferenciales tipo Lotka–Volterra e implementado en MATLAB, complementado con un análisis de sensibilidad paramétrica y restricciones de implementación (horizonte de 100 años dividido en cuatro periodos de 25 años y límites de magnitud en las intervenciones) para garantizar que los perfiles de política sean realistas y graduales. A partir de más de cien parámetros que componen al modelo matemático, se seleccionó un subconjunto manejable de variables de decisión directamente traducibles a instrumentos públicos (mortalidad de plantas silvestres accesibles, salario base, precios agrícolas y ganaderos, precios industriales y factor de productividad de recursos) con el fin de preservar interpretabilidad y aplicabilidad administrativa. Las funciones objetivo representaron explícitamente las tres dimensiones que conforman a la sustentabilidad: Minimización de la temperatura final del sistema (dimensión ambiental), minimización de la volatilidad sectorial (dimensión económica) y maximización de la masa humana (dimensión social), y la resolución del conflicto entre ellas se realizó por la estrategia de mínima distancia, contrastada frente a optimizaciones mono objetivo e Información de Fisher.

En los experimentos numéricos la solución por mínima distancia produjo perfiles de política más equilibrados y robustos: Redujo la temperatura final en el orden del 15 % (hasta $\approx 29.7^{\circ}\text{C}$ en el horizonte de 100 años), mejoró indicadores sociales respecto al caso base y atenuó la volatilidad económica en comparación con las demás estrategias evaluadas. El enfoque facilita, por tanto, la generación de paquetes de política traducibles a medidas concretas (ajustes salariales graduales, subsidios agrícolas focalizados, manejo forestal sustentable, estímulos a productividad, etc.) y ofrece una herramienta cuantitativa reproducible para explorar relaciones de compensación entre criterios (compromisos entre dimensiones de sustentabilidad), priorizar intervenciones y apoyar evaluaciones antes de la implementación; no obstante, su adopción real exige validación empírica local y estrategias de gobernanza que consideren aceptación social y coordinación administrativa.

Dedicatoria.

A la memoria de mi padre.

Agradecimientos.

Primeramente, agradezco a Dios, por darme la fortaleza y las oportunidades que me han permitido llegar hasta aquí.

A mis padres, cuyo amor ha sido el cimiento de mi vida. A mi padre, cuya memoria vive en mí y me impulsa a seguir adelante con la frente en alto; aunque ya no esté físicamente, su ejemplo sigue marcando mi camino. Y a mi madre, por ser mi refugio inagotable, por darme todo sin pedir nada, por confiar en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Su amor, sacrificio y fe han sido la luz que me guía y la fuerza que me sostiene; a ella le debo gran parte de lo que soy.

A mi esposa, mi compañera de vida, porque tenerla a mi lado es un regalo invaluable. Su fe en mí, su paciencia y su apoyo constante han sido mi motor para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Soy afortunado de compartir este camino con ella y de aprender cada día del amor incondicional que me impulsa a nunca rendirme.

A mis hermanos, compañeros de vida en cada etapa. Con ellos aprendí el valor de la unión, la fuerza que nace del apoyo mutuo y la importancia de celebrar juntos los logros y afrontar las adversidades. Cada recuerdo compartido es un tesoro que me acompaña, y cada gesto suyo me recuerda lo afortunado que soy de tenerlos.

Al Dr. Tenoch, por su generosidad, empatía y disponibilidad, así como por ser guía y ejemplo dentro y fuera de lo académico. Extiendo también mi reconocimiento al jurado de tesis, por el tiempo y dedicación otorgados a la revisión de este trabajo.

A mis amigos, que han estado conmigo en los buenos y en los malos momentos, haciéndome recordar el valor de la amistad sincera.

Al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, mi casa de formación, donde he crecido no solo académicamente sino también en lo humano, y donde he forjado amistades que siempre recordaré con gratitud. Gracias por permitirme pertenecer a tan distinguida institución.

Finalmente, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría en mi carácter de becario con número de referencia 005088.

Tabla de contenido

Resumen.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	vi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Ecosistemas Humanos y Problemas Ambientales.	1
1.2. Objetivo General.	7
1.3. Objetivos Específicos.	7
Capítulo 2. Marco teórico.....	8
2.1. Políticas Públicas.	8
2.2. Políticas Públicas Sustentables.....	9
2.3. Modelos Matemáticos Compartimentales.	10
2.4. Optimización.	12
2.5. Optimización Multiobjetivo en Sistemas Socio-Ecológicos.	13
Capítulo 3. Metodología.....	16
3.1. Modelo Matemático.	16
3.2. Selección de Variables de Decisión.....	25
3.2.1. Análisis de Sensibilidad.....	26
3.3. Restricciones.	26
3.3.1. Periodos de Tiempo.	26
3.3.2. Restricción de Rango.....	27
3.4. Optimización Usando un Índice Global.	29
3.5. Optimización Multiobjetivo.	30
Capítulo 4. Resultados y discusión.	32
4.1. Variables de Decisión.	32
4.2. Valores Óptimos.	32
4.3. Soluciones Óptimas.....	33
4.4. Perfiles Óptimos del Modelo.....	37
Capítulo 5. Conclusiones.....	49
5.1. Conclusiones Generales.	49
5.2. Implicaciones para las Políticas Públicas Sustentables.	49
5.3. Desafíos para la Implementación en la Vida Real.	49
5.4. Trabajos Futuros.....	50
5.5. Reflexión Final.....	50
5.6. Publicaciones y Participaciones en Congresos.....	50
Referencias Bibliográficas.	51
Anexos.	54

Lista de Figuras.

Figura 1. Ejemplo de sistema socio-ecológico (<i>Bronwen, 2019</i>)	1
Figura 2. Gráfica huella ecológica vs biocapacidad	2
Figura 3. Ciclo de las políticas públicas.	3
Figura 4. 17 objetivos del desarrollo sustentable. Agenda 2030.....	4
Figura 5. Ciclo de vida de una política pública.....	8
Figura 6. Sustentabilidad, como trayectoria en el tiempo para un sistema complejo eco-socio-económico.	9
Figura 7. Esquema general de modelo compartimental presa-predador (<i>Lotka-Volterra</i>).....	10
Figura 8. Esquema de optimización (<i>proceso iterativo</i>)	12
Figura 9. Modelos de programación lineal y no lineal.....	13
Figura 10. Ejemplo de frente de Pareto	14
Figura 11. Modelo compartimental.....	17
Figura 12. Restricción de periodos de tiempo	27
Figura 13. Restricción de rango.....	28
Figura 14. Perfil óptimo mP2	34
Figura 15. Perfil óptimo aw	34
Figura 16. Perfil óptimo aP1p.....	35
Figura 17. Perfil óptimo aH1p.....	35
Figura 18. Perfil óptimo aISp	36
Figura 19. Perfil óptimo lambda.....	36
Figura 20. Temperatura global del modelo durante cien años.....	38
Figura 21. Salario per cápita durante cien años.....	38
Figura 22. HH durante cien años.....	39
Figura 23. Número de humanos durante cien años.....	40
Figura 24. P1 durante cien años	40
Figura 25. P2 durante cien años	41
Figura 26. P3 durante cien años	42
Figura 27. H1 durante cien años.....	43
Figura 28. H2 durante cien años.....	44
Figura 29. H3 durante cien años.....	44
Figura 30. C1 durante cien años.....	45
Figura 31. C2 durante cien años.....	46
Figura 32. IS durante cien años	46
Figura 33. RP durante cien años.....	47
Figura 34. IRP durante cien años	48
Figura 35. ERP durante cien años	48

Lista de tablas.

Tabla 1. Principios fundamentales de políticas públicas sustentables	3
Tabla 2. Comportamiento de Z1, Z2 y Z3 con cada FO específica para cada dimensión	33

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Ecosistemas humanos y problemas ambientales.

Los ecosistemas humanos son sistemas complejos, donde interactúan dinámicas naturales, sociales y económicas, relacionar adecuadamente estas dimensiones representa un desafío, ya que, aunque todas conforman un mismo sistema, sus interacciones no son lineales y son difíciles de predecir. Priorizar el desarrollo de una o dos de estas dimensiones (en detrimento de las demás) puede acarrear consecuencias no deseadas que comprometen la sustentabilidad del conjunto. Dichos sistemas se caracterizan por su adaptabilidad y resiliencia, pero enfrentan presiones sin precedentes debido a la actividad antropogénica. Para ilustrar estas interacciones, se muestra un ejemplo de sistema socio-ecológico (Figura 1) el cual ofrece una representación clara de cómo fluyen los subsistemas ecológico y social, y cómo operan diferentes escalas de control.

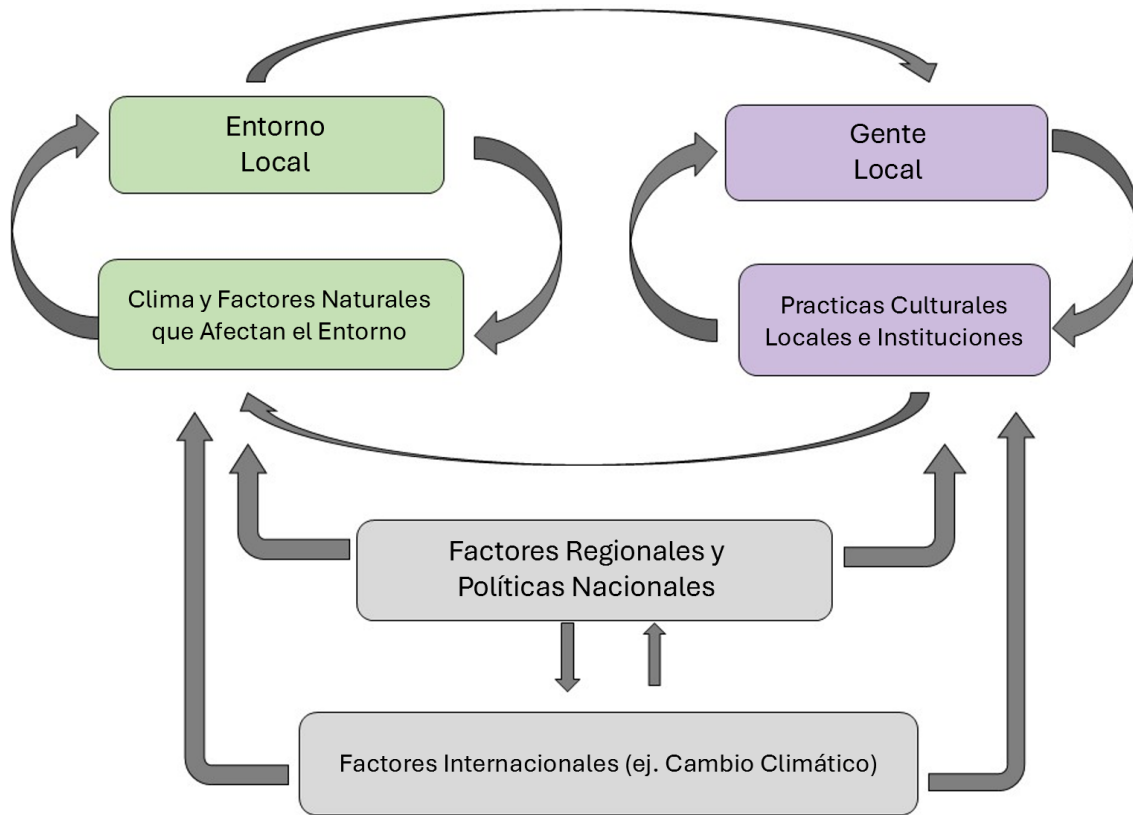


Figura 1. Ejemplo de sistema socio-ecológico (Bronwen, 2019).

La interconexión entre recursos naturales, actividades productivas y bienestar social define su sustentabilidad a largo plazo (Liu et al., 2007). Estudios recientes demuestran que el colapso de civilizaciones históricas, como los mayas, estuvo ligado al desacoplamiento entre sus demandas y la capacidad de regeneración ecosistémica (Diamond, 2005). En el siglo XXI, esta dicotomía se manifiesta en la huella ecológica global, que supera en 1.7 veces la biocapacidad terrestre, como se muestra en la Figura 2 (Global Footprint Network, 2025).

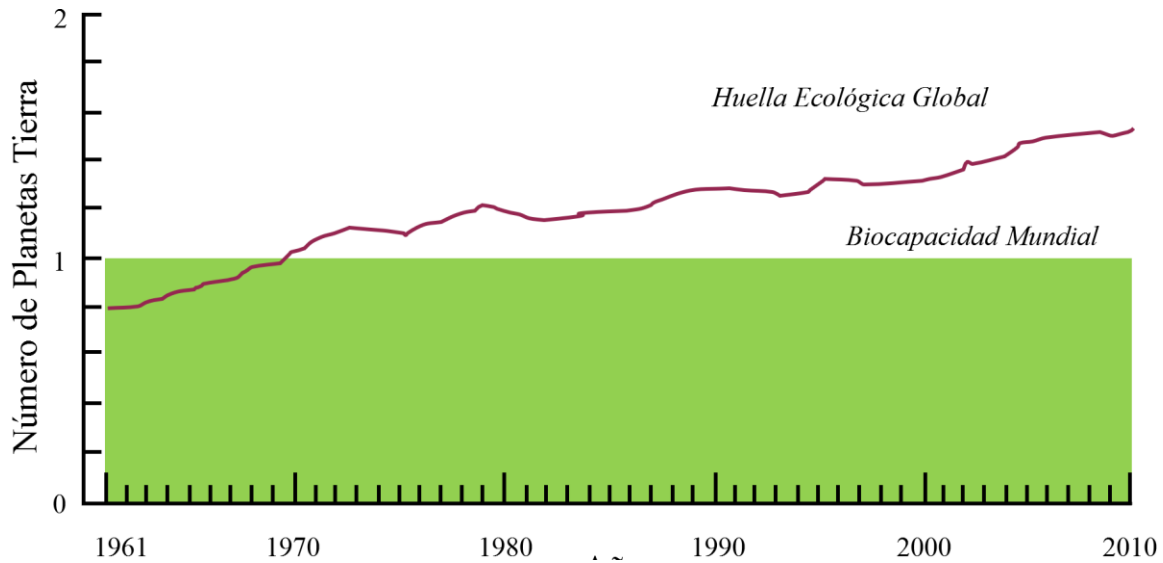


Figura 2. Gráfica huella ecológica vs biocapacidad.

Estos problemas no solo amenazan la estabilidad ecológica, sino también el bienestar social y la viabilidad económica a largo plazo. En este contexto, la toma de decisiones basada en políticas públicas sustentables se convierte en algo imperativo para equilibrar el desarrollo humano con la preservación de los sistemas naturales (Azabache De la Cruz, 2024). La crisis ambiental contemporánea se expresa en tres dimensiones críticas:

1. Cambio climático: Aumento de la temperatura de 0.2°C y concentraciones de CO₂ de 20 ppm, por década desde el 2000 (10 veces más rápido que cualquier aumento previo en 800,000 años) (M.R et al., 2022).
2. Pérdida de biodiversidad: Tasa de extinción 100-1000 veces mayor que la basal, con 1 millón de especies amenazadas (Brondízio et al., 2019).
3. Agotamiento de recursos: 90% de degradación de suelos agrícolas y estrés hídrico en 40% de la población mundial (UNCCD, 2022).

Estos fenómenos interactúan sinérgicamente, creando "zonas de sacrificio" donde comunidades vulnerables sufren impactos desproporcionados (Bullard, 2000). En este contexto, la toma de decisiones en política pública enfrenta grandes retos. Decidir sobre planes y proyectos a nivel gubernamental implica equilibrar objetivos económicos, sociales y ecológicos muchas veces contradictorios. En la práctica, la asignación de recursos públicos obedece a prioridades políticas e ideológicas y se plasma en "carteras de proyectos" donde se intenta maximizar el impacto de los programas seleccionados. Sin embargo, la naturaleza multifacética de las demandas ciudadanas y la incertidumbre inherente al entorno exigen métodos rigurosos para apoyar dichas decisiones. Las políticas públicas se estructuran cíclicamente, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Ciclo de las políticas públicas.

Pero las políticas públicas tradicionales suelen estar sujetas, por lo menos, a tres limitantes estructurales:

1. Fragmentación: Tratamiento sectorizado de problemas interconectados (OCDE, 2019).
2. Cortoplacismo: Ciclos políticos que ignoran escalas temporales ecosistémicas.
3. Inercia institucional: Resistencia a incorporar evidencia científica en diseño regulatorio (Cairney & Oliver, 2017).

La teoría de la elección racional revela que, sin incentivos alineados, los tomadores de decisiones priorizan beneficios inmediatos antes que sostenibilidad intergeneracional (Ostrom, 2005). Una política pública sustentable debe integrar cuatro principios fundamentales, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Principios fundamentales de políticas públicas sustentables.

Principio	Mecanismo	Ejemplo
Integración multidimensional	Equilibrio ambiente-economía-sociedad	Impuestos al carbono con dividendos sociales
Pensamiento sistemático	Análisis de retroalimentaciones	Evaluación ambiental estratégica
Adaptabilidad	Monitoreo y aprendizaje continuo	Presupuestos base cero con indicadores ODS (Objetivos de desarrollo sustentable)
Gobernanza policéntrica	Participación multinivel	Desarrollo y seguimiento a políticas públicas intergeneracionales

Las políticas públicas sustentables se definen como aquellas estrategias gubernamentales orientadas a promover el desarrollo económico y social sin comprometer la viabilidad ambiental de largo plazo. En teoría, su enfoque integrador debe “unir los objetivos de diversas dimensiones de la intervención humana en relación con el ambiente natural” (Pamplona, 2000). Tradicionalmente, el diseño de políticas se ha apoyado en enfoques cualitativos o modelos reduccionistas que no capturan la complejidad de los ecosistemas humanos. Sin embargo, los modelos matemáticos, en particular los modelos compartimentales, ofrecen un marco cuantitativo para simular interacciones entre componentes ambientales, económicos y sociales (Cabezas et al., 2003). Las políticas públicas sustentables son vitales para abordar desafíos tanto locales como globales. A nivel nacional, garantizan la seguridad de los recursos naturales y la calidad de vida presente y futura. Por ejemplo, la constitución colombiana reconoce “el derecho a gozar de un ambiente sano”, promoviendo la protección de la diversidad ecológica y la educación ambiental (*Políticas Públicas Ambientales, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 2021*). Esto refleja la importancia de adoptar políticas que vinculen desarrollo económico con el bienestar ambiental de la comunidad. En el ámbito global, existe un consenso internacional que refrenda esta necesidad. La agenda 2030 de la ONU plantea retos universales para el desarrollo sustentable aplicables a todos los gobiernos, en los cuales 17 objetivos de desarrollo sustentable sirven como marco para planificar y evaluar políticas nacionales y locales (mencionados en la Figura 4)(*Implementación de la Agenda 2030 a Nivel Subnacional, PNUD, 2018*). En consecuencia, al alinear las estrategias públicas con acuerdos internacionales (ODS, acuerdos climáticos) se promueve que cada nivel de gobierno atienda sus desafíos con una visión integral y de largo plazo.



Figura 4. 17 objetivos del desarrollo sustentable. Agenda 2030.

Existen múltiples ejemplos prácticos de políticas públicas orientadas a la sustentabilidad. En Brasil, el programa bolsa familia (2003-2023) es un caso emblemático de política social sustentable: mediante transferencias de dinero condicionadas al cumplimiento educativo y de salud de los niños, logró reducir significativamente la pobreza y mejorar el capital humano (Rivera Castiñeira et al., 2009). En el ámbito ambiental, Costa Rica implementó un programa de pago por servicios ambientales (PPSA) que reconoce financieramente a propietarios de bosques para conservar sus recursos. Este programa está diseñado “Para el manejo, la conservación y el desarrollo sostenible de los recursos del bosque y de la biodiversidad” (*Pago de Servicios Ambientales, FONAFIFO*, 2018), ilustrando cómo se traducen objetivos ecológicos en incentivos económicos. También puede citarse políticas energéticas (por ejemplo, subsidios para renovables), planes de uso de suelo sostenible o presupuestos verdes, que combinan metas económicas con metas ambientales y sociales. En todos los casos, se observa el uso de enfoques integrados y evaluación de indicadores sostenibles, sirviendo como lecciones para diseñar políticas públicas equilibradas y efectivas.

Los modelos matemáticos permiten abstraer y simular la dinámica de los sistemas socio-ambientales, vinculando variables económicas, sociales y ecológicas bajo supuestos explícitos. Específicamente, los modelos compartimentales dividen el sistema en "compartimentos" interconectados (ej. recursos naturales, sectores productivos, población) y describen sus flujos mediante ecuaciones diferenciales, descomponen sistemas complejos en subsistemas interconectados por flujos de masa/energía.

Aunque útiles, estos modelos suelen abordar dimensiones aisladas. La verdadera sustentabilidad exige un enfoque integral que considere simultáneamente:

- Objetivos ambientales (ej. reducir emisiones de CO₂).
- Objetivos sociales (ej. mejorar calidad de vida).
- Objetivos económicos (ej. estabilizar mercados).

Esto se logra mediante la optimización multiobjetivo, pues considera simultáneamente varios criterios de desempeño que suelen estar en conflicto. No existe una única solución que optimice todos los objetivos a la vez; en cambio, interesa caracterizar el conjunto de óptimos de Pareto, es decir, las soluciones factibles no dominadas. Formalmente, un vector de decisión factible es óptimo de Pareto si no existe otro que mejore todos los objetivos simultáneamente (Coello, 2021). Cualquier mejora en uno de los objetivos solo es posible a costa de empeorar al menos otro. El frente de Pareto está formado por los valores objetivos correspondientes a estas soluciones eficientes (Flores Fuentes, 2021). En la práctica, el decisor elige del frente aquella solución que mejor equilibre los objetivos según sus preferencias, explicitando así los trade-offs entre ellos (por ejemplo, cuánta tasa de crecimiento económico sacrificamos para reducir emisiones).

La optimización multiobjetivo ha encontrado numerosas aplicaciones en problemas reales de sustentabilidad y política pública. Por ejemplo, en el transporte público se han optimizado estructuras de red de pasajeros buscando minimizar simultáneamente costos y emisiones. Un estudio reciente desarrolló un modelo multiobjetivo para el sistema de transporte de una ciudad, considerando emisiones de carbono y costos de traslado, y mostró cómo modificar la oferta de buses, subterráneos y taxis puede mejorar la sustentabilidad del sistema (Zhang et al., 2023). En la práctica, este tipo de modelo reveló que aumentar ligeramente el uso de buses y subterráneos puede reducir significativamente los autos privados y las emisiones asociadas, apoyando decisiones de política de transporte sostenible. En el sector energético, se diseña la matriz energética óptima como un problema multiobjetivo, balanceando el costo económico de generación con las emisiones de carbono. Mediante modelos de programación matemática se identifican mezclas de fuentes (fósiles,

renovables, nucleares, etc.) que minimizan costos mientras cumplen metas ambientales. De forma similar, en cadenas de suministro se construyen modelos multicriterio para economía circular: por ejemplo, cadenas de suministro de ciclo cerrado (“circuito cerrado”) optimizadas según costo total, emisiones de CO₂ y otros indicadores sociales. Estos modelos integran la logística inversa con la directa, minimizando costo e impacto ambiental simultáneamente (Jayarathna et al., 2021). Estas aplicaciones permiten a los responsables públicos evaluar opciones de política (inversiones, subsidios, regulaciones) con criterio cuantitativo. Al presentar la frontera de Pareto, los tomadores de decisión pueden ver los compromisos entre desarrollo económico, equidad social y protección ambiental (Zhang et al., 2023). Así, la optimización multiobjetivo sirve como herramienta para diseñar políticas que armonicen la sostenibilidad ambiental con el crecimiento y la justicia social.

1.2. Objetivo general.

Determinar políticas públicas sustentables mediante optimización multiobjetivo aplicada a un modelo compartimental de ecosistema humano.

1.3. Objetivos específicos.

1. Seleccionar un modelo matemático compartimental que integre dimensiones ambientales, económicas y sociales de un ecosistema humano.
2. Seleccionar variables de decisión vinculadas a políticas públicas reales (ej. regulación de salarios, manejo de recursos forestales) mediante análisis de sensibilidad y criterios de viabilidad.
3. Formular funciones objetivo independientes para cada dimensión de sustentabilidad:
 - Ambiental: Minimizar temperatura global.
 - Social: Maximizar bienestar humano (masa total de población).
 - Económica: Minimizar volatilidad de sectores productivos.
4. Implementar la optimización multiobjetivo en MATLAB usando el método de distancia mínima para resolver conflictos entre objetivos.
5. Validar y correlacionar resultados con escenarios del mundo real, proponiendo políticas públicas (ej. subsidios agrícolas, ajustes salariales graduales).
6. Evaluar el desempeño comparando el enfoque multiobjetivo con optimizaciones mono-objetivo (ej. basadas en la Información de Fisher).

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1. Políticas públicas.

Las políticas públicas constituyen un conjunto de acciones emprendidas por el gobierno con el propósito de atender problemas de interés público. Estas acciones se fundamentan en decisiones derivadas de procesos sistemáticos de diagnóstico y análisis de factibilidad, que permiten identificar y priorizar problemáticas específicas. Asimismo, se caracterizan por la participación de la ciudadanía, tanto en la definición de los problemas como en la propuesta de soluciones, lo que favorece su legitimidad, pertinencia y eficacia.

El diseño y la implementación de una política pública no ocurren de manera espontánea ni desarticulada, sino que obedecen a un proceso estructurado compuesto por etapas secuenciales y complementarias. Este proceso, conocido como el ciclo de vida de una política pública, permite comprender la lógica interna mediante la cual una problemática social es identificada, abordada mediante acciones gubernamentales y, finalmente, evaluada en términos de su impacto. La Figura 5 resume las fases que integran este ciclo.

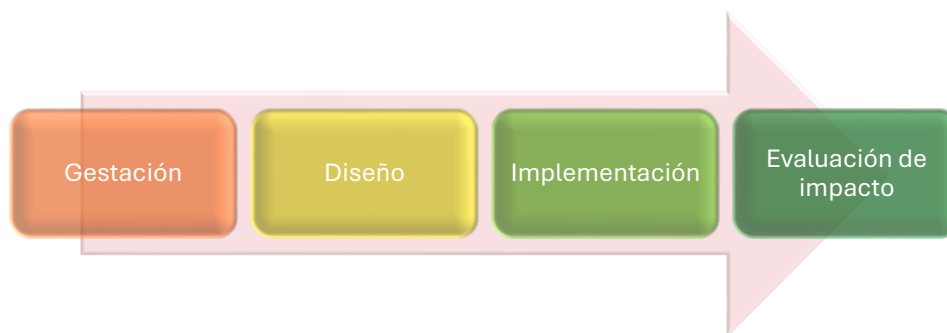


Figura 5. Ciclo de vida de una política pública.

Como se observa en la Figura 5, el ciclo de vida de una política pública inicia con la gestación: La identificación de un problema colectivo que requiere atención institucional, seguido de su incorporación en la agenda gubernamental. Posteriormente, se desarrolla la etapa de diseño, donde se analiza la problemática, se exploran soluciones viables y se plantea un curso de acción estructurado. La fase de implementación implica tanto decisiones formales como acciones concretas, incluyendo la asignación de recursos, la aprobación normativa y la ejecución administrativa. Finalmente, la evaluación de impacto permite medir los efectos reales de la política implementada, generando insumos para mejorar su eficacia y retroalimentar futuras intervenciones. Este enfoque cíclico e iterativo asegura una gestión pública más informada, estratégica y orientada a resultados.

No puede considerarse política pública a toda acción gubernamental; quedan excluidas aquellas iniciativas que se diseñan sin atender al interés colectivo, que carecen de un sustento en el diagnóstico riguroso de la realidad y en el análisis de factibilidad, y que omiten deliberadamente la participación ciudadana en su formulación. Del mismo modo, tampoco pueden asumirse como políticas públicas aquellas decisiones impulsadas por ocurrencias, improvisaciones o caprichos de actores políticos, que, aunque en apariencia pudieran ofrecer soluciones plausibles, no superan un examen crítico al

revelar la ausencia de fundamentos técnicos, de coherencia estratégica y de criterios de viabilidad. La política pública, en su sentido más estricto y legítimo, exige racionalidad, planificación y corresponsabilidad democrática; todo lo que se aleje de ello constituye una acción gubernamental aislada, carente de sustento y limitada en su capacidad de incidir efectivamente en la resolución de problemas públicos.

2.2. Políticas públicas sustentables.

El concepto de sustentabilidad surgió con el Informe Brundtland (1987) como “El desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro” (*Acerca de Desarrollo Sostenible, CEPAL, 2017*). Esta definición pionera enfatiza la conservación del capital ambiental junto con el bienestar humano. A lo largo de las décadas se ha reforzado que la sustentabilidad implica un equilibrio entre las dimensiones ambiental, económico y social, como se muestra en la Figura 6, la cual ilustra que la sustentabilidad de un sistema se mantiene mientras su trayectoria permanezca dentro ciertos límites, aquí figurados como un túnel; cuando la trayectoria se desvía fuera de dichos límites, el sistema se considera insostenible. Es fundamental señalar que la pérdida de sustentabilidad puede originarse a partir de desviaciones en cualquiera de las múltiples dimensiones que definen el sistema. Además, estas desviaciones pueden clasificarse en dos tipos: (1) aquellas que son autocorrectivas, en las cuales el sistema tiende a retornar a condiciones sustentables por sí mismo, y (2) aquellas que no son autocorrectivas, lo que implica una trayectoria hacia el colapso o una transformación crítica en curso. Evidentemente, esta última categoría reviste una gravedad mucho mayor, al representar una amenaza estructural para la integridad del sistema (Cabezas et al., 2003). Las cumbres mundiales (Río 1992, Johannesburgo 2002, Río +20) ampliaron este marco conceptual, incorporando principios de equidad intergeneracional y participación ciudadana, conceptos que reflejan el cambio de mentalidad como sociedad, desde la conservación ambiental aislada hacia una visión integral que combina crecimiento económico, inclusión social y protección del medio ambiente.

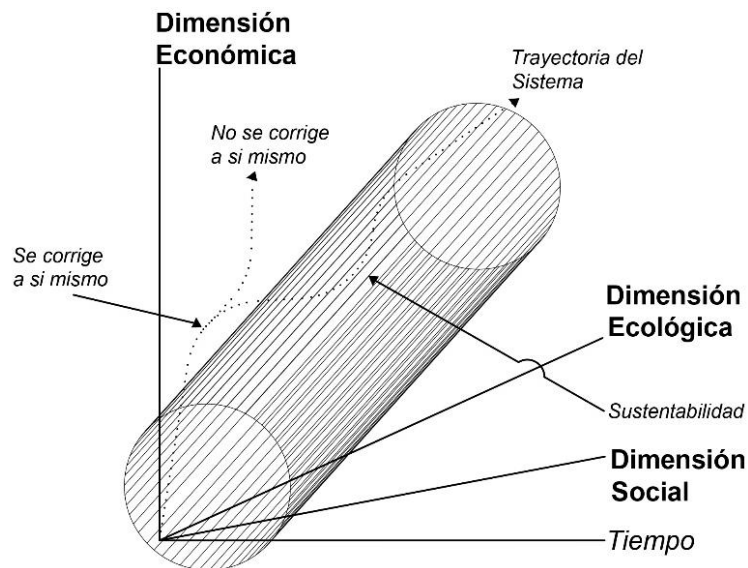


Figura 6. Sustentabilidad, como trayectoria en el tiempo para un sistema complejo eco-socio-económico.

Lo anterior conduce al análisis de marcos de política pública coherentes con los principios de sustentabilidad. Una política pública sustentable debe integrar de manera coherente las dimensiones ecológica, económica y social. En la práctica esto implica metas a largo plazo, análisis de impacto ambiental y social, indicadores de rendimiento multisectoriales, y mecanismos de rendición de cuentas. Además, es crucial que las políticas sean coherentes y basadas en evidencia: la ONU subraya que para ser eficaces “las políticas públicas deben ser coherentes entre sí y tener una motivación real y bien fundada, plenamente acorde con los hechos” (Ribeiro, 2018). Un tercer elemento esencial es la participación ciudadana e inclusividad. Por ejemplo, los principios de gobernanza de las naciones unidas establecen que las políticas deben tener en cuenta las necesidades y aspiraciones de todos los segmentos de la sociedad, incluidos los más pobres y vulnerables. La formulación de políticas sustentables exige planificación estratégica e integradora, transparencia en la toma de decisiones y diálogo con la sociedad para garantizar equidad y viabilidad en sus tres dimensiones.

2.3. Modelos matemáticos compartimentales.

Los modelos matemáticos permiten formalizar la dinámica de poblaciones, recursos y factores humanos en los sistemas socio-ecológicos. Los primeros modelos describían el crecimiento poblacional: Malthus (1789) propuso el modelo exponencial (crecimiento ilimitado) y Verhulst (1838) Introdujo la ecuación logística con capacidad de carga (Oganician & Expósito, 2017). Más adelante, Lotka y Volterra formularon (independientemente a principios del siglo XX) un modelo de presa-predador que describe la interacción cíclica entre 2 especies. En la Figura 7 y con la Ecuación 2.1, se muestra que dos ecuaciones diferenciales pueden capturar relaciones dinámicas.

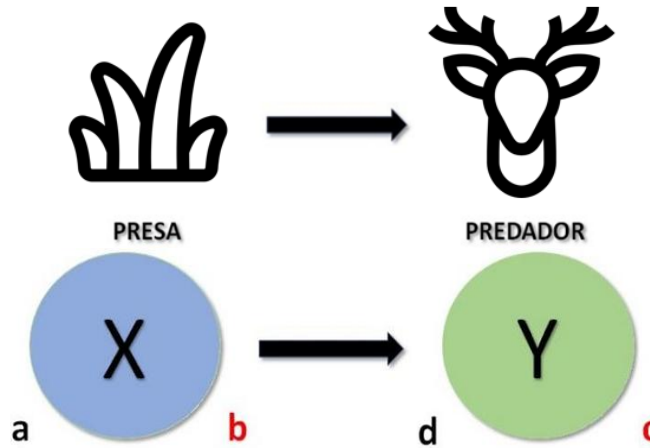


Figura 7. Esquema general de modelo compartimental presa-predador (Lotka-Volterra).

$$\frac{dx}{dt} = ax - bxy \quad (2.1)$$

$$\frac{dy}{dt} = -cy + dxy$$

El sistema de Ecuaciones 2.1, describe la dinámica acoplada entre dos poblaciones, denominadas presa (x) y depredador (y) bajo el marco del modelo de Lotka–Volterra. El primer término de cada ecuación representa la variación intrínseca de cada población en ausencia de interacción: ax modela

el crecimiento exponencial de la presa, mientras que $-cy$ refleja la mortalidad natural del depredador. El segundo término en cada expresión incorpora el efecto de las interacciones tróficas: $-bxy$ representa la reducción de presas por depredación proporcional al producto de ambas densidades poblacionales, y $+dxy$ expresa el incremento de depredadores derivado del consumo de presas, modulando así la transferencia de energía entre niveles tróficos. Este sistema constituye un paradigma de modelización no lineal en ecología matemática, donde la estructura multiplicativa de los términos de interacción captura de manera simplificada las oscilaciones periódicas y la codependencia entre especies.

En el contexto de ecosistemas humanos, los modelos se extienden para incluir también flujos económicos y sociales: por ejemplo, variables de población pueden estar conectadas con tasa de empleo, consumo de recursos o generación de residuos. Así, la modelización ecosistémica establece un marco cuantitativo para simular escenarios futuros, prever efectos de políticas (como cambios tecnológicos o demográficos) y analizar la interdependencia entre lo natural y lo humano.

En ámbitos socioeconómicos se emplean modelos de poblaciones humanas, flujos migratorios, transferencia de capital o consumo de recursos. Un ejemplo concreto puede verse en la modelización de cadenas de suministro: al tratar cada etapa (producción, uso, reciclaje) como compartimentos con flujos de material entre ellas, es posible estudiar la sustentabilidad de sistemas cerrados. Estas aplicaciones ilustran la versatilidad de los modelos compartimentales para capturar intercambios complejos y su utilidad para apoyar la toma de decisiones integrando datos ecológicos y sociales.

Los modelos compartimentales simplifican sistemas complejos en bloques homogéneos conectados por flujos, lo que facilita la interpretación y el análisis de escenarios. Por ejemplo, pueden capturar la dinámica esencial de epidemias o ecosistemas en un marco sencillo e interpretable (Tovar Ortiz et al., 2024). Esta estructura modular permite identificar factores clave y realizar simulaciones hipotéticas (p.ej. crecimiento poblacional o cambios tecnológicos) con relativa facilidad. En contextos de políticas públicas, facilitan evaluar cómo distintas decisiones afectan la dinámica global.

Ventajas:

- Permiten representar las dinámicas esenciales de sistemas complejos en forma simple y comprensible.
- Apoyan pruebas de hipótesis y análisis de escenarios (por ejemplo, optimización de estrategias de vacunación)(Tovar Ortiz et al., 2024).
- Facilitan el análisis de sensibilidad al variar parámetros y evaluar los efectos en la solución.

Sin embargo, estas ventajas conllevan a limitaciones importantes. Para mantener solvencia matemática suelen asumir linealidad en los flujos (coeficientes constantes) y homogeneidad interna en cada compartimento, ignorando heterogeneidades individuales (Romero & Escudero, 2023). Estas suposiciones simplificadoras pueden desvirtuar la realidad: las interacciones sociales o ambientales complejas quedan implícitas en parámetros fijos. Además, dependen de parámetros inciertos o difíciles de medir en la práctica. Por último, al omitir bucles de realimentación o respuestas adaptativas, pueden no captar dinámicas no lineales (puntos de quiebre o eventos extremos), lo que conduce a conclusiones poco realistas en entornos reales complejos. Los modelos compartimentales requieren validación empírica cuidadosa y análisis crítico de sus supuestos al aplicarlos en sistemas socioambientales complejos (Tovar Ortiz et al., 2024).

2.4. Optimización.

La optimización es la rama de las matemáticas aplicadas que busca maximizar o minimizar una función objetivo al variar sistemáticamente un conjunto de variables de decisión en un espacio factible (Duarte Muñoz et al., 2007). En términos simples, consiste en encontrar los valores de las variables que optimizan el objetivo (p.ej. minimizar costos o maximizar eficiencia) sujeto a restricciones (inecuaciones o igualdades). Un problema de optimización, en su forma más general, se expresa del siguiente modo:

$$\begin{array}{l} \text{Optimizar } Z = z(x) \\ x \end{array} \quad (2.2)$$

Sujeto a

$$h(x) = 0 \quad (2.3)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (2.4)$$

El objetivo de un problema de optimización es determinar las variables de decisión x que optimicen la función objetivo Z (Ecuación 2.2), garantizando que el modelo opere dentro de los límites establecidos por las restricciones de igualdad h (Ecuación 2.3) y las restricciones de desigualdad g (Ecuación 2.4). La Figura 8 ilustra de forma esquemática el procedimiento iterativo empleado en una técnica de optimización numérica. Como se puede observar, el optimizador ejecuta el modelo con un conjunto de valores para las variables de decisión x . El modelo simula los fenómenos y calcula la función objetivo y las restricciones. Esta información es utilizada por el optimizador para calcular un nuevo conjunto de variables de decisión. Esta secuencia iterativa continúa hasta que se cumplen los criterios de optimización correspondientes al algoritmo de optimización (Diwekar, 2008).

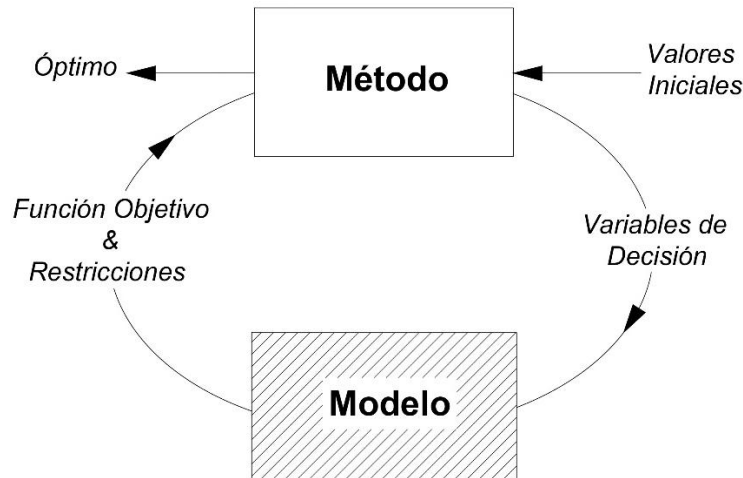


Figura 8. Esquema de optimización (proceso iterativo).

La Figura 9 muestra la gráfica de la función objetivo Z en función de una variable de decisión x . La figura de la izquierda representa un problema de programación lineal en el que tanto la función objetivo lineal como sus restricciones (líneas AB, BC y CA) son lineales. Las restricciones mostradas en la figura son desigualdades que indican que la solución debe estar por encima o sobre la línea AB, y por debajo o sobre las líneas BC y CA. El triángulo ABC representa la región factible de operación dentro de la cual debe encontrarse la solución. Las restricciones delimitan el espacio objetivo, por lo que la función objetivo lineal se encuentra en el borde de la región factible (restricción). La figura de la derecha, presenta un problema sin restricciones, por lo que la región factible se extiende al infinito.

El mínimo de la función objetivo se encuentra en el punto B, donde la tangente a la curva es paralela al eje x , con pendiente cero (la derivada de la función objetivo respecto a la variable de decisión es igual a cero).

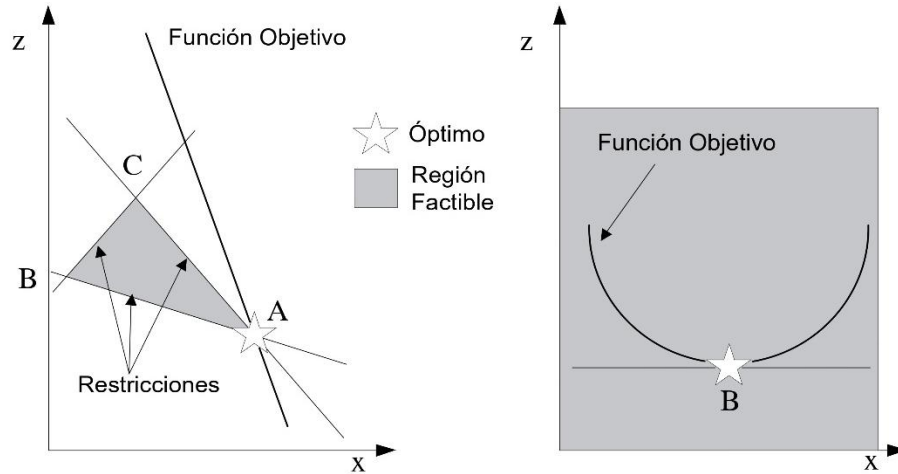


Figura 9. Modelos de programación lineal y no lineal.

La optimización se utiliza para diseñar estrategias eficientes: por ejemplo, asignar recursos públicos o planificar inversiones con un fin específico. En sistemas complejos, los modelos de optimización ayudan a equilibrar demandas contrapuestas. Por ejemplo, pueden comparar escenarios que favorezcan el crecimiento económico o la reducción de emisiones, procurando un compromiso óptimo según criterios definidos. El desafío está en expresar cuantitativamente esos objetivos y restricciones, y luego emplear algoritmos numéricos que exploren el espacio de soluciones factibles para encontrar las más favorables.

2.5. Optimización multiobjetivo en Sistemas socio-ecológicos.

La optimización multiobjetivo estudia cómo tomar decisiones cuando hay más de un criterio importante y esos criterios suelen entrar en conflicto entre sí, por ejemplo: minimizar costos y al mismo tiempo maximizar la calidad ambiental. En lugar de buscar “la mejor” solución única (como en problemas mono objetivo), este campo muestra el conjunto de compromisos disponibles para que el decisor elija según sus prioridades (Miettinen, 1998).

Un problema multiobjetivo se puede escribir como se muestra en la Ecuación (2.5):

$$\text{Optimizar} \quad Z(x) = (Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_k(x)) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeto a} \quad & h(x) = 0, \\ & g(x) \leq 0, \\ & x \in X \end{aligned}$$

Donde x es el vector de variables de decisión, $Z_i(x)$ son las funciones objetivo y $h(x)$, $g(x)$ representan las restricciones de igualdad y desigualdad respectivamente. La estructura matemática de las funciones (lineales, no lineales, enteras, mixtas, etc.) determina la clase del problema (por ejemplo: MOLP (Multi Objective Linear Programming) para programación lineal multiobjetivo, MONLP

(Multi Objective NonLinear Programming) para programación no lineal multiobjetivo, MOP-MIP (Multi Objective Programming - Mixed Integer Programming) para problemas con variables enteras, etc.).

En los MOP no existe una única solución que optimice simultáneamente todos los objetivos. Por ello se recurre al concepto de óptimo de Pareto (o solución eficiente): una solución x^* es Pareto eficiente si no existe otra solución factible x que mejore estrictamente a x^* en al menos un objetivo sin empeorar en ningún otro. El conjunto de todas las soluciones Pareto eficientes en el espacio de objetivos se denomina frente de Pareto (Figura 10) y representa las compensaciones disponibles entre criterios contrapuestos.

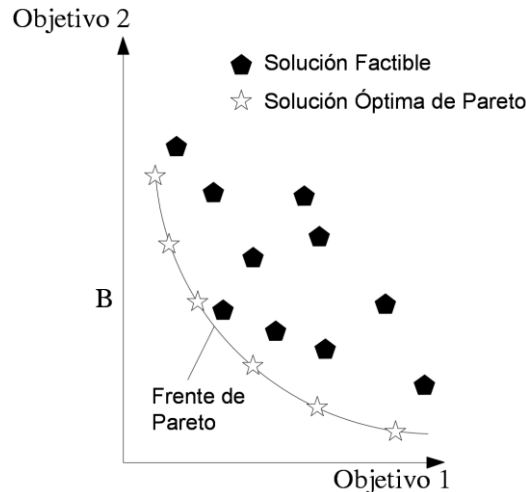


Figura 10. Ejemplo de frente de Pareto.

En la práctica, la resolución de MOP suele seguir dos etapas complementarias: (i) generación de un conjunto representativo de soluciones eficaces (métodos de exploración), y (ii) selección de la(s) solución(es) preferida(s) según las preferencias del decisor (articulación de preferencias). Entre las técnicas para generar soluciones figuran métodos de escalarización (por ejemplo, suma ponderada, método ϵ -constraint), enfoques basados en optimización matemática y metaheurísticas multiobjetivo (algoritmos evolutivos como NSGA-II, SPEA2, entre otros) que resultan particularmente útiles cuando los objetivos y restricciones son no lineales y/o el espacio factible es discontinuo (Mavrotas, 2009; Deb et al., 2002; Zitzler et al., 2001). La etapa de selección puede apoyarse en técnicas multicriterio de decisión (por ejemplo, análisis por utilidad, AHP, PROMETHEE) o en la incorporación directa de las preferencias del experto durante la búsqueda (J. P. Brans et al., 1984).

En el contexto de la sustentabilidad de sistemas socio-ecológicos, los tres componentes fundamentales de un problema multiobjetivo son:

- **Variables de decisión:** Corresponden a acciones de manejo o políticas de intervención que el planificador puede modificar, como la distribución del uso del suelo, los niveles de extracción de recursos, la inversión en energías renovables o las cuotas de emisión permitidas.
- **Modelo:** Representa la estructura matemática que describe el comportamiento del sistema, integrando dimensiones ecológicas (ciclos biogeoquímicos, dinámica de poblaciones, resiliencia ecosistémica) y sociales (demografía, economía, gobernanza). Estos modelos

suelen ser no lineales y dinámicos, capturando interacciones y retroalimentaciones características de los sistemas socio-ecológicos.

- **Funciones objetivo (FOs):** Cuantifican el grado de cumplimiento de metas múltiples, como maximizar la biodiversidad, minimizar la huella de carbono, maximizar el bienestar económico o garantizar la equidad social. En este tipo de sistemas, las FOs se definen considerando tanto métricas biofísicas como indicadores socioeconómicos.

Para resolver problemas multiobjetivo existen diversas estrategias, una de ellas es el método por compromiso, también llamado método de distancia mínima al punto ideal, la cual busca la solución eficiente más cercana al ideal. Se asigna a cada objetivo un nivel deseado (meta o aspiración) y se minimizan las desviaciones respecto a esas metas. Se incorporan variables de desviación en el modelo para cuantificar cuánto se aleja cada objetivo de su meta, y se minimiza una función agregada de esas desviaciones. Por otro lado, la programación por compromisos plantea un punto ideal (o utópico) formado por los óptimos individuales de cada criterio y busca la solución cuya distancia a ese punto ideal sea mínima. En efecto, la solución de compromiso es la que queda más próxima al punto ideal (Zapata Ramos, 2008). En la práctica se suelen introducir pesos o normas que reflejan la importancia relativa de cada criterio, de modo que el problema multiobjetivo original se convierte en problemas de optimización simples escalados según esos pesos.

Capítulo 3. Metodología.

3.1. Modelo matemático.

El modelo matemático utilizado es una representación conceptual de un ecosistema humano con una red alimentaria ecológica simplificada. Se trata de una continuación de los trabajos de (Cabezas et al., 2006) y (Kotecha et al., 2013) el cual ha sido utilizado ampliamente en trabajos relacionados, pues su enfoque compartimental permite el desarrollo de proyectos que analizan la sustentabilidad a profundidad en conjunto con otros datos a los que dicho modelo permite tener acceso y la posibilidad de análisis profundos.

El modelo se presenta gráficamente en la Figura 11, el cual está compuesto por 14 compartimentos. Tres compartimentos corresponden a las piscinas de fuentes de recursos, representados con rectángulos: *RP* es una representación de los recursos bióticos y abióticos en el sistema, como lo son el agua, el aire, etc.; *ERP* se trata de los recursos energéticos con los que cuenta el sistema, como son combustibles fósiles, gas, etc.; por último *IRP*, el cual representa a los recursos que quedan al final de las cadenas tróficas y ya no pueden ser aprovechados directamente por ningún compartimento, el equivalente a los desechos en un sistema real, y se reincorporan lentamente a la piscina *RP*. En el primer nivel trófico se encuentran las plantas: *P1* es un compartimento que representa al sector agrícola, donde su mera existencia es debido a la actividad del ser humano y su aumento o reducción es altamente dependiente de los seres humanos que trabajan dicho sector; el compartimento *P2* corresponde a las plantas silvestres del sistema que interactúan con los seres humanos, como podría ser la explotación forestal; y por último el compartimento *P3*, correspondiente a las plantas silvestres que no tienen ninguna interacción con el ser humano. En el segundo nivel trófico se encuentran los compartimentos correspondientes a los animales herbívoros: *H1*, al igual que *P1*, tiene absoluta dependencia de la actividad humana pues corresponde a la ganadería, animales herbívoros que su cría, manejo y explotación es con el único fin de la obtención de recursos; seguido esta *H2* que corresponde a los animales herbívoros salvajes con los que interactuamos los seres humanos como podrían ser las aves que se alimentan de los sembradíos; el compartimento *H3* representa a los animales herbívoros salvajes sin ninguna interacción con los seres humanos, como podría ser la vida salvaje herbívora en un bosque o el mar. Los animales carnívoros corresponden al siguiente nivel trófico: *C1* representa a los animales carnívoros del sistema que suelen interactuar con seres humanos, pues se alimentan de animales herbívoros de ganadería y salvajes, como serían coyotes o lobos; y *C2* representa a los animales carnívoros que no interactúan con seres humanos de forma habitual, como sería un oso o un león en sus hábitats naturales. Estos niveles tróficos están agrupados en domesticados (agricultura y ganadería) y el resto como salvajes. Para representar los flujos debidos a que los animales herbívoros salvajes consumen los sembradíos humanos y que los animales carnívoros salvajes que se alimentan de los animales producidos en la ganadería se denotan como “Devoran”. Asimismo, es común alimentar a los animales de ganadería con plantas salvajes, esto se denota con “Pastan”.

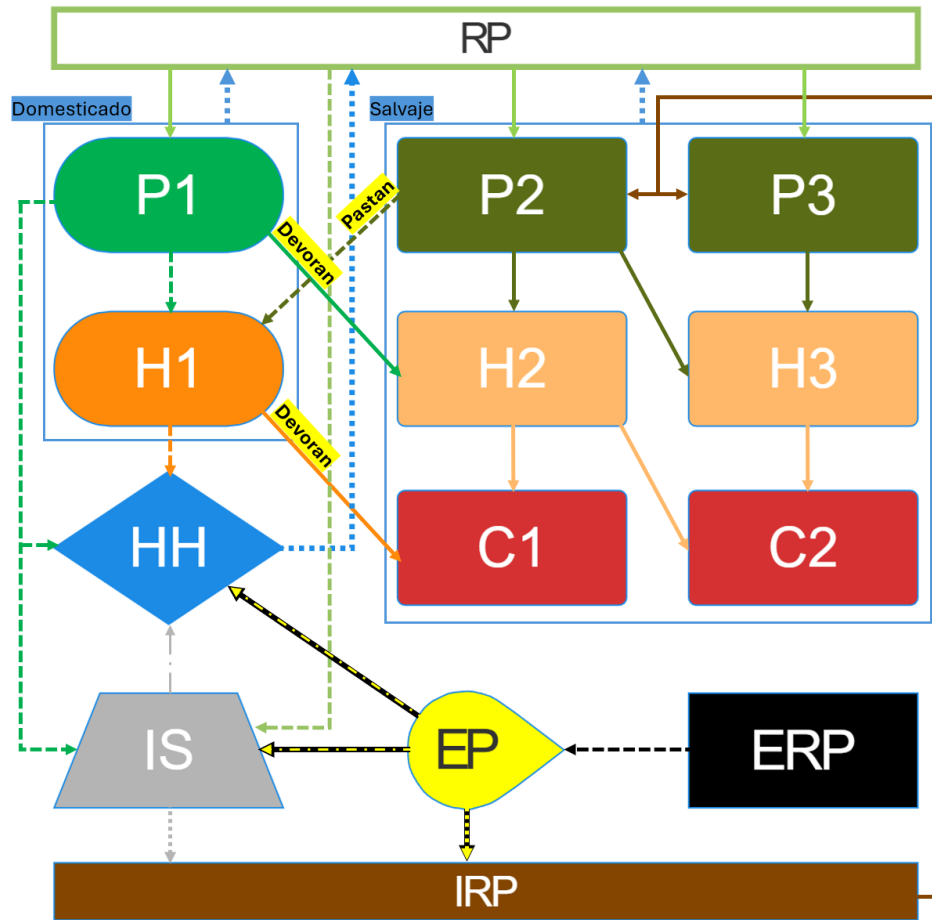


Figura 11. Modelo compartmental.

En el cuarto nivel trófico se encuentran los seres humanos, representados por el compartimento *HH*. El compartimento *IS* correspondiente a la industria, específicamente a la manufactura y de servicios en el sistema; mientras que el compartimento *EP* representa a la producción energética, que utiliza los recursos de *ERP*. Se puede apreciar que todos los compartimentos están interconectados mediante líneas las cuales son flujos, cada tipo de línea corresponde a un tipo de flujo: las líneas enteras representan consumos másicos naturales, por ejemplo, el compartimento *P1*, *P2* y *P3* se alimentan de los recursos que dispone y entrega *RP* naturalmente; las líneas punteadas hacen referencia a la mortalidad de los compartimentos y su reintegración al sistema; las líneas conformadas por guiones representan las interacciones que existen gracias a la actividad humana y que de forma natural no existirían, como por ejemplo la ganadería alimentándose de plantas silvestres y de la agricultura específica para alimento; finalmente, las líneas con punto y guion representan la interacción de servicios necesarios para el funcionamiento de compartimentos, como sería la energía producida de *EP* para el adecuado funcionamiento de *IS* y *HH*.

Adicionalmente, el modelo cuenta con variables que permiten caracterizarlo con diversas complejidades que intervienen en un ecosistema real en el que los humanos interactuamos. Una de las principales es el salario *per cápita*, el cual se determina partiendo de que en el sistema existe una brecha oferta-demanda en lo producido por *IS* y una cantidad de mano de obra disponible (Ecuación 3.1).

$$W = a_W - \frac{c_W \left((IS^{def} - IS) - IS^{tg} \right)}{(\lambda + \theta)} - d_W N_{HH} \quad (3.1)$$

Donde IS^{def} representa el déficit de inventario del compartimento IS ; mientras que IS^{tg} su objetivo. N_{HH} representa el tamaño de población; a_W , c_W y d_W representan parámetros constantes; λ y θ corresponden a la productividad de RP y PI para la obtención de IS .

El modelo cuenta con ecuaciones que simulan un sistema económico simplificado de oferta-demanda (Ecuaciones 3.2-3.9) donde la producción y precio de productos se determinan por los sectores económicos PI , HI , IS y EP , y la demanda depende del compartimento HH . Las producciones se denotan como PI^{prod} , HI^{prod} , IS^{prod} y EP^{prod} , mientras que los precios de sus productos por PI^p , HI^p , IS^p y EP^p . El sistema de ecuaciones está diseñado de tal forma que si la brecha de oferta-demanda crece, los precios y la producción disminuyen y los cambios que se presenten en los salarios se ven reflejados en los precios de cada producto e inversamente en sus producciones. Es importante mencionar que de la energía no existe stock, por lo que su precio depende de las reservas de recurso energético ERP restante en el sistema y su producción acorde a la energía demandada por el sistema, específicamente HH e IS . Las Ecuaciones 3.2 a la 3.7 representan la oferta-demanda del sector económico del modelo, también se podrá apreciar en las ecuaciones def y tg como subíndices de PI y HI , los cuales corresponden a sus déficits y objetivos de inventario respectivamente. Para el caso de IS , dem corresponde a la demanda total de industria y servicios. Las Ecuaciones 3.8 y 3.9 representan la demanda-producción energética, donde $EEHH$ es la demanda total de energía por parte del compartimento HH y $EEIS$ la demanda del compartimento IS ; a_i , b_i y c_i representan parámetros constantes.

$$PI^p = a_{P1price} + b_{P1price}W - c_{P1price}((P1^{def} + P1) - P1^{tg}) \quad (3.2)$$

$$P1^{prod} = a_{P1prod} - b_{P1prod}W - c_{P1prod}((P1^{def} + P1) - P1^{tg}) \quad (3.3)$$

$$HI^p = a_{H1price} + b_{H1price}W - c_{H1price}((H1^{def} + H1) - H1^{tg}) \quad (3.4)$$

$$H1^{prod} = a_{H1prod} - b_{H1prod}W - c_{H1prod}((H1^{def} + H1) - H1^{tg}) \quad (3.5)$$

$$IS^p = a_{ISprice} + b_{ISprice}W - c_{ISprice} \left(\frac{(IS^{def} - IS) - IS^{tg}}{(\lambda + \theta)} \right) + d_{ISprice} d^{fee} (\lambda + \theta) IS^{dem} \quad (3.6)$$

$$IS^{prod} = a_{ISprod} - b_{ISprod}W - c_{ISprod} \left(\frac{(IS^{def} - IS) - IS^{tg}}{(\lambda + \theta)} \right) + d_{ISprod} IS^{dem} \quad (3.7)$$

$$EP^p = a_{EEprice} + b_{EEprice}W + \frac{c_{EEprice}}{ERP} \quad (3.8)$$

$$EP^{prod} = EPHH + EPIS \quad (3.9)$$

Con los precios y producción definidos, es necesario calcular las demandas que los sectores productivos tienen. Las demandas de cada compartimento del sector económico del modelo están interrelacionadas con el compartimento *HH* (humanos) y están a expensas de la competencia, es decir, que su comportamiento se ve influenciado dependiendo de los precios y demanda de los demás sectores. Estos flujos se determinan con las Ecuaciones 3.10 a la 3.13:

$$P1^{dem} = d_{P1} - k_{P1}P1^p + \frac{1}{3}l_{P1}H1^p + \frac{1}{3}n_{P1}IS^p + \frac{1}{3}o_{P1}EP^p + z_{P1}(P1^{dem} + H1^{dem} + IS^{dem} + EP^{dem}) \quad (3.10)$$

$$H1^{dem} = d_{H1} + \frac{1}{3}k_{H1}P1^p - l_{H1}H1^p + \frac{1}{3}n_{H1}IS^p + \frac{1}{3}o_{H1}EP^p + z_{H1}(P1^{dem} + H1^{dem} + IS^{dem} + EP^{dem}) \quad (3.11)$$

$$IS^{dem} = d_{IS} + \frac{1}{3}k_{IS}P1^p - \frac{1}{3}l_{IS}H1^p + n_{IS}IS^p + \frac{1}{3}o_{IS}EP^p + z_{IS}(P1^{dem} + H1^{dem} + IS^{dem} + EP^{dem}) \quad (3.12)$$

$$EP^{dem} = d_{EE} + \frac{1}{3}k_{EE}P1^p - \frac{1}{3}l_{EE}H1^p + \frac{1}{3}n_{EE}IS^p + o_{EE}EP^p + z_{EE}(P1^{dem} + H1^{dem} + IS^{dem} + EP^{dem}) \quad (3.13)$$

Donde d_i , k_i , l_i , n_i , o_i y z_i son parámetros constantes del modelo. Para determinar las demandas totales de productos, es necesario multiplicar las demandas per cápita con el número de humanos N_{HH} , de esta forma, se obtiene la cantidad necesaria de cada producto en base a la cantidad de humanos, como se observa en las Ecuaciones 3.14 a la 3.17.

$$P1HH = P1^{dem}N_{HH} \quad (3.14)$$

$$H1HH = H1^{dem}N_{HH} \quad (3.15)$$

$$ISHH = IS^{dem}N_{HH} \quad (3.16)$$

$$EPHH = EP^{dem}N_{HH} \quad (3.17)$$

Al igual que en un sistema real, el sector ganadero requiere en parte del sector agrario, tal dependencia se representa con la Ecuación 3.18, donde dicha demanda está en función de los salarios, el precio de *PI* y la brecha que exista entre su oferta y demanda. Los parámetros d_{PIH1} , e_{PIH1} , f_{PIH1} y g_{PIH1} son parámetros constantes.

$$P1H1 = d_{P1H1} - e_{P1H1}W - f_{P1H1}P1^p - g_{H1P1}(H1 - H1^{tg}) \quad (3.18)$$

El compartimento *IS* correspondiente al sector industrial necesita consumir de *PI* y *RP*, así como la energía que *EP* proporciona para su funcionamiento. Se determina la demanda que *IS* tiene con cada

uno de ellos mediante el producto de su producción por su productividad, que son las unidades requeridas de PI (representado con θ), RP (representado con λ) o de EP (γ_{EPIS}) para producir una unidad de IS (Ecuaciones 3.19-3.21).

$$P1IS = IS^{prod}\theta \quad (3.19)$$

$$RPIS = IS^{prod}\lambda \quad (3.20)$$

$$EPIS = IS^{prod}\gamma_{EPIS} \quad (3.21)$$

Después, es necesario determinar el resto de los flujos en que los humanos tienen influencia, como son las plantas propiedad del gobierno ($H1P2$) se encuentra regulado por este último, y es igual a un factor constante k , como se presenta en la Ecuación 3.22.

$$H1P2 = k \quad (3.22)$$

También se calcula el consumo de PI y HI por parte de las especies salvajes que los depredan como son $H2$ y $C1$ respectivamente, siempre limitados por su crecimiento y muertes naturales de sus presas, también por su habilidad de producción, o, dicho de otra forma, su habilidad para convertir la masa consumida en más de su especie como se muestra en las Ecuaciones 3.23 y 3.24.

$$P1H2 = RPP1 - P1^{prod} - P1RP \quad (3.23)$$

$$H1C1 = P1H1 + P2H1 - H1^{prod} - H1RP \quad (3.24)$$

$RPP1$ es el crecimiento de PI gracias al consumo de RP ; $PIH1$ y $P2H1$ son el crecimiento de HI debido al consumo de PI y $P2$; $PIRP$ y $H1RP$ son los flujos másicos hacia RP debido a la muerte de dichos compartimentos.

La energía producida por el sistema genera residuos másicos que se desechan, y se suman a la fuente de recursos inaccesibles IRP , de igual manera lo hacen los residuos generados por el consumo de IS por parte de los humanos en el sistema. La forma de determinan dicha generación de residuos se define con el uso de las ecuaciones 3.25 y 3.26, las cuales multiplican sus respectivas productividades, unidad de masa por unidad de producto.

$$ISIRP = ISHH(\lambda + \theta) \quad (3.25)$$

$$ERPIRP = \gamma_{EPIS}(EPIS + EPHH) \quad (3.26)$$

Los desechos resultados de la actividad humana se reincorporan al sistema poco a poco a través de los productores primarios $P2$ y $P3$, con las ecuaciones 3.27 y 3.28.

$$IRPP2 = \frac{r_{P2}(IRP - IRPRP + RPIRP)}{r_{P2} + r_{P3}} \quad (3.27)$$

$$IRPP3 = \frac{r_{P3}(IRP - IRPRP + RPIRP)}{r_{P2} + r_{P3}} \quad (3.28)$$

Donde r_{P2} y r_{P3} son factores de reciclo, mientras que $IRPRP$ y $RPIRP$ son flujos constantes entre las fuentes de recursos principales e inaccesibles.

El modelo está basado en ED tipo *Lotka-Volterra*, por lo que cada uno de los flujos entre compartimentos es un término de una ecuación presa-predador multivariable. Los nombres que cada flujo lleva son resultado del compartimento de origen y del compartimento de destino. Los flujos que no han sido determinados por actividad humana o reciclo son de dos tipos: flujos que representan crecimiento por consumo, y flujos debido a la mortandad de compartimentos, el primer tipo de flujo mencionado se encuentra en las ecuaciones 3.29 a la 3.37, mientras que los flujos de mortandad de la ecuación 3.38 a la 3.46.

$$RPP1 = g_{RPP1}RP * P1 \quad (3.29)$$

$$RPP2 = g_{RPP2}RP * P2 \quad (3.30)$$

$$RPP3 = g_{RPP3}RP * P3 \quad (3.31)$$

$$P2H2 = g_{P2H2}P2 * H2 \quad (3.32)$$

$$P2H3 = g_{P2H3}P2 * H3 \quad (3.33)$$

$$P3H3 = g_{P3H3}P3 * H3 \quad (3.34)$$

$$H2C1 = g_{H2C1}H2 * C1 \quad (3.35)$$

$$H2C1 = g_{H2C1}H2 * C1 \quad (3.36)$$

$$H3C2 = g_{H3C2}H3 * C2 \quad (3.37)$$

$$P1RP = m_{P1}P1 \quad (3.38)$$

$$P2RP = m_{P2}P2 \quad (3.39)$$

$$P3RP = m_{P3}P3 \quad (3.40)$$

$$H1RP = m_{H1}H1 \quad (3.41)$$

$$H2RP = m_{H2}H2 \quad (3.42)$$

$$H3RP = m_{H3}H3 \quad (3.43)$$

$$C1RP = m_{C1}C1 \quad (3.44)$$

$$C2RP = m_{C2}C2 \quad (3.45)$$

$$HHRP = m_{HH}HH \quad (3.46)$$

El modelo cuenta con una ecuación demográfica, que relaciona la cantidad de masa del comportamiento humano HH , con el tamaño de la población N_{HH} , conocida como masa *per cápita*; se presenta como la Ecuación 3.47 a continuación:

$$pcm = \frac{HH}{N_{HH}} \quad (3.47)$$

Por su parte, la Ecuación 3.48 determina los nacimientos *per cápita*, que está en función de la tasa de natalidad variable a_{pcb} , el parámetro constante b_{pcb} , de los salarios *per cápita* W y de un precio de productos promedio wp , el cual se calcula con la ecuación 3.49 ponderando la cantidad total de cada producto consumido por HH con su respectivo precio de venta.

$$pcb = a_{pcb} - b_{pcb}\sqrt{W/wp} \quad (3.48)$$

$$wp = \frac{P1^p * P1HH + H1^p * H1HH + IS^p * ISHH + EP^p * EPHH}{(P1HH + H1HH + ISIRP + EPHH)} \quad (3.49)$$

Las Ecuaciones 3.52 a 3.69 son ecuaciones diferenciales obtenidas de balances de materia, donde las velocidades de cambio están dadas por la diferencia entre todos los flujos que salen y entran en cada compartimento.

$$\frac{dP1}{dt} = RPP1 - (P1RP + P1H1 + P1H2 + P1HH + P1IS) \quad (3.52)$$

$$\frac{dP2}{dt} = IRPP2 + RPP2 - (P2RP + P2H2 + P2H3 + P2H1) \quad (3.53)$$

$$\frac{dP3}{dt} = IRPP3 + RPP2 - (P3RP + P3H3) \quad (3.54)$$

$$\frac{dH1}{dt} = P1H1 + P2H1 - (H1RP + H1C1 + H1HH) \quad (3.55)$$

$$\frac{dH2}{dt} = P1H2 + P2H2 - (H2RP + H2C1 + H2C2) \quad (3.56)$$

$$\frac{dH3}{dt} = P2H3 + P3H3 - (H3RP + H3C2) \quad (3.57)$$

$$\frac{dC1}{dt} = H1C1 + H2C1 - C1RP \quad (3.58)$$

$$\frac{dC2}{dt} = H2C2 + H3C2 - C2RP \quad (3.59)$$

$$\frac{dHH}{dt} = P1HH + H1HH - HHRP \quad (3.60)$$

$$\frac{dIS}{dt} = P1IS + RPIS - ISIRP \quad (3.61)$$

$$\frac{dERP}{dt} = -ERP\text{IRP} \quad (3.62)$$

$$\frac{dRP}{dt} = P1RP + P2RP + P3RP + H1RP + H2RP + H3RP + C1RP + C2RP + HHRP + IRPRP - (RPP1 + RPP2 + RPP3 + RPIS + RPIRP) \quad (3.63)$$

$$\frac{dIRP}{dt} = ISIRP + ERP\text{IRP} + RPIRP - (IRPP2 + IRPP3 + IRPRP) \quad (3.64)$$

$$\frac{dP1H1^{def}}{dt} = P1H1 - P1H1^{dem} \quad (3.65)$$

$$\frac{dP1IS^{def}}{dt} = P1IS - P1IS^{dem} \quad (3.66)$$

$$\frac{dP1HH^{def}}{dt} = P1HH - P1HH^{dem}y_{10} \quad (3.67)$$

$$\frac{dH1HH^{def}}{dt} = H1HH - H1HH^{dem}y_{10} \quad (3.68)$$

$$\frac{dISHH^{def}}{dt} = ISIRP - ISHH^{dem}y_{10} \quad (3.69)$$

El tamaño de la población N_{HH} no es un compartimento ya que no posee masa a pesar de estar íntimamente relacionado con HH . Sin embargo, su velocidad de cambio puede estimarse de manera análoga mediante la Ecuación 3.70, sumando los humanos nacidos y restándole las defunciones.

$$\frac{dN_{HH}}{dt} = [pcbN_{HH}] - [m_{HH}N_{HH}] - [\varphi(pcm - pcm_{id})N_{HH}] \quad (3.70)$$

Al tratarse de personas, se redondea siempre a valores enteros, al entero superior inmediato. pcm_{id} es un parámetro de masa per cápita ideal; mientras que φ es un factor de ponderación que relaciona muertes humanas con la diferencia entre el peso per cápita real de un humano y el ideal.

Al tener flujos definidos por el sector humano el modelo debe incluir una serie de restricciones lógicas. Si PI , $H1$, $H2$ o $C1$ son iguales a cero, sus variables asociadas debidas a la actividad económica son también cero, como se muestra en las ecuaciones 3.71 a 3.74

$$P1 = 0 \rightarrow P1^p = 0 \quad (3.71)$$

$$P1^{prod} = 0$$

$$P1H2 = 0$$

$$H1 = 0 \rightarrow H1^p = 0 \quad (3.72)$$

$$H1^{prod} = 0$$

$$P1H1 = 0$$

$$P2H1 = 0$$

$$H1C1 = 0$$

$$H2 = 0 \rightarrow P1H2 = 0 \quad (3.73)$$

$$C1 = 0 \rightarrow H1C1 = 0 \quad (3.74)$$

La Ecuación 3.75 se encarga de que, cuando la fuente de recursos inaccesibles *IRP* es cero, los flujos de reciclaje de *IRP* hacia *P2* y *P3* se vuelven cero.

$$IRP = 0 \rightarrow IRPP2 = 0 \quad (3.75)$$

$$IRPP3 = 0$$

Si el compartimento correspondiente a los humanos *HH* se vuelve cero, los flujos debido a la actividad humana se vuelven cero, además de que el acceso de *H2* a *P1* y de *C1* a *H1* se determinan en términos de una ecuación Lotka-Volterra, como se muestra en la ecuación 3.76.

$$HH = 0 \cup N_{HH} < \min_{N_{HH}} \rightarrow IS^p = 0 \quad (3.76)$$

$$IS^{prod} = 0$$

$$EP^p = 0$$

$$EP^{prod} = 0$$

$$P1H1 = 0$$

$$P2H1 = 0$$

$$P1HH = 0$$

$$H1HH = 0$$

$$ISHH = 0$$

$$EPHH = 0$$

$$P1H2 = g_{P1H1} P1 * H1$$

$$H1C1 = g_{H1C1} H1 * C1$$

Las Ecuaciones 3.77 y 3.78 garantizan la ausencia de compartimentos negativos, evitando su consumo excesivo cuando se encuentran por debajo del umbral mínimo de reproducción, denotado como *belowrep*. Si el compartimento y_i cae por debajo de este límite, pueden presentarse dos escenarios: En el primero, el flujo asociado a la mortalidad del compartimento supera la suma de los flujos de entrada f_{inj} correspondientes a cada j -ésimo flujo, en cuyo caso todos los flujos de salida f_{outj} se anulan y el flujo de mortandad se ajusta a dicha sumatoria; en el segundo escenario, si el flujo de mortandad es menor, cada uno de los flujos de salida f_{outj} se pondera de manera que la acumulación del compartimento y_i sea nula.

$$y_i < belowrep \cap m_i y_i > \sum_j f_{inj_i} \quad \forall i \rightarrow f_{out_{ij}} = 0 \quad \forall j \quad (3.77)$$

$$m_i y_i = \sum_j f_{inj_i}$$

$$y_i < belowrep \cap m_i y_i < \sum_j f_{inj_i} \quad \forall i \rightarrow f_{salida_{ij}} = \frac{f_{out_{ij}} m_{disp_j}}{dmem_j} \quad \forall j \quad (3.78)$$

$$m_{disp_i} = \sum_j f_{inj_i} - m_i y_i$$

$$m_{dem_i} = \sum_j f_{out_{ji}}$$

3.2. Selección de variables de decisión.

La selección de variables de decisión debe seguir una serie de criterios que garanticen tanto su relevancia en el sistema modelado como su viabilidad de intervención en el mundo real mediante políticas públicas. A continuación, se describen los pasos recomendados para realizar dicha selección:

- Interpretación en la realidad: Priorizar variables que tengan una representación en la realidad, muy clara y con elementos fácilmente comparables al mundo real, como por ejemplo el manejo de residuos, la mortalidad de especies silvestres, entre otros. Esto facilita su comprensión y su integración en procesos de toma de decisiones.
- Capacidad de manipulación: Seleccionar variables que puedan ser modificadas mediante políticas públicas o estrategias de gestión. Esto permite explorar escenarios realistas y aumentar así la aplicabilidad de los resultados del modelo a la realidad.
- Aceptación social: Favorecer variables cuya modificación pueda realizarse de forma gradual y con poca agresividad. Esto mejora la probabilidad de aceptación por parte de la sociedad y contribuye a la eficacia y resultado de las medidas a largo plazo.
- Impacto en el sistema: Evaluar el efecto potencial de cada variable sobre el comportamiento del modelo utilizando técnicas como el análisis de sensibilidad. Solo aquellas que influyen significativamente a una dimensión o más del sistema deben ser consideradas.
- Factibilidad: Deben ser viables su aplicación en la práctica, tanto económica y administrativamente.
- Gestión del número de variables: Limitar el conjunto final de variables seleccionadas, ya que un número elevado puede generar incrementar la complejidad y la incertidumbre en los resultados del modelo, dificultando su análisis e interpretación.

3.2.1. Análisis de sensibilidad.

Este tipo de análisis resulta particularmente útil para entender cómo las modificaciones en los parámetros iniciales influyen en los resultados del modelo. Concretamente, se estudia la influencia que tiene cada variable preseleccionada al analizar gráficamente el efecto que se tiene sobre el sistema al alterar cada una individualmente en un $\pm 10\%$, centrándose especialmente en cómo estas variaciones afectaban a factores clave de la dinámica del sistema como la temperatura del sistema, la economía y la tasa de natalidad o masa de humanos en el sistema. Se seleccionan aquellas que tengan una influencia significativa en la dinámica del sistema.

3.3. Restricciones.

Si bien el modelo ya está definido, este debe adecuarse para poder integrarlo a un esquema de optimización. En este caso, se deben incluir restricciones que acoten al sistema dentro de un rango de permita que la solución que se encuentre tenga un significado real congruente, es decir, que los perfiles óptimos de las variables de decisión se puedan traducir a políticas públicas que sean aplicables en la realidad. Esto implica que se debe ajustar el modelo matemático para representar de forma realista la toma de decisiones en un ecosistema humano. Es decir, si se aplicaran políticas públicas que modificaran los parámetros definidos en puntos anteriores (como salarios base), sus efectos tardarían años en hacer efecto al sistema, además de que tendrían que ser cambios de una magnitud pequeña para que sean de fácil implementación. Lo anterior conlleva que se deban considerar dos aspectos primordiales: la temporalidad y la magnitud.

3.3.1. Periodos de tiempo.

Se incorporan al modelo condiciones temporales que permiten representar múltiples periodos de análisis. En particular, se consideran cuatro periodos de 25 años cada uno, lo que da como resultado un horizonte de simulación total de 100 años. Esta estructura temporal permite actualizar o modificar el valor de cada variable de decisión al inicio de cada periodo, es decir, cada 25 años. De este modo, se facilita la evaluación de estrategias dinámicas a lo largo del tiempo, adaptándose a posibles cambios en las condiciones del sistema o en las políticas públicas aplicables.

Para realizar dicha incorporación, se modifica el conjunto de ecuaciones que contengan a las variables de decisión seleccionadas, se agrega una condicional de tiempo. Por ejemplo, la ecuación 3.1 cambia a la ecuación 3.79.

$$W_i = a_{W_i} - \frac{c_W \left((IS^{def} - IS) - IS^{tg} \right)}{(\lambda_i + \theta_i)} - d_W N_{HH} \quad (3.79)$$

$$i = \{1, 2, 3, 4\}$$

Donde i indica el periodo de tiempo actual dentro del modelo, alterando así el comportamiento del sistema en base al año simulado (el periodo 1 sería del año 1 al 25 en simulación, el 2 del 26 al 50, y así sucesivamente).

En la Figura 12 se muestra cómo funciona dicha restricción, donde la variable de decisión tiene un valor (a) los primeros 24 años de simulación, que es el valor óptimo de acuerdo con las condiciones de la simulación; para el año 25, el valor óptimo de la variable de decisión está condicionado por el

estado en que se encuentra el sistema, debido a ello, toma el valor de (b) y pasado 25 años de simulación toma otro valor, y así sucesivamente.

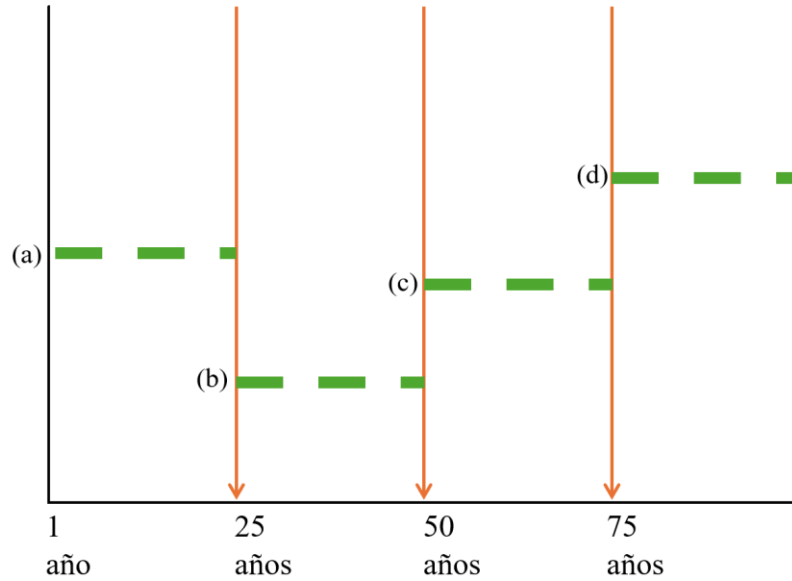


Figura 12. Restricción de periodos de tiempo.

3.3.2. Restricción de rango.

También se modifican las ecuaciones del modelo para que las variables solo puedan adquirir magnitudes dentro de un rango de $\pm 10\%$ del valor base, para que los valores que tomen las variables de decisión no sean radicalmente distintos a su previa condición. Esto hace que el comportamiento del ecosistema tenga una perspectiva más similar a la realidad, donde las políticas públicas además de tomar tiempo también implican hacer cambios pequeños para alcanzar grandes metas.

Esto se logra mediante el uso de restricciones de desigualdad, que condiciona a las variables de decisión en cuanto al rango en que pueden variar. Por ejemplo, una variable de decisión X , la cual su valor óptimo fluctúa en los cuatro periodos de tiempo, es decir, $X_{\text{óptimo}}(1: 4, y)$. Para restringir en el rango definido a la variable, se usan las ecuaciones 3.80 y 3.81:

$$1.1 X(1,1) \geq X(2,1) \quad (3.80)$$

$$0.9 X(1,1) \leq X(2,1) \quad (3.81)$$

La ecuación 3.80 indica que la variable en el segundo periodo de tiempo no puede ser mayor a 1.1 veces (+10%) respecto al valor de la variable en el primer periodo de tiempo, inversamente, la ecuación 3.81 representa que no puede ser menor en el segundo periodo a un 0.9 veces la variable anterior (-10%). Estas restricciones son sucesivas en cada periodo de tiempo, como se muestra en las ecuaciones 3.82 y 3.83:

$$1.1 X(1,1) \geq X(2,1) \Rightarrow 1.1 X(2,1) \geq X(3,1) \Rightarrow 1.1 X(3,1) \geq X(4,1) \dots \quad (3.82)$$

$$0.9 X(1,1) \leq X(2,1) \Rightarrow 0.9 X(2,1) \leq X(3,1) \Rightarrow 0.9 X(3,1) \leq X(4,1) \dots \quad (3.83)$$

Al utilizar una herramienta computacional para resolver la simulación, como sería el uso de MATLAB, es necesario el traducir el sistema de ecuaciones a matrices de restricción que el programa pueda interpretar. Se convierte entonces las restricciones de la siguiente manera, primero, haciendo la desigualdad respecto a cero, como se muestra en la ecuación 3.84 y 3.85, y posteriormente, elaborar las matrices como en la ecuación 3.86 se muestra:

$$R1: -1.1(X(1,1)) + X(2,1) \leq 0 \dots \quad (3.84)$$

$$R2: 0.9(X(1,1)) - X(2,1) \leq 0 \dots \quad (3.85)$$

$$A \begin{bmatrix} -1.1 & 1 & 0 & 0 \\ 0.9 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad b[0 \quad 0] \quad (3.86)$$

Se muestra el sistema de ecuaciones y la matriz que relacionan el periodo de tiempo 1 con el 2. Para un sistema con 6 variables de decisión y 4 periodos de tiempo, se requiere una matriz A de 24x36, y una matriz b de 1x36, aunque esta última solo con ceros.

En la Figura 13, se muestra cómo el restringir con un $\pm 10\%$ el cambio que el parámetro tiene en cada periodo de tiempo hace notablemente más sutiles los cambios de las variables de decisión. Al inicio la variable tiene un valor (a), para el valor de (b) el valor óptimo de acuerdo con las condiciones del sistema toma el valor de (a)-10%, para el valor de (c), el valor óptimo es el límite superior (b)+10% y así se limita la magnitud de acuerdo con el valor que tomo en el periodo anterior.

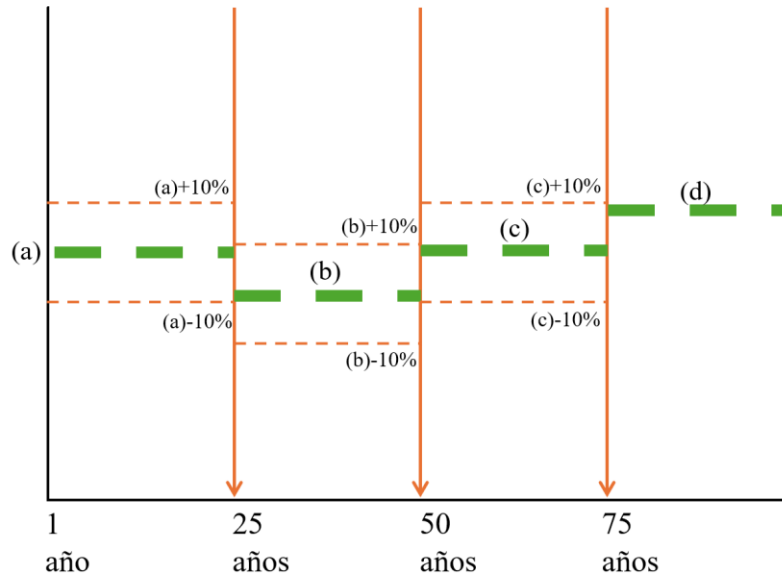


Figura 13. Restricción de rango.

3.4. Optimización usando un índice global.

La información de Fisher (FI) se ha utilizado exitosamente como indicador global de sustentabilidad en trabajos similares al presente. Su importancia radica en que puede integrar las diferentes dimensiones de la sustentabilidad manteniendo un enfoque mono objetivo, pudiendo analizar a detalle variables que se puedan controlar en el mundo real y que tengan gran repercusión en el resto de los elementos que componen el ecosistema.

La FI promediada temporalmente para un sistema de n especies está dada por la Ecuación 3.87:

$$FI_t = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \left(\frac{a(t)^2}{v(t)^4} \right) dt \quad (3.87)$$

Donde T_c es el ciclo del Sistema, $v(t)$ y $a(t)$ son los términos de aceleración y velocidad (Ecuaciones 3.88 y 3.89).

$$v(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{dY_i}{dt} \right)^2} \quad (3.88)$$

$$a(t) = \frac{1}{v(t)} \left[\sum_{i=1}^n \frac{dY_i}{dt} \left(\frac{d^2 Y_i}{dt^2} \right) \right] \quad (3.89)$$

En este trabajo se utiliza una Función Objetivo tipo Bolza (Bryson et al., 1979), la cual minimiza de la desviación estándar con respecto a un caso base, como se presenta en la Ecuación 3.87. Esta FO consta de dos partes: la primera evalúa la trayectoria del sistema, mientras que la segunda evalúa el valor en el punto final de la simulación. El factor 100 proviene de los pasos de integración y permite que ambas partes de la función tengan el mismo peso en la optimización.

$$Z_{FI} = \sum_{t=1}^T (FI(t) - \overline{FI})^2 + 100 \times \sum_{t=1}^T (FI(T) - \overline{FI})^2 \quad (3.90)$$

Es esencialmente un índice de variabilidad y penalización del estado final de la serie temporal de FI. La primera parte de la ecuación mide la suma de los cuadrados de las desviaciones de cada valor de FI respecto a su media $\overline{FI}$. Equivale (salvo por un factor de escala) a la varianza total de la serie. Cuanto mayor sea, más inestable o fluctuante ha sido el sistema a lo largo del tiempo. La segunda parte de la ecuación vuelve a ponderar fuertemente (factor 100) el final de la simulación respecto a la media histórica. De esta manera, si el sistema acaba en un estado de FI muy distinto al comportamiento “promedio”, el índice Z se disparará, destacando posibles puntos de cambio de régimen o desviaciones críticas al final de la simulación.

El resultado de Z tiene varias interpretaciones prácticas:

Un Z pequeño indica que la FI ha permanecido cerca de su valor medio, y que además al final la dinámica no se ha alejado bruscamente: Rasgo típico de estabilidad del régimen.

Un Z grande señala, o bien fuertes oscilaciones (primera parte de la ecuación) o bien un punto de inflexión al final (segunda parte de la ecuación) o ambas cosas.

El ajuste del peso puede controlar cuanta importancia tiene el comportamiento final frente a la inestabilidad general.

3.5. Optimización multiobjetivo.

A pesar de demostrar su gran valía como Función Objetivo Sustentable, la FI aún presente algunas limitantes que deben de tenerse en cuenta. En particular, su formulación matemática puede resultar compleja, lo que dificulta su aplicación y cuantificación en ecosistemas humanos reales. Adicionalmente, Rodriguez-Gonzalez et al. (2020) demostraron que distintos ecosistemas humanos responden de manera diversa ante diferentes funciones objetivo. Por lo tanto, cada ecosistema requiere una función objetivo específica, adaptada a su contexto socioambiental y a sus características particulares.

El modelo de ecosistema tiene representadas dentro de sus variables las dimensiones económicas, ambientales y sociales, las cuales suelen estar en contraposición unas con otras. Al tener un enfoque multiobjetivo, se puede considerar que se tiene un enfoque sustentable al buscar el beneficio del sistema en general. Para realizar la optimización multiobjetivo se debe definir para cada dimensión una función objetivo. Para hacerlo adecuadamente, es necesario cumplir con las siguientes características: deben representar adecuadamente su dimensión, tener una influencia significativa en el sistema global y tener equivalente en la realidad para poder ejecutarse en un ecosistema existente.

En ese sentido, el principal problema ambiental del sistema es el calentamiento global, reflejado en un creciente valor de la temperatura atmosférica. Por lo anterior, en la Ecuación 3.91 se presenta la función objetivo definida para la dimensión ambiental, en donde $Temp(tf)$ representa el valor de la temperatura en el tiempo final. Esto implica que desde la dimensión ambiental se busca disminuir lo más posible el valor final de la temperatura atmosférica. El considerar únicamente el valor en el punto final le otorga una mayor flexibilidad al sistema para mejorar el valor objetivo.

$$\min Z_{amb} = Temp(tf) \quad (3.91)$$

En la dimensión correspondiente a la parte económica, se consideran las fluctuaciones económicas del sistema, debido a que subidas o bajadas en los sectores productivos son perjudiciales para todo el sistema. La Ecuación 3.89 presenta la función objetivo definida para brindar estabilidad a la dimensión económica, donde $std(P1)$ representa la desviación estándar del sector productivo agrícola, $std(H1)$ representa la desviación estándar del sector productivo ganadero, $std(ISmass)$ representa la desviación estándar del sector productivo que compone al sector industrial y $std(EEIRP)$ representa la desviación estándar del sector productivo energético. Al sumarse estos 4 sectores económicamente importantes se obtiene un valor que representa la variabilidad económica global. Tener valores grandes de Z_{eco} implica mayor variabilidad, inconsistencia e incertidumbre; mientras que valores pequeños de Z_{eco} representa que los sectores económicos son consistentes y relativamente estables.

$$\min Z_{eco} = std(P1) + std(H1) + std(ISmass) + std(EEIRP) \quad (3.92)$$

La función objetivo definida para la dimensión social es la Ecuación 3.90, donde se maximiza la integral de la variable HH a lo largo del tiempo, correspondiente a la masa total de humanos. Considerando que el modelo contempla que, si los demás recursos son adecuados, prospera la cantidad de masa de humanos, esto se puede interpretar como la mejora en la calidad de vida y la tasa de nacimientos.

$$\min Z_{soc} = \int_{t=t_0}^{t_f} HH(t) dt \quad (3.93)$$

Es importante mencionar que cada función objetivo de forma independiente mejora únicamente la dimensión de interés, es decir, las demás dimensiones se ven perjudicadas. Sin embargo, dado que lo que se busca con la optimización multiobjetivo es encontrar el balance entre las diferentes funciones objetivo. Por lo anterior, se utiliza la estrategia de la “Distancia Mínima”. Utilizando geometría euclidiana, se busca el menor valor posible de distancia entre dos o más objetos, puntos o conjuntos. El objetivo de utilizarla es encontrar los puntos equidistantes que minimizan la distancia respecto a las referencias tomadas. La Ecuación 3.91 representa la función objetivo de la mínima distancia donde las tres dimensiones sustentables usan de referencia el valor ideal, es decir, el valor que se obtiene al optimizar de forma mono objetivo.

$$Z = \sqrt{(\min Z_{amb} - 29.5055)^2 + (\min Z_{eco} - 0.011)^2 + (\min Z_{soc} - (-38.9265))^2} \quad (3.94)$$

Capítulo 4. Resultados y discusión.

En el presente capítulo se muestran los resultados y el análisis de estos partiendo de las gráficas obtenidas y el comportamiento de las variables estudiadas, seguido de una discusión que contextualiza estos hallazgos con respecto a los objetivos planteados y la literatura existente.

4.1. Variables de decisión.

Las variables de decisión se eligieron en función de dos criterios principales: El primero, su interpretación directa en sistemas reales (ej. manejo de residuos, mortalidad de plantas silvestres) y segundo, su capacidad de ser modificadas mediante políticas públicas. Estas variables deben permitir intervenciones graduales pero significativas, ya que cambios menos intrusivos favorecen su aceptación social y viabilidad a largo plazo. De los cientos de variables del modelo, solo un subconjunto cumple con estos requisitos. Para maximizar la aplicabilidad de los resultados, se priorizaron aquellas con mayor impacto en al menos una dimensión del sistema (para dimensionar su influencia en el modelo, se realiza un análisis de sensibilidad) y teniendo en cuenta su factibilidad de implementación pública. Las variables seleccionadas fueron:

- Mortalidad de plantas silvestres accesibles a humanos ($mP2$), se puede llevar a la vida real a partir del manejo de recursos forestales.
- Salario base (aw), con leyes como la ley federal del trabajo donde temas tan importantes como el salario mínimo son regidos.
- Precios de las plantas alimenticias del sector agrícolas ($aPlp$), tiene su contraparte real en el precio de venta de la producción agrícola o subsidios que apoyen a su producción.
- Precios de los herbívoros del sector ganadero ($aHlp$), de la misma manera que el sector agrícola, adaptado al sector ganadero.
- Precios de servicios y manufacturas industriales ($aISp$), se maneja como impuestos o subsidios que fomenten o limiten sus actividades
- Factor de productividad de recursos bióticos/abióticos (λ), implica mejorar el rendimiento en cuanto a cómo se aprovechan los recursos naturales utilizados, implementando nuevas tecnologías, o apoyos.

4.2. Valores óptimos.

Una vez definidas las variables de decisión, el modelo se optimizó bajo diferentes enfoques: uno utilizando la FI como un índice sustentable global, dos; utilizando una función objetivo para cada dimensión de interés (ambiental, social y económico), y una multiobjetivo utilizando la mínima distancia. En los Anexos A.1 y A.2 se presentan los códigos de la optimización y del modelo, respectivamente.

En la Tabla 2, se muestra como la dimensión ambiental, económica y la social se comportan en los diferentes enfoques utilizados. Los mejores valores de cada dimensión se obtienen al optimizar la dimensión en cuestión. Por otro lado, en el modelo original se tienen los peores resultados para la

parte social y la ambiental, más no así para la parte económica, esto se puede deber a que la dinámica del modelo original está gobernada por los factores económicos. Los valores obtenidos al optimizar cada dimensión por separado se utilizan en el caso de la mínima distancia, la cual, como se menciona en el marco teórico, tiene por objetivo encontrar el punto de equidistante entre las variables involucradas, donde se puedan beneficiar al máximo y tengan las menores pérdidas posibles, pues las tres dimensiones tienen la misma importancia.

Tabla 2. Comportamiento de Z1, Z2 y Z3 con cada FO específica para cada dimensión.

	Z Ambiental	Z Económica	Z Social
Modelo Original.	35.3145	0.1416	-38.8214
min FI	30.88254352	0.0804	-38.8805
min Z_{amb}	29.5055	0.1509	-39.1475
Z_{eco}	31.4933	0.011	-38.9131
max Z_{soc}	32.2713	0.1184	-38.9265
min Z multi objetivo	29.6619	0.1143	-39.0778

Si bien, cuando la función objetivo está orientada para el beneficio de una dimensión en específico, se obtienen los mejores resultados para dicha dimensión, esto se logra a expensas de sacrificar indiscriminadamente los recursos que componen a las otras dimensiones, no así para la optimización multiobjetivo y FI, donde se puede observar que ambas cuentan con resultados balanceados, comparando con los diferentes resultados de la Tabla 2. Para la FI, su FO mantiene balanceado el sistema a lo largo de la simulación y cierre, al evitar fuertes oscilaciones o puntos de inflexión, existe equilibrio en las tres dimensiones con grandes resultados si se compara con las FO de cada dimensión específica, los resultados son bastante similares a los mejores, y superiores respecto al modelo original, existen trabajos como el de Doshi et al. (2015) donde se plantea un modelo integrado ecológico-económico con parámetros de política y se usa la Información de Fisher como métrica de sustentabilidad o König et al. (2019) donde la FI sirve de indicador de resiliencia y estabilidad de regímenes. La FI es de uso común para trabajos similares al presente por ser una herramienta de gran utilidad y adaptabilidad. Para la optimización multiobjetivo, como se mencionó en el capítulo anterior, con la mínima distancia aplicada a ecuaciones que den peso a cada dimensión, se observan valores aún mejores, con una temperatura global menor final de hasta 5° C respecto al modelo original y ligeramente menor que FI. Los resultados mostrados en la Tabla 2, pueden ser complejos de interpretar a simple vista, por ello, para comprender mejor las ventajas o desventajas que implica cada optimización en el sistema global, en la siguiente sección se profundiza el comportamiento de los compartimentos y otras variables importantes.

4.3. Soluciones óptimas.

A continuación, se presentan las soluciones óptimas encontradas, es decir, se muestra de forma gráfica el comportamiento a lo largo del tiempo de las diferentes variables de decisión, tanto para la función objetivo de FI como para la multiobjetivo. También se incluyen, para fines comparativos, los perfiles constantes (caso sin optimizar) donde se puede apreciar que no varían a lo largo del tiempo debido a que el sistema no tiene ningún tipo de intervención. En las siguientes figuras la línea semicontinua de color rojo representa el caso base, la línea punteada en azul al caso donde la función objetivo es la FI, y la línea sólida en verde es el caso de la optimización multiobjetivo.

En la Figura 14, se presentan los perfiles correspondientes a la mortalidad de las plantas silvestres a la que los humanos tienen acceso *mP2*. Se puede destacar como tienen comportamientos radicalmente distintos el modelo optimizado con información de Fisher y el modelo optimizado utilizando optimización multiobjetivo. Aunque ambos entregan buenos resultados en cuanto a la disminución de la temperatura y el resto de las dimensiones objetivo, el comportamiento de *mP2* con información de Fisher implica un ligero decremento de la mortandad a lo largo del tiempo, siendo su comportamiento más cercano al caso base; mientras que, en la optimización multiobjetivo, parte de un valor más bajo para tener un ligero incremento, siendo comportamientos prácticamente opuestos.

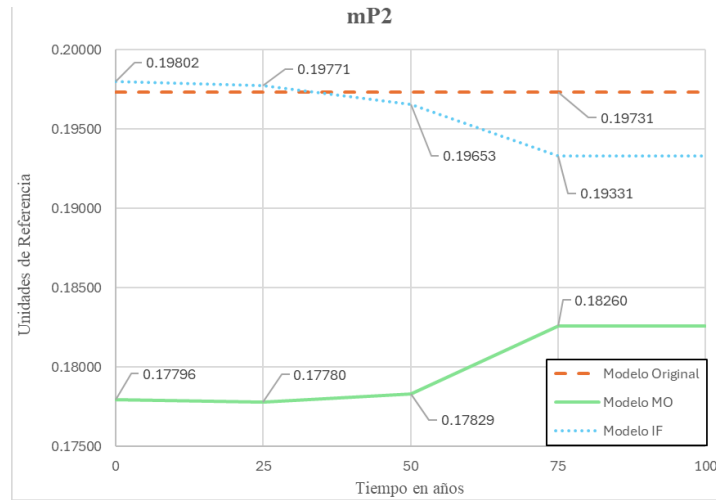


Figura 14. Perfil óptimo *mP2*.

La Figura 15 presenta los resultados obtenidos de los perfiles del salario base *aw*. Se puede observar al modelo optimizado utilizando optimización multiobjetivo que requiere de un inicio con un valor de aproximadamente 1% más grande respecto al original para ir decrementando hasta llegar casi al valor del modelo original; mientras que, para el valor con Fisher, es similar el incremento inicial, pero se sostiene a lo largo del tiempo. Una manera de interpretarlo es que FI requiere un apoyo o mantener alto el incremento salarial base, lo cual puede resultar complicado en la realidad, mientras que el modelo multiobjetivo solo al principio requiere un impulso para luego decrementar a lo largo del tiempo.

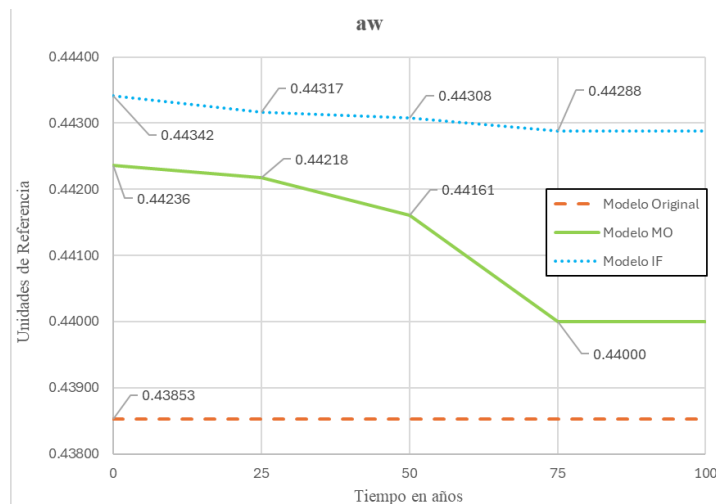


Figura 15. Perfil óptimo *aw*.

En la figura 16 se presentan los perfiles correspondientes a los precios de las plantas alimenticias del sector agrícola *aP1p*. El modelo optimizado utilizando información de Fisher inicia en el mismo valor que el modelo original para luego reducirse y casi estabilizarse por el resto de la simulación inmediatamente después de los 25 años, mientras que para la optimización multiobjetivo se inicia en un valor menor respecto al original para continuar cada 25 años ajustándose, con subidas y bajadas, siempre por debajo que el modelo original e FI.

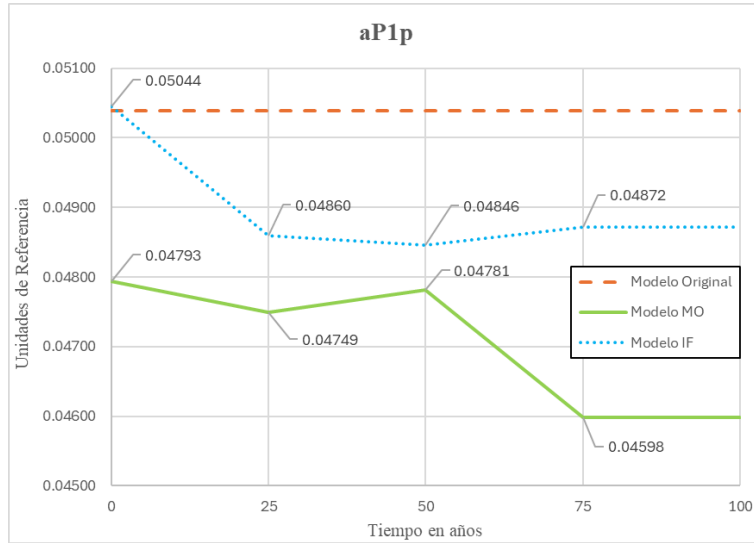


Figura 16. Perfil óptimo aP1p.

La Figura 17 muestra los perfiles correspondientes a los precios del sector ganadero aH1p, donde el modelo optimizado multiobjetivo se encuentra hasta un 7% por debajo del modelo original, lo cual se interpreta como una reducción al precio y sigue reduciendo hasta para el año 75 alcanzar un 10% menos respecto a su valor en el modelo original. Para la información de Fisher, comienza con 7% por encima del valor que tiene en el modelo original, algo muy negativo económicamente hablando pues implicaría incrementar precios, pero decrece hasta llegar a tener un valor por debajo del original, siendo ligeramente mejor que el modelo original.

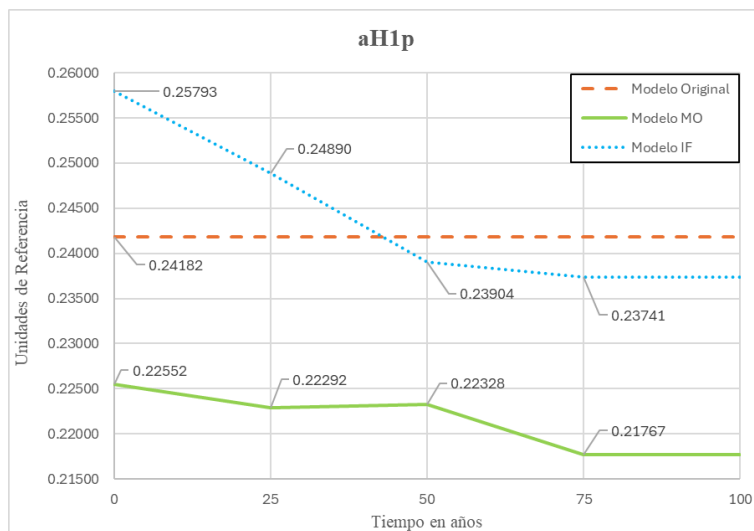


Figura 17. Perfil óptimo aH1p.

Los perfiles que representan a los precios de servicios y manufacturas del sector industrial aISp se muestran en la Figura 18. Los perfiles en la optimización MO y en FI se ajustan con subidas y bajadas a lo largo del tiempo, donde Fisher tiene cambios claramente más drásticos, y MO constantemente decrece el valor de la variable.

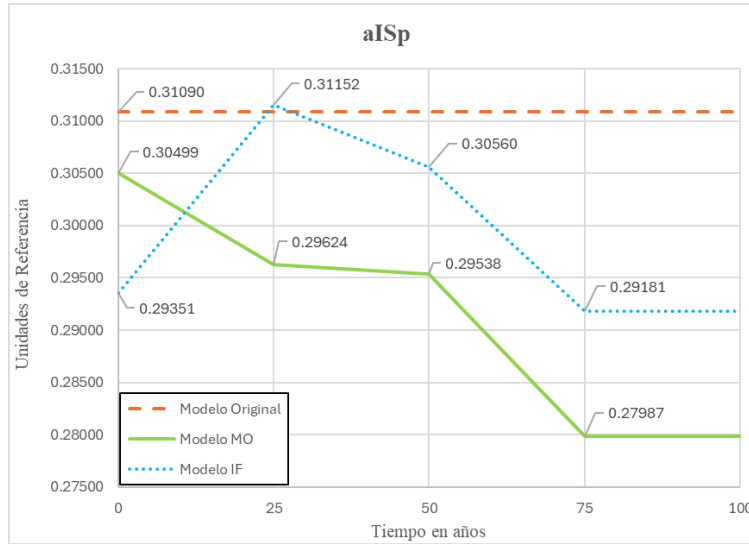


Figura 18. Perfil óptimo aISp.

Por último, en la Figura 19 se presenta el comportamiento de los perfiles correspondientes al factor de productividad de los recursos bióticos y abióticos λ . La variable en la optimización MO prácticamente alcanza hasta un 10% por encima del valor original, pero inmediatamente comienza a descender y así, para el año 25 ya está por debajo del modelo inicial y continúa decreciendo, hasta llegar a 10% menos respecto al valor original. Para FI, inicia por debajo del valor que tiene la variable en el modelo original y se reduce aún más; para el año 25 en adelante se puede considerar que se mantiene estable en el mismo rango de valor.

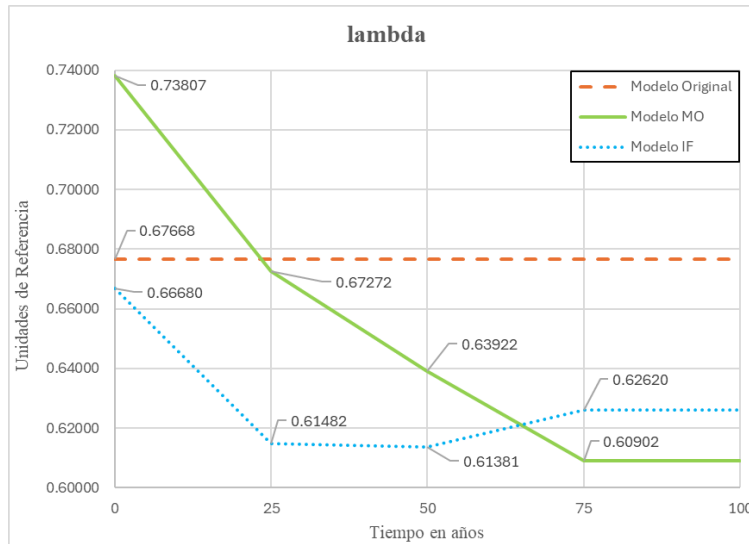


Figura 19. Perfil óptimo lambda.

4.4. Perfiles óptimos del modelo.

Los perfiles óptimos representan configuraciones específicas del sistema modelado que maximizan o equilibran distintas funciones objetivo, tales como el bienestar económico, la sostenibilidad ambiental o la equidad social. En este documento, las variables seleccionadas para construir dichos perfiles han sido ordenadas de acuerdo con su relación directa con estas funciones objetivo y su relevancia dentro de las dimensiones de la sustentabilidad. En primer lugar, se presenta la Temperatura global del modelo, como variable asociada a la función objetivo ambiental; seguida por el Salario per cápita, correspondiente a la función objetivo económica; y luego la Cantidad másica total de humanos, relacionada con la función objetivo social. Posteriormente, se incluyen variables que representan aspectos estructurales del sistema y que, aunque no forman parte directa de una función objetivo individual, resultan clave para interpretar las dinámicas sociales, ambientales y económicas del modelo: el número de humanos, la agricultura, las plantas y animales salvajes (accesibles o no a los humanos), la ganadería, los carnívoros (accesibles o no a los humanos), la industria y servicios, así como los distintos tipos de recursos naturales (renovables, no renovables y biológicamente inaccesibles). La inclusión de estas variables, y no de todas las disponibles en el modelo, responde a un criterio de relevancia y analítica: se priorizaron aquellas que condensan información esencial para evaluar el desempeño sistémico en términos de sustentabilidad, permitiendo una lectura completa del modelo sin perder claridad o interpretabilidad.

Temperatura global del modelo (FO ambiental).

En la Figura 20 se presenta el comportamiento de la temperatura global del modelo (*temp*) en un tiempo de cien años de simulación, obtenido a partir de optimizar el modelo utilizando como función objetivo la información de Fisher, la optimización multiobjetivo comparándolo con el modelo original. Al igual que en las figuras previas, en todas las de esta sección la línea roja semicontinua corresponde al caso base sin optimizar, la línea punteada azul al caso de la FI como función objetivo y la línea sólida verde al caso multiobjetivo. Se puede apreciar que tanto utilizando la FI como con el uso del enfoque multiobjetivo se puede reducir la temperatura global del sistema. Sin embargo, se puede apreciar claramente que los resultados de la optimización multiobjetivo son mejores respecto a los otros casos. Usando la FI la temperatura final se reduce en un 11.4% pasando de 35 a 31 °C; mientras que en el acercamiento multiobjetivo la reducción que se logra es de 15% disminuyendo hasta 29.7 °C. Aunque el uso de la información de Fisher como función objetivo es suficiente para lograr una disminución significativa, evitando que la temperatura se dispare los últimos 10 años (lo que representa un colapso del sistema como se explica más adelante); el uso de la optimización multiobjetivo nos permite obtener mejores resultados.

Salario per cápita (FO económica).

El Salario per cápita (*W*) simulado a cien años, ilustrado en la Figura 21, muestra que tanto FI como MO presentan cambios abruptos cada 25 años de simulación, coincidiendo con el tiempo de duración de las restricciones de tiempo, donde los valores que toman las variables de decisión tienen 25 años para surtir efecto. Para MO, se observa una reducción de hasta un 16.5% en el lapso de 25 años, para luego subir un 4.3% al siguiente ciclo, repetir su comportamiento una vez más y, en el último ciclo, subir 3.8%. Estos resultados guardan un comportamiento similar a otros parámetros y variables que conforman el modelo de la parte económica, por lo que no necesariamente es negativo cuando baja el salario per cápita; puede significar un ajuste temporal derivado de las nuevas reformas en el sistema.

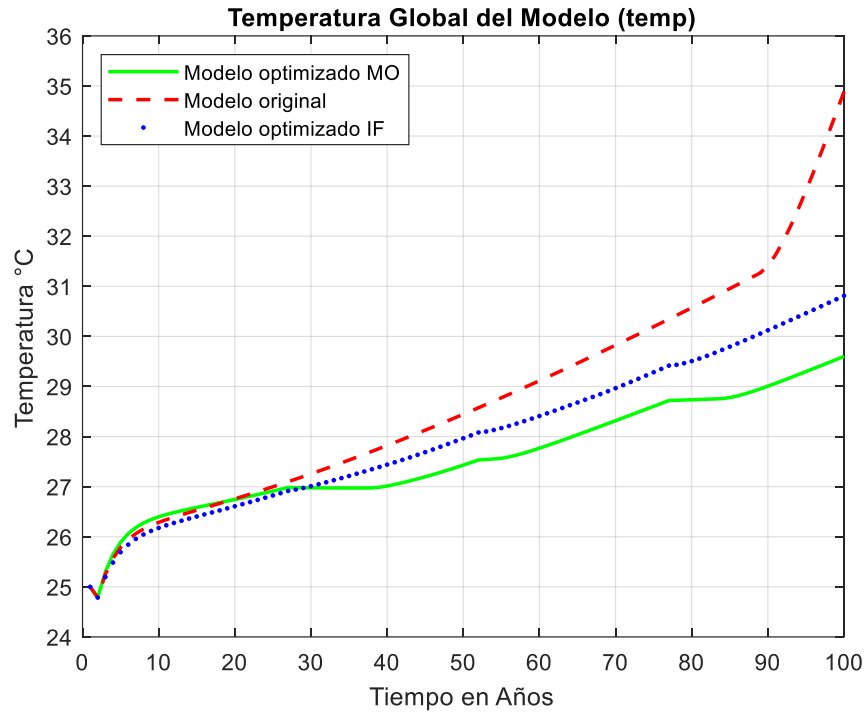


Figura 20. Temperatura global del modelo durante cien años.

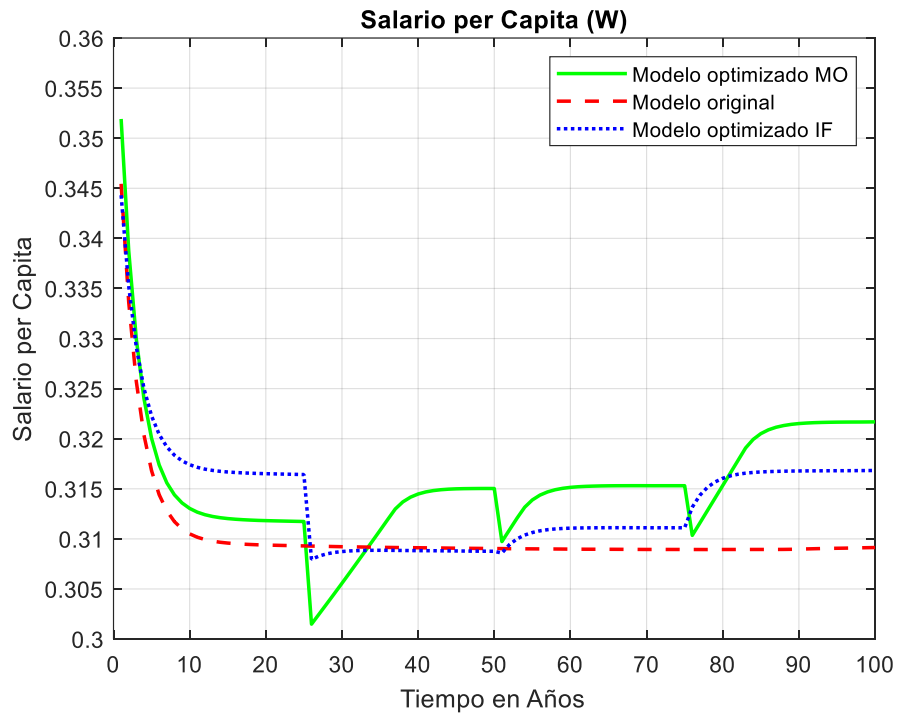


Figura 21. Salario per cápita durante cien años.

Cantidad másica total de humanos (Compartimento HH y FO social).

La Figura 22 representa la cantidad másica total de humanos (*HH*) presente en el modelo, es decir, que entre más grande sea su valor, se consideraría que el sistema es más propicio para el desarrollo y longevidad de los humanos, tomando esto en cuenta, el modelo optimizado MO muestra los mejores resultados, mostrando un resultado mayor al modelo original de hasta un 4.4%, pese a ser una pequeña diferencia, se aprecian mejores resultados que FI, y desde año 40 de simulación, MO comienza a mostrar beneficios superiores al resto de opciones.

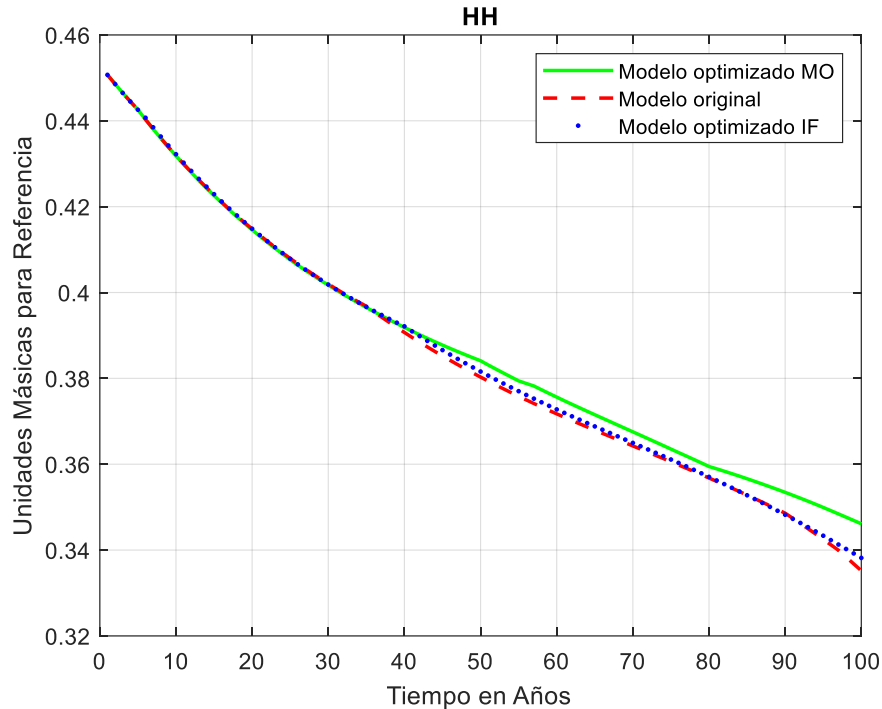


Figura 22. HH durante cien años.

Número de humanos (numHH).

El crecimiento del número de humanos (numHH), mostrado en la Figura 23, permite observar nuevamente que FI y la MO entregan una considerable mejora respecto al modelo original. El modelo optimizado con Fisher a partir del año 85 comienza a decrecer, mientras que el MO mantiene su crecimiento a lo largo de los años simulados, llegando al final de la simulación hasta 1465 humanos, en contraste con el modelo original que alcanza 1400 pero con una evidente tendencia bajista al menos hasta el año 98 de simulación. Las condiciones del modelo utilizando la optimización MO favorecen a todas las dimensiones que conforman el camino de la sustentabilidad y, de esta forma, impulsan el crecimiento y la prosperidad de la sociedad humana dentro de la simulación.

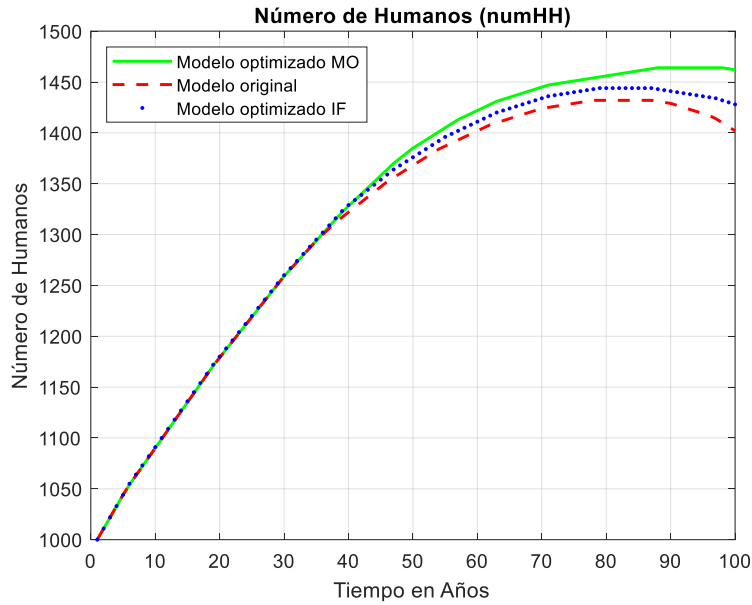


Figura 23. Número de humanos durante cien años.

Agricultura (Compartimento P1).

En la Figura 24 podemos observar el comportamiento de la piscina de recursos *P1* correspondiente a la agricultura, a lo largo de los cien años de simulación. Se puede apreciar que tanto la FI como el uso de MO reducen las actividades agrícolas del modelo, en hasta un 23% aproximadamente, para el final de la simulación. El modelo trabaja con unidades másicas de referencia, debido a esto, es complicado interpretar en la realidad la dimensión de la reducción de la agricultura en el sistema, también es importante notar que no se vuelve cero, solo se reduce considerablemente; esto significa que por la forma en que este modelado el ecosistema, la agricultura tiene gran influencia en la temperatura.

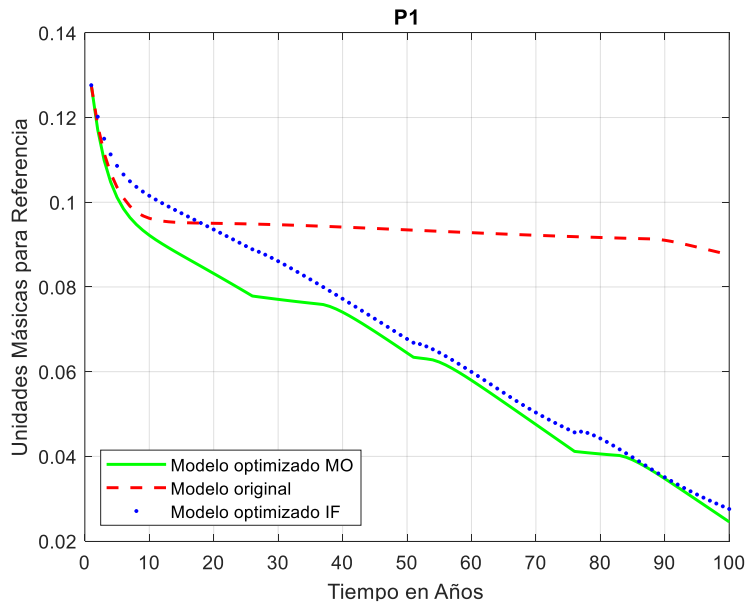


Figura 24. P1 durante cien años.

Plantas salvajes a las que tienen acceso los humanos (Compartimento P2).

El comportamiento de la piscina de recursos P2 correspondiente a las plantas salvajes que interactúan con los humanos se muestra en la Figura 25. En este caso, MO presenta una gran diferencia respecto al resto: el principal y más importante comportamiento es que no llega a volverse cero a comparación de las otras simulaciones, teniendo al final de la simulación un valor de 3.9, poco más de la mitad del valor inicial de referencia con el que todos los modelos inician. También es destacable que se mantiene estable en comparación al resto, lo que indica un desarrollo más próspero para la flora salvaje con interacción humana en MO.

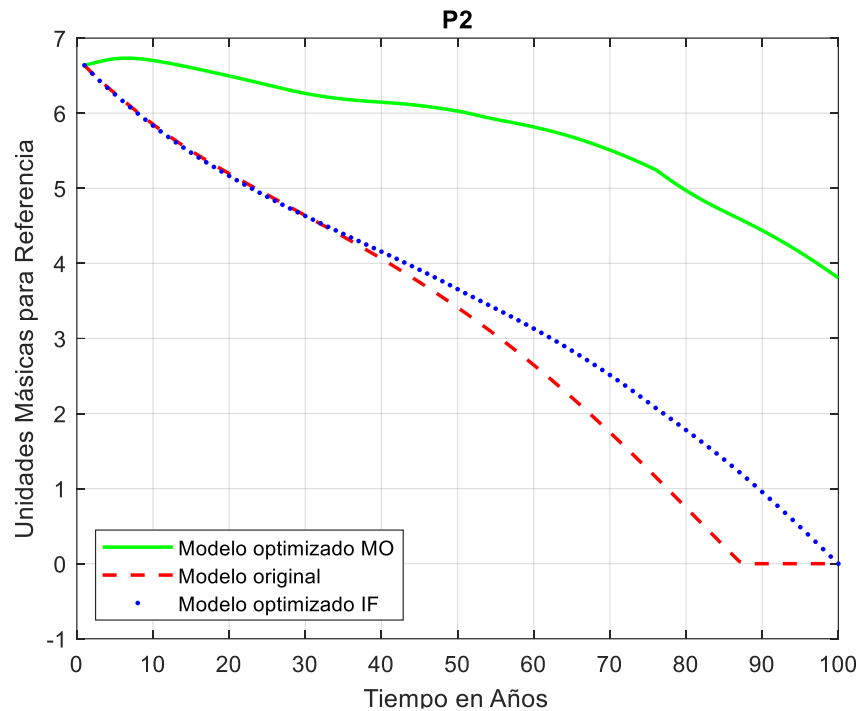


Figura 25. P2 durante cien años.

Plantas salvajes a las que no tienen acceso los humanos (Compartimento P3).

La piscina de recursos P3, correspondiente a plantas salvajes sin interacción con los humanos, se presenta en la Figura 26. Tomando como referencia al modelo original, la optimización de modelo disminuye esta variable en ambos casos: con el modelo optimizado FI se observa una reducción del 7.4% en el año 90 de simulación, aunque al final terminan con el mismo valor; mientras que con el modelo optimizado MO la reducción es mucho más notable, alcanzando hasta un 21.8% al final de la simulación. Se aprecia que MO es más estable y, en general, menos recursos tienden a cero, prevaleciendo en mayor medida a lo largo del tiempo y evitando que comience a crecer flora salvaje sin acceso a humanos en lugares donde ya existe flora salvaje accesible. Esto se vuelve más evidente al comparar con la Figura 24, correspondiente a la agricultura, y con la Figura 25.

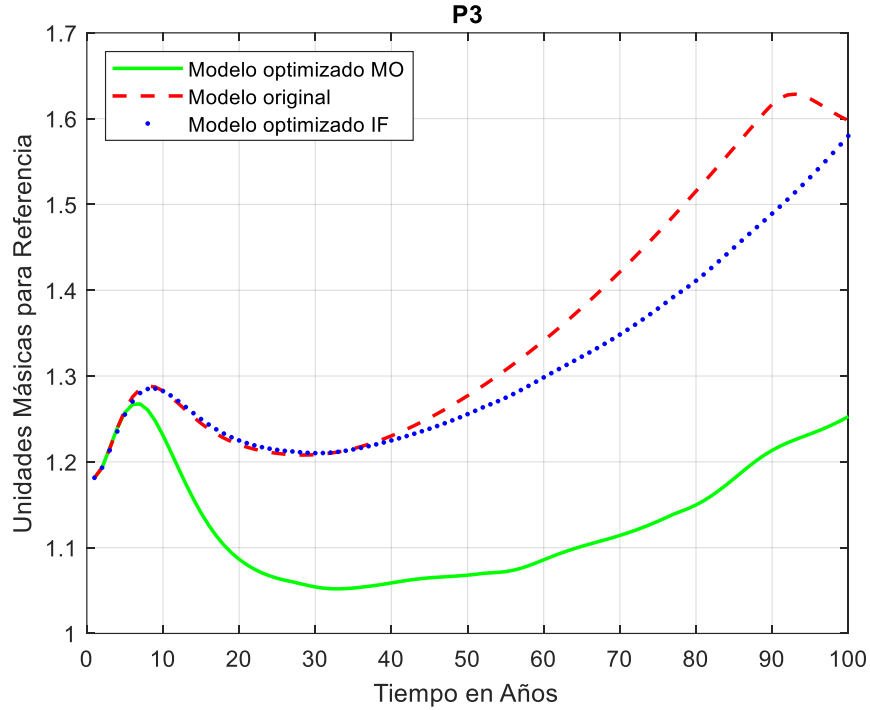


Figura 26. P3 durante cien años.

Ganadería (Compartimento H1).

De la Figura 27 correspondiente a la ganadería (H1) se puede apreciar el comportamiento similar entre el modelo optimizado MO y el modelo optimizado usando FI, en el año 50 de simulación tienen una diferencia de 7.87% que es cuando presentan una mayor diferencia entre sí; se aprecia que MO requiere una menor cantidad de unidades másicas para mantenerse estable a lo largo de la simulación, con un 6.15% respecto a FI al final de la simulación. Cabe destacar que el modelo original, en el año 87 aproximadamente se desploma y reduce drásticamente año con año, indicando el colapso de este y probablemente otras piscinas de recursos relacionadas que inevitablemente condenan a la simulación del modelo original. Estos resultados nos indican que es necesario la reducción de la actividad ganadera siempre intentando mantener una estabilidad, en conjunto con el resto de los resultados mejoran la sustentabilidad del modelo.

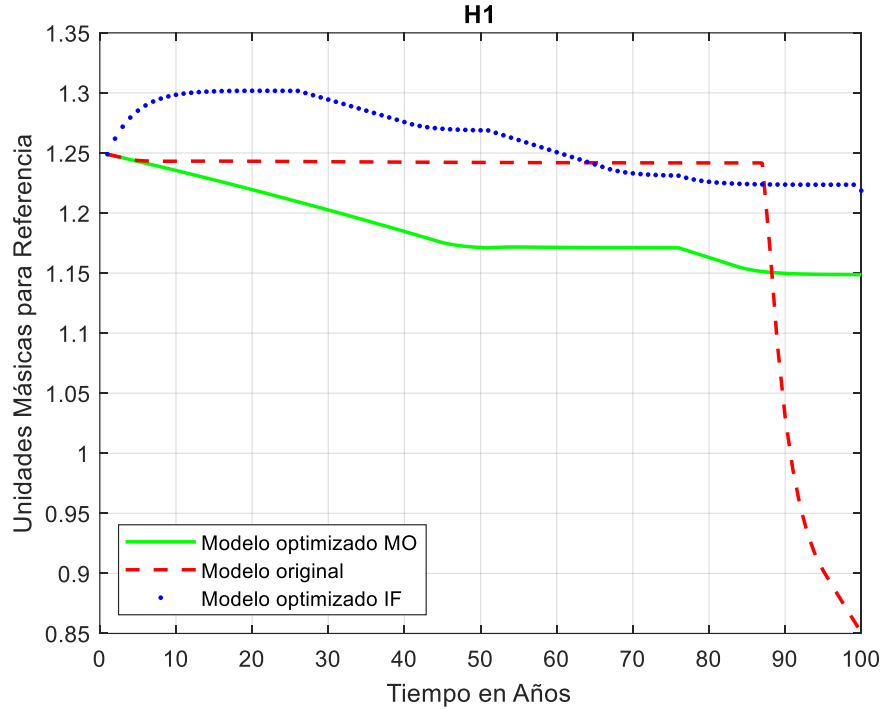


Figura 27. H1 durante cien años.

Herbívoros salvajes a los que tienen acceso los humanos (Compartimento H2).

En la Figura 28 se presenta el comportamiento de la piscina de recursos *H2* correspondiente a los herbívoros salvajes a los cuales tienen acceso los humanos. Recordemos que una de las variables controladas del modelo era la mortandad de estos animales, salvajes herbívoros, y pese a tomar decisiones sobre estos recursos, podemos observar en la gráfica que con la MO se incrementa la cantidad másica de estos animales y tiene un comportamiento bastante estable tomando de referencia el modelo original que también tiene una tendencia al decremento, llegando a tener una diferencia de hasta el 66.6% al final de la simulación entre sí. Se puede interpretar que controlar la mortandad no implica solamente la erradicación de estos animales, también puede implicar su protección y prosperidad.

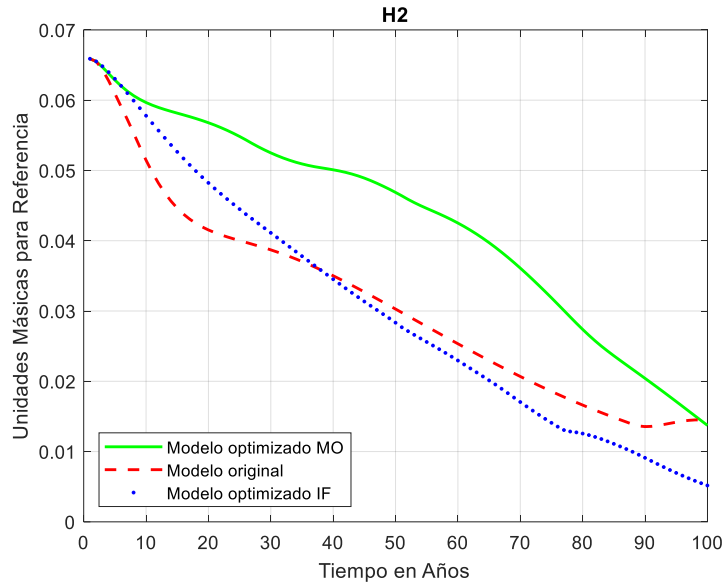


Figura 28. H2 durante cien años.

Herbívoros salvajes a los que no tienen acceso los humanos (Compartimento H3).

La Figura 29 corresponde a los herbívoros salvajes que no interactúan, al menos directamente, con los humanos (H3) nos muestra el gran incremento que el modelo optimizado MO tiene respecto al modelo original, de hasta un 17.9% de diferencia en su momento de mayor diferencia (año 90) y respecto al modelo optimizado utilizando FI, una diferencia de 12.8% al final de la simulación. Pese a descender a partir del año 50, siempre sigue siendo superior en cuanto a su comportamiento y cantidad másica. Incluso si son animales que no interactúan con humanos, se benefician evidentemente de las mejores condiciones del ecosistema, posiblemente a la proliferación de plantas salvajes.

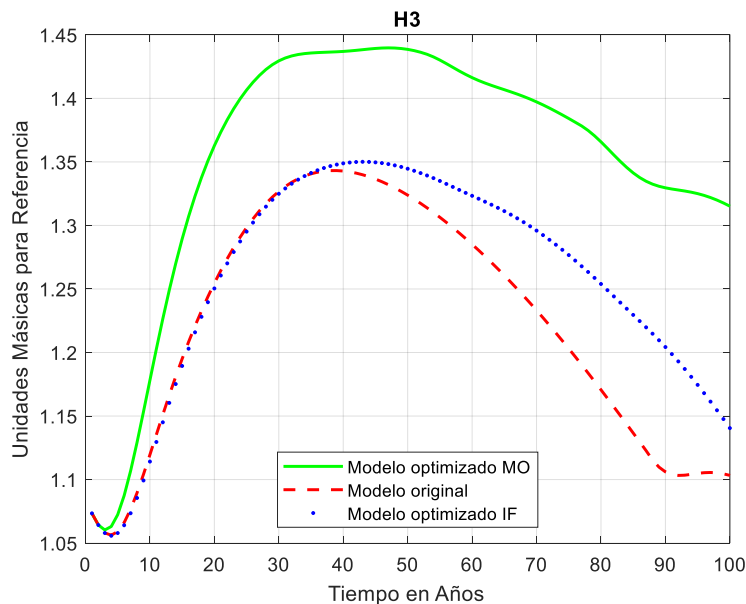


Figura 29. H3 durante cien años.

Carnívoros salvajes que interactúan con humanos (Compartimento C1).

La Figura 30 corresponde a los carnívoros salvajes que interactúan con humanos (C1). Se puede apreciar el colapso en el modelo original de la piscina de recursos C1 luego del año 87, y si bien, el modelo optimizado FI no colapsa y es estable, el modelo optimizado MO mantiene una estabilidad similar, pero con una mayor magnitud de cantidad másica, llegando a superar a FI hasta un 6.6% al final de la simulación. El sistema es adecuado para el incremento de los carnívoros gracias al comportamiento de las demás piscinas (como se muestra en anteriores figuras) donde la mayoría muestran mayor estabilidad, un incremento en las unidades másicas de referencia o el mejor aprovechamiento de los recursos. Esto se puede tomar como evidencia que incluso si C1 no es una piscina de particular interés, el beneficio enfocado a las tres dimensiones (ambiental, económica y social), nos entrega grandes resultados con beneficios para todos los elementos que integran al sistema.

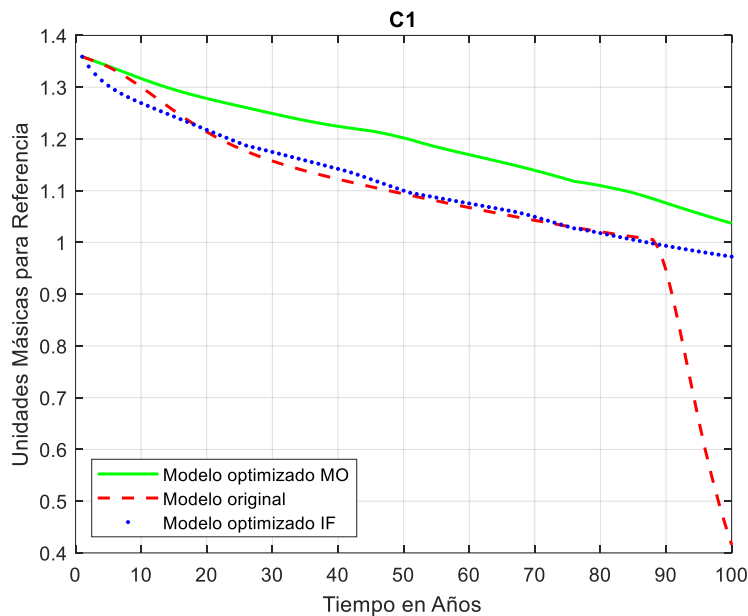


Figura 30. C1 durante cien años.

Carnívoros salvajes que no interactúan con humanos (Compartimento C2).

La Figura 31 correspondiente a los carnívoros salvajes que no interactúan con humanos (C2). Es otro claro ejemplo de que la optimización MO, al permitirnos seleccionar de forma específica los objetivos deseados de la optimización, las diferentes variables que conforman al modelo se benefician directa e indirectamente. En este caso, el modelo optimizado a partir de la FI no difiere mucho del modelo original, donde existe una clara tendencia al cero, mientras que el modelo optimizado MO a partir del año 15 mantiene cierta estabilidad y un mayor valor másico el resto del tiempo, incluso en el año 100 su valor llega a ser más del doble respecto al modelo original (127.2% más).

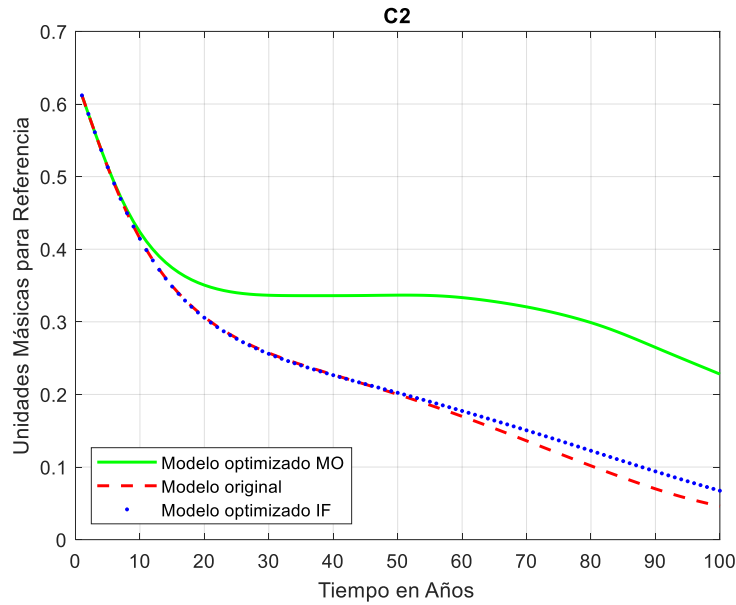


Figura 31. C2 durante cien años.

Cantidad másica total de industria y servicios (Compartimento IS).

La gráfica de la Figura 32 muestra el comportamiento que tiene la industria y servicios en la simulación (*ISmass*). Una forma de interpretar los resultados de la optimización MO es el incremento en los primeros años de la producción para solventar las necesidades que el sistema tiene en los primeros 25 años de simulación, pero casi inmediatamente dicha demanda se sigue reduciendo hasta llegar a un valor final menor que el del modelo original (24.5% menos). Puede considerarse como un esfuerzo al comienzo para abastecer las demandas generadas en el primer ciclo, y de esa manera, obtener grandes beneficios el resto de la simulación.

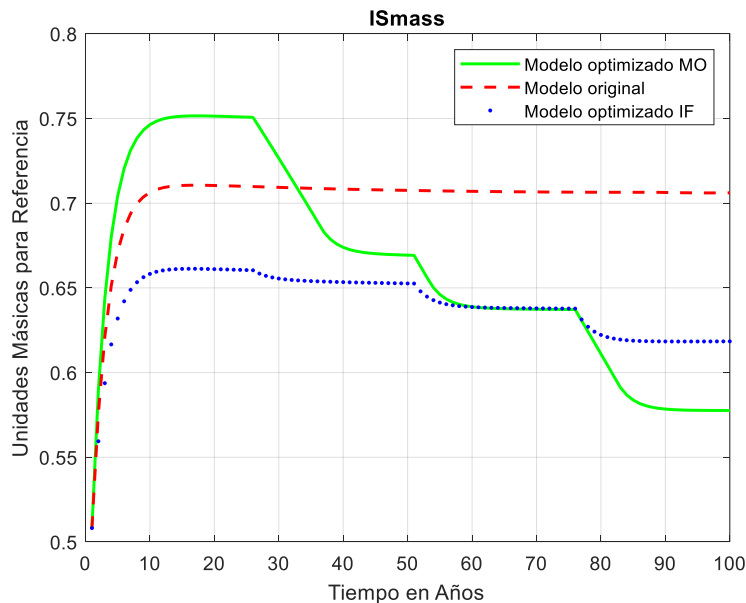


Figura 32. IS durante cien años.

Fuente finita de recursos bióticos y abióticos (Piscina de recursos RP).

En el caso de la Figura 33, cuya gráfica representa el uso de la fuente de recursos finitos bióticos y abióticos (RP), se puede comparar con las tres líneas, entre más elevada sea, mayor será el consumo de los recursos. El modelo original tiene el mayor consumo de recursos, seguido del modelo optimizado FI y, por último, con el mejor aprovechamiento de los tres, el modelo optimizado MO, donde se utiliza hasta un 15.8% menos de los recursos en comparación al modelo FI, y respecto al modelo original hasta un 18.7% (todo al final de la simulación) como se puede observar de la gráfica, también se muestra un consumo más estable respecto al resto de simulaciones, lo que se puede interpretar como un consumo más consiente de recursos por parte del ecosistema.

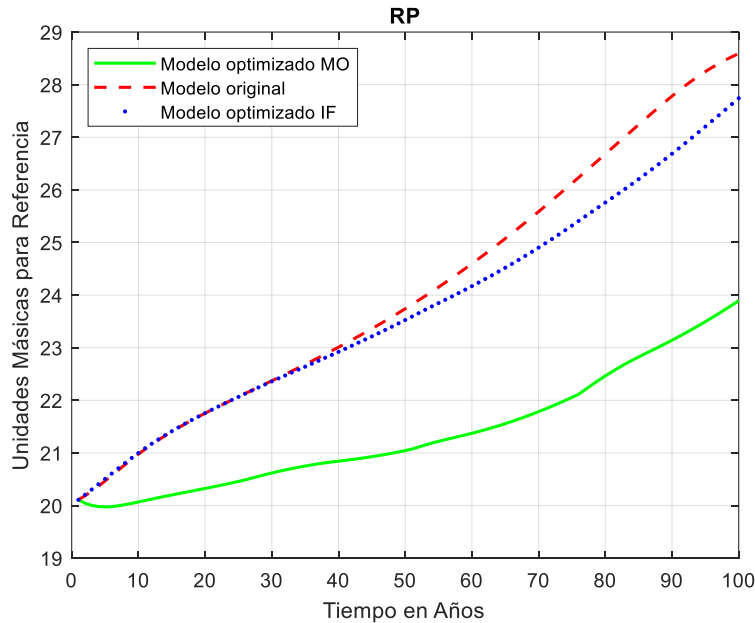


Figura 33. RP durante cien años.

Masa biológicamente inaccesible al resto del ecosistema (Piscina de recursos IRP).

Al igual que en la Figura anterior, la Figura 34 nos muestra en qué medida se consumen los recursos de dicha piscina en el ecosistema, en este caso, se trata de la masa biológicamente inaccesible para el resto del ecosistema. En este caso se puede observar como el modelo optimizado MO es la simulación que genera una mayor cantidad de masa inaccesible al ecosistema, pero no es algo necesariamente negativo, pues esto puede deberse al crecimiento de las diferentes poblaciones que componen al ecosistema, y como se ha demostrado con las anteriores figuras, con mayores beneficios respecto al modelo original y la optimización con FI, es decir, el que tenga valores más elevados respecto a las otras simulaciones, no implica contaminación, solo una generación mayor de recursos inaccesibles.

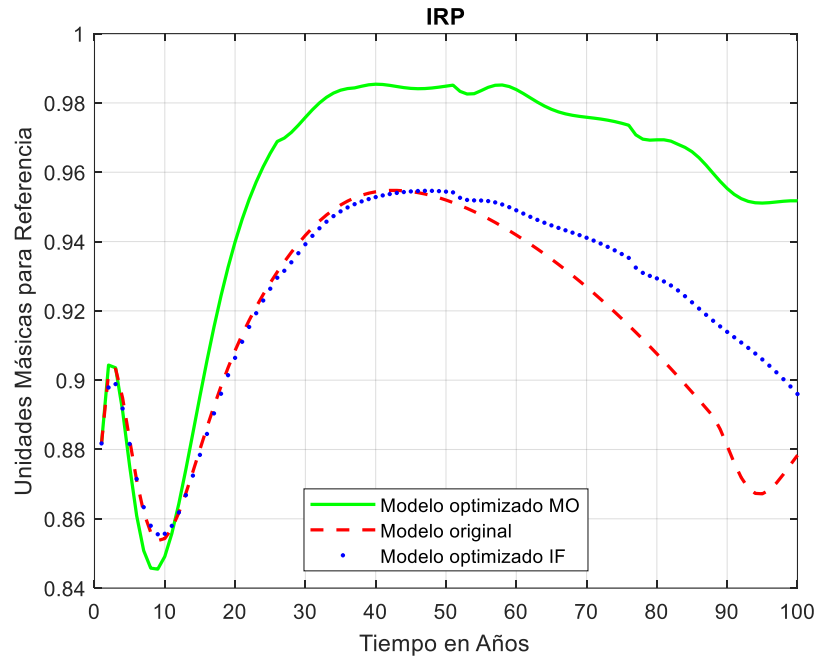


Figura 34. IRP durante cien años.

Recursos energéticos finitos no renovables (Piscina de recursos ERP).

Para el caso del consumo de recursos energéticos, no parece haber diferencias significativas entre los diferentes modelos; como se puede apreciar en la Figura 35 que representa los recursos energéticos finitos no renovables (ERP), salvo los notables consumos que tienen lugar cada 25 años donde las simulaciones realizan los ajustes que consideran necesarios, se muestran comportamientos bastante estables a lo largo del tiempo que dura la simulación donde ninguno llega a cero nunca, siendo un consumo similar en los tres modelos.

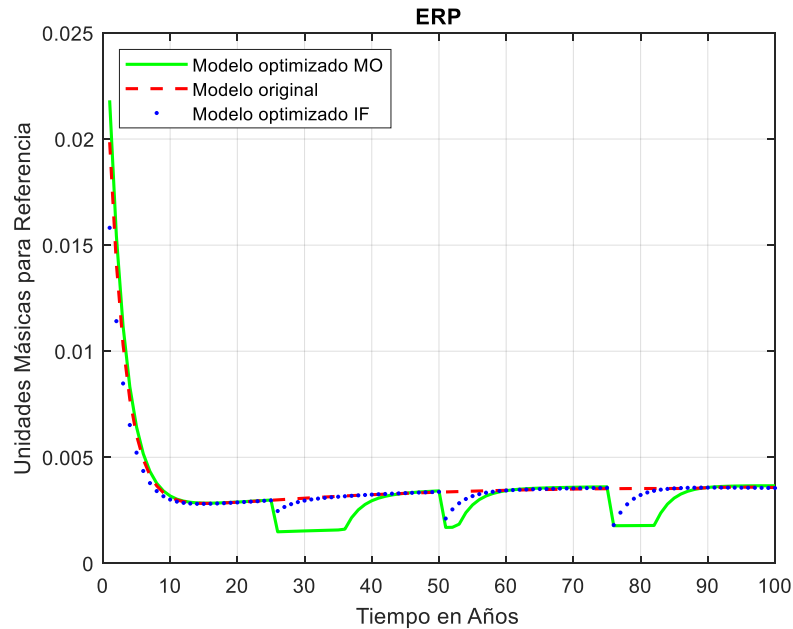


Figura 35. ERP durante cien años.

Capítulo 5. Conclusiones.

5.1. Conclusiones generales.

La principal contribución de este trabajo radica en la aplicación de la optimización multiobjetivo para reducir la temperatura global a partir de la selección estratégica de variables clave dentro de un modelo que contiene más de 100 parámetros. De las más de 100 variables presentes en el modelo, se identificaron seis que tienen un importante impacto en la temperatura global y en la dinámica del sistema en general. Estas variables, relacionadas con la mortandad de las plantas silvestres, los precios de la actividad agrícola, ganadera e industrial, el consumo de recursos renovables y no renovables y los salarios en general, demostraron ser puntos de intervención clave para diseñar políticas públicas efectivas. La selección de estas variables no solo simplifica la complejidad del modelo al ser variables semejantes a aspectos que ya se controlan en la realidad, sino que también proporciona a los tomadores de decisiones un enfoque práctico y manejable para implementar cambios. Esto es particularmente relevante en contextos donde los recursos y la capacidad de acción son limitados, ya que permite concentrar los esfuerzos en áreas de alto impacto. Este enfoque permitió identificar áreas de oportunidad en estas variables, logrando una reducción significativa de la temperatura global en comparación con estudios anteriores que utilizaron métodos tradicionales, como la información de Fisher. La optimización multiobjetivo, basada específicamente en la teoría de la mínima distancia, demostró ser de gran utilidad al poder asignar la misma importancia a las dimensiones ambiental, social y económica. Este equilibrio es crucial para garantizar que al proponer políticas públicas no solo mitiguen el calentamiento global, sino que también mantengan la viabilidad económica y el bienestar social. Los resultados obtenidos confirman que es posible alcanzar un punto óptimo donde se minimizan los impactos negativos en el ecosistema sin sacrificar el desarrollo humano.

5.2. Implicaciones para las políticas públicas sustentables.

Los resultados de este estudio tienen implicaciones profundas para la formulación de políticas públicas sustentables. Primero, se demuestra que modificando un número limitado de variables clave es posible diseñar estrategias efectivas para reducir la temperatura global de un sistema. Estas estrategias pueden ser implementadas gradualmente, lo que facilita su adopción y minimiza los impactos negativos en la economía y la sociedad. En segundo lugar, se puede y se debe adoptar un enfoque integral que considere las interconexiones entre los sistemas ecológicos, económicos y sociales que por siglos han formado parte de la vida humana. Por ejemplo, una política que reduce las emisiones de CO₂ puede tener efectos positivos en la temperatura global pero también puede afectar negativamente la producción industrial y reduce los empleos. Debido a esto, las políticas públicas deben ser diseñadas con una visión integral considerando tanto los beneficios ambientales como los sociales y económicos.

5.3. Desafíos para la Implementación en la Vida Real.

Aunque la simulación ofrece resultados prometedores, su implementación en la vida real enfrenta muchos desafíos. En primer lugar, la resistencia al cambio por parte de actores clave, como industrias y la población, puede dificultar la adopción de políticas sustentables. En segundo lugar, la burocracia

y la falta de coordinación entre diferentes niveles de gobierno pueden retrasar o incluso impedir la implementación de dichas políticas públicas. Para superar estos desafíos, es esencial complementar las soluciones técnicas con estrategias de gestión de cambio y participación de la ciudadanía. Esto incluye campañas de concientización, incentivos económicos para la adopción de prácticas sustentables y mecanismos de transparencia que permitan a la sociedad monitorear el progreso de las políticas implementadas.

5.4. Trabajos futuros.

Este trabajo abre nuevas líneas de investigación a futuro. En primer lugar, se recomienda validar los resultados del modelo con datos reales de sistemas ecológicos y socioeconómicos. Esto permitiría ajustar los parámetros del modelo y mejorar su precisión. En segundo lugar, se sugiere explorar la aplicación de técnicas avanzadas, como inteligencia artificial y análisis de big data con tecnologías nuevas y emergentes, para identificar nuevas variables clave y poder definir políticas públicas sustentables aún más específicas. Finalmente, se propone desarrollar casos de estudio específicos en regiones o sectores económicos particulares, lo que permitiría adaptar las políticas propuestas a contextos locales y evaluar su efectividad en condiciones realistas.

5.5. Reflexión Final.

Se demuestra que la optimización multiobjetivo es una herramienta eficiente y precisa para el diseño de políticas públicas sustentables que reduzcan la temperatura global y en general, promuevan la sustentabilidad. Al enfocarse en un número limitado de variables clave se ofrece un enfoque práctico y efectivo que puede ser implementado en la vida real. Sin embargo, el éxito de estas políticas dependerá de la capacidad de los gobiernos, la sociedad y la comunidad científica para trabajar de manera colaborativa y comprometida, asegurando un futuro más sustentable para la humanidad actual y las siguientes generaciones.

5.6. Publicaciones y Participaciones en Congresos.

- ◆ Ponencia “Optimización de un modelo de ecosistema humano con una red alimentaria ecológica simplificada para la reducción del calentamiento global” (coautoría), Congreso de ingeniería, Tecnología y Ciencias Sociales (CITyCS) 1er Edición, Universidad Politécnica de Aguascalientes.
- ◆ Artículo “Multi-Objective Optimization of Socio-Ecological Systems for Global Warming Mitigation” (coautoría), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

Referencias bibliográficas.

- Acerca de Desarrollo Sostenible, CEPAL.* (2017, abril 17).
<https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible>.
- Azabache De la Cruz, P. N. (2024). Implementación de Políticas Públicas y Desarrollo Sostenible en Perú: Una Revisión Sistemática de Prácticas y Resultados. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5.
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i4.2404>
- Brondízio, E. Sonnewend., Settele, Josef., Díaz, Sandra., & Ngo, H. Thu. (2019). *The global assessment report on BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES*. IPBES.
- Bronwen, P. (2019). *Complex Social-Ecological Systems*.
<https://courses.ems.psu.edu/geog430/node/519>
- Bryson, A. E., Ho, Y.-C., & Siouris, G. M. (1979). Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 366–367.
<https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310229>
- Bullard, R. D. (2000). *Dumping in Dixie: Race, Class, and Environmental Quality* (3rd ed.). Westview Press. <https://doi.org/10.1007/bf02689929>
- Cabezas, H. ., Pawlowski, C., Whitmore, H. W. J., Mayer, A., & Hoagland, T. (2006). Integration of an Economy Under Imperfect Competition with a Twelve-cell. *Technical Report EPA/600/R-06/046. USEPA*.
- Cabezas, H., Pawlowski, C. W., Mayer, A. L., & Hoagland, N. T. (2003). Sustainability: ecological, social, economic, technological, and systems perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 5(3–4), 167–180. <https://doi.org/10.1007/s10098-003-0214-y>
- Cairney, P., & Oliver, K. (2017). Evidence-based policymaking is not like evidence-based medicine, so how far should you go to bridge the divide between evidence and policy? *Health Research Policy and Systems*, 15. <https://doi.org/10.1186/s12961-017-0192-x>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 6(2).
- Degradación crónica de las tierras: las Naciones Unidas ofrecen serias advertencias y remedios prácticos en su informe Perspectiva global de la tierra 2.* (2022).
<https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-04/Spanish.pdf>
- Diamond, J. (2005). *Collapse How Societies Choose To Fail Or Succeed* (Vol. 1).
<https://doi.org/10.1093/ije/dyi304>
- Diwekar, U. M. . (2008). *Introduction to applied optimization*. Springer.
- Doshi, R., Diwekar, U., Benavides, P. T., Yenkie, K. M., & Cabezas, H. (2015). Maximizing sustainability of ecosystem model through socioeconomic policies derived from multivariable optimal control theory. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 1573–1583.
<https://doi.org/10.1007/s10098-014-0889-2>

- Duarte Muñoz, A., Pantrigo Fernández, J. J., & Gallego Carrillo, M. (2007). *Metaheurísticas*. Dykinson. <https://elibro.net/es/ereader/itaguascalientes/35696>
- Estrategia de Competencias de la OCDE 2019. (2019). En *Estrategia de Competencias de la OCDE 2019*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/e3527cfb-es>
- Global Footprint Network*. (2025). <https://www.footprintnetwork.org/>.
- Implementación de la Agenda 2030 a Nivel Subnacional*, PNUD. (2018, octubre). <https://www.undp.org/es/mexico/proyectos/implementacion-de-la-agenda-2030-nivel-subnacional>.
- J. P. Brans, B. Mareschal, & P. Vincke. (1984). PROMETHEE A new family of outranking methods in multicriteria analysis. En *Operational Research, Vol. 3* (Vol. 3). https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=17810&utm_source=chatgpt.com
- König, E., Cabezas, H., & Mayer, A. L. (2019). Detecting dynamic system regime boundaries with Fisher information: the case of ecosystems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1471–1483. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01718-9>
- Kotecha, P., Diwekar, U., & Cabezas, H. (2013). Model-based approach to study the impact of biofuels on the sustainability of an ecological system. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 21–33. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0491-4>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H., & Taylor, W. W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. En *Science* (Vol. 317, pp. 1513–1516). <https://doi.org/10.1126/science.1144004>
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455–465. <https://doi.org/10.1016/J.AMC.2009.03.037>
- Miettinen, K. (1998). *Nonlinear Multiobjective Optimization*. 12. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5563-6>
- M.R, A., Dube, O. P., Solecki, W., F, A.-D., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2022). Special Report: Global Warming of 1.5 °C. En *Global Warming of 1.5°C* (pp. 49–92). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.003>
- Oganician, J., & Expósito, M. (2017). Modelo Depredador - Presa de Lotka-Volterra. En <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/6217/Modelo%20depredador-presa%20de%20Volterra-Lotka.pdf> (1a ed., pp. 2–5). ULL.
- Ostrom, E. (2005). *Understanding Institutional Diversity*.
- Pago de Servicios Ambientales*, FONAFIFO. (2018, noviembre 10). <https://www.fonafifo.go.cr/es/servicios/pago-de-servicios-ambientales/>.
- Pamplona, F. (2000). Sustentabilidad y políticas públicas. *Gaceta ecológica*, 56, 46–53. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53905604.pdf>

- Políticas Públicas Ambientales, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia.* (2021, noviembre 27). <https://www.minambiente.gov.co/planeacion-y-seguimiento/politicas-publicas-ambientales/>.
- Ribeiro, A. (2018). Principios de gobernanza eficaz para el desarrollo. En *Documentos Oficiales, 2018*. United Nations Department of Social and Economic Affairs. https://publicadministration.un.org/portals/1/images/cepa/principles_of_effective_governance_spanish.pdf
- Rivera Castiñeira, B., Currais Nunes, L., & Rungo, P. (2009, enero). Impacto de los programas de transferencia condicionada de renta sobre el estado de salud: el Programa Bolsa Familia de Brasil. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272009000100007, 83, 1.
- Rodriguez-Gonzalez, P. T., Rico-Martinez, R., & Rico-Ramirez, V. (2020). Effect of feedback loops on the sustainability and resilience of human-ecosystems. *Ecological Modelling, 426*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109018>
- Romero, D., & Escudero, P. (2023). Adaptive Learning in Agent-Based Models: An Approach for Analyzing Human Behavior in Pandemic Crowding. *MDPI, 6*(6), 113. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/asi6060113>
- Tovar Ortiz, S. A., Rodriguez Gonzalez, P. T., & Tovar Gómez, R. (2024). Modeling the Impact of Global Warming on Ecosystem Dynamics: A Compartmental Approach to Sustainability. *MDPI, 5*(4), 1077–1100. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/world5040054>
- Zapata Ramos, N. (2008). *Técnicas multicriterio para la toma de decisiones estratégicas en el ámbito del comercio internacional* [Universidad de Sevilla]. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/use/abreproy/70078/fichero/Tecnicas+multicriterio+para+la+toma+de+decisiones+estrategicas%252FCapitulo+3.+Optimizacion+multicriterio.pdf>
- Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*.


```
0.197313146 0.43853 0.050392 0.24182 0.3109 0.676677233  
0.197313146 0.43853 0.050392 0.24182 0.3109 0.676677233]; %se dejan los 4 filas de datos por si se desea modificar el valor en  
lapso de tiempo especifico
```

```
lw = x0*0.9;
```

```
up = x0*1.1;
```

```
[xopt,fval] = fmincon(@GWM,x0,rst,rsb,[],[],lw,up,[],options);
```

A.2 Código de Matlab del modelo de ecosistema humano.

```
function Z = GWM3(xx)

%% VALORES INICIALES

FISH=0;
% Caso particular
lto=0; Case=3; pais=0;

time = 100; % time in years for sustainability analysis
t=0:time; % integration steps

% nivel por debajo del cual los elementos del ecosistema natural no se reproducen
belownoreproduction=1e-4;

% Valores iniciales
P1(1) = 0.127639522 ;
P2(1) = 6.637479579 ;
P3(1) = 1.181396149 ;
H1(1) = 1.248945367 ;
H2(1) = 0.065892868 ;
H3(1) = 1.073417243 ;
C1(1) = 1.358944396 ;
C2(1) = 0.611883366 ;
HH(1) = 0.4507;
ISmass(1) = 0.508187978 ;
RP(1) = 20.10894289 ;
IRP(1) = 0.881746274 ;
numHH(1)= 1000 ;

P1H1massdeficit(1) = 0;
P1ISmassdeficit(1) = 0;
P1HHmassdeficit(1) = 0;
H1massdeficit(1) = 0;
ISmassdeficit(1) = 0;
P1massdeficit(1)= P1H1massdeficit(1)+P1ISmassdeficit(1)+P1HHmassdeficit(1);

percapmass(1)=HH(1)/numHH(1);
ERP(1) = 800;
EE(1) = 0;
CO2eq(1) = 300; %ppm

IP1(1) = 0;
DP1(1) = 0;
IP2(1) = 0;
DP2(1) = 0;
IP3(1) = 0;
DP3(1) = 0;
IH1(1) = 0;
DH1(1) = 0;
IH2(1) = 0;
DH2(1) = 0;
IH3(1) = 0;
DH3(1) = 0;
IC1(1) = 0;
DC1(1) = 0;
IC2(1) = 0;
DC2(1) = 0;
IHH(1) = 0;
DHH(1) = 0;
IIRP(1) = 0;
DIRP(1) = 0;
INRP(1) = 0;
DRP(1) = 0;

%mHH = 0.01;

%mHH1p = mHH;
%mHH2p = mHH / 2;
```

```
%PARAMETROS DE TEMPERATURA
%PARAMETROS DE TEMPERATURA
```

```
atemp(1)= -0.21; % Anomalia de temperatura
temp(1)=25; % Temperatura inicial
tempo=25; % Temperatura óptima
```

```
% Crecimiento de las plantas
gRPP1p = 0.003541127 ;
gRPP2p = 0.009933643;
gRPP3p = 0.000778772 ;
```

```
%PARAMETROS NATURALES
%PARAMETROS NATURALES
```

```
gP2H2 = 0.058687036;
gP2H3 = 0.0168;
gP3H3 = 0.125249403 ;
gH2C1 = 0.366996266 ;
gH2C2 = 0.052509103 ;
gH3C2 = 0.117534846 ;
rIRPP2 = 0.021472781 ;
rIRPP3 = 0.357331692 ;
```

```
mP2 = 0.197313146;
mP3 = 0.186325524 ;
mH2 = 0.0004 ;
mH3 = 0.196123663 ;
mC1 = 0.092105574 ;
mC2 = 0.171458886 ;
mIRPRP = 0 ;
```

```
RPIRP = 0.49337505 ;
gP1H2 = 0.079785 ;
gH1C1 = 0.19963 ;
mP1 = 0.001018295 ;
mH1 = 0.009838862 ;
```

```
%PARAMETROS ECONOMICOS
%PARAMETROS ECONOMICOS
```

```
aw = 0.43853 ;
cw = 0.135718104 ;
dw = 4.51E-06 ;
```

```
aP1 = 0.4968 ;
bP1 = 0.67631 ;
cP1 = 0.12318 ;
aP1p = 0.050392 ;
bP1p = 0.149737492 ;
cP1p = 0.033805381 ;
aH1 = 1.4359 ;
bH1 = 0.001 ;
cH1 = 0.252716513 ;
aH1p = 0.24182 ;
bH1p = 0.049912497 ;
cH1p = 0.26657 ;
aIS = 1.17 ;
bIS = 0.297210307 ;
cIS = 0.001 ;
aISp = 0.3109 ;
bISp = 0.0044 ;
cISp = 0.3313 ;
```

```
dP1H1 = 0.000191077 ;
eP1H1 = 0.049912497 ;
fP1H1 = 0.81332 ;
gP1H1 = 2.9657 ;
```

```

dP1HH = 4.00E-08 ;
zP1HH = 6.00E-08 ;
kP1HH = 1.60E-07 ;
mP1HH = 6.00E-08 ;
nP1HH = 0 ;
dH1HH = 6.00E-08 ;
zH1HH = 3.13E-05 ;
kH1HH = 6.00E-08 ;
mH1HH = 6.00E-08 ;
nH1HH = 0 ;
dISHH = 6.00E-08 ;
zISHH = 5.68E-05 ;
kISHH = 6.00E-08 ;
mISHH = 4.00E-08 ;
nISHH = 2.00E-08 ;

khat = .1;%0.09 ;
theta = 0.101991961 ;
lambda = 0.676677233 ;
% mHH = 0.01;
P1bar = 0 ;
H1bar = 0.4 ;
ISbar = 0 ;
etaa = 0.000271386*52;
etab = 0.00010454*52;
phi = 10 ; %valor de enfermedad
idealpercapmass = 4.51E-04*10000/numHH(1);

%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ito Processes

sigmam=2.34e-05;
sigmab=1.56e-03;

epsilonm1=random('normal',0,1,1,time);
epsilonb1=random('normal',0,1,1,time);
epsilonm2=random('normal',0,1,1,time);
epsilonb2=random('normal',0,1,1,time);

% if Ito == 0
    sigmam(:)=0;
    sigmab(:)=0;
% end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Based on data taken from International Labor Organization
% http://laborsta.ilo.org/STP/guest

% SOCIETY TYPE A - IDEAL
% Two Populations modifications (2P):
% 2P) IEI 1 Income Equality Index
% 2P-a) 75-25 total population; 1 = poor, 2 = rich;
% 2P-b) 75-25 total wages
% 2P-c) 75-25 total P1demand & H1demand
% 2P-d) 75-25 total ISdemand & EEdemand
% 2P-e) 75-25 HH

IEI=1;
numHH1(1)=0.75*numHH(1); %2P-a)
numHH2(1)=0.25*numHH(1); %2P-a)
HH1(1)=HH(1)*.75; %2P-e)
HH2(1)=HH(1)*.25; %2P-e)
phi1=phi; %factor is phi related to deads due healthcare and nutricional issues
phi2=phi/2; %It's assumed that rich people have access to a better healthcare
percapmass1(1)=HH1(1)/numHH1(1);
percapmass2(1)=HH2(1)/numHH2(1);

```

```

% Factors for modification in individual populations variables
% equation systems formed by:
% 1) pop1 + pop2 = total pop
% 2) pop1 - pop2*(ratio of percentages) = 0
Ab=[numHH1(1)/numHH(1) numHH2(1)/numHH;
    numHH1(1)/numHH(1) -(numHH2(1)/numHH)*(75/25)]; %2P-b,d)
Ac=[numHH1(1)/numHH(1) numHH2(1)/numHH;
    numHH1(1)/numHH(1) -(numHH2(1)/numHH)*(75/25)]; %2P-c,e)
Ad=[numHH1(1)/numHH(1) numHH2(1)/numHH;
    numHH1(1)/numHH(1) -(numHH2(1)/numHH)*(75/25)]; %2P-b,d)
bb=[1 0];
f2pb=inv(Ab)*bb';
f2pc=inv(Ac)*bb';
f2pd=inv(Ad)*bb';
f2pe=[.75 .25];

% Wages parameters
aw1=aw*f2pb(1);
aw2=aw*f2pb(2);
cw1=cw*f2pb(1);
cw2=cw*f2pb(2);
dw1=dw*f2pb(1);
dw2=dw*f2pb(2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Based on Kotecha & Diwekar (2010)
% Inclusion of energy concepts %En)
% - Energy producer compartment (EE)
% - Energy Resource Pool compartment (ERP)

%Energy parameters
dEEHH = 6.00E-08; %demand
zEEHH = 5.68E-05; %demand
kEEHH = 6.00E-08; %demand
mEEHH = 4.00E-08; %demand
nEEHH = 2.00E-08; %demand
aEE = aP1; %price
bEE = bP1; %price
cEE = 5000*cP1; %price
gammaEEIS = 1; % (unit of energy / unit of IS)
gammaEEIRP= 0.2; %yield (mass/energy)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Economic Mobility Factor
Wid=0.31; %Ideal wage from stable simulation without EMF
Wgid=0.31*numHH(1); %Ideal global wage
psi=1; %Richness distribution factor

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Greenhouse Gas emission based on:
%-https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html and references
%-Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Working Group III
%-Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental
%-Panel on Climate Change
%-https://www.co2.earth/ and http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html

% 1870-2015: - CO2eq 300-485 ppm aprox, CO2ppm 290-400
% - 545 GtC = 2000 GtCO2 (42% air, 28% ocean, 29% land)
% - 840 GtCO2eq and 185 ppm ---> 0.22024 ppm/GtCO2eq
% 2015: - 400 ppm CO2, 485 ppm CO2eq
% - 10.1 GtC = 37 GtCO2eq aprox

ppmCO2eq=0.22024; % factor para convertir de GtCO2eq a ppm en la atmosfera
GtCO2eqStb= 37; % GtCO2eq aprox emitted in 2015

% Global emissions 2010: - 25% Energy and heat production (EE)

```

```
%
- 24% Agriculture forestry and other land use
(P1, H1 & productions)
%
- 6% Buildings (numHH)
%
- 14% Transportation (numHH)
%
- 21% Industry (IS)
%
- 10% Other energy (EE)
```

```
% Percentage of total emissions per stable value of yGHG
% P1 H1 numHH P1prod H1prod ISprod EEprod P2 P3 RP
percCO2eq=[6 6 20 6 6 21 35 -24 -5 -28];
% negatives came from distribution percentages of emissions been equals for
% P1 and P2 %'s are equally weighted
```

```
% Stable Value of variables producers of GHG (yGHG)
yGHGstb= [0.090108316273598 1.243569877687978 996 ...
0.000770375203888207 0.001427446253809 0.006279712575167 ...
0.012336856254033 5.247311054647068 1.112128665742525 ...
22.415707968618005];
```

```
GtCO2eq= GtCO2eqStb.*(percCO2eq/100)./yGHGstb; %gigatonnes of CO2equivalente emitted by mass unit
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%% STARTING SIMULATION LOOP
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
for i=1:time
%%
% Factores de peso para variables de población total %2P)
% alfa1=numHH1(i)/(numHH1(i)+numHH2(i));
% alfa2=numHH2(i)/(numHH1(i)+numHH2(i));
```

```
alfa1=numHH1(1)/(numHH1(1)+numHH2(1));
alfa2=numHH2(1)/(numHH1(1)+numHH2(1));
```

```
% Demographic params due Case
% Current trends (2014)
mHH1=(-3.25*log(i+55) + 20.536)/1000 + sigmam*epsilon1(i)*sqrt(1);
mHH2=(-0.0103*(i+55) + 9.4329)/1000 + sigmam*epsilon2(i)*sqrt(1);
aa = mHH1;
bb = mHH2;
mHH=mHH1*alfa1+mHH2*alfa2;
cc = mHH;
etaa1= (41.975*exp(-0.013*(i+55))+3)/1000;
%etaa1 = etaa1 * xx(7); % xx es un factor de redimensionamiento 0.9-1.1
etab1=etab;
etaa2=(20.831*exp(-0.012*(i+55))+3)/1000;
%etaa2 = etaa2 * xx(8); % xx es un factor de redimensionamiento 0.9-1.1
etab2=etab;
```

```
%%%%%%%%%FLUJO DE MATERIA RPP1 RPP2 RPP3 en funcion de la temperatura. %%%%%%%%%%
```

```
%PLANTAS
gRPP1=gRPP1p*exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100);
gRPP2=gRPP2p*exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100);
gRPP3=gRPP3p*exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100);
%gRPP1=gRPP1p;
%gRPP2=gRPP2p;
%gRPP3=gRPP3p;
```

```
%HUMANOS
```

```

% mHH1 = - (mHH1p*(exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100))) + (2 * mHH1p);
% mHH2 = - (mHH2p*(exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100))) + (2 * mHH1p * .75);
% mHH1 = - (mHH1*(exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100))) + (2 * mHH1);
% mHH2 = - (mHH2*(exp(-((temp(i)-tempo)^2)/100))) + (2 * mHH1 * .75);
% mHH=mHH1*alfa1+mHH2*alfa2;
mHH = - (mHH.*(exp(-((temp(i)-tempo).^2)/100))) + (2. * mHH);

dd = mHH1;
ee = mHH2;
ff = mHH;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CALCULO DE TEMPERATURA %%%%%%%%%%

atemp(i+1)=0.010008*CO2eq(i) - 3.21675;
temp(i+1)= tempo+atemp(i+1);

% mHH=mHH1*alfa1+mHH2*alfa2;

%% I. Economics

% Industrial sector sets the wage rate
%W=max(aw+cw*(ISbar-(ISmassdeficit(i)+ISmass(i)))/(theta+lambda)-dw*numHH(i),0);
W1=max(aw1+cw1*(ISbar-(ISmassdeficit(i)+ISmass(i)))/(theta+lambda)-dw1*numHH(i),0); %2P-b)
W2=max(aw2+cw2*(ISbar-(ISmassdeficit(i)+ISmass(i)))/(theta+lambda)-dw2*numHH(i),0); %2P-b)
W=W1*alfa1 + W2*alfa2;

% Economic Mobility Factor
EMF=psi*((Wgid-W*numHH(i))/Wgid);
if EMF*numHH(i)>numHH1(i)
    EMF=numHH1(i)/numHH(i);
end
if EMF*numHH(i)<(-numHH2(i))
    EMF=numHH2(i)/numHH(i);
end

%% Precio y Produccion de sectores economicos P1, H1, IS y EP

% Con base en el salario, las industrias establecen precios y su producción
% (cuánto les gustaría producir para maximizar sus ganancias en función de
% su suposición de cuál será la demanda de sus productos). Aquí se supone
% una forma funcional lineal para el suministro.

if P1(i)==0
    pP1=0;
    P1production=0;
else
    pP1=max(aP1+bP1*W-cP1*((P1massdeficit(i)+P1(i))-P1bar),0);
    P1production=max(aP1p-bP1p*W-cP1p*((P1massdeficit(i)+P1(i))-P1bar),0);
end

if H1(i)==0
    pH1=0;
    H1production=0;
else
    pH1=max(aH1+bH1*W-cH1*((H1massdeficit(i)+H1(i))-H1bar),0);
    H1production=max(aH1p-bH1p*W-cH1p*((H1massdeficit(i)+H1(i))-H1bar),0);
end

if HH(i) == 0 || numHH(i) < 20
    pIS=0;
    ISproduction=0;
else
    pIS=max(aIS+bIS*W+cIS*(ISbar-(ISmassdeficit(i)+ISmass(i)))/...
        (theta+lambda),0);
    ISproduction=max(aISp-bISp*W+cISp*(ISbar-(ISmassdeficit(i)+ISmass(i)))/...
        /(theta+lambda),0);
end

```

```

if HH(i) == 0 || numHH(i) < 20                                % En)
    pEE=0;
else
    pEE=max(aEE + bEE*W + (cEE/ERP(i)),0);
end

%% II. Demanda

%A continuación, se calcula cuánto demandará cada industria a sus
%proveedores. Los siguientes están en unidades de masa, a menos que
%se indique lo contrario

if H1(i)==0||HH(i)==0||numHH(i)<20
    P1H1demand=0;
    P2H1=0;
else
    P1H1demand=max(dP1H1 - cP1H1 * W - fP1H1 * pP1 - gP1H1 * ((H1massdeficit(i)+H1(i))...
        -H1bar),0);
    P2H1=khat;
end

%Las expresiones para P1HH, H1HH e ISHH reflejan restricciones en el
%gasto humano. Estas expresiones están en forma explícita. Estos son
%per cápita, por lo que deben multiplicarse por la población más tarde

if HH(i)==0||numHH(i)<20
    P1HHdemand=0;
    H1HHdemand=0;
    ISHHdemand=0;
    EEHHdemand=0;
else
    P1HHdemand=max((1/(-1+zP1HH+zH1HH+zISHH))*...
        (-dP1HH-mP1HH*pH1-nP1HH*pIS+kP1HH*pP1-dH1HH*zP1HH-...
        dISHH*zP1HH+mH1HH*pH1*zP1HH-mISHH*pH1*zP1HH-nH1HH*pIS*zP1HH+...
        nISHH*pIS*zP1HH-kH1HH*pP1*zP1HH-kISHH*pP1*zP1HH+dP1HH*zH1HH+...
        mP1HH*pH1*zH1HH+nP1HH*pIS*zH1HH-kP1HH*pP1*zH1HH+dP1HH*zISHH+...
        mP1HH*pH1*zISHH+nP1HH*pIS*zISHH-kP1HH*pP1*zISHH),0)*50;

    H1HHdemand=max((1/(-1+zP1HH+zH1HH+zISHH))*...
        (-dH1HH+mH1HH*pH1-nH1HH*pIS-kH1HH*pP1+dH1HH*zP1HH-...
        mH1HH*pH1*zP1HH+nH1HH*pIS*zP1HH+kH1HH*pP1*zP1HH-dISHH*zH1HH-...
        dP1HH*zH1HH-mISHH*pH1*zH1HH-mP1HH*pH1*zH1HH+nISHH*pIS*zH1HH-...
        nP1HH*pIS*zH1HH-kISHH*pP1*zH1HH+kP1HH*pP1*zH1HH+dH1HH*zISHH-...
        mH1HH*pH1*zISHH+nH1HH*pIS*zISHH+kH1HH*pP1*zISHH),0)*50;

    ISHHdemand=max(-((dISHH+mISHH*pH1-nISHH*pIS+kISHH*pP1-...
        dISHH*zP1HH-mISHH*pH1*zP1HH+nISHH*pIS*zP1HH-kISHH*pP1*zP1HH-...
        dISHH*zH1HH-mISHH*pH1*zH1HH+nISHH*pIS*zH1HH-kISHH*pP1*zH1HH+...
        dH1HH*zISHH+dP1HH*zISHH-mH1HH*pH1*zISHH+mP1HH*pH1*zISHH+...
        nH1HH*pIS*zISHH+nP1HH*pIS*zISHH+kH1HH*pP1*zISHH-...
        kP1HH*pP1*zISHH)/(-1+zP1HH+zH1HH+zISHH)),0)*50;

    EEHHdemand=max(-((dEEHH+mEEHH*pH1-nEEHH*pEE+kEEHH*pP1-... % En)
        dEEHH*zP1HH-mEEHH*pH1*zP1HH+nEEHH*pEE*zP1HH-kEEHH*pP1*zP1HH-...
        dEEHH*zH1HH-mEEHH*pH1*zH1HH+nEEHH*pEE*zH1HH-kEEHH*pP1*zH1HH+...
        dH1HH*zEEHH+dP1HH*zEEHH-mH1HH*pH1*zEEHH+mP1HH*pH1*zEEHH+...
        nH1HH*pEE*zEEHH+nP1HH*pEE*zEEHH+kH1HH*pP1*zEEHH-...
        kP1HH*pP1*zEEHH)/(-1+zP1HH+zH1HH+zEEHH)),0)*50;

% xP1HHdemand = 1/3*(-(P1HH*pEE-3*dP1HH+3*kP1HH*pP1-mP1HH*pH1+zH1HH*nP1HH*pIS+zH1HH*tP1HH*pEE-
nP1HH*pIS-3*zP1HH*dH1HH-zP1HH*kH1HH*pP1+3*zP1HH*mH1HH*pH1-zP1HH*nH1HH*pIS-
zP1HH*tH1HH*pEE+3*zH1HH*dP1HH-3*zH1HH*kP1HH*pP1+zH1HH*mP1HH*pH1-3*zP1HH*dISHH-zP1HH*kISHH*pP1-
zP1HH*mISHH*pH1+3*zP1HH*nISHH*pIS-zP1HH*tISHH*pEE+3*zISHH*dP1HH-
3*zISHH*kP1HH*pP1+zISHH*mP1HH*pH1+zISHH*nP1HH*pIS+zISHH*tP1HH*pEE-3*zP1HH*dEEHH-zP1HH*kEEHH*pP1-
zP1HH*mEEHH*pH1-zP1HH*nEEHH*pIS+3*zP1HH*tEEHH*pEE+3*zEEHH*dP1HH-
3*zEEHH*kP1HH*pP1+zEEHH*mP1HH*pH1+zEEHH*nP1HH*pIS+zEEHH*tP1HH*pEE)/(-1+zP1HH+zH1HH+zISHH+zEEHH));

```

```
%
xHHdemand = -1/3*(-3*mHH*pH1+zHH*nHH*pIS+zHH*tHH*pEE-
zSHH*kHH*pP1+3*zSHH*mHH*pH1+nHH*pIS+tHH*pEE+3*dHH+kHH*pP1-3*zP1H*dHH-
zP1H*kHH*pP1+3*zP1H*mHH*pH1-zP1H*nHH*pIS-zP1H*tHH*pEE+3*zH1H*dP1H-
3*zH1H*kP1H*pP1+zH1H*mP1H*pH1+3*zH1H*dSHH+zH1H*kSHH*pP1+zH1H*mSHH*pH1-
3*zH1H*nSHH*pIS+zH1H*tSHH*pEE-3*zSHH*dHH-zSHH*nHH*pIS-zSHH*tHH*pEE+zH1H*kEEH*pP1-
zEEH*nHH*pIS+3*zEEH*mHH*pH1+zH1H*mEEH*pH1-3*zH1H*tEEH*pEE-zEEH*kHH*pP1-
zEEH*tHH*pEE+zH1H*nEEH*pIS-3*zEEH*dHH+3*zH1H*dEEH)/(-1+zP1H+zH1H+zSHH+zEEH);

%
xSHHdemand = -1/3*(zSHH*nEEH*pIS+zSHH*kEEH*pP1-tSHH*pEE*zEEH+3*nSHH*pIS*zEEH-
kSHH*pP1*zEEH-3*dSHH*zEEH+zSHH*mEEH*pH1-3*zSHH*tEEH*pEE+3*zSHH*dEEH-
mSHH*pH1*zEEH+mSHH*pH1+zSHH*kHH*pP1-3*zSHH*mHH*pH1-
3*nSHH*pIS+3*dSHH+kSHH*pP1+tSHH*pEE-3*zP1H*dSHH-zP1H*kSHH*pP1-
zP1H*mSHH*pH1+3*zP1H*nSHH*pIS-zP1H*tSHH*pEE+3*zSHH*dP1H-
3*zSHH*kP1H*pP1+zSHH*mP1H*pH1+zSHH*nP1H*pIS+zSHH*tP1H*pEE-3*zH1H*dSHH-zH1H*kSHH*pP1-
zH1H*mSHH*pH1+3*zH1H*nSHH*pIS-zH1H*tSHH*pEE+3*zSHH*dHH+zSHH*nHH*pIS+zSHH*tHH*pEE)/(-
1+zP1H+zH1H+zSHH+zEEH);

%
xEEHdemand = -1/3*(-zSHH*nEEH*pIS-zSHH*kEEH*pP1+tSHH*pEE*zEEH-
3*nSHH*pIS*zEEH+kSHH*pP1*zEEH+3*dSHH*zEEH-zSHH*mEEH*pH1+3*zSHH*tEEH*pEE-
3*zSHH*dEEH+mSHH*pH1*zEEH+3*dEEH+kEEH*pP1+mEEH*pH1+nEEH*pIS-3*tEEH*pEE-3*zP1H*dEEH-
zP1H*kEEH*pP1-zP1H*mEEH*pH1-zP1H*nEEH*pIS+3*zP1H*tEEH*pEE+3*zEEH*dP1H-
3*zEEH*kP1H*pP1+zEEH*mP1H*pH1+zEEH*nP1H*pIS+zEEH*tP1H*pEE-
zH1H*kEEH*pP1+zEEH*nHH*pIS-3*zEEH*mHH*pH1-
zH1H*mEEH*pH1+3*zH1H*tEEH*pEE+zEEH*kHH*pP1+zEEH*tHH*pEE-
zH1H*nEEH*pIS+3*zEEH*dHH-3*zH1H*dEEH)/(-1+zP1H+zH1H+zSHH+zEEH);

end

P1HHdemand1=P1HHdemand*f2pc(1); %2P-c
P1HHdemand2=P1HHdemand*f2pc(2); %2P-c
H1HHdemand1=H1HHdemand*f2pc(1); %2P-c
H1HHdemand2=H1HHdemand*f2pc(2); %2P-c
ISHHdemand1=ISHHdemand*f2pd(1); %2P-d
ISHHdemand2=ISHHdemand*f2pd(2); %2P-d
EEHHdemand1=EEHHdemand*f2pd(1); %2P-d % En
EEHHdemand2=EEHHdemand*f2pd(2); %2P-d % En

P1HHdemand=(P1HHdemand1*alfa1+P1HHdemand2*alfa2);
H1HHdemand=(H1HHdemand1*alfa1+H1HHdemand2*alfa2);
ISHHdemand=(ISHHdemand1*alfa1+ISHHdemand2*alfa2);
EEHHdemand=(EEHHdemand1*alfa1+EEHHdemand2*alfa2); % En

% Energy demands % En
EEHhtotdemand=EEHHdemand*numHH(i);
EEISdemand=ISproduction*gammaEEIS;

%Los flujos que involucran mano de obra para evitar que la naturaleza
%tome domesticos, es decir, P1H2 y H1C2, deben calcularse.
if P1(i)==0|| H2(i)==0
    P1H2=0;
else
    P1H2=max((gRPP1*P1(i)*RP(i)-mP1*P1(i)-P1production),0);
end

if H1(i)==0||C1(i)==0
    H1C1=0;
else
    H1C1=max((P1H1demand+P2H1-mH1*H1(i)-H1production),0);
end

%Si no hay humanos, el consumo de P1H2 y H1C1 es natural (Lokta-Volterra)
if HH(i)==0||numHH(i)<20
    P1H2=gP1H2*P1(i)*H2(i);
    H1C1=gH1C1*H1(i)*C1(i);
end

P1ISdemand=theta*ISproduction;
RPISdemand=lambda*ISproduction;
```

%% III. Calculate all but next state, according to system equations.

% (Asegúrese de que se cumple el balance de masa y no tiene
% compartimentos negativos).

% P1

P1RP=max(mP1*P1(i),0);

RPP1=max(gRPP1*P1(i)*RP(i),0);

P1H1=P1H1demand;

P1IS=P1ISdemand;

P1HH=P1HHdemand*numHH(i);

%if statement to deal with going negative

if P1(i)+RPP1-P1RP-P1H2-P1H1-P1HH-P1IS<0

if P1(i)+RPP1-P1RP<0

P1RP=P1(i)+RPP1;

P1H2=0;

P1H1=0;

P1HH=0;

P1IS=0;

else

totP1demand=P1H2+P1H1+P1HH+P1IS;

P1avail=P1(i)+RPP1-P1RP;

P1H2=P1avail*P1H2/totP1demand;

P1H1=P1avail*P1H1/totP1demand;

P1HH=P1avail*P1HH/totP1demand;

P1IS=P1avail-(P1H2+P1H1+P1HH);

end

else

if P1massdeficit(i)<0 %if there is an accumulated deficit between

% demand for P1 try to make this up if there is extra stock

% only what you need to make up deficit

P1surplus=min(P1(i)+RPP1-P1RP-P1H2-P1H1-P1HH-P1IS,-P1massdeficit(i));

P1H1=P1H1+P1surplus*P1H1massdeficit(i)/P1massdeficit(i);

P1IS=P1IS+P1surplus*P1ISmassdeficit(i)/P1massdeficit(i);

P1HH=P1HH+P1surplus*P1HHmassdeficit(i)/P1massdeficit(i);

end

end

% P2

P2H2=gP2H2*P2(i)*H2(i);

P2H3=gP2H3*P2(i)*H3(i);

P2RP=max(mP2*P2(i),0);

RPP2=max(gRPP2*RP(i)*P2(i),0);

IRPP2=max(rIRPP2*P2(i)*RP(i),0);

P3RP=max(mP3*P3(i),0);

P3H3=gP3H3*P3(i)*H3(i);

RPP3=max(gRPP3*RP(i)*P3(i),0);

IRPP3=max(rIRPP3*P3(i)*RP(i),0);

if IRP(i)<=0

IRPP2=0;

IRPP3=0;

elseif IRP(i)-IRPP2-IRPP3-max(IRP(i)*mIRPP,0)+RPIRP<0

if P2(i)~=0

IRPP2=rIRPP2*(IRP(i)-max(IRP(i)*mIRPP,0)+RPIRP)/(rIRPP2+rIRPP3);

end

if P3(i)~=0

IRPP3=rIRPP3*(IRP(i)-max(IRP(i)*mIRPP,0)+RPIRP)/(rIRPP2+rIRPP3);

end

end

if P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP-P2H2-P2H3-P2H1<belownoreproduction

if P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP<belownoreproduction

P2RP=P2(i)+IRPP2+RPP2;

P2H2=0;

P2H3=0;

P2H1=0;

else

totP2demand=P2H2+P2H3+P2H1;

P2avail=P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP;

P2H2=P2H2*P2avail/totP2demand;

P2H3=P2H3*P2avail/totP2demand;

P2H1=P2avail-(P2H2+P2H3);

```

end
end

% P3
if P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP-P3H3<belownoreproduction
    if P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP<belownoreproduction
        P3RP=P3(i)+IRPP3+RPP3;
        P3H3=0;
    else
        totP3demand=P3H3;
        P3avail=P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP;
        P3H3=P3H3*P3avail/totP3demand;
    end
end

% H1
H1RP=max(mH1*H1(i),0);
H1HH=H1HHdemand*numHH(i);
if H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP-H1C1-H1HH<0
    if H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP<0
        H1RP=H1(i)+P1H1+P2H1;
        H1C1=0;
        H1HH=0;
    else
        totH1demand=H1C1+H1HH;
        H1avail=H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP;
        H1C1=H1avail*H1C1/totH1demand;
        H1HH=H1avail-H1C1;
    end
end
else
    if H1massdeficit(i)<0
        H1HH=H1HH+min(H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP-H1C1-H1HH,-H1massdeficit(i));
        %only what you need to make up deficit
    end
end

% H2
H2C1=gH2C1*C1(i)*H2(i);
H2C2=gH2C2*H2(i)*C2(i);
H2RP=max(mH2*H2(i),0);
if H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP-H2C1-H2C2<belownoreproduction
    if H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP<belownoreproduction
        H2RP=H2(i)+P1H2+P2H2;
        H2C1=0;
        H2C2=0;
    else
        totH2demand=H2C1+H2C2;
        H2avail=H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP;
        H2C1=H2C1*H2avail/totH2demand;
        H2C2=H2avail-H2C1;
    end
end

% H3
H3RP=max(mH3*H3(i),0);
H3C2=gH3C2*H3(i)*C2(i);
if H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP-H3C2<belownoreproduction
    if H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP<belownoreproduction
        H3RP=H3(i)+P2H3+P3H3;
        H3C2=0;
    else
        totH3demand=H3C2;
        H3avail=H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP;
        H3C2=H3C2*H3avail/totH3demand;
    end
end

% C1
C1RP=max(mC1*C1(i),0);
if C1(i)+H1C1+H2C1-C1RP<belownoreproduction

```

```

    C1RP=C1(i)+H1C1+H2C1;
end

% C2
C2RP=max(mC2*C2(i),0);
if C2(i)+H2C2+H3C2-C2RP<belownreproduction
    C2RP=C2(i)+H2C2+H3C2;
end

% HH
HHRP=ceil(mHH*numHH(i))*percapmass(i);
if HHRP>(HH(i)+P1HH+H1HH)
    HHRP=(HH(i)+P1HH+H1HH);
end

% RP
IRPRP=max(IRP(i)*mIRPRP,0);
RPIS=min(lambda*P1IS/theta,RPISdemand);
stockRP=RP(i)+P1RP+P2RP+P3RP+H1RP+H2RP+H3RP+C1RP+C2RP+HHRP+IRPRP;
if stockRP<0
    stockRP=0;
end
if (stockRP-(RPP1+RPP2+RPP3)-RPIRP-RPIS) <= 0 && RPIRP == 0
    RPdemand=RPP1+RPP2+RPP3+RPISdemand;
    RPP1=RPP1*stockRP/RPdemand;
    RPP2=RPP2*stockRP/RPdemand;
    RPP3=RPP3*stockRP/RPdemand;
    if RPIS~=0
        RPIS=stockRP-(RPP1+RPP2+RPP3);
    else
        RPIS=0;
    end
end
P1IS=min(theta*RPIS/lambda,P1IS);

% ERP                                     % En)
if ERP(i)>0
    EEproduction = EEHHtotdemand + EEISdemand;
    EEHHmass = EEHHtotdemand*gammaEEIRP;
    ERPEE=EEproduction*gammaEEIRP;
    if ((ERP(i)-ERPEE)<0)
        ERPEE = ERP(i);
        ERP(i) = 0;
    end
    EEIRP=ERPEE;
else
    pEE = 0;
    EEproduction = 0;
    EEHHmass = 0;
    ERPIRP = 0;
    EEHHtotdemand = 0;
    EEISdemand = 0;
    EEHHdemand = 0;
end

%%%% III.A. make checks again, to balance flows
% P1
if P1(i)+RPP1-P1RP-P1H2-P1H1-P1HH-P1IS<0 %if statement to deal with going negative
    if P1(i)+RPP1-P1RP<0
        P1RP=P1(i)+RPP1;
        P1H2=0;
        P1H1=0;
        P1HH=0;
        P1IS=0;
    else
        totP1demand=P1H2+P1H1+P1HH+P1IS;
        P1avail=P1(i)+RPP1-P1RP;
        P1H2=P1avail*P1H2/totP1demand;
        P1H1=P1avail*P1H1/totP1demand;
    end
end

```

```

    P1HH=P1avail*P1HH/totP1demand;
    P1IS=P1avail-(P1H2+P1H1+P1HH);
end
else
    if P1massdeficit(i)<0 %if there is an accumulated deficit between
        % demand for P1 try to%make this up if there is extra stock
        P1surplus=min(P1(i)+RPP1-P1RP-P1H2-P1H1-P1HH-P1IS,-P1massdeficit(i));
        %only what you need to make up deficit
        P1H1=P1H1+P1surplus*P1H1massdeficit(i)/P1massdeficit(i);
        P1IS=P1IS+P1surplus*P1ISmassdeficit(i)/P1massdeficit(i);
        P1HH=P1HH+P1surplus*P1HHmassdeficit(i)/P1massdeficit(i);
    end
end

% P2
if IRP(i)<=0
    IRPP2=0;
    IRPP3=0;
elseif IRP(i)-IRPP2-IRPP3-max(IRP*mIRPRP,0)+RPIRP<0
    if P2(i)~=0
        IRPP2=rIRPP2*(IRP(i)-max(IRP(i)*mIRPRP,0)+RPIRP)/(rIRPP2+rIRPP3);
    end
    if P3~=0
        IRPP3=rIRPP3*(IRP(i)-max(IRP(i)*mIRPRP,0)+RPIRP)/(rIRPP2+rIRPP3);
    end
end
if P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP-P2H2-P2H3-P2H1<belownoreproduction
    if P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP<belownoreproduction
        P2RP=P2(i)+IRPP2+RPP2;
        P2H2=0;
        P2H3=0;
        P2H1=0;
    else
        totP2demand=P2H2+P2H3+P2H1;
        P2avail=P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP;
        P2H2=P2H2*P2avail/totP2demand;
        P2H3=P2H3*P2avail/totP2demand;
        P2H1=P2avail-(P2H2+P2H3);
    end
end

% P3
if P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP-P3H3<belownoreproduction
    if P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP<belownoreproduction
        P3RP=P3(i)+IRPP3+RPP3;P3H3=0;
    else totP3demand=P3H3;
        P3avail=P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP;
        P3H3=P3H3*P3avail/totP3demand;
    end
end

% H1
if H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP-H1C1-H1HH<0
    if H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP<0
        H1RP=H1(i)+P1H1+P2H1;
        H1C1=0;
        H1HH=0;
    else
        totH1demand=H1C1+H1HH;
        H1avail=H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP;
        H1C1=H1avail*H1C1/totH1demand;
        H1HH=H1avail-H1C1;
    end
end
else
    if H1massdeficit(i)<0
        H1HH=H1HH+min(H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP-H1C1-H1HH,-H1massdeficit(i));
        %only what you need to make up deficit
    end
end
end

```

```

% H2
if H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP-H2C1-H2C2<belownoreproduction
    if H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP<belownoreproduction
        H2RP=H2(i)+P1H2+P2H2;
        H2C1=0;
        H2C2=0;
    else
        totH2demand=H2C1+H2C2;
        H2avail=H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP;
        H2C1=H2C1*H2avail/totH2demand;
        H2C2=H2avail-H2C1;
    end
end

% H3
if H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP-H3C2<belownoreproduction
    if H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP<belownoreproduction
        H3RP=H3(i)+P2H3+P3H3;
        H3C2=0;
    else
        totH3demand=H3C2;
        H3avail=H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP;
        H3C2=H3C2*H3avail/totH3demand;
    end
end

% C1
if C1(i)+H1C1+H2C1-C1RP<belownoreproduction
    C1RP=C1(i)+H1C1+H2C1;
end

% C2
if C2(i)+H2C2+H3C2-C2RP<belownoreproduction
    C2RP=C2(i)+H2C2+H3C2;
end

% HH
HHRP=ceil(mHH*numHH(i))*percapmass(i);
if HHRP>(HH(i)+P1HH+H1HH)
    HHRP=(HH(i)+P1HH+H1HH);
end

%% IV. Demographic

ISHHflow=max((theta+lambda)*ISHHdemand*numHH(i),0);
ISIRP=ISHHflow;
if ISmass(i)+P1IS+RPIS-ISIRP<=0
    ISIRP=ISmass(i)+P1IS+RPIS;
else
    if ISmassdeficit(i)<0&&numHH(i)>=2 %if there is an accumulated deficit
        % between demand for IS by the HH and IS supplied, try to make
        % this up if there is extra stock
        ISIRP=ISIRP+min(ISmass(i)+P1IS+RPIS-ISIRP,-ISmassdeficit(i));
        %only what you need to make up deficit
    end
end

if (P1HH+H1HH+ISIRP)==0
    weightedprice=0;
    percapbirths=0;
    percapbirths1=0;
    percapbirths2=0;
elseif (pP1*P1HH+pH1*H1HH+pIS*ISIRP)==0
    weightedprice=0;
    percapbirths=0;
    percapbirths1=0;
    percapbirths2=0;
else
    %weightedprice=(pP1*P1HH+pH1*H1HH+pIS*ISIRP)/(P1HH+H1HH+ISIRP);
    weightedprice=(pP1*P1HH+pH1*H1HH+pIS*ISIRP+pEE*EEHHmass)/(P1HH+H1HH+ISIRP+EEHHmass); % En
end

```

```
%percapbirths=max(etaa-eta*W/weightedprice+etac*(W/weightedprice)^2,0);
%percapbirths=max(etaa-eta*sqrt(W/weightedprice),0);
percapbirths1=max(etaa1-eta1*sqrt(W/weightedprice)...
+ sigmab*epsilonb1(i)*sqrt(1),0); %2P-a)
percapbirths2=max(etaa2-eta2*sqrt(W/weightedprice)...
+ sigmab*epsilonb2(i)*sqrt(1),0); %2P-a)
percapbirths=percapbirths1*alfa1+percapbirths2*alfa2;
end
```

```
%%%%%%%%% Next Step %%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
P1(i+1) = P1(i)+RPP1-P1RP-P1H2-P1H1-P1HH-P1IS;
IP1(i+1) = RPP1;
DP1(i+1) = P1RP+P1H1+P1H2+P1HH+P1IS;
```

```
if P1==0
    P1H1demand=0;
    P1ISdemand=0;
    P1HHdemand=0;
    P1HHdemand1=0;
    P1HHdemand2=0;
end
P1H1massdeficit(i+1)=P1H1massdeficit(i)+P1H1-P1H1demand;
P1ISmassdeficit(i+1)=P1ISmassdeficit(i)+P1IS-P1ISdemand;
P1HHmassdeficit(i+1)=P1HHmassdeficit(i)+P1HH-P1HHdemand*numHH(i);
P1massdeficit(i+1)=P1H1massdeficit(i+1)+P1ISmassdeficit(i+1)+...
    P1HHmassdeficit(i+1);
```

```
P2(i+1) = P2(i)+IRPP2+RPP2-P2RP-P2H2-P2H3-P2H1;
IP2(i+1) = RPP2+IRPP2;
DP2(i+1) = P2RP+P2H1+P2H2+P2H3;
```

```
P3(i+1) = P3(i)+IRPP3+RPP3-P3RP-P3H3;
IP3(i+1) = RPP3+IRPP3;
DP3(i+1) = P3RP+P3H3;
```

```
H1(i+1) = H1(i)+P1H1+P2H1-H1RP-H1C1-H1HH;
IH1(i+1) = P1H1+P2H1;
DH1(i+1) = H1RP+H1C1+H1HH;
```

```
if H1==0
    H1HHdemand=0;
    H1HHdemand1=0;
    H1HHdemand2=0;
end
H1massdeficit(i+1)=H1massdeficit(i)+H1HH-H1HHdemand*numHH(i);
```

```
H2(i+1) = H2(i)+P1H2+P2H2-H2RP-H2C1-H2C2;
IH2(i+1) = P1H2+P2H2;
DH2(i+1) = H2RP+H2C1+H2C2;
```

```
H3(i+1) = H3(i)+P2H3+P3H3-H3RP-H3C2;
IH3(i+1) = P2H3+P3H3;
DH3(i+1) = H3RP+H3C2;
```

```
C1(i+1)= C1(i)+H1C1+H2C1-C1RP;
IC1(i+1)= H1C1+H2C1;
DC1(i+1)=C1RP;
```

```

C2(i+1)= C2(i)+H2C2+H3C2-C2RP;
IC2(i+1)= H2C2+H3C2;
DC2(i+1)= C2RP;

HH(i+1) = HH(i)+P1HH+H1HH-HHRP;
IHH(i+1) = P1HH+H1HH;
DHH(i+1) = HHRP;

    HH1(i+1)=HH(i+1)*f2pe(1);                %2P-e)
    HH2(i+1)=HH(i+1)*f2pe(2);                %2P-e)

ISmass(i+1)=ISmass(i)+P1IS+RPIS-ISIRP;

ISmassdeficit(i+1) = ISmassdeficit(i)+ISIRP-ISHHflow;

%IRP(i+1) = IRP(i)-IRPP2-IRPP3+RPIRP+ISIRP-IRPRP;
IRP(i+1) = IRP(i)-IRPP2-IRPP3+RPIRP+ISIRP-IRPRP + EEIRP;
IIRP(i+1) = RPIRP+ISIRP+EEIRP;
DIRP(i+1) = IRPP2+IRPP3+IRPRP;

RP(i+1) = stockRP-(RPP1+RPP2+RPP3)-RPIRP-RPIS;
INRP(i+1) = stockRP;
DRP(i+1) = RPP1+RPP2+RPP3+RPIRP+RPIS;

ERP(i+1) = ERP(i) - EEIRP;                    % En)

EE(i+1) = EE(i) + ERPEE - EEIRP;              % En)

%numHH(i+1)=max(numHH(i)+ceil(percapbirths*numHH(i))-...
%   ceil(mHH*numHH(i))-...
%   ceil(numHH(i)*phi*(percapmass(i)-idealpercapmass)^2),1);

%   numHH1(i+1)=max(numHH1(i)+ceil(percapbirths1*numHH1(i))-...   %2P-a)
%   ceil(mHH1*numHH1(i))-...
%   ceil(numHH1(i)*(phi-phi1)*(percapmass1(i)-idealpercapmass)^2)...
%   -round(EMF*numHH(i),1);

    numHH1(i+1)=max(numHH1(i)+ceil(percapbirths1*numHH1(i))-...   %2P-a)
    ceil(mHH1*numHH1(i))-...
    ceil(numHH1(i)*(phi-phi1)*(percapmass1(i)-idealpercapmass)^2),1);

%   numHH2(i+1)=max(numHH2(i)+ceil(percapbirths2*numHH2(i))-...   %2P-a)
%   ceil(mHH2*numHH2(i))-...
%   ceil(numHH2(i)*(phi-phi2)*(percapmass2(i)-idealpercapmass)^2)...
%   +round(EMF*numHH(i),1);

    numHH2(i+1)=max(numHH2(i)+ceil(percapbirths2*numHH2(i))-...   %2P-a)
    ceil(mHH2*numHH2(i))-...
    ceil(numHH2(i)*(phi-phi2)*(percapmass2(i)-idealpercapmass)^2),1);

%numHH(i+1)=numHH1(i+1) + numHH2(i+1);

numHH(i+1)=max(numHH(i)+ceil(percapbirths*numHH(i))-...   %2P-a)
    ceil(mHH*numHH(i))-...
    ceil(numHH(i)*(phi-phi1)*(percapmass(i)-idealpercapmass)^2),1);

%percapmass(i+1)=HH(i+1)/numHH(i+1);
percapmass1(i+1)=HH1(i+1)/numHH1(i+1);                %2P-a)
percapmass2(i+1)=HH2(i+1)/numHH2(i+1);                %2P-a)
percapmass(i+1)= alfa1*percapmass1(i+1) + alfa2*percapmass2(i+1);

yGHG=[P1(i) H1(i) numHH(i) P1production H1production ISproduction ...
    EEproduction P2(i) P3(i) RP(i)];

CO2eq(i+1)=CO2eq(i) + sum(yGHG.*GtCO2eq)*ppmCO2eq; %In ppm

```

```

%1 2 3 4 5 6 7 8
% x(i,:)= [P1RP P1H1 P1H2 P1IS P1HH P2RP P2H1 P2H2 ...
%          %9 10 11 12 13 14 15 16
%          P2H3 P3RP P3H3 H1RP H1C1 H1HH H2RP H2C1 ...
%          %17 18 19 20 21 22 23 24
%          H2C2 H3RP H3C2 C1RP C2RP HHRP ISIRP RPP1 ...
%          %25 26 27 28 29 30 31
%          RPP2 RPP3 RPIS IRPP2 IRPP3 IRPRP P1HHdemand ...
%          %32 33 34 35
%          H1HHdemand ISHHdemand P1ISdemand RPISdemand ...
%          %36 37 38 39 40
%          P1production H1production ISproduction pP1 pH1 ...
%          %41 42 43 44
%          pIS percapbirths weightedprice W];

x(i,:)= [P1RP P1H1 P1H2 P1IS P1HH P2RP P2H1 P2H2...
P2H3 P3RP P3H3 H1RP H1C1 H1HH H2RP H2C1 ...
H2C2 H3RP H3C2 C1RP C2RP HHRP ISIRP RPP1 ...
RPP2 RPP3 RPIS IRPP2 IRPP3 IRPRP P1HHdemand ...
H1HHdemand ISHHdemand P1ISdemand RPISdemand ...
P1production H1production ISproduction pP1 pH1 ...
pIS percapbirths weightedprice W ...
W1 W2 P1HHdemand1 P1HHdemand2 H1HHdemand1 H1HHdemand2 ...
ISHHdemand1 ISHHdemand2 EEHHdemand1 EEHHdemand2 pEE ...
EEHHdemand EEHHtotdemand EEISdemand EEproduction EEHHmass ...
EEIRP percapbirths1 percapbirths2 mHH1 mHH2 EMF round(EMF*numHH(i)) ...
gRPP1 gRPP2 gRPP3 mHH aa bb cc dd ee ff];

%Z = -W(end);

%71
end
%1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
y=[P1' P2' P3' H1' H2' H3' C1' C2' HH' ISmass' RP' IRP' numHH' ...
percapmass' P1H1massdeficit' P1ISmassdeficit' P1HHmassdeficit'...
H1massdeficit' ISmassdeficit' numHH1' numHH2' HH1' HH2' ERP' EE' ...
CO2eq' temp' IP1' DP1' IP2' DP2' IP3' DP3' IH1' DH1' IH2' DH2' IH3' DH3'...
IC1' DC1' IC2' DC2' IH3' DH3' IIRP' DIRP' INRP' DRP'];

% 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39
% CO2eq' temp' IP1' DP1' IP2' DP2' IP3' DP3' IH1' DH1' IH2' DH2' IH3' DH3'

% 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49
% IC1' DC1' IC2' DC2' IH3' DH3' IIRP' DIRP' INRP' DRP'

FISHER

% Z1 correspondiente a la beneficio de la dimensión ambiental
Z1 = temp(end); %max (función original)

% Z2 correspondiente a la beneficio de la dimensión económica
Z2 = std(P1) + std(H1) + std(ISmass) + std(EEIRP);

% Función promedio de cada evaluacion/funcion, como el final de la simulacion, tienen la misma importancia al optimizar, estabilizando
lo mayor posible la información de fisher y aun así obteniendo grandes resultados.
%Z = sum((F1 - mean(FI)).^2) + 100*sum((F1(end) - mean(FI)).^2); %MEJORES RESULTADOS FI

% Z3 correspondiente a la beneficio de la dimensión social
Z3 = -sum(HH);

% Z multiobjetivo final
Z = sqrt((Z1-29.5055)^2+(Z2-0.011)^2+(Z3-(-38.9265))^2);

end

```