



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ALCANZANDO LOS 17 OBJETIVOS DE DESARROLLO
SOSTENIBLE DENTRO DE LOS 9 LÍMITES PLANETARIOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN MATEMÁTICAS APLICADAS

P R E S E N T A :

JONATAN BLANK HALL

TUTOR

DRA. LIZBETH NARANJO ALBARRÁN



CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

La Humanidad, a través de las Naciones Unidas, acordó en el año 2015 cumplir 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, estableciendo como fecha límite el año 2030. 14 de los Objetivos son de índole socio-económico, mientras que 3 involucran la preservación biofísica del entorno. Se propone que el proceso de alcanzar las metas socio-económicas, siguiendo las tendencias de toma de decisión de las últimas décadas, deteriora el progreso en las metas ecológicas. La presión emitida por las actividades económicas humanas pone en riesgo cruzar umbrales biofísicos que perjudiquen el funcionamiento de sistemas terrestres vitales para la prosperidad humana.

Dedicatoria

Dedicado a mi Hermano, a mi Mamá, y a mi Papá.

Índice general

1. Introducción	10
1.1. ¿De dónde Venimos?	10
1.2. ¿En dónde nos Encontramos?	14
1.3. ¿Hacia dónde Vamos?	17
2. Objetivos de Desarrollo Sostenible	18
2.1. Desarrollo Sostenible	19
2.2. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible	20
2.2.1. Objetivo 1: Fin de la Pobreza	21
2.2.2. Objetivo 2: Hambre Cero	23
2.2.3. Objetivo 3: Salud y Bienestar	25
2.2.4. Objetivo 4: Educación de Calidad	26
2.2.5. Objetivo 5: Igualdad de Género	27
2.2.6. Objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento	28
2.2.7. Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante	30
2.2.8. Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico	31
2.2.9. Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructuras.	33
2.2.10. Objetivo 10: Reducción de las Desigualdades	34
2.2.11. Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.	35
2.2.12. Objetivo 12: Producción y consumo responsables.	36
2.2.13. Objetivo 13: Acción por el Clima	37
2.2.14. Objetivo 14: Vida Submarina	39
2.2.15. Objetivo 15: Vida de Ecosistemas Terrestres	40
2.2.16. Objetivo 16: Paz, Justicia e Instituciones Sólidas	41
2.2.17. Objetivo 17: Alianzas para Lograr los Objetivos	42
2.3. ¿Cómo se Mide el Progreso?	43
3. Límites Planetarios	45
3.1. El Equilibrio de la Tierra	45
3.2. Los 9 Límites de Nuestro Planeta	46
3.2.1. Cambio Climático	47
3.2.2. Acidificación de los Océanos	48
3.2.3. Agotamiento de Ozono Estratosférico	50
3.2.4. Interferencia con los Ciclos Globales de Fósforo y Nitrógeno	50
3.2.5. Tasa de Pérdida de Biodiversidad	51
3.2.6. Uso de Agua Dulce	52
3.2.7. Cambios en el Sistema de Tierras	54
3.2.8. Carga de Aerosoles	54
3.2.9. Contaminación Química	55
3.3. Interacción entre Límites	56
3.4. Discusión	56

4. <i>Earth Model</i>	57
4.1. Modelos Planetarios	57
4.2. El Modelo <i>Earth3</i>	59
4.2.1. Submodelo Socioeconómico	60
4.2.2. Submodelo Biofísico	63
4.2.3. Submodelo de Rendimiento	64
4.2.4. Interacción de los Submodelos	67
4.3. Abstracción Matemática del Modelo	69
5. Generando los Resultados	72
5.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible	72
5.2. Límites Planetarios	92
5.3. Resumen de los Resultados	101
6. Conclusiones	103
6.1. ¿Es Posible Alcanzar la Meta?	103
6.2. Diferentes Futuros Escenarios	106
6.3. ¿El comienzo del fin, o el fin del comienzo?	109
A. Appendix	110
A.1. Regresión Lineal	110
A.2. Ajuste Exponencial	112

Índice de figuras

1.1.	Población Mundial Histórica para los años 10,000 a.C. a 1500 d.C.	12
1.2.	Población Mundial Histórica, 1800 - 2021.	13
1.3.	Tasa de crecimiento poblacional anual mundial, 1950-2100.	15
1.4.	Crecimiento Poblacional Natural, 2022.	16
1.5.	Producto Interno Bruto per Cápita (1980-2018).	17
2.1.	Índice de Desarrollo Humano, 2021.	19
2.2.	Tasa de incidencia de la pobreza, sobre la base de \$1,90 por día (2011 PPA).	22
2.3.	Escala de Experiencia de Inseguridad Alimentaria.	23
2.4.	Índice Cuantitativo: Prevalencia de la Subalimentación.	24
2.5.	Tasas de Participación en la fuerza laboral.	28
2.6.	Proporción de la Población con acceso a la Electricidad, 2000 y 2017.	30
2.7.	Temperatura superficial anual en comparación con el promedio del siglo XX de 1880 a 2021.	38
3.1.	El último ciclo glacial y eventos claves en la historia de la humanidad.	46
3.2.	Proceso químico de la captación de CO_2 en los Océanos.	49
3.3.	Causas y Proceso del fenómeno de Eutrofización.	50
3.4.	Flujos de Agua Verde y de Escorrentía (Green and Blue, respectivamente).	53
3.5.	Estimaciones de cómo han cambiado las diferentes variables de control para siete límites planetarios desde 1950 hasta el presente.	56
4.1.	Esquemática de un Modelo Atmosférico.	58
4.2.	Ciclos Causales del submodelo socioeconómico	61
4.3.	Simulación de la Población en la Región China	62
4.4.	Ciclos Causales del submodelo biofísico.	63
4.5.	Simulación del aumento global de la Temperatura.	64
4.6.	Interacción de los submodelos en Earth3.	68
5.1.	Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Fracción de la población que vive por debajo de 1.90\$ al día (%)</i> y el <i>Producto Interno Bruto por Persona</i>	73
5.2.	Ajuste entre los valores históricos del indicador <i>Fracción de la población que vive por debajo de 1.90\$ al día (%)</i> y el <i>Producto Interno Bruto por Persona</i>	74
5.3.	Objetivo 1: Fin de la Pobreza –Simulación Earth3– tendencia histórica.	74
5.4.	Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Fracción de la población desnutrida (%)</i> y el <i>Producto Interno Bruto por Persona</i>	75
5.5.	Ajuste entre los valores históricos del indicador <i>Fracción de la población desnutrida (%)</i> y el <i>Producto Interno Bruto por Persona</i>	76
5.6.	Objetivo 2: Hambre Cero - Simulación Earth3 - Tendencia Histórica.	76
5.7.	Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Esperanza de vida al nacer (años)</i>	77
5.8.	Objetivo 3: Salud y Bienestar – Simulación Earth3– tendencia histórica.	77
5.9.	Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Esperanza de vida escolar (años)</i> y el <i>Producto Interno Bruto por Persona</i>	78
5.10.	Ajuste entre los valores históricos del indicador <i>Esperanza de vida escolar (años)</i> y el <i>Producto Interno Bruto por Persona</i>	79
5.11.	Objetivo 4: Educación de Calidad –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	79

5.12. Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Paridad de género en la escolarización (1)</i> y el Producto Interno Bruto por Persona.	80
5.13. Objetivo 5: Igualdad de Género –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	80
5.14. Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Fracción de la población con acceso a agua segura (%)</i> y el Producto Interno Bruto por Persona.	81
5.15. Objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	82
5.16. Correlación entre los valores históricos del indicador <i>Fracción de la población con acceso a electricidad (%)</i> y el Producto Interno Bruto por Persona.	82
5.17. Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	83
5.18. Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	84
5.19. Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	85
5.20. Objetivo 10: Reducción de las Desigualdades –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	86
5.21. Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	87
5.22. Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	88
5.23. Objetivo 13: Acción por el Clima –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	89
5.24. Objetivo 14: Vida Submarina –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	89
5.25. Objetivo 15: Vida de Ecosistemas Terrestres –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	90
5.26. Objetivo 16: Paz, Justicia e Instituciones Sólidas –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	91
5.27. Objetivo 17: Alianzas para Lograr los Objetivos –Simulación Earth3– Tendencia Histórica.	92
5.28. Calentamiento Global –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica.	93
5.29. Agotamiento de Ozono Estratosférico - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	94
5.30. Acidificación de los Océanos - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	95
5.31. Cambios en el Sistema de Tierras - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	96
5.32. Interferencia con los ciclos globales de fósforo y nitrógeno - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	97
5.33. Uso de Agua Dulce - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	98
5.34. Tasa de Pérdida de Biodiversidad - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	99
5.35. Carga de Aerosoles - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica	100
5.36. Contaminación Química - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica.	101
6.1. Calificación Total –por Región– del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en el modelo.	105
6.2. Margen de Seguridad Global con respecto a los Límites Planetarios, en el modelo.	105
6.3. Simulación de la calificación total mundial del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, para diferentes escenarios de Comportamiento de la Humanidad.	107
6.4. Simulación del Margen de Seguridad Global con respecto a los Límites Planetarios, para diferentes escenarios de Comportamiento de la Humanidad.	108

Índice de tablas

4.1. Objetivos de Desarrollo, sus indicadores y umbrales.	66
4.2. Límites planetarios, sus indicadores y umbrales.	67
5.1. Resultados Regionales para los ODS siguiendo la tendencia histórica	101
5.2. Resultados de Margen de Seguridad con respecto a Límites Planetarios siguiendo la tendencia histórica	102

Expectativas del Trabajo

El presente trabajo tiene el objetivo de presentar información básica suficiente para proponer y justificar un modelo de simulación global que permita predecir la evolución de variables socioeconómicas y ecológicas para tiempos futuros. Mediante este modelo se busca justificar que un futuro crecimiento social y económico convencional alejará a la humanidad de la estabilidad ecológica sobre la cual floreció. Adicionalmente, se podrá utilizar el modelo propuesto para evaluar el resultado que diferentes tendencias de comportamiento tienen sobre los objetivos de desarrollo y la resiliencia ecológica global.

Los aportes del presente trabajo incluyen una investigación y recopilación de información innovadora sobre temas vanguardistas, la creación de una página web (<https://www.sdginpb.com>) interactiva que permitirá la continuidad de la divulgación y la actualización de la información, y un código de *python* (<https://github.com/blankhall98/17in9Thesis/tree/main/models/e3python>) que facilita la replicación y variación del modelo planteado y los resultados obtenidos en el trabajo escrito. Así mismo, el código puede ser fácilmente complementado con diferentes métodos de predicción o sujeto a análisis de sensibilidad.

El desglose del contenido es el siguiente:

1. En los primeros tres capítulos se presenta un Marco Teórico Poblacional, de Desarrollo Sostenible y Ecológico, respectivamente. El primer capítulo presenta una línea del tiempo del desarrollo social y poblacional que la humanidad ha experimentado a lo largo del tiempo. El segundo capítulo plantea los Objetivos del Desarrollo Sostenible, así como las metas que los conforman. El tercer capítulo presenta el concepto de los Límites Planetarios y cuantifica umbrales para cada uno de ellos.
2. El cuarto capítulo propone una metodología para resolver las preguntas de investigación:
 - Suponiendo que la sociedad global continuase sus tendencias de comportamiento históricas, ¿cuántos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible serán alcanzados en el 2030, y en el 2050?
 - ¿Cuál será la presión resultante sobre los 9 límites planetarios?
3. El quinto capítulo aplica la metodología propuesta para generar predicciones de indicadores de progreso para cada uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Límites Planetarios. Posteriormente, se aplica una calificación a cada valor de los indicadores para determinar si el objetivo se ha cumplido o el límite trasgredido.
4. El sexto y último capítulo analiza los resultados obtenidos en el capítulo anterior, concluyendo una respuesta para las dos preguntas de investigación.

1

Introducción

El propósito del presente trabajo es construir una visión objetiva del actual estado de la humanidad, así como nuestra interacción con el medio que nos rodea. Al conocer el estado actual y la evolución de nuestra estructura demográfica, nuestros patrones de consumo, nuestras aspiraciones como especie humana y la resiliencia de nuestros entornos, nos será posible analizar futuros escenarios - y sus implicaciones - para nosotros y los demás seres vivos con los cuales compartimos el planeta.

El análisis de futuros posibles escenarios ayuda a los tomadores de decisiones en identificar los puntos débiles en los procesos actuales, lo que puede impulsar reformas de desarrollo adecuadas. En un nivel individual, el entender las consecuencias de continuar con comportamientos insostenibles puede crear conciencia e impulsar la adopción de buenos hábitos.

Adicionalmente a este trabajo escrito, se ha decidido construir una *página web* interactiva, la cual se puede encontrar en la siguiente liga: <https://www.sdginpb.com>. La finalidad del sitio virtual es el de simplificar varios temas presentados en el trabajo escrito, así como mantener actualizada la información posteriormente a la finalización del trabajo escrito. Al comienzo de cada capítulo se facilita el enlace de la sección correspondiente.

Entender el presente estado de la humanidad requiere analizar los patrones de desarrollo y momentos claves que ésta ha experimentado hasta posicionarse en la situación actual.

1.1. ¿De dónde Venimos?



La historia de la humanidad es la narrativa de nuestro pasado; el conjunto de hechos y procesos que se han desarrollado en torno al ser humano desde su aparición hasta la actualidad. Ésta se estudia mediante la arqueología, antropología, genética y la lingüística.

Alrededor de 5-13 millones de años atrás - en el continente africano - los humanos evolucionaron de los primates [1]. Estudios genéticos indican que el linaje del *Homo sapiens* divergió del linaje genético de los chimpancés y bonobos, los relativos más cercanos al humano moderno [2].

Hace aproximadamente 3.3 millones de años - con la construcción e implementación de herramientas principalmente conformadas de piedras - comienza el periodo histórico *Paleolítico* [3]. No fue hasta hace alrededor de 500.000 años que se comenzó a utilizar el fuego a voluntad para calentarse y cocinar. Paralelamente se fueron desarrollando las primeras versiones del lenguaje; los humanos de este periodo eran cazadores y recolectores, generalmente nómadas [4].

La glaciación Würm, también llamada Edad de Hielo, fue el último periodo glacial que ha acontecido en la historia geológica de la Tierra. Comenzó hace unos 110.000 años y finalizó alrededor del 9700 a.C, dando paso al *Holoceno* - el periodo de clima templado actual. La migración humana fuera del continente africano comenzó aproximadamente al inicio de la glaciación. Se colonizaron todos los continentes e islas principales; llegando a Australia hace 65 mil años, Eurasia hace alrededor de 60 mil años y América hace aproximadamente 15 mil años [5]. Para el final de la era de hielo, los humanos ya estaban esparcidos por casi todo el planeta [4].

El periodo *Neolítico* comenzó alrededor del año 10.000 a.C. Este periodo marcó el comienzo de la agricultura. La agricultura es el conjunto de actividades económicas y técnicas relacionadas con el tratamiento del suelo y el cultivo de la tierra para la producción de alimentos. Comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforman el medio ambiente.

Para los humanos, la agricultura cambió fundamentalmente el estilo de vida. Ésta dio lugar a la demanda de mejores herramientas para trabajar la tierra, por lo que la manipulación de metales se especializó. La necesidad de los materiales y herramientas novedosas estimuló el intercambio de bienes [6]. El avance técnico combinado con condiciones climáticas ideales produjo un superávit de alimento, lo cual permitió alimentar a sectores poblacionales que no se dedicaban de manera directa a la agricultura. Estos sectores, al no tener que dedicar su tiempo a la producción agrícola, se especializaron en resolver problemáticas sociales que hasta el momento no habían sido atendidas. La especialización condujo a poblaciones más densas y a la creación de ciudades.



Las ciudades se convirtieron en centros de intercambio, manufactura y poder político. Éstas formaron una simbiosis con sus alrededores; recibiendo productos agrícolas y devolviendo tanto productos manufacturados como protección militar. Destacan las ciudades *Jericho* - en la actual Palestina - y *Çatalhöyük*, que gozaron su auge alrededor del año 6.000 a.C.

La Figura 1.1 muestra un estimado de la población mundial, adicionalmente un desglose continental, desde el año 10.000 a.C. al año 1500 d.C. utilizando el sistema *Hyde* - History database of the Global Environment. Estos estimados indican que la población

pasó de **4.43 millones** de humanos en el año 10.000 a.C. a **44.49 millones** en el año 3.000 a.C. La humanidad creció un 900 % en esos 7.000 años; se dio un crecimiento anual promedio de 0.033 %. Esto último significa que durante el periodo transcurrido, en promedio, la población en el año $t+1$ era 0.033 % más grande que la población al año t . Podemos comprobar que:

$$4.43 * \left(1 + \frac{0.033}{100}\right)^{7000} = 44.61269 \approx 44.49.$$

El desarrollo de las ciudades dio pie a las civilizaciones. Las primeras surgieron en Mesopotamia (3.000 a.C.). Posteriormente surgieron la civilización Egipcia a orillas del río Nilo (3.000 a.C.), la civilización Harappa en el río Indo y la civilización China a lo largo de los ríos Amarillo y Yangtze (2.200 a.C.). Estas sociedades desarrollaron ideas unificadoras: sistema de gobierno central, una compleja organización económica y social, sistemas de lenguaje y escritura, cultura y religión. La escritura facilitó la administración de ciudades, la expresión de las ideas y la preservación de la información [6]. Ejércitos bien entrenados, ideologías unificadoras y burocracia posibilitaron a los emperadores el controlar grandes territorios y millones de súbditos. La estabilidad producida por los imperios, así como la creciente

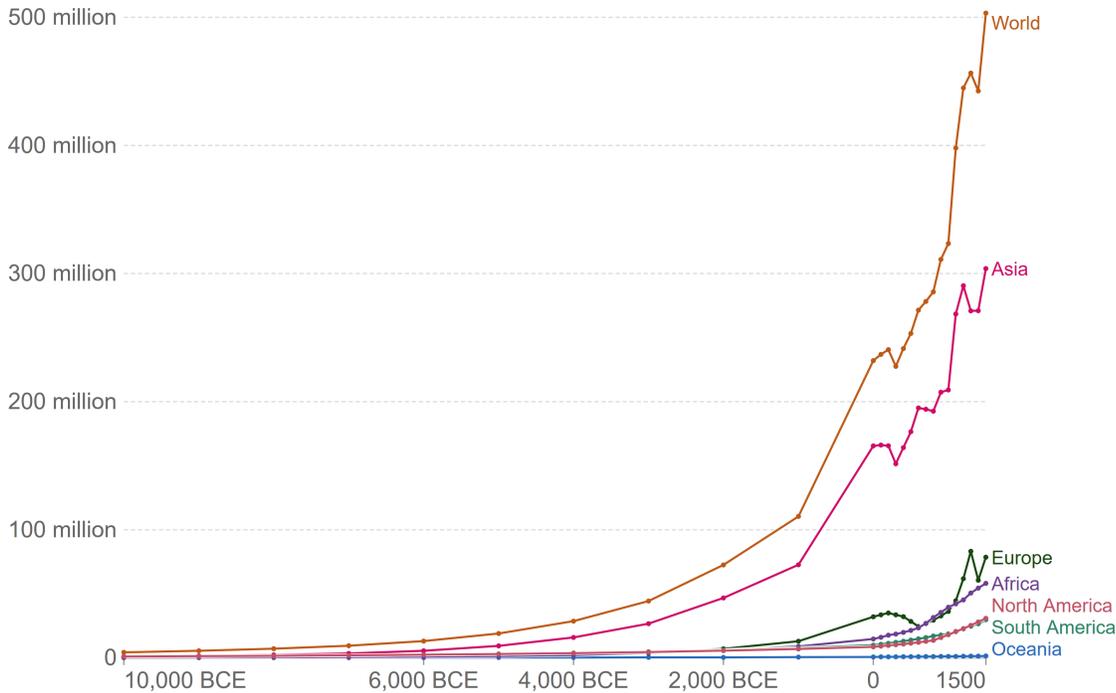


Figura 1.1: **Población Mundial Histórica para los años 10,000 a.C. a 1500 d.C.**

Fuente: *Gapminder (v6)*; *UN (2022)*; *HYDE (v3.2)*.

demanda de bienes y servicios que estos representaban, impulsó el comercio internacional - empleando rutas de intercambio en el mediterráneo y océano índico, al igual que la ruta de seda.

Utilizando nuevamente la Figura 1.1, observamos que la población crece de **44.9 millones** en el año 3.000 a.C. a **503.24 millones** en el año 1500 d.C. Por lo tanto, en ese periodo de 4500 años, la población creció en un 1031.13% - un crecimiento anual promedio de 0.054%.

La historia *moderna temprana* abarca los años 1500 a 1800, y fue el periodo abarcado entre la edad media y la revolución industrial. Este periodo se caracteriza por los avances científicos, el rápido incremento de procesos tecnológicos en los medios de producción, la secularización de la política y el surgimiento de las naciones [7]. Se sustituye el *feudalismo* - estructura social derivada de la posibilidad de trabajar tierras ajenas a cambio de servicios - por la teoría económica *mercantilista*. El mercantilismo es una política económica diseñada para maximizar las exportaciones y minimizar las importaciones de productos. Históricamente, dichas políticas condujeron a guerras y expansiones coloniales [8]. Durante este periodo, la población total pasó de **503.24 millones** a **984.74 millones** de personas - un crecimiento anual promedio de 0.225%.

La historia *moderna tardía* se considera el periodo transcurrido entre la revolución industrial, en 1800, y el fin de la segunda guerra mundial en 1945. El suceso conocido como *revolución industrial* fue una transición en el proceso de manufactura que se dio en Gran Bretaña, Europa Continental y los Estados Unidos a principios del siglo XIX [9]. Ésta consistió en sustituir métodos de producción manuales por máquinas, producir en masa, implementar nuevos procesos químicos y metalúrgicos y aprovechar el poder mecánico e hidráulico para la generación de energía.

El cambio en la metodología de producción tuvo como consecuencia un colosal superávit de bienes materiales - desencadenando un rápido crecimiento de la población. La constante y elevada demanda de materias primas del sector de producción representaba una oportunidad - además de una alta motivación para los inversionistas - de explotar dicha materia con la mayor intensidad posible, incrementando así la demanda de obreros, mineros y técnicos. Innovaciones como los trenes y barcos de vapor, la fundición

de hierro con chorro de aire caliente, el telégrafo eléctrico y el automóvil fueron concebidas durante este periodo. Múltiples historiadores económicos afirman que la revolución industrial es el evento más significativo para la historia de la humanidad, sólo después de la domesticación de las plantas y animales [10].

La Figura 1.2 presenta la población mundial total - nuevamente mostrando el desglose continental - desde el año 1800 al año 2021. A diferencia de la Figura 1.1, los datos de la gráfica moderna provienen de censos de la Organización de las Naciones Unidas, y su rango de error es mucho menor. Notemos que el eje vertical ahora denota *miles de millones*. La cantidad de humanos en el planeta cambió de **984.74 millones** en 1800 - el comienzo de la revolución industrial - a **2420 millones** en 1945. Un incremento de 1435 millones de humanos en 145 años. En promedio, la humanidad creció un 0.62635% de su valor anualmente durante este periodo.

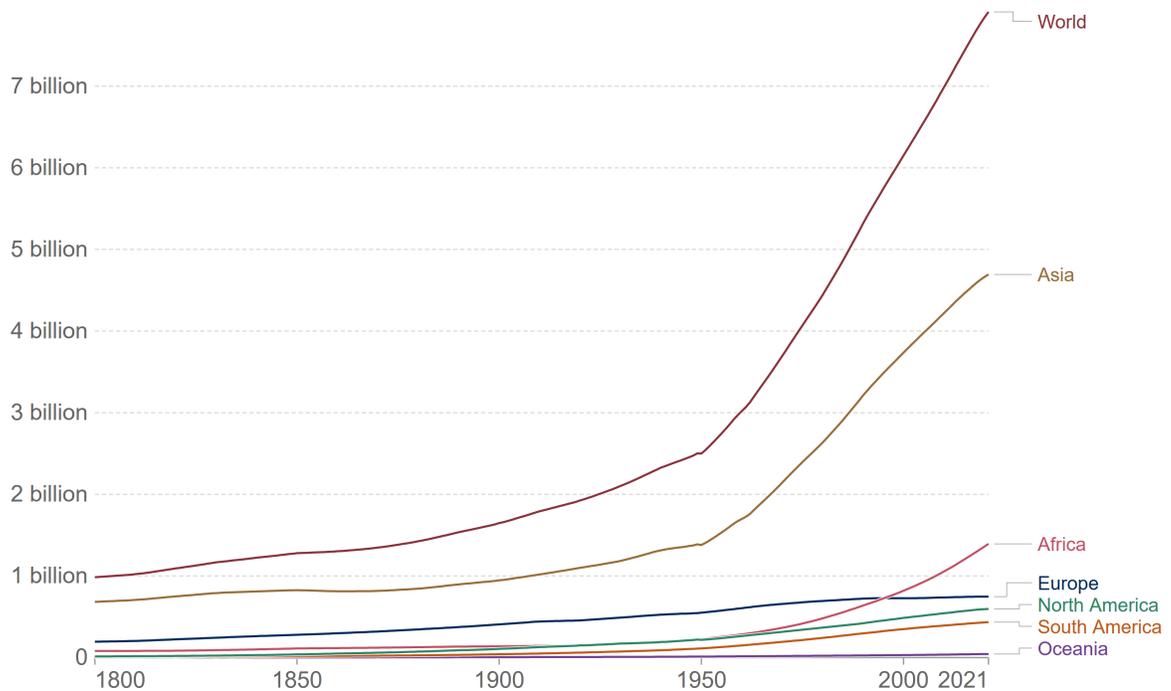


Figura 1.2: **Población Mundial Histórica, 1800 - 2021**

Fuente: *Gapminder (v6)*; *UN (2022)*; *HYDE (v3.2)*.

En 1945 - terminada la segunda guerra mundial - con el fin de prevenir conflictos bélicos, se crea la *Organización de las Naciones Unidas*. La disputa mundial había dejado a dos países como líderes mundiales: Estados Unidos y la Unión Soviética. Ambos países tenían que el mundo adoptara el sistema político-económico del otro - capitalismo y comunismo, respectivamente. Comenzó así la *guerra fría*, una carrera de armamentos que duró 45 años. Las preparaciones durante la guerra fría - ya fuera para evitarla o ganarla - aceleraron los avances en la tecnología. Aviones militares, cohetes espaciales, computadoras avanzadas, satélites y un sistema de posicionamiento global (GPS) fueron invenciones con propósito militar consecuencia del conflicto. La brutal competencia no se dio únicamente en el sector militar; el descubrimiento del ADN y su secuencia, la erradicación de la viruela, las prácticas de la medicina moderna, la *revolución verde* en la agricultura, la creación de los celulares y la exploración espacial son consecuencia directa del enfrentamiento intelectual de la época.

En el transcurso de los años 1945 a 2021, la humanidad pasó de **2420 millones** a **7870 millones** de habitantes. En tan solo 76 años, la humanidad añadió 5450 millones nuevos miembros a la gran familia. Un incremento promedio anual de 1.5848%. Esta tasa de crecimiento supera por más del doble a la tasa del periodo anterior; hecho que puede ser vinculado principalmente a la mejora en la calidad de vida y acceso a recursos. Si la tendencia promedio continuase - la humanidad se mantiene creciendo al mismo ritmo que en el periodo analizado - la población del año 2021 se duplicaría en aproximadamente 44 años.

Preguntas que surgen naturalmente en este punto son:

- ¿Puede la humanidad continuar creciendo al ritmo de los últimos años?
- ¿Será que, al igual que sucedió en el pasado, la tasa de crecimiento continúe aumentando?

Atacar estas preguntas requiere tener un mayor entendimiento de cuáles son algunos de los factores que permiten el crecimiento, así como el estado y distribución actual de los mismos.

1.2. ¿En dónde nos Encontramos?

Es evidente que la población humana mundial ha crecido rápidamente. El tipo de crecimiento que ésta ha presenciado recibe el nombre de *crecimiento exponencial*. Una cantidad exhibe un crecimiento de tipo exponencial cuando ésta aumenta un porcentaje de su valor total en un periodo constante de tiempo.

El crecimiento exponencial es un fenómeno *dinámico*, lo que significa que involucra elementos que cambian con el tiempo. Cuando múltiples cantidades diferentes cambian simultáneamente en un sistema - y además dichas cantidades están interrelacionadas - el análisis de las causas del crecimiento y del comportamiento futuro del sistema puede volverse complicado.

En una población con una *fertilidad promedio* constante - número de hijos, en promedio, que se pronostica tendrá una mujer durante su edad reproductiva - cuanto más grande sea la población, mayor será la cantidad de bebés nacidos cada año. Una mayor cantidad de nacimientos implica una población más grande anualmente - notemos el ciclo positivo entre la fertilidad y el aumento de la población. Otra característica que define el crecimiento poblacional es la *mortalidad promedio* - un reflejo de la salud general. El número de muertes anuales es igual a la población total multiplicada por la tasa de mortalidad promedio. Si la tasa de fertilidad promedio es mayor a la tasa de mortalidad promedio, entonces la población crecerá, de lo contrario ésta decrece.

Si suponemos una población con P_0 habitantes, la cual en un periodo de tiempo constante t presenta N nacimientos y M muertes, entonces la población al tiempo t , denotada P_1 , será:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 + [N - M] \\ &= P_0 + P_0 \left[\frac{N}{P_0} - \frac{M}{P_0} \right] \\ &= P_0 \left[1 + \left[\frac{N}{P_0} - \frac{M}{P_0} \right] \right]. \end{aligned}$$

La cantidad $r = \frac{N}{P_0} - \frac{M}{P_0}$ se conoce como la tasa de crecimiento de la población.

Debido a que todas las poblaciones presentan muertes y nacimientos - y que además éstas pueden variar dependiendo de las circunstancias que se vivan dentro de la población - el comportamiento dinámico de las poblaciones se vuelve complicado. Recordemos que durante los periodos de mayores avances tecnológicos - los cuales trajeron abundancia de recursos y estabilidad relativa - se presentó un gran crecimiento poblacional. Ésto se puede justificar al entender que los avances disminuyeron la mortalidad poblacional e hicieron más atractivo el procrear, aumentando la fertilidad.

La Figura 1.3 muestra la tasa de crecimiento poblacional mundial registrada entre los años 1950 y 2015, además de predicciones de la ONU para el periodo 2015-2100. Observemos que la población mundial alcanzó un máximo en su tasa de crecimiento entre los años 1962 y 1963, aumentando un 2.2% de su valor en un solo año. Notemos que la tasa de crecimiento ha disminuido significativamente desde 1980 - principalmente por políticas demográficas en China - y de acuerdo con las predicciones demográficas se espera una reducción aún más agresiva en los años por venir. Debemos notar que la tasa siempre es positiva, por lo que no se espera un decremento en la cantidad de humanos; únicamente una desaceleración en el crecimiento.

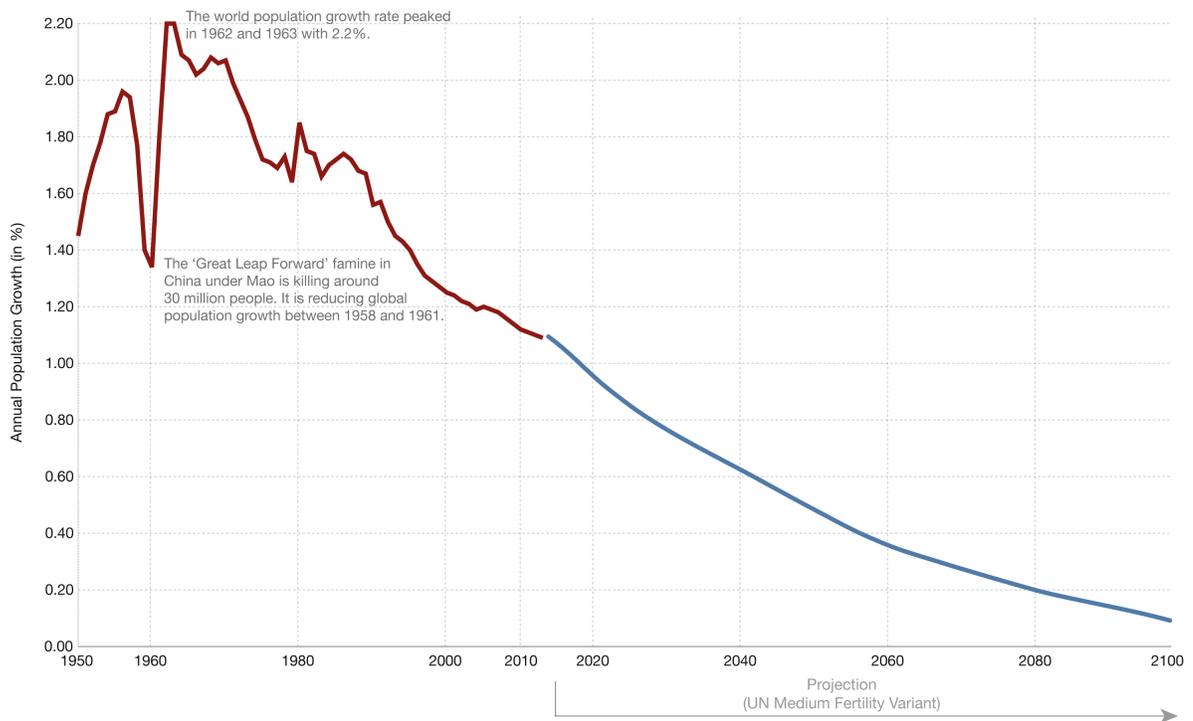


Figura 1.3: **Tasa de crecimiento poblacional anual mundial, 1950-2100.**

Fuente: *US Census Bureau & Projections: United Nations Population Division.*

Aún si la tasa de crecimiento mundial disminuye, esto no es verdad para todas las regiones del mundo. Las regiones menos desarrolladas industrial y económicamente cuentan actualmente con tasas de crecimiento poblacional cercanas al 5 %, mientras que las regiones más desarrolladas presentan valores bajos - o inclusive negativos. La Figura 1.4 muestra un mapamundi, clasificando a los países por su tasa de crecimiento natural (nacimientos menos muertes) en el año 2022. Los países pertenecientes al África Subsahariana muestran la mayor tasa de crecimiento, por lo que se puede esperar un abrupto incremento de su población en los próximos años. Estudios [11] proponen que las razones por las cuales los países más desarrollados tienen una menor tasa de crecimiento son:

- Acceso a la educación.
- Paridad de género - reducción en los matrimonios a temprana edad, empoderamiento de la mujer.
- Planeación familiar.
- Alto costo de añadir un nuevo miembro a la familia en comparación a su beneficio.

Resulta entonces intuitivo el intentar relacionar el crecimiento poblacional de una región con el progreso y bienestar económico de la misma. Para realizar un análisis, se deben de encontrar indicadores de *producción y poder económico* de las regiones de interés.

El crecimiento económico puede ser interpretado como un incremento en la calidad y cantidad de bienes y servicios producidos por una sociedad. El *producto interno bruto* (PIB) es un indicador económico que refleja el valor monetario de todos los bienes y servicios finales producidos por un territorio en un determinado periodo de tiempo. Se dice que un país crece económicamente cuando la *tasa de variación* del PIB aumenta, es decir, el PIB del año calculado es mayor que el del año anterior.

El PIB es usado frecuentemente como una medida del bienestar material de una sociedad. Esto motiva a que políticamente se usen las cifras del crecimiento del PIB como un indicador de que las políticas económicas aplicadas han sido positivas. Sin embargo, numerosos autores han criticado el uso

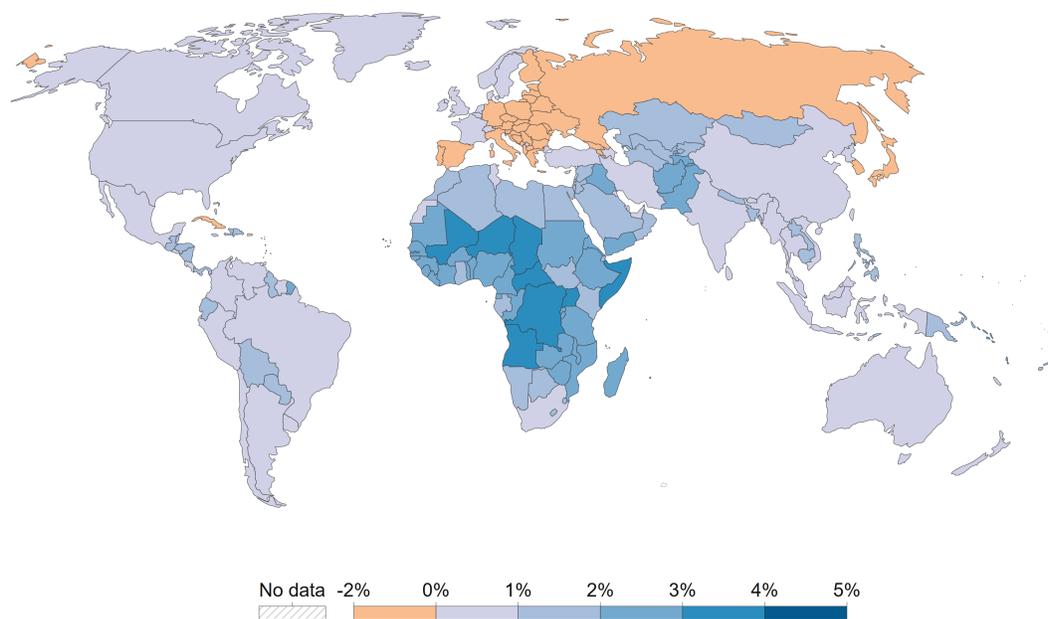


Figura 1.4: **Crecimiento Poblacional Natural, 2022**

Fuente: *United Nations Population Division (2022)*.

del Producto Interno Bruto como sinónimo de bienestar social; éste solamente utiliza variables contables que puedan expresarse directamente en términos monetarios, por lo tanto, prescinde de aspectos como los costes ecológicos y sociales. Algunos de estos costes son: el impacto ecológico de la producción, la desigualdad en la distribución de la riqueza, las desigualdades de género, entre otras.

Para intentar solucionar este problema, se pueden construir otros indicadores que sigan utilizando al PIB en su cálculo. Si el Producto Interno Bruto de un país se repartiera en partes iguales entre todos sus habitantes, ¿cuánto dinero le tocaría a cada uno? Resolver esto implica calcular:

$$\frac{PIB}{Población} = PIB_{pc}$$

Al resultado de esta operación se le conoce como *producto interno bruto per cápita* y refleja, de forma general, el nivel de vida de un individuo perteneciente a dicha población. Sin embargo, es importante señalar que este indicador es únicamente un promedio, afectado de manera directa por la desigualdad en la distribución de la riqueza y los medios de producción.

¿Qué tipo de análisis se puede realizar con el producto interno bruto *per cápita* de un país? Observemos que éste depende únicamente de dos cantidades: la población de la región y la producción económica de la misma. Una nación puede presentar un crecimiento económico consistente, pero si su población crece más rápido que su producción bruta interna, entonces la tasa de variación del producto interno bruto per cápita será negativa. Países cuyo PIB crece de manera irregular, o incluso de manera negativa, que además cuenten con un crecimiento poblacional pronunciado - la mayoría de los países africanos - limitarán el crecimiento del PIB per cápita, empeorando los estándares de vida regionales.

La Figura 1.5, alimentada por datos de Maddison Project, muestra la evolución del producto interno bruto per cápita en regiones de interés durante el periodo 1980-2018. Es notable que existen dos regiones económicas que superan al resto del mundo; Estados Unidos y Europa Occidental. Ambas regiones gozan de altos niveles de producción interna bruta per cápita pues existe un sano equilibrio entre su producción nacional y su crecimiento demográfico. Bastante preocupante son las dos regiones que se encuentran por

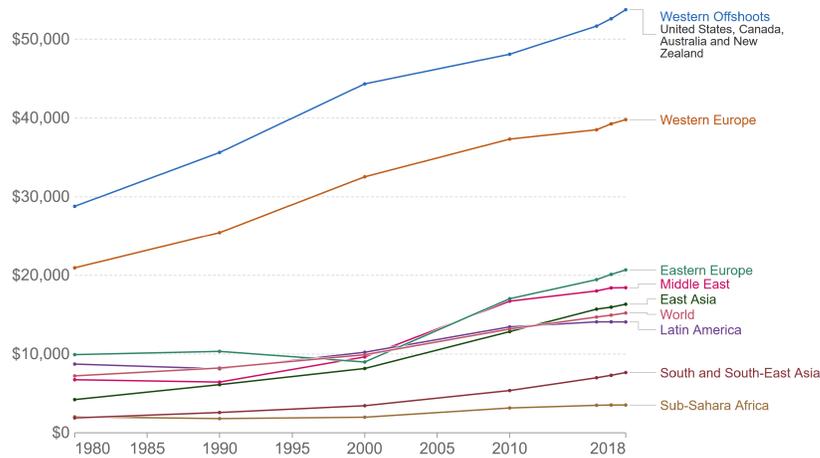


Figura 1.5: **Producto Interno Bruto per Cápita (1980-2018).**

Fuente: *The Maddison Project (2020)*.

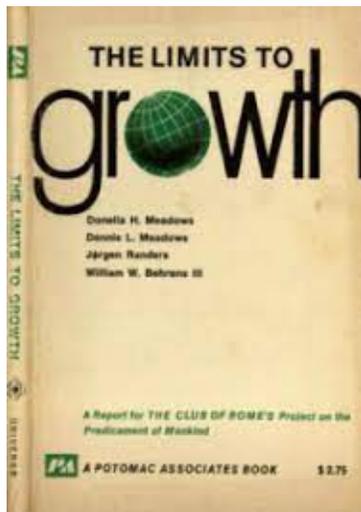
debajo del resto del mundo; Sureste Asiático y África Subsahariana. Sus curvas de producción interna bruta per cápita parecen mantenerse constantes desde 1980. Recordemos que las tasas de crecimiento poblacional de ambas regiones son bastante elevadas - cerca del 5% anualmente - mientras que su producción nacional no es tan alta. Si bien la calidad de vida vinculada con el producto interno bruto per cápita se ha mantenido casi constante durante 40 años para los pobladores de dichas regiones, el costo de vida no; la inflación de bienes y servicios - principalmente de alimentos - afecta directamente a los pobladores y su forma de vivir.

1.3. ¿Hacia dónde Vamos?

En el reporte *Perspectivas de la población mundial 2019*, la ONU declaró:

“Está previsto que la población mundial alcance los 8500 millones en el año 2030, 9700 millones en 2050 y 11200 en 2100. Los resultados se basan en la variante media de la proyección de fecundidad. También se prevé que mejoren las posibilidades de supervivencia en todos los países”

Así mismo, se prevé que más de la mitad del crecimiento demográfico mundial desde hoy hasta el año 2050 tenga lugar en el continente africano. Se espera que la África subsahariana duplique su población para el 2050. Esto implica una cruda realidad: que una de las regiones más pobres y subdesarrolladas del mundo será el hogar de una gran cantidad de personas en un futuro cercano.



El aparente conflicto ante el cual se enfrenta la humanidad –la voluntad de seguir creciendo indefinidamente en un mundo finito [11]– presenta un dilema que debemos afrontar: ¿Cómo debe ser nuestro desarrollo como especie si deseamos un futuro próspero *para todos y todas*? Éste dilema no es nuevo ya que desde los años 1970 el tema fue rigurosamente analizado por organizaciones como *Club of Rome* –comenzando con su gran obra *The Limits to Growth*– y la Organización de las Naciones Unidas. En el capítulo a continuación se presenta un plan de crecimiento y desarrollo, fruto del análisis y de las serias discusiones que la humanidad ha realizado en los últimos años.

2

Objetivos de Desarrollo Sostenible

El sitio *En Línea* que complementa la información presentada en este capítulo es:
<https://www.sdginpb.com/ods>

Así como existen múltiples placeres terrenales de los cuales podemos disfrutar —si somos afortunados— abundan circunstancias de vida paradójicamente inconvenientes. El Club de Roma propone que la humanidad sufre de los siguientes problemas:

- Pobreza en medio de la abundancia.
- Pérdida de fe en las instituciones.
- Crecimiento urbano descontrolado.
- Inseguridad laboral.
- Alienación de la juventud y pérdida de los valores tradicionales.
- Inflación y otras crisis económicas.

Estos problemas comparten tres características fundamentales: suceden, en cierto grado, en todas las sociedades; contienen elementos técnicos, sociales, económicos y políticos; y finalmente, estos problemas interactúan entre sí.

El historiador israelí Yuval Noah Harari mantiene que el dominio de los humanos sobre las demás especies se debe a nuestro poder de comunicación y organización:

“El Sapiens puede cooperar de maneras extremadamente flexibles con innumerables números de extraños. Es por esto que los Sapiens gobiernan al mundo”

Aprovechar este mismo poder de organización para lograr un objetivo común —el de erradicar los problemas humanos— ha sido el propósito principal de múltiples organismos internacionales. A continuación se presentan algunos conceptos básicos de *desarrollo* y el plan actual acordado por la humanidad que tiene como fin el alcanzar un *futuro próspero*.

2.1. Desarrollo Sostenible

El *desarrollo humano* es el proceso por el cual una sociedad mejora las condiciones de vida de sus miembros a través de un incremento de los bienes con los que éstos pueden cubrir sus necesidades básicas y complementarias, además de crear entornos sociales que respeten los derechos humanos de la población. Las sociedades humanas se encuentran en un constante cambio tanto en avances tecnológicos como en desarrollo social. Es por ello que el concepto de desarrollo humano se ha ido alejando progresivamente de la esfera meramente económica para incorporar otros aspectos relevantes para la vida.

El *índice de desarrollo humano* (IDH) es un indicador –elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)– que se utiliza para clasificar a los países de acuerdo a su nivel de desarrollo humano. Así, un país tiene un mayor IDH si sus habitantes gozan de una alta esperanza de vida, un nivel de educación competente y un alto ingreso nacional bruto per cápita.

La figura 2.1 muestra un mapa mundial que califica a los países de acuerdo a su índice de desarrollo humano en el año 2020. Los rangos de colores van de verde oscuro a rojo oscuro - entre más cercano el país a verde oscuro, mayor su índice de desarrollo, inversamente para el color rojo oscuro. Los países en color rojo cuentan con un IDH que toma valores entre 0 y 0.5; Los países en color amarillo toman valores entre 0.51 y 0.7; Los países verdosos toman valores entre 0.71 y 0.85; Los países con verde obscuro presentan valores mayores al intervalo anterior. Es notable que los países del Norte de América, Zona Euro, Australia y Japón son los que cuentan con un mejor desarrollo humano, mientras que los países de África Central y Subsahariana y la región de Asia Meridional se encuentran severamente infradesarrollados.

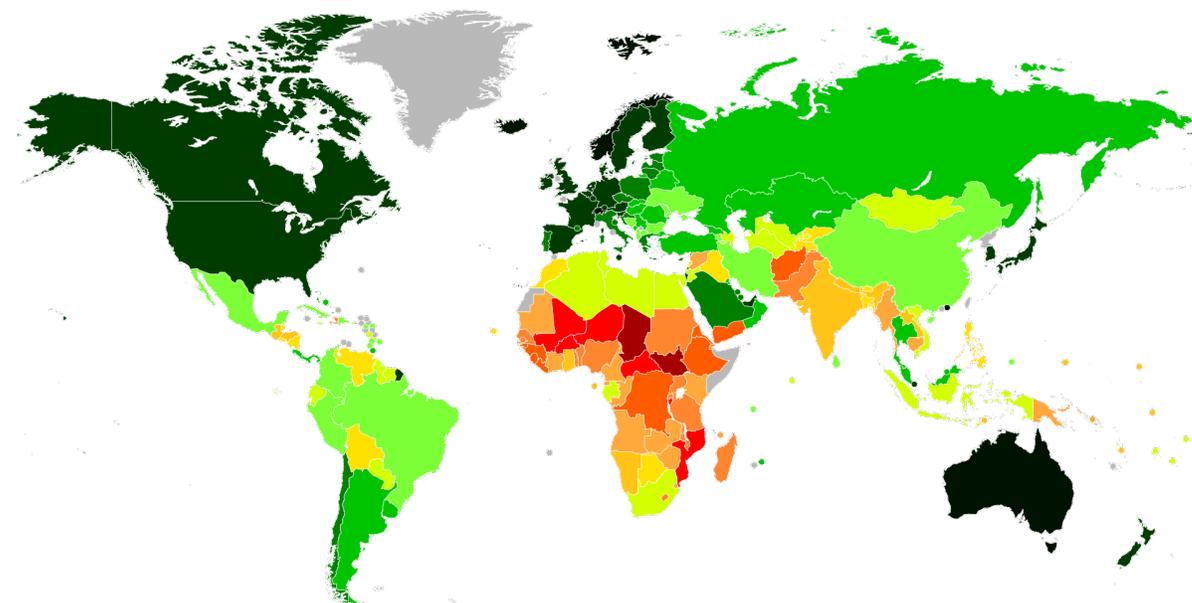


Figura 2.1: **Índice de Desarrollo Humano, 2021.**

Fuente: *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2022).*

Históricamente, el pensamiento que impulsó la Revolución Industrial introdujo criterios de desarrollo, esencialmente aquellos de crecimiento económico. Estos criterios se encuentran en el cálculo del Producto Interno Bruto –indicador que muestra la cantidad de bienes y servicios finales generados con los factores de producción (tierra, trabajo y capital) de un país y un periodo de tiempo dado–. Las correcciones para incluir factores multidimensionales se hicieron en la segunda mitad del siglo XIX, con la aparición de las organizaciones sin ánimo de lucro y del sindicalismo.

Los países *desarrollados* “se dieron cuenta” en los años setentas que su prosperidad se basaba mayormente en el uso intensivo de recursos naturales finitos, y que por consiguiente –además de las cuestiones económicas y sociales– había que considerar un tercer aspecto del desarrollo: el medio ambiente [11].

Muchos analistas argumentaron que el modelo de desarrollo industrial que hasta el momento se había adoptado no era sostenible en términos medioambientales. Los puntos críticos de éste son el agotamiento de los recursos naturales, la destrucción y fragmentación de los ecosistemas y la pérdida de diversidad biológica; estos factores, al degradarse, debilitan la capacidad terrestre de *resistir* nuestras actividades.

Así bien, el concepto de *desarrollo sostenible* se aplica al principio organizador empleado para alcanzar los objetivos de desarrollo humano y al mismo tiempo mantener la productividad y resiliencia de los sistemas naturales. El resultado deseado es una sociedad en la cual los recursos naturales se utilizan para continuar satisfaciendo las necesidades humanas sin socavar la integridad y estabilidad del sistema natural. Su definición se formalizó por primera vez en 1987 en el documento *Informe Brundtland*. Éste contrasta la postura del desarrollo económico de la época con el de sostenibilidad ambiental. La ex primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland define el desarrollo sostenible de la siguiente manera:

“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades”

En el año 1992 se celebró en Río de Janeiro la conferencia conocida como la *Cumbre de la Tierra*, enfocada en temas de medio ambiente y el desarrollo. Tras esta conferencia, los líderes de los estados miembros de la ONU, aprobaron el *Programa 21*, un elaborado plan cuyo objetivo era encaminar a los países a una exitosa transición hacia el desarrollo sostenible para el siglo XXI. Algunos puntos fueron alcanzados, y muchos otros no [12].

A consecuencia de los resultados del *Programa 21*, en el año 2000, los 189 países miembros de las Naciones Unidas acordaron alcanzar ocho propósitos de desarrollo - *Los Objetivos de Desarrollo del Milenio* (ODM) - para el año 2015. Éstos eran referentes a la erradicación de la pobreza, la educación primaria universal, la igualdad entre los géneros, la mortalidad infantil y materna, el avance del VIH y el sustento del medio ambiente [13]. Los ODM marcan una pauta importante; por primera vez la agenda internacional pone una fecha para la consecución de acuerdos concretos y medibles.

2.2. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible



En septiembre de 2015, al terminar el periodo de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, el mundo había cambiado radicalmente. En específico, China había logrado reducir significativamente la pobreza de su población y logrado fortalecer su economía. Más de 180 estados miembros de la ONU acordaron un nuevo plan de acción minuciosamente elaborado para incluir a todas las regiones en la vía del progreso. De esta manera se estableció la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, mejor conocida como *Los Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS). El conjunto de objetivos mundiales busca poder ser adoptado por cualquier región mundial, incluyendo metas de crecimiento sostenible, prosperidad energética con cuidado al medio ambiente, seguridad social, paz e igualdad de género [14].

La *Agenda 2030* está integrada por **17 Objetivos** –que se desagregan en **169 metas**– abarcando 5 esferas de acción:

1. Las personas
2. El planeta
3. La prosperidad
4. La paz
5. Las alianzas

El *avance* de cada uno de estos objetivos se mide a través de **230 indicadores globales**. De nueva cuenta se ha decidido fijar una fecha límite para alcanzar los objetivos y todos los países miembros de la ONU se han comprometido a cooperar con el fin de alcanzar los objetivos para el año 2030.

Se presentan a continuación los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, explicando la situación mundial que origina su necesidad, las metas principales que los componen y los indicadores más significativos con los cuales se mide su progreso.

2.2.1. Objetivo 1: Fin de la Pobreza

“Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo”



La *pobreza* es una situación en la cual no es posible satisfacer las necesidades físicas y psicológicas básicas de una persona debido a falta de recursos como la alimentación, la vivienda, la educación, la asistencia sanitaria, el agua potable o la electricidad. Ésta tiene consecuencias en varias dimensiones –la falta de ingresos, necesidades básicas insatisfechas, condiciones de vida deficientes y carencia de capacidades. Sus causas son el desempleo, la exclusión social y la alta vulnerabilidad de determinadas poblaciones a los desastres naturales, las enfermedades y otros fenómenos que les impiden a las personas ser productivas.

El aumento en la desigualdad es perjudicial para el crecimiento económico y socava la cohesión social, lo que incrementa las tensiones políticas y sociales y, en algunos casos, impulsa la inestabilidad y los conflictos [15].

Un enfoque más común define la pobreza como falta de ingresos; la pobreza se configura cuando el total de ingresos disponibles no satisface el mínimo necesario para la subsistencia. Esta idea inspiró la creación por parte del *Banco Mundial* (BM) de la línea de pobreza, que es “el costo monetario de un nivel de bienestar de referencia para una persona dada, en un momento y lugar dados”. En 2015, el BM clasifica como pobre a una persona que vive con menos de **\$1.90 dólares americanos al día**.

Hay teorías económicas que defienden que la pobreza trasciende la mera falta de ingresos. El economista indio Amartya Sen introdujo la visión de la pobreza como la privación del desarrollo humano individual. Éste visualiza la pobreza como la falta de capacidad de producir o de realizar su potencial productivo, es decir, la imposibilidad de alcanzar un mínimo de realización vital por verse privado un individuo de las capacidades, posibilidades y derechos básicos para hacerlo. Esta forma de ver la pobreza se inspira, de acuerdo a Sen, en la filosofía aristotélica que define la *buena vida* como aquella en la que se han realizado o florecido todas las capacidades encerradas en la naturaleza de los seres humanos. De esta misma teoría fue que Mahbub ul Haq concibió el Índice de Desarrollo Humano.

Un indicador utilizado para medir la pobreza en un país es la *tasa de incidencia de la pobreza*. Utilizando este indicador, que es medido anualmente por el Banco Mundial, es posible afirmar –véase la figura 2.2– que el porcentaje de personas en el mundo que vive por debajo de la línea de pobreza ha disminuido drásticamente en los últimos años. A nivel mundial, el número de personas que viven en una situación de pobreza extrema disminuyó desde un **36 %** en 1990 hasta un **10 %** en 2015.

Es sumamente importante recalcar que gran parte de este porcentaje se debe al progreso logrado por China en las últimas dos décadas ya que en 40 años alrededor de 770 millones de habitantes chinos salieron de la pobreza. Sin embargo, más de **700 millones** de personas, o el **10 % de la población total mundial** aún vive en situación de pobreza extrema. La mayor parte –el 70%– de las personas que viven con menos de \$1,90 dólares al día viven en dos regiones: África Subsahariana y Asia Meridional.

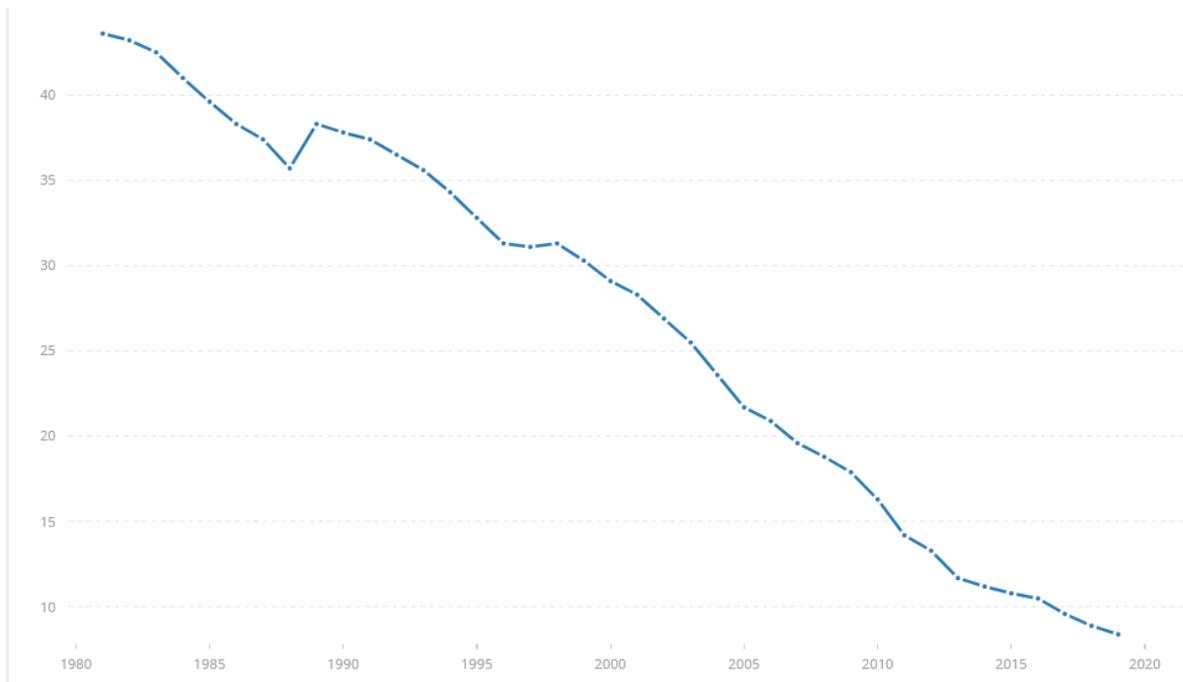


Figura 2.2: Tasa de incidencia de la pobreza, sobre la base de \$1,90 por día (2011 PPA).

Fuente: *Banco Mundial*.

De acuerdo con datos de la ONU [16] existen regiones y sectores poblacionales que son más propensos a caer en la pobreza. En todo el mundo, los índices de pobreza en las áreas rurales son del 17,2%, es decir, más del triple de los mismos índices para las áreas urbanas. Para los que trabajan, su puesto de trabajo no les garantiza una vida digna; el 8% de los trabajadores de todo el mundo, y sus familias, vivían en situación de extrema pobreza en el 2018. Finalmente, las violentas variaciones económicas - inflación del precio de los alimentos y pérdida del poder adquisitivo - afectan fuertemente a los sectores poblacionales que *viven al día*. En 2016, sólo el 45% de la población mundial estaba amparada por un sistema de protección social con al menos una prestación en efectivo.

Tomando en cuenta los puntos mencionados anteriormente, las metas relacionadas con el primer objetivo son:

1. Para 2030, erradicar la pobreza extrema para todas las personas en el mundo, actualmente medida por un ingreso por persona inferior a 1,25 dólares al día.
2. Para 2030, reducir al menos a la mitad la proporción de hombres, mujeres y niños y niñas de todas las edades que viven en pobreza en todas sus dimensiones con arreglo a las definiciones nacionales.
3. Poner en práctica a nivel nacional sistemas y medidas apropiadas de protección social para todos y –para 2030– lograr una amplia cobertura de los pobres y de los más vulnerables.

2.2.2. Objetivo 2: Hambre Cero

“Poner fin al hambre”



El hambre es una sensación física incómoda o dolorosa, causada por un consumo insuficiente de energía alimentaria [17]. Ésta se vuelve crónica cuando la persona no consume una cantidad suficiente de calorías de forma regular para llevar una vida normal, activa y saludable.

Una persona padece de *inseguridad alimentaria* cuando carece de acceso regular a suficientes alimentos nutritivos o recursos suficientes para obtenerlos. La *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación* (FAO, por sus siglas en inglés) mide la inseguridad alimentaria utilizando la *escala de experiencia de inseguridad alimentaria* que se muestra en la figura 2.3.

De acuerdo con la FAO, padecer cualquier nivel de inseguridad alimentaria presenta consecuencias importantes:

“La inseguridad alimentaria severa es uno de los extremos de la escala, pero incluso la inseguridad alimentaria moderada es preocupante. Para las personas que padecen una inseguridad alimentaria moderada, el acceso a los alimentos es incierto. Puede que tengan que sacrificar otras necesidades básicas, sólo para comer. Cuando comen, puede ser lo que está más fácilmente disponible o lo más barato, que puede no ser el alimento más nutritivo. El aumento de la obesidad y otras formas de malnutrición es en parte resultado de este fenómeno. Los alimentos muy elaborados e hipercalóricos, con alto contenido de grasas saturadas, azúcares y sal, son a menudo más baratos y fáciles de conseguir que las frutas y verduras frescas. Los niños que hoy en día se enfrentan al hambre, la inseguridad alimentaria y la desnutrición, pueden tener un mayor riesgo de sobrepeso, obesidad y enfermedades crónicas como la diabetes a lo largo de su vida. En muchos países, la desnutrición y la obesidad coexisten, y ambas pueden ser consecuencia de la inseguridad alimentaria.”

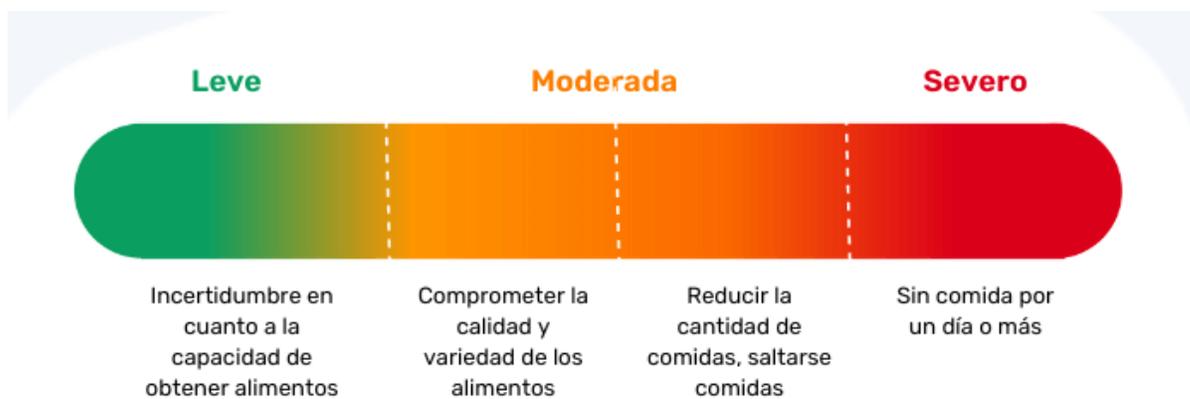


Figura 2.3: Escala de Experiencia de Inseguridad Alimentaria.

Fuente: *Food and Agriculture Organization*.

El indicador cuantificado por la FAO –la *prevalencia de la subalimentación*– se utiliza para monitorear el hambre a nivel mundial y regional. Este se basa en los datos de los países sobre la disponibilidad y consumo de alimentos así como las necesidades calóricas. La figura 2.4 muestra los registros del indicador para los años 2005-2018. De acuerdo con los datos, a nivel mundial, la prevalencia de la subalimentación ha permanecido prácticamente sin cambios, situándose a un nivel **ligeramente por debajo del 11 %**, mientras que el número total de personas subalimentadas se ha ido incrementando lentamente durante

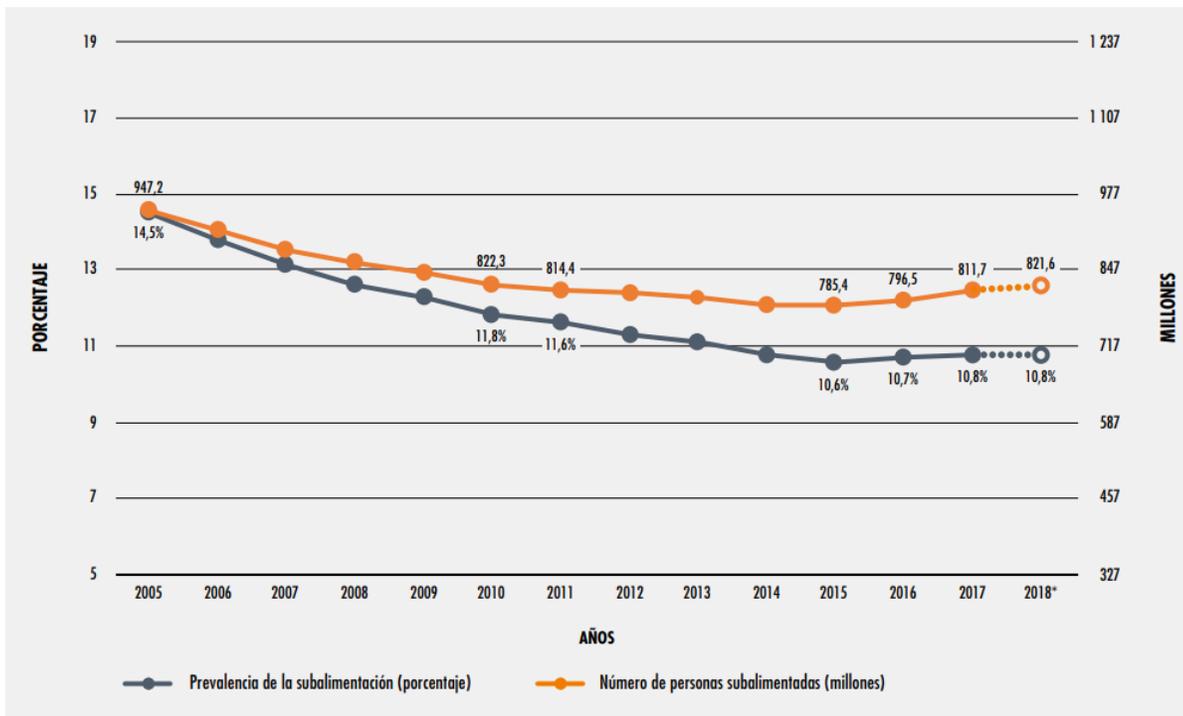


Figura 2.4: **Índice Cuantitativo: Prevalencia de la Subalimentación.**

Fuente: *Food and Agriculture Organization.*

varios años consecutivos.

Las estimaciones actuales indican que **690 millones de personas** en el mundo padecen hambre, es decir, el 8,9% de la población mundial. Según el Programa Mundial de Alimentos, alrededor de **135 millones** de personas padecen hambre severa, debido principalmente a los conflictos causados por los seres humanos, el cambio climático y las recesiones económicas. Si continúan las tendencias recientes, el número de personas afectadas por el hambre superará los 840 millones de personas para 2030.

Es necesario llevar a cabo un cambio profundo en el sistema agroalimentario mundial si queremos alimentar correctamente a la población actual y a los 2000 millones de personas más que vivirán en el mundo para 2050. El aumento de la productividad agrícola y la producción alimentaria sostenible son cruciales para ayudar a aliviar los riesgos del hambre. **500 millones de pequeñas granjas** en todo el mundo, la mayoría aún con producción de secano, proporcionan hasta el **80% de los alimentos** que se consumen en gran parte del mundo en desarrollo.

Un factor decisivo que se debe analizar es el uso que se le da a los alimentos producidos. Hoy en día se producen alimentos más que suficientes para alimentar a todos. Sin embargo, de las calorías cosechadas, únicamente el **55% de las calorías son consumidas por humanos**, **36% son usadas para alimentar ganado** y **9% se convierten en combustible**. De las 5000 millones de hectáreas cosechables disponibles en la tierra –el 38% de la superficie global– únicamente **un tercio es utilizado para cosechar**, mientras que los dos tercios restantes son utilizados como zonas de pastoreo [18].

Adicionalmente, desde el inicio de los años 1900, alrededor del **75% de la diversidad de cultivos ha desaparecido de los campos** de los agricultores. Un mejor uso de la biodiversidad agrícola podría contribuir a dietas más nutritivas, mejorar las formas de vida en las comunidades agrícolas y ayudar a que los sistemas agrícolas sean más resistentes y sostenibles.

Con la intención de alcanzar el segundo objetivo, tomando en cuenta las problemáticas mencionadas, las principales metas acordadas han sido:

1. Para 2030, poner fin al hambre y asegurar el acceso de todas las personas a una alimentación sana, nutritiva y suficiente durante todo el año.
2. Para 2030, duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos en pequeña escala, entre otras cosas, mediante un acceso seguro y equitativo a las tierras, a otros recursos de producción e insumos, conocimientos, servicios financieros, mercados y oportunidades para la generación de valor añadido y empleos no agrícolas.
3. Para 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción; contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas; fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, a los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad del suelo y de la tierra.

2.2.3. Objetivo 3: Salud y Bienestar

“Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades”

La *esperanza de vida*, es decir, el número de años que en promedio se espera que viva una persona después de nacer, se incrementó en 5 años entre los años 2000 y 2015 –el aumento más rápido desde los años 60–. Esos avances invierten los descensos registrados por la Organización Mundial de la Salud durante los años 90, en los que la esperanza de vida se redujo en África por la epidemia de SIDA, y en Europa del Este como consecuencia del derrumbe de la Unión Soviética [19]. El mayor aumento se registró en la región de África, en la que la esperanza de vida aumentó en **9,4 años** hasta llegar a los **60 años**, que se debió principalmente a las mejoras en la supervivencia infantil, los progresos en la lucha contra el paludismo y la ampliación del acceso a terapias antirretrovirales para el tratamiento del VIH.



Sin embargo, existen fuertes desigualdades en el acceso a la atención sanitaria dentro de un mismo país y de un país a otro. Las Estadísticas Sanitarias Mundiales del año 2016 [20] ponen de relieve que muchos países están todavía muy lejos de lograr la cobertura sanitaria universal, medida con arreglo a un índice de acceso a 16 servicios esenciales, en particular en las regiones de África y del Mediterráneo Oriental. Por consecuencia, un número considerable de usuarios de los servicios se enfrentan a gastos sanitarios mayúsculos que rebasan el 25% del total del gasto de su economía familiar.

De acuerdo con los reportes de las Naciones Unidas [21] el progreso en temas de salubridad ha sido irregular. Cada día mueren 17,000 niños menos que en 1990; pero **más de cinco millones de niños** siguen muriendo cada año antes de cumplir los 5 años hoy en día donde **cuatro de cada cinco muertes** de los menores de cinco años ocurren en África Subsahariana y en Asia Meridional.

La mortalidad materna e infantil representa un enorme reto para los sectores de salud y desarrollo, pero puede que sus causas estén relacionadas con el desarrollo humano de las progenitoras; los hijos de madres que han recibido educación, incluso las madres con tan solo educación primaria, tienen más probabilidad de sobrevivir que los hijos de madres sin educación. Además, la *tasa de mortalidad materna* –la proporción de madres que no sobreviven el parto en comparación con las que lo hacen– en las regiones en vías de desarrollo es **14 veces mayor** que en las regiones desarrolladas.

El prejuicio, la discriminación de grupos vulnerables y la pobre educación de la población general en torno a enfermedades virales representan un obstáculo para la erradicación de las mismas. En 2017, **36.9 millones** de personas vivían con VIH - de las cuales **21.7 millones** tuvieron acceso a terapia antirretroviral. La tuberculosis sigue siendo la principal causa de muerte entre las personas que viven con el VIH, y representa aproximadamente una de cada tres muertes relacionadas con el SIDA. Aún con el significativo avance médico contra el virus, el VIH es la **principal causa de muerte** para las mujeres en edad

reproductiva en todo el mundo. El SIDA es ahora la principal causa de muerte entre adolescentes (de 10 a 19 años) en África y la segunda causa más común de muerte entre los adolescentes de todo el mundo.

Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos, en todas las edades, es importante para la construcción de sociedades prósperas. Las principales metas relacionadas con este objetivo son:

1. Para 2030, reducir la tasa mundial de mortalidad materna a menos de 70 por cada 100.000 niños nacidos vivos.
2. Para 2030, poner fin a las muertes evitables de recién nacidos y de niños menores de 5 años, logrando que todos los países intenten reducir la mortalidad neonatal al menos hasta 12 por cada 1.000 nacidos vivos, y la mortalidad de niños menores de 5 años al menos hasta 25 por cada 1.000 nacidos vivos.
3. Para 2030, poner fin a las epidemias del SIDA, la tuberculosis, la malaria y las enfermedades tropicales desatendidas y combatir la hepatitis, las enfermedades transmitidas por el agua y otras enfermedades transmisibles.
4. Para 2030, reducir en un tercio la mortalidad prematura por enfermedades no transmisibles mediante la prevención y el tratamiento, y promover la salud mental y el bienestar.
5. Fortalecer la prevención y el tratamiento del abuso de sustancias adictivas, incluido el uso indebido de estupefacientes y el consumo nocivo de alcohol.
6. Y finalmente, lograr la cobertura sanitaria universal, en particular la protección contra los riesgos financieros, el acceso a los servicios de salud esenciales de calidad y el acceso a medicamentos y vacunas seguros, eficaces, asequibles y de calidad para todos.

2.2.4. Objetivo 4: Educación de Calidad

“Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos”



La *educación* es un proceso humano y cultural complejo. Esta se define como el procedimiento de facilitar el aprendizaje o la adquisición de conocimientos, así como de habilidades, valores, creencias y hábitos. La educación permite la movilidad socioeconómica ascendente y es clave para salir de la pobreza [22].

Durante la última década se han conseguido grandes avances, ampliando el acceso a la educación y aumentando las tasas de matriculación en las escuelas, en todos los niveles, especialmente para las niñas. La matriculación en la enseñanza primaria en los países en desarrollo ha alcanzado el **91 %**; además, entre los años 2000 y 2012, el porcentaje de niños en edad de asistir a la escuela primaria que no reciben educación escolarizada ha **disminuido del 40 % al 22 %** en África

Subsahariana y del **20 % al 6 %** en Asia Meridional.

No obstante, **57 millones de niños** en edad de escolarización primaria siguen sin asistir a la escuela. Más de la mitad de los niños que no están matriculados en la escuela viven en el África Subsahariana. Debido a su crecimiento demográfico, en 2030 esta región tendrá que proporcionar educación básica a **444 millones de niños** - lo cual representa una cantidad **2.6 veces mayor** al número de alumnos matriculados hoy en día.

Educar a las generaciones futuras no es suficiente para solucionar el problema; se debe educar a las generaciones presentes. **617 millones de jóvenes** en el mundo carecen de los conocimientos básicos en aritmética y de un nivel mínimo de alfabetización. Al no tener conocimientos sólidos en las áreas

de conocimiento más atractivas para el mercado laboral, estos jóvenes son susceptibles a desempeñar trabajos mal remunerados y de índole informal y de trabajar largas jornadas laborales que no permitan su desarrollo personal y que, además, carecen de algún tipo de seguridad social o económica.

Con el propósito de alcanzar el objetivo de educación, atacando las problemáticas presentes y futuras, las principales metas acordadas han sido:

1. De aquí a 2030, asegurar que todas las niñas y niños terminen la enseñanza primaria y secundaria, que ha de ser gratuita, equitativa y de calidad, y producir resultados de aprendizaje pertinentes y efectivos.
2. De aquí a 2030, asegurar el acceso igualitario de todos los hombres y las mujeres a una formación técnica, profesional y superior de calidad, incluida la enseñanza universitaria.
3. De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, el trabajo decente y al emprendimiento.
4. De aquí a 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible.

2.2.5. Objetivo 5: Igualdad de Género

“Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas”



América Latina y el Caribe son las regiones del planeta con la mayor desigualdad, discriminación y violencia, situación que afecta a millones de niñas, niños y adolescentes [23]. Las identidades, vivencias, oportunidades y discriminaciones que ellos experimentan no son homogéneas; cambian según el lugar de residencia, las normas sociales y la condición de pobreza. A eso se le suman factores como vivir con algún tipo de discapacidad, pertenecer a comunidades indígenas o afrodescendientes, además de las necesidades y cuidados específicos de niñas y adolescentes por el hecho de ser mujeres y menores de edad.

El empoderamiento de las niñas, adolescentes y mujeres es clave para romper con el ciclo de discriminación y violencia. Cuando una sociedad consigue que las mujeres —en toda su diversidad— alcancen su plena autonomía económica, física y política, asegura que se cumplan sus derechos en igualdad de condiciones y, por tanto, garantiza también que niños, niñas y adolescentes tengan un desarrollo pleno.

Se han conseguido algunos avances relacionados con la igualdad de género durante las últimas décadas [24]: más niñas están escolarizadas y se obliga a menos niñas al matrimonio precoz; hay más mujeres con cargos en parlamentos y en posiciones de liderazgo. Así, las leyes se están reformando para fomentar la igualdad de género.

Sin embargo:

- A nivel mundial, **750 millones** de mujeres y niñas se casaron **antes de los 18 años** y **al menos 200 millones** de mujeres y niñas en **30 países** han sido sometidas a mutilación genital femenina.
- En **18 países**, los esposos pueden impedir legalmente que sus esposas trabajen; en **39 países**, las hijas y los hijos no tienen los mismos derechos de herencia; y en **49 países** no existen leyes que protejan a las mujeres de la violencia doméstica.

- **Una de cada cinco** mujeres y niñas han sufrido violencia física y/o sexual por parte de una pareja íntima, **durante los últimos 12 meses**. Solo el 52 % de las mujeres casadas o en unión toman libremente sus propias decisiones sobre relaciones sexuales, uso de anticonceptivos y atención médica.

Además, de acuerdo con el Banco Mundial [25], la participación de las mujeres adultas en la fuerza laboral en todo el mundo es 27 puntos porcentuales más baja que la de los hombres. Las brechas de género salariales se mantienen en alrededor del 20 % –véase la figura 2.5– y la mayoría de ellas “siguen siendo inexplicables por las diferencias en educación”. Numerosos factores explican esto, como la discriminación laboral por razones de sexo, las normas sociales desventajosas sobre los roles en el hogar y en el mercado, la falta de cuidado infantil y políticas de licencias adecuadas, acoso sexual y transporte inseguro, limitaciones específicas en el acceso a las finanzas y los mercados, y obstáculos legales y normativos para constituir empresas y hacerlas crecer.

Tasas de participación en la fuerza laboral (%)

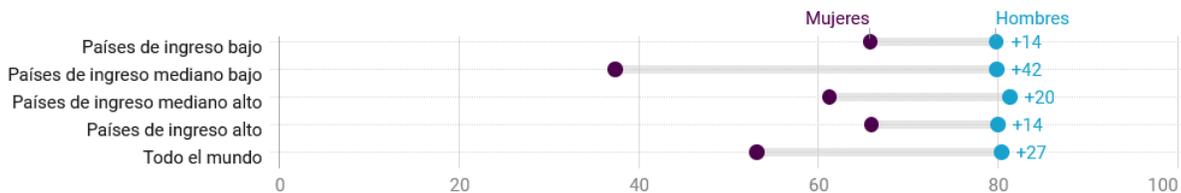


Figura 2.5: **Tasas de Participación en la fuerza laboral (%) - Diferenciado por Ingresos.**

Fuente: *Banco Mundial*.

No se puede hablar de logros relacionados con la igualdad de género al mismo tiempo que situaciones tan injustas siguen sucediendo en todos los niveles sociales. Es por esto, que las principales metas acordadas para alcanzar el objetivo de la igualdad son:

1. Poner fin a todas las formas de discriminación contra todas las mujeres y las niñas en todo el mundo.
2. Eliminar todas las formas de violencia contra las mujeres y las niñas en los ámbitos público y privado, incluidas la trata y la explotación sexual y otros tipos de explotación.
3. Eliminar todas las prácticas nocivas, como el matrimonio infantil, precoz y forzado, y la mutilación genital femenina.
4. Reconocer y valorar los cuidados y el trabajo doméstico no remunerados mediante servicios públicos, infraestructuras y políticas de protección social, promoviendo la responsabilidad compartida en el hogar y en la familia.

2.2.6. Objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento

“Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”



Tal como fue mencionado en la introducción, las grandes civilizaciones antiguas se asentaron cerca de fuentes de agua – recordar la civilización egipcia, mesopotámica y la china–. Fue gracias a estos aliados hídricos que las civilizaciones lograron regar sus cultivos, saciar su sed, vivir con sanidad e higiene y transportar múltiples recursos esenciales. En el último siglo, la demanda de agua a nivel mundial ha aumentado debido a la alta tasa de crecimiento demográfico, la rápida urbanización, el desarrollo económico y las modalidades cambiantes de consumo. Además,

está pronosticado que esta demanda se intensificará con el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos que cada vez son originados con mayor frecuencia, como las sequías [26].

En la actualidad existen varios asentamientos humanos que inclusive siguen sin gozar de los mismos beneficios de los recursos hídricos que gozaron las civilizaciones antiguas. La escasez de agua afecta a **más del 40 %** de la población mundial y se prevé que este porcentaje aumente. **Más de 1,700 millones de personas** viven actualmente en cuencas fluviales en las que el consumo de agua supera la recarga.

De acuerdo con reportes de la ONU [27], si bien se ha conseguido progresar de manera sustancial en ampliar el acceso a agua potable y saneamiento, existen miles de millones de personas que aún carecen de estos servicios básicos. En todo el mundo, **una de cada tres** personas no tiene acceso a agua potable salubre, **dos de cada cinco** personas no disponen de una instalación básica destinada al lavado de manos con agua y jabón, y **más de 673 millones** de personas aún defecan al aire libre.

La escasez de agua se encuentra fuertemente relacionada con dinámicas de desigualdad, tanto económicas como de género. Las áreas rurales son las más propensas a carecer de servicios de agua potable seguros u acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura. Además, las mujeres y las niñas son las encargadas de recolectar agua en el **80 % de los hogares** sin acceso a agua corriente. Esto último es preocupante porque los depósitos de agua suelen encontrarse a kilómetros de los asentamientos –en África Subsahariana las mujeres destinan, en promedio, una hora diaria a la recolección de agua [28]–, por lo que las mujeres deben caminar largas distancias para recolectar el recurso, volviéndose vulnerables a ataques sexuales, fatiga excesiva o privación de oportunidades para su propio desarrollo.



No solo debemos enfocar los esfuerzos en la falta de agua; también hay que considerar la calidad del agua existente. Más del 80 % de las aguas residuales resultantes de las actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación. Las enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento siguen estando entre las principales causas de fallecimiento de niños menores de 5 años; **más de 800 niños mueren cada día** por enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene.

Afortunadamente existen suficientes recursos hoy en día para satisfacer las necesidades hídricas de las personas, pero éstos se emplean en sectores “más rentables y atractivos”; aproximadamente el **70 % de todas las aguas extraídas** de los ríos, lagos y acuíferos se utilizan para el riego –este porcentaje puede aumentar hasta a un 95 % en algunos países en desarrollo–. De acuerdo con la Organización para la Alimentación y la Agricultura: *“La retirada de agua para riego y ganado aumentará a medida que el crecimiento de la población mundial y el desarrollo económico impulsen la demanda de alimentos. Las tendencias dietéticas apuntan a un aumento global en el consumo de alimentos cuya producción requiere más agua”*. Recordemos, del objetivo Hambre Cero, que únicamente el 55 % de las calorías cosechadas son consumidas por humanos; por lo tanto una modificación en nuestros patrones de consumo de carne podría liberar la carga hídrica de ciertos sectores.

El sexto objetivo presenta complejas implicaciones: una combinación de administración de recursos finitos, desigualdad económica y de género, patrones de consumo, salubridad e infraestructura. Para alcanzar el objetivo, se han propuesto las siguientes metas:

1. De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.
2. De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre.
3. De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad

el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.

- De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

2.2.7. Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante

“Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”



Nuestra vida cotidiana depende de servicios energéticos fiables y asequibles para funcionar correctamente y de forma equitativa. Un sistema energético bien establecido apoya a todos los sectores, desde el empresarial, el sector salud, educación, agricultura, el sector infraestructura, las comunicaciones, hasta el sector tecnología. Y a la inversa, la falta de acceso al suministro de energía y a sistemas de transformación es un obstáculo para el desarrollo humano y económico [29].

El mundo está avanzando hacia la consecución del Objetivo 7 con indicios alentadores de que la energía se está volviendo más sostenible y ampliamente disponible [30].

El porcentaje de personas con acceso a la electricidad actualmente es el mayor en la historia, pasando de un 83 % global en el año 2010 a un 87 % en el 2015, acelerando a un 89 % en 2017. Sin embargo, 840 millones de personas carecieron de este servicio en el año 2017 –la mayoría de estas personas pertenecientes a la región del África Subsahariana–. La figura 2.6 muestra que, en esa región, únicamente el 44 % de la población tuvo acceso al servicio, e implica que **573 millones de personas sufrieron falta de electricidad**.

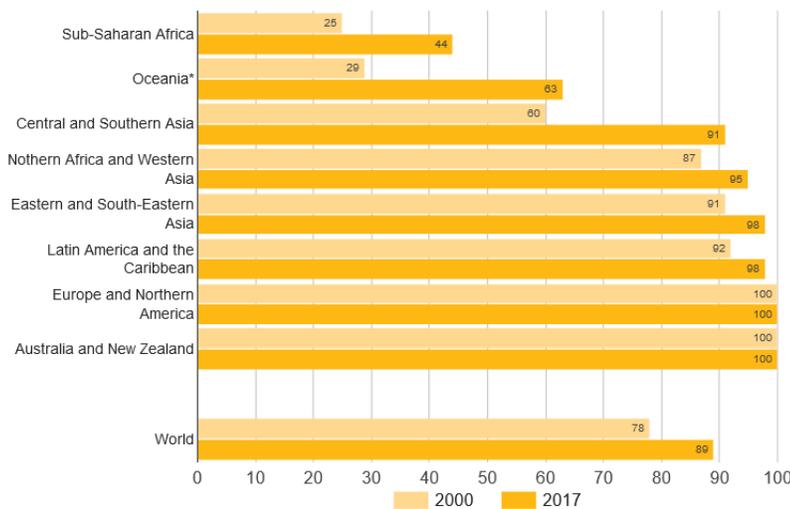


Figura 2.6: Proporción de la población con acceso a la electricidad, 2000 y 2017.

Fuente: UN Statistics.

Globalmente, la electrificación de las zonas rurales avanzó rápidamente entre los años 2015 y 2017, pero aún existe una gran disparidad. En el año 2017, la cobertura rural era del **78 % comparada con**

el 97 % en las zonas urbanas. Esto implica que el 87 % de las personas que viven actualmente sin acceso a servicios eléctricos radican en zonas rurales.

Durante muchos decenios, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas han sido las principales fuentes de producción de electricidad, pero la quema de combustibles con alto contenido de carbono produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero –la producción energética es el factor que contribuye principalmente al cambio climático, y presenta alrededor del 60 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero– los cuales tienen efectos perjudiciales para el bienestar de la población y el medio ambiente.

El porcentaje de energía renovable del total de energía consumida en 2017 alcanzó el 17.5 %, ascendiendo de un 16.6 % en 2010. La mayoría del crecimiento del sector energético renovable se concentra en el sector eléctrico. Esto se debe principalmente a la rápida expansión y adopción de la energía eólica y solar. Sin embargo, la electricidad representa únicamente el 20 % del uso de energía total. El otro 80 % se concentra en los sectores de calefacción y transporte, en los cuales las alternativas renovables han penetrado únicamente en un 9 % y 3.3 % del mercado global en el 2016, respectivamente.

La *eficiencia energética* es el uso de una menor cantidad de energía para desarrollar un mismo proceso u obtener un mismo resultado. Las casas y edificios con eficiencia energética utilizan una menor cantidad de energía para calentar, enfriar y hacer uso de aparatos electrónicos. Así mismo, las estructuras con eficiencia energética utilizan menos energía para producir bienes. Ésta es una de las soluciones más económicas para combatir el cambio climático, reducir el costo energético para los consumidores y mejorar la competencia entre las empresas.

La *intensidad energética primaria* –definida como el total de energía administrada por unidad de producto interno bruto– mejoró un 2.5 % en el año 2016, colocando la tasa anual promedio de mejora entre los años 2010 y 2016 en un 2.3 %. Esta tasa es significativamente mejor a la observada en el periodo 1990-2010, cuando la mejora anual promedio rondaba el 1.3 %. Sin embargo, la tasa de mejora debe aumentar significativamente si se busca alcanzar metas de desarrollo.

Tomando en cuenta los factores que determinan el desarrollo de una infraestructura eléctrica sostenible e incluyente, las metas del Objetivo 7 son:

1. De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.
2. De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes renovables.
3. De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.

2.2.8. Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico

“Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.”



La erradicación de la pobreza sólo es posible mediante empleos estables y bien remunerados [31]. Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la cifra de desempleados asciende en 2015 a más de **204 millones**. El desempleo mundial aumentó de 170 millones de personas en 2007 a casi **202 millones de personas en 2012** dejando en evidencia que el crecimiento poblacional fue más rápido que el crecimiento en la demanda de trabajadores.

A nivel mundial, el número de empleos necesarios entre 2016 y 2030, simplemente para que las personas que acceden al mercado de trabajo mantengan el ritmo de crecimiento de la población mundial en edad laboral,

ascendió a 470 millones. Esto significa 30 millones de empleos al año.

Además de crear empleos, también tenemos que mejorar las condiciones de aproximadamente 780 millones de personas que trabajan, pero no ganan lo suficiente para que ellos y sus familias puedan salir de la pobreza.

La Organización de las Naciones Unidas define *trabajo decente* como aquel que permite a las personas tener oportunidades para realizar una actividad productiva que aporte un ingreso justo, seguridad en el lugar de trabajo y protección social para las familias. La continua falta de oportunidades de trabajo decente, la insuficiencia de las inversiones y el bajo consumo erosionan el contrato básico subyacente en las sociedades democráticas: que todos debemos beneficiarnos del progreso.

El crecimiento económico per cápita –cuantificado mediante el producto interno bruto per cápita– es un reflejo del aumento en la calidad de vida económica del habitante promedio de cierta región. Lamentablemente, el crecimiento económico sucede de manera desigual entre las naciones. La UNCTAD [32] –rama de las Naciones Unidas dedicada al comercio y desarrollo– reporta lo siguiente en el periodo 2015-2021:

- En el mundo el crecimiento económico per cápita fue de 0.97 %.
- En África el producto interno bruto per cápita se redujo en un -0.83 %, pero regiones como África Central presentaron un decremento del -3 %.
- La Eurozona creció económicamente en un 2.12 %.
- Los países en vías de desarrollo latinoamericanos redujeron su ingreso bruto per cápita en un -1.51 %.
- La única región en el continente americano con un crecimiento positivo fue Norteamérica, la cual creció un 0.98 %.

Las metas acordadas con el propósito del alcanzar el objetivo de garantizar trabajo decente y un sano crecimiento económico son:

1. Mantener el crecimiento económico per cápita de conformidad con las circunstancias nacionales y, en particular, un crecimiento del producto interno bruto de al menos el 7 % anual en los países menos adelantados.
2. Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas, centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra.
3. Promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes, el emprendimiento, la creatividad y la innovación, y fomentar la formalización y el crecimiento de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas, incluso mediante el acceso a servicios financieros.
4. Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales, y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al *Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles*, empezando por los países desarrollados.
5. De aquí a 2030, reducir considerablemente la proporción de jóvenes que no están empleados y no cursan estudios ni reciben capacitación.
6. Adoptar medidas inmediatas y eficaces para erradicar el trabajo forzoso, poner fin a las formas contemporáneas de esclavitud y a la trata de personas y asegurar la prohibición y eliminación de las peores formas de trabajo infantil, incluidos el reclutamiento y la utilización de niños soldados y, de aquí a 2025, poner fin al trabajo infantil en todas sus formas.

2.2.9. Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructuras.

“Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.”

El crecimiento económico, el desarrollo social y la preservación del ambiente dependen en gran medida de la inversión en infraestructuras, desarrollo industrial sostenible y progreso tecnológico [33].

La industrialización inclusiva y sostenible, junto con la innovación y la infraestructura, pueden impulsar a las fuerzas económicas dinámicas y competitivas a generar empleo e ingresos. Estas desempeñan un papel clave a la hora de introducir y promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos. El efecto multiplicador del empleo que tiene la industria repercute de manera positiva en la sociedad pues cada empleo en el sector manufacturero crea **2.2 empleos** en otros sectores de la economía.



Las infraestructuras básicas como las carreteras, las tecnologías de información, el saneamiento, la energía eléctrica y el agua siguen siendo escasos en muchos países en desarrollo. Por ejemplo:

- El 16 % de la población mundial no tiene acceso a redes de banda ancha móvil.
- Para muchos países africanos, sobre todo en los países con menores ingresos, las limitaciones en materia de infraestructura afectan la productividad de las empresas en alrededor del 40 %.
- En los países en desarrollo, apenas el 30 % de la producción agrícola se somete a procesos industriales. En los países de altos ingresos, el 98 % se procesa. Esto sugiere que hay grandes oportunidades para los países en desarrollo en materia de *agronegocios*.

Con el propósito de fomentar el desarrollo industrial incluyente y la creación de infraestructuras sostenibles que faciliten las dinámicas económicas, las metas del noveno objetivo son:

1. Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.
2. Promover una industrialización inclusiva y sostenible y, de aquí a 2030, aumentar significativamente la contribución de la industria al empleo y al producto interno bruto.
3. Aumentar el acceso de las pequeñas industrias y otras empresas, particularmente en los países en desarrollo, a los servicios financieros, incluidos créditos asequibles, y su integración en las cadenas de valor y los mercados.
4. Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

2.2.10. Objetivo 10: Reducción de las Desigualdades

“Reducir la desigualdad en y entre los países.”



El capital del que disponen los individuos influye en sus posibilidades de acceso a los bienes y servicios disponibles en la sociedad. Su distribución desigual origina graves problemas socio-económicos, que en la actualidad van en aumento a nivel mundial. La información sobre el nivel de desigualdad en un territorio es clave para poder diseñar soluciones que mejoren la situación [34].

El *coeficiente Gini* es el método más utilizado para medir la desigualdad salarial. Es una herramienta analítica que suele emplearse para medir la concentración de ingresos entre los habitantes de una región, en un periodo de tiempo determinado. Este es un número entre 0 y 1, donde 0 se corresponde con la perfecta igualdad –todos tienen los mismos ingresos– y donde el valor 1 se corresponde con la perfecta desigualdad –una persona tiene todos los ingresos y los demás ninguno–.

Los tres países con la mayor desigualdad son: Sudáfrica, Namibia y Suriname, con valores de **0.63**, **0.591** y **0.579**, respectivamente. Los países con la mayor igualdad son Bielorrusia, Eslovenia y República Eslovaca, los tres con valores cercanos a **0.24**.

Según datos de Oxfam, de 2016:

- El 1 % más rico de la población del mundo posee más riqueza que el 99 % de los habitantes del planeta.
- La riqueza de las 62 personas más ricas del mundo aumentó de 2010 a 2015 en un 45 %. Poseen la misma riqueza que la mitad más pobre de la población mundial, 3,600 millones de personas.

De acuerdo con el *World Inequity Report 2022* [35], México calificó como uno de los países más desiguales del mundo en el año 2021. Contando con una población de 129,789,000 habitantes, el ingreso nacional anual promedio en la población adulta fue de MXN 232,790. Mientras que el 50 % más pobre de la población gana MXN 42,700 (9 % del total de las riquezas), el 10 % más rico de la población gana 30 veces más, MXN 1,335,030 (57 % del total de las riquezas). Las desigualdades en las emisiones de dióxido de carbono también son muy altas en México. La emisión promedio ronda las 5 toneladas por persona. El 50 % más pobre de la población emite un promedio de 2 toneladas de CO₂ por persona, mientras que las emisiones del 10 % más rico es de 20 toneladas, y el 1 % más rico emite en promedio 83.7 toneladas de CO₂. Así, como en México, la mayoría de los países se encuentran en una situación en donde el 10 % más rico acapara más del 50 % de los ingresos generados.

Con la intención de una reducción significativa de las desigualdades, entre y dentro de las naciones, las metas del décimo objetivo son:

1. De aquí a 2030, lograr progresivamente y mantener el crecimiento de los ingresos del 40 % más pobre de la población a una tasa superior a la media nacional.
2. Garantizar la igualdad de oportunidades y reducir la desigualdad de resultados, incluso eliminando las leyes, políticas y prácticas discriminatorias y promoviendo legislaciones, políticas y medidas adecuadas a ese respecto.
3. Adoptar políticas, especialmente fiscales, salariales y de protección social, y lograr progresivamente una mayor igualdad.
4. Mejorar la reglamentación y vigilancia de las instituciones y los mercados financieros mundiales y fortalecer la aplicación de esos reglamentos.

2.2.11. Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.

“Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.”

La mitad de la humanidad –aproximadamente 3,500 millones de personas– viven actualmente en ciudades, y se prevé que esta cifra aumente a 5,000 millones para el año 2030. [36].

Uno de los retos más urgentes y preocupantes a los que se enfrentan actualmente las ciudades es la desigualdad. Hay 828 millones de personas que viven en barrios marginales y esta cifra sigue aumentando. La mayoría de estas personas se encuentran en Asia Oriental y Sudoriental.

Los niveles de contaminación en las zonas urbanas son también preocupantes: Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos del crecimiento económico, ya que contribuyen aproximadamente al 60% del PIB mundial. Sin embargo, aunque las ciudades solo ocupan el 3% de la superficie terrestre, representan entre un 60% y un 80% del consumo de energía y el 75% de las emisiones de carbono.

Desde 2016, el 90% de los habitantes de las ciudades respira aire que no cumple las normas de seguridad establecidas por la Organización Mundial de la Salud, lo que provocó un total de 4.2 millones de muertes debido a la contaminación atmosférica. Más de la mitad de la población urbana mundial estuvo expuesta a niveles de contaminación del aire al menos 2.5 veces más altos que el estándar de seguridad.

Muchas ciudades son también más vulnerables al cambio climático y a los desastres naturales debido a su elevada concentración de personas y su ubicación. Así, la rápida urbanización está ejerciendo presión sobre los suministros de agua dulce, las aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública.

El costo de una deficiente planificación urbanista puede apreciarse en los enormes barrios marginales, el tráfico masivo, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo desmedido de recursos finitos. Los barrios marginales son un lastre para el PIB y reducen la esperanza de vida. Esto último es preocupante, pues está estimado que en los próximos decenios, el 95% de la expansión urbana tendrá lugar en los países en desarrollo.

Para impulsar un desarrollo urbano sostenible, donde todos los ciudadanos disfruten de una digna calidad de vida y estabilidad social sin perjudicar el medio ambiente, las metas acordadas son:

1. De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles, y mejorar los barrios marginales.
2. De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos, y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público.
3. De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
4. De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.



2.2.12. Objetivo 12: Producción y consumo responsables.

“Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.”

De acuerdo con las Naciones Unidas, si la población mundial alcanza las 9.600 millones de personas en 2050, para mantener el actual estilo de vida será necesario el equivalente a casi **tres planetas** [37].



En los próximos decenios, se espera que más personas se sumen a la clase media en todo el mundo. Esto es bueno para la prosperidad individual, pero aumentará la demanda de recursos naturales, ya limitados. El consumo y la producción mundiales dependen del uso del medio ambiente natural y de los recursos de una manera insostenible. El progreso económico y social conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación medioambiental que está poniendo en peligro los mismos sistemas de los que depende nuestro futuro desarrollo. Si no actuamos para cambiar nuestras modalidades de consumo y producción, vamos a causar daños irreversibles al medio ambiente.

Menos del 3% del agua del mundo es fresca; 2,5% está congelada en la Antártica, el Ártico y los glaciares. Por lo tanto, la humanidad únicamente cuenta con el 0,5% para todas las necesidades del ecosistema y del ser humano. Lamentablemente, se está contaminando más rápido de lo que la naturaleza puede reciclar y purificar el agua en ríos y lagos. Recordemos del objetivo 6, Agua Limpia y Saneamiento, que más de mil millones de personas no tienen acceso directo al agua potable, cifra que puede aumentar significativamente debido al uso excesivo del agua.

Si bien los impactos ambientales más graves en los alimentos se producen en la fase de producción –agricultura y procesamiento de alimentos–, los hogares influyen en estos impactos a través de sus hábitos y elecciones dietéticas. Esto, en consecuencia, afecta el medio ambiente a través del consumo de energía relacionada con los alimentos y la generación de residuos. La degradación de la tierra, la disminución de la fertilidad del suelo, el uso insostenible del agua, la sobrepesca y la degradación del medio marino están disminuyendo la capacidad de la base de recursos naturales para suministrar alimentos.

Aún si la producción de alimentos es necesaria para alimentar a la población humana –recordemos el objetivo 2 relacionado con el hambre– mucha de la comida producida termina desperdiciada por malas prácticas del transporte y la cosecha. Cada año, se calcula que un tercio de todos los alimentos producidos, equivalentes a 1,300 millones de toneladas, termina pudriéndose en los contenedores de los consumidores y de minoristas.

La *huella ecológica* suma todos los servicios ecológicos que demandan las personas que compiten por el espacio. Incluye el área biológicamente productiva (o biocapacidad) necesaria para cultivos, pastizales, áreas edificadas, caladeros y productos forestales. También incluye el área de bosque necesaria para absorber las emisiones de dióxido de carbono que no pueden ser absorbidas por el océano. El carbono procedente de la quema de combustibles fósiles ha sido el componente dominante de la huella ecológica de la humanidad durante más de medio siglo y su proporción continúa creciendo. Tanto la *biocapacidad* como la huella ecológica se expresan en una unidad común denominada hectárea global (gha). En 2012, la biocapacidad total de la Tierra era de 12,200 millones de gha, o 1,7 gha por persona, mientras que la huella ecológica de la humanidad era de 20,100 millones de gha, o 2,8 gha por persona. La Huella Ecológica se distribuye de manera desigual, y los residentes de los países de altos ingresos ejercen una presión desproporcionada sobre la naturaleza, ya que utilizan más de lo que les corresponde de los recursos de la Tierra. En el otro extremo de la escala, las personas de algunos de los países de ingresos más bajos del mundo luchan por satisfacer sus necesidades básicas.

La *huella de carbono* es la cantidad total de gases de efecto invernadero (incluidos el dióxido de carbono y el metano) que generan nuestras acciones. La huella de carbono promedio de una persona en los Estados Unidos es de 16 toneladas, una de las tasas más altas del mundo. A nivel mundial, la

huella de carbono promedio está cerca de las 4 toneladas. Para tener una mejor oportunidad de evitar un aumento de 2 °C en las temperaturas globales, la huella de carbono global promedio por año debe reducirse a menos de 2 toneladas para 2050.

Moderar el consumo humano es crucial para construir un futuro sostenible. Considerando las tasas de consumo actuales, la restringida disponibilidad de los recursos necesarios para la producción de bienes y el deterioro ambiental producido por esta misma producción, es necesario tomar acción inmediata. Las metas que buscan guiar a la humanidad en el doceavo objetivo son:

1. De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.
2. De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha.
3. De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.
4. Alentar a las empresas, en especial a las grandes empresas y a las transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes.
5. De aquí a 2030, asegurar que las personas de todo el mundo tengan la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza.

La última meta mencionada es de particular importancia, pues es la gente que, mediante su dinero y poder adquisitivo, impulsa al mercado a producir ciertos bienes. La gente debe transformar sus tendencias consumistas y simultáneamente exigir a las empresas prácticas amigables con el medio ambiente. Solo mediante una transformación en la conciencia consumista de la población será posible alcanzar un futuro de consumo sostenible en un mundo sobrepoblado.

2.2.13. Objetivo 13: Acción por el Clima

“Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.”

El concepto de una temperatura promedio para todo el mundo puede parecer extraño. Después de todo, en este mismo momento, las temperaturas más altas y más bajas en la Tierra probablemente estén separadas por más de 55°C. Las temperaturas varían de la noche al día y entre extremos estacionales en los hemisferios norte y sur. Esto significa que algunas partes de la Tierra son bastante frías, mientras que otras son extremadamente calientes. Hablar de la temperatura “media”, entonces, puede parecer una tontería. Sin embargo, el concepto de una temperatura promedio global es conveniente para detectar y rastrear cambios en el presupuesto de energía de la Tierra (cuánta luz solar absorbe la Tierra menos cuánto irradia al espacio como calor) a lo largo del tiempo [38].



Dado el tremendo tamaño y la capacidad calorífica de los océanos globales, se necesita una gran cantidad de energía térmica para elevar la temperatura promedio anual de la superficie de la Tierra, incluso en una pequeña cantidad. El aumento de aproximadamente 1 grado Celsius en la temperatura global promedio de la superficie que ha ocurrido desde la era preindustrial (1880-1900) puede parecer pequeño, pero significa un aumento significativo en el calor acumulado. Ver la figura 2.7, las barras azules indican años más fríos que el promedio; las barras rojas muestran años más cálidos que el promedio. Ese calor adicional está provocando temperaturas extremas regionales y estacionales, reduciendo la capa de nieve y el hielo marino, intensificando las fuertes lluvias y cambiando los rangos de hábitat para plantas y animales, expandiendo algunos y reduciendo otros.

GLOBAL AVERAGE SURFACE TEMPERATURE

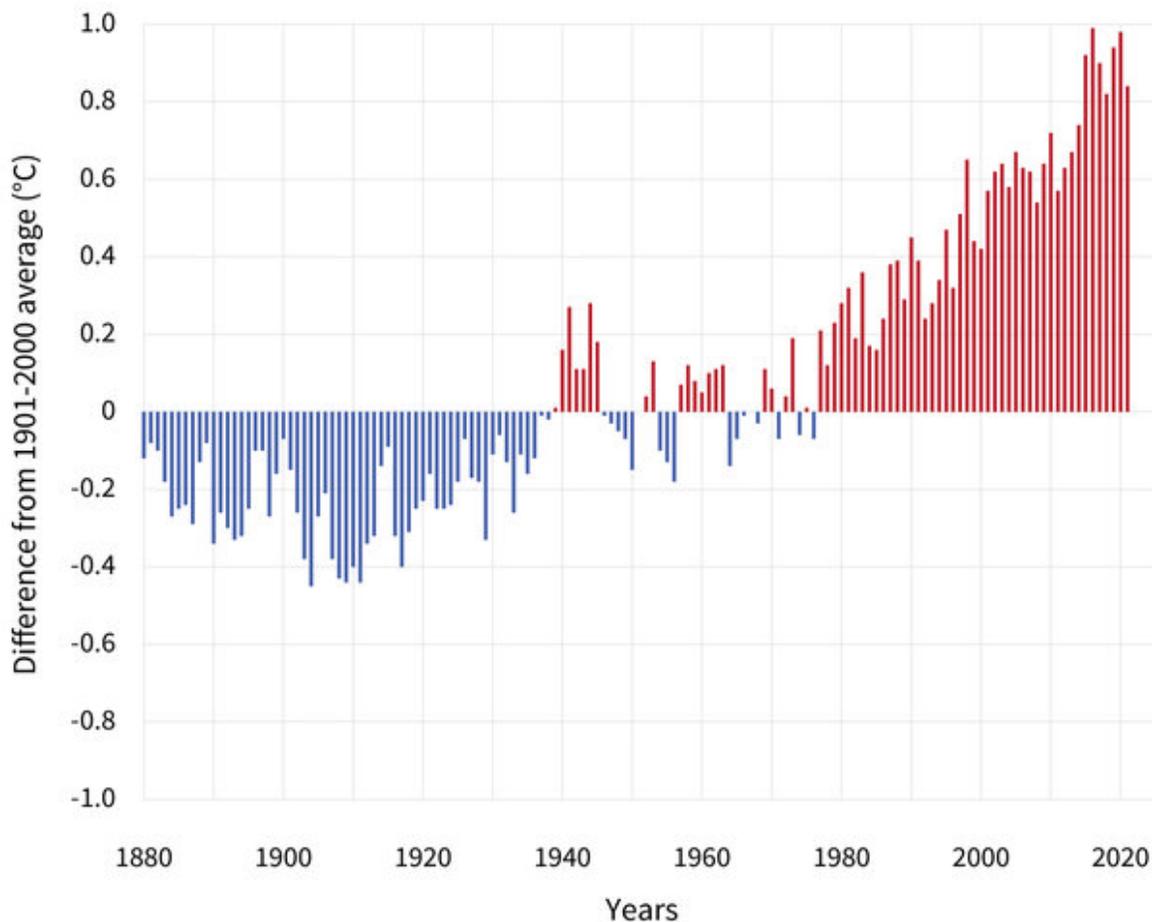


Figura 2.7: **Temperatura superficial anual en comparación con el promedio del siglo XX de 1880 a 2021.**

Fuente: *NOAA climate.gov*.

De acuerdo con el *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*; por cada grado que aumenta la temperatura la producción de cereales se reduce un 5% aproximadamente. Se ha producido una reducción significativa en la producción de maíz, trigo y otros cultivos importantes, de 40 megatonnes anuales a nivel mundial, entre 1981 y 2002, debido a un clima más cálido. Además, entre 1901 y 2010, el nivel medio del mar aumentó 19 cm, pues los océanos se expandieron debido al calentamiento y al deshielo. Se prevé una elevación media del nivel del mar de entre 24 y 30 cm para 2065 y entre 40 y 63 cm para 2100 [39].

En el siguiente capítulo, se retomará la problemática inducida por el aumento en la temperatura, profundizando en sus causas, así como sus actuales y futuras consecuencias.

Con la intención de acotar superiormente el incremento de la temperatura mundial, así como afrontar y superar las consecuencias del estado actual, se han acordado tres metas:

1. Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.
2. Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.
3. Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.

2.2.14. Objetivo 14: Vida Submarina

“Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos”

La vida depende de los océanos. Estos constituyen el ecosistema más grande del planeta, el cual cubre más de dos tercios de la superficie de la Tierra, y proporcionan alimentos y medios de subsistencia a miles de millones de personas. Los océanos producen aproximadamente la mitad del oxígeno que respiramos y actúan como reguladores del clima, absorbiendo el calor atmosférico y más de una cuarta parte del CO₂ producido por el hombre [40].



Sin embargo, décadas de aumento de las emisiones de carbono han provocado una acumulación de calor en los océanos y cambios en su composición química. Los efectos adversos resultantes de la acidificación de los océanos, el cambio climático (incluido el aumento del nivel del mar), los fenómenos meteorológicos extremos y la erosión costera amenazan los recursos marinos y costeros por la sobrepesca, la contaminación y la degradación del hábitat.

La contaminación marina es un problema creciente en el mundo actual. Nuestro océano se está inundando con dos tipos principales de contaminación: productos químicos y basura.

La contaminación química, o contaminación por nutrientes, es preocupante por razones de salud, ambientales y económicas. Este tipo de contaminación ocurre cuando las actividades humanas –en particular el uso de fertilizantes en las granjas– provocan la escorrentía de productos químicos en las vías fluviales que finalmente desembocan en el océano. El aumento de la concentración de sustancias químicas en el océano costero, como nitrógeno y fósforo, promueve el crecimiento y la proliferación de algas, que pueden ser tóxicas para la vida silvestre y dañinas para los humanos.

La basura marina abarca todos los productos manufacturados, la mayoría de ellos plásticos, que terminan en el océano. La basura, los vientos tormentosos y la mala gestión de los desechos contribuyen a la acumulación de estos desechos donde el 80 por ciento provienen de fuentes terrestres. Los tipos comunes de desechos marinos incluyen varios artículos de plástico como bolsas de compras y botellas de bebidas, junto con colillas de cigarrillos, tapas de botellas, envoltorios de alimentos y artículos de pesca. Los desechos plásticos son particularmente problemáticos como contaminantes porque son muy duraderos. Estos artículos de plástico pueden tardar cientos de años en descomponerse [41]. Esta basura representa un peligro tanto para los humanos como para los animales. Los peces se enredan y se lesionan en los escombros, y algunos animales confunden artículos como bolsas de plástico con comida y lo ingieren. Los pequeños organismos se alimentan de pequeños trozos de plástico descompuesto, llamados *microplásticos*, y absorben las sustancias químicas del plástico en sus tejidos. Los microplásticos tienen menos de cinco milímetros (0,2 pulgadas) de diámetro y se han detectado en una variedad de especies marinas, incluido el plancton y las ballenas. Cuando los animales más grandes comen pequeños organismos que consumieron estos diminutos plásticos, los químicos tóxicos se vuelven parte de sus tejidos. De esta manera, la contaminación por microplásticos migra hacia arriba en la cadena alimentaria y eventualmente se convierte en parte de los alimentos que comen los humanos.

Los océanos, mares y recursos marinos son cruciales para la supervivencia humana. Lograr el objetivo de conservarlos debe ser una prioridad para un futuro próspero. Es por eso que se han propuesto las siguientes metas:

1. Prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes.
2. Minimizar y abordar los efectos de la acidificación de los océanos.
3. Reglamentar eficazmente la explotación pesquera y poner fin a la pesca excesiva, la pesca ilegal, no declarada y no reglamentada y las prácticas pesqueras destructivas, y aplicar planes de gestión con

fundamento científico a fin de restablecer las poblaciones de peces en el plazo más breve posible, al menos alcanzando niveles que puedan producir el máximo rendimiento sostenible de acuerdo con sus características biológicas.

4. Prohibir ciertas formas de subvenciones a la pesca que contribuyen a la sobrecapacidad y la pesca excesiva, eliminar las subvenciones que contribuyen a la pesca ilegal, no declarada y no reglamentada y abstenerse de introducir nuevas subvenciones de esa índole.

2.2.15. Objetivo 15: Vida de Ecosistemas Terrestres

“Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad”

A medida que aumentan las temperaturas globales y la población humana se expande, una mayor parte del planeta es vulnerable a la *desertificación*, la degradación permanente de la tierra que alguna vez fue cultivable. Si bien las interpretaciones del término desertificación varían, la preocupación se centra en la degradación de la tierra en áreas con precipitaciones escasas o variables conocidas como tierras secas: tierras áridas, semiáridas y subhúmedas. Estas tierras secas representan más del 40 por ciento de la superficie terrestre del mundo [42].

Aunque la degradación de la tierra ha ocurrido a lo largo de la historia, el ritmo se ha acelerado, alcanzando de 30 a 35 veces la tasa histórica, según las Naciones Unidas [43]. Esta degradación tiende a ser impulsada por una serie de factores, que incluyen la urbanización, la minería, la agricultura y la ganadería. El cambio climático también juega un papel importante, aumentando el riesgo de sequía.

Más del 75 % de la superficie terrestre de la Tierra ya está degradada, según el Atlas Mundial de Desertificación de la Comisión Europea, y más del 90 por ciento podría degradarse para 2050. El Centro Conjunto de Investigación de la comisión encontró que un área total de la mitad del tamaño de la Unión Europea se degrada anualmente, siendo África y Asia los más afectados.

Los impulsores de la degradación de la tierra varían según la ubicación y las causas a menudo se superponen entre sí. En las regiones de Uzbekistán y Kazajstán que rodean el Mar de Aral, el uso excesivo de agua para riego agrícola ha sido el principal culpable de que el mar se encoja, dejando atrás un desierto salino. Y en la región africana del Sahel, bordeada por el desierto del Sahara al norte y las sabanas al sur, el crecimiento de la población ha provocado un aumento en la extracción de madera, la agricultura ilegal y la limpieza de terrenos para viviendas, entre otros cambios.

La *pérdida de biodiversidad* se refiere a la disminución o desaparición de la diversidad biológica, entendida esta última como la variedad de seres vivos que habitan el planeta, sus distintos niveles de organización biológica y su respectiva variabilidad genética, así como los patrones naturales presentes en los ecosistemas. A mediados de 2019, la Organización de las Naciones Unidas, en colaboración con la IPBES, presentó un informe sobre biodiversidad en el que advertía que un millón de especies –de un total que ronda los ocho millones– están en peligro de extinción [44]. La pérdida de biodiversidad trae numerosas consecuencias, las cuales no recaen solo sobre el medio ambiente, sino también sobre el ser humano, ya sea a nivel económico o sanitario.



Defender y preservar adecuadamente la vida y calidad de los ecosistemas terrestres es uno de los retos más importantes a los cuales se enfrenta la humanidad. Con el propósito de lograr éste objetivo, se han propuesto las siguientes metas:

1. Velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas.
2. Luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo.
3. Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2030, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción.
4. Promover la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos y promover el acceso adecuado a esos recursos.

2.2.16. Objetivo 16: Paz, Justicia e Instituciones Sólidas

“Promover sociedades justas, pacíficas e inclusivas”

A fin de avanzar en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, necesitamos instituciones públicas eficaces e inclusivas que puedan proporcionar educación y asistencia sanitaria de calidad, aplicar políticas económicas justas y brindar una protección inclusiva del medio ambiente [45].



La libertad para expresar opiniones propias, en privado y en público, debe estar garantizada. Las personas deben poder participar en el proceso de adopción de las decisiones que afectan a sus vidas. Las leyes y las políticas deben aplicarse sin ningún tipo de discriminación. Las controversias deben resolverse mediante sistemas de justicia y política que funcionen bien. Las instituciones nacionales y locales deben rendir cuentas y tienen que prestar servicios básicos a las familias y las comunidades de manera equitativa y sin necesidad de sobornos. La corrupción, el soborno, el robo y la evasión impositiva cuestan alrededor de \$1.26 billones de Dólares Americanos para los países en desarrollo por año; esta cantidad de dinero podría usarse para ayudar a aquellos que viven con menos de \$ 1.25 al día por encima del margen de pobreza extrema durante al menos seis años.

En 2018, el número de personas que huían de la guerra, la persecución y el conflicto superó los **70 millones**, el nivel más alto que ha visto el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados en casi 70 años. Todos son particularmente vulnerables a diversas formas de abuso, incluida la trata, la violencia y la toma de decisiones no inclusivas.

La inseguridad continúa suponiendo una grave amenaza para el desarrollo sostenible. Del 1 de enero al 31 de octubre de 2018, Naciones Unidas registró y verificó 397 asesinatos de defensores de los derechos humanos, periodistas y sindicalistas en 41 países. Cada semana, un promedio de nueve personas fueron asesinadas en la primera línea de los esfuerzos para construir sociedades más inclusivas e igualitarias, un aumento preocupante del promedio de una víctima por día entre 2015 y 2017. **Una de cada dos víctimas** había estado trabajando con las comunidades en temas relacionados con la tierra, el medio ambiente, la pobreza, los derechos de las minorías y los pueblos indígenas, o el impacto de las actividades comerciales. Y, en general, una de cada diez víctimas fue una mujer. Los periodistas constituyeron una cuarta parte del número total de víctimas asesinadas, y la mayoría de estos asesinatos ocurrieron fuera de países en conflicto [46].

Las metas propuestas con el propósito de asegurar el éxito del dieciseisavo objetivo son:

1. Reducir significativamente todas las formas de violencia y las correspondientes tasas de mortalidad en todo el mundo.
2. De aquí a 2030, reducir significativamente las corrientes financieras y de armas ilícitas, fortalecer la recuperación y devolución de los activos robados y luchar contra todas las formas de delincuencia organizada.
3. Reducir considerablemente la corrupción y el soborno en todas sus formas.
4. Crear a todos los niveles instituciones eficaces y transparentes que rindan cuentas.
5. Ampliar y fortalecer la participación de los países en desarrollo en las instituciones de gobernanza mundial.
6. Garantizar el acceso público a la información y proteger las libertades fundamentales, de conformidad con las leyes nacionales y los acuerdos internacionales.

2.2.17. Objetivo 17: Alianzas para Lograr los Objetivos

“Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible”

En 2015, los líderes del mundo aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que tiene por objeto poner fin a la pobreza, reducir las desigualdades y combatir el cambio climático. Para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, debemos unirnos todos —los gobiernos, la sociedad civil, los científicos, el mundo académico y el sector privado—[47]. Se necesitan inversiones a largo plazo, incluida la inversión extranjera directa, en áreas críticas, especialmente en los países en desarrollo. Estas áreas incluyen energía sostenible, infraestructura y transporte, así como tecnologías de la información y la comunicación.



Las metas para cumplir con el decimoséptimo objetivo se distribuyen en cinco sectores: Finanzas, Tecnología, Creación de Capacidad, Comercio y Cuestiones Sistémicas. Algunas de estas metas son:

1. Velar por que los países desarrollados cumplan plenamente sus compromisos en relación con la asistencia oficial para el desarrollo, incluido el compromiso de numerosos países desarrollados de alcanzar el objetivo de destinar el 0.7% del ingreso nacional bruto a la asistencia oficial para el desarrollo de los países en desarrollo y entre el 0.15% y el 0.20% del ingreso nacional bruto a la asistencia oficial para el desarrollo de los países menos adelantados.
2. Ayudar a los países en desarrollo a lograr la sostenibilidad de la deuda a largo plazo con políticas coordinadas orientadas a fomentar la financiación, el alivio y la reestructuración de la deuda, según proceda, y hacer frente a la deuda externa de los países pobres muy endeudados a fin de reducir el endeudamiento excesivo.
3. Aumentar el apoyo internacional para realizar actividades de creación de capacidad eficaces y específicas en los países en desarrollo a fin de respaldar los planes nacionales de implementación de todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
4. Aumentar significativamente las exportaciones de los países en desarrollo, en particular con miras a duplicar la participación de los países menos adelantados en las exportaciones mundiales.
5. Aumentar la estabilidad macroeconómica mundial, incluso mediante la coordinación y coherencia de las políticas.

6. Mejorar el apoyo a la creación de capacidad prestado a los países en desarrollo, incluidos los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo, para aumentar significativamente la disponibilidad de datos oportunos, fiables y de gran calidad desglosados por ingresos, sexo, edad, raza, origen étnico, estatus migratorio, discapacidad, ubicación geográfica y otras características pertinentes en los contextos nacionales.
7. Aprovechar las iniciativas existentes para elaborar indicadores que permitan medir los progresos en materia de desarrollo sostenible y complementen el producto interno bruto, y apoyar la creación de capacidad estadística en los países en desarrollo.

2.3. ¿Cómo se Mide el Progreso?

A lo largo del presente capítulo se han presentado estadísticas mundiales que describen situaciones económicas, demográficas y ecológicas. Mediante el análisis de dichas estadísticas, se justifica la existencia de problemáticas, para las cuales se crean los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Una vez establecido un objetivo y las metas que lo conforman, es necesario medir el progreso que la humanidad –en una escala global y regional– ha obtenido al intentar cumplir con éste. La manera en la que la Organización de las Naciones Unidas –al igual que muchas otras instituciones– cuantifica el progreso, es mediante el uso de *indicadores*.

Un indicador es una característica específica, observable y medible que puede ser usada para mostrar los cambios y progreso que está haciendo un programa hacia el logro de un resultado específico. Debe haber por lo menos un indicador por cada resultado, éste debe estar enfocado, ser claro y específico. El cambio medido por el indicador debe representar el progreso que el programa espera hacer.

Para que un indicador sea considerado bueno, debe de cumplir con ciertas características. Por ejemplo:

- **Confiable:** Consistentemente medible a lo largo del tiempo, de la misma forma, por diferentes observadores.
- **Preciso:** Definido en términos operacionalmente claros.
- **Medible:** Cuantificable usando las herramientas y métodos disponibles.
- **Oportuno:** Aporta una medida a intervalos relevantes y apropiados en términos de las metas y actividades del programa.

Al momento de escoger un indicador para medir el progreso, es conveniente tomar algunas consideraciones:

- **Disponibilidad de datos:** Algunos datos pueden ser considerados como información exclusiva para agencias, proyectos o funcionarios gubernamentales. Además, los datos pueden estar disponibles sólo en niveles agregados o ya calculados en indicadores que pueden no ser los ideales para su programa o actividad.
- **Recursos:** Los indicadores ideales pueden requerir de una recolección de datos para calcular un denominador desconocido, o datos nacionales para comparar con los datos del área del proyecto, o hacer seguimiento de las estadísticas a lo largo de la vida de una población de control y/o afectada, etc. El costo de recolectar los datos apropiados para los indicadores ideales es prohibitivo. Los recursos humanos y las habilidades técnicas también pueden presentar dificultades.
- En general, los programas deben mantenerse alejados de los indicadores que no pueden ser afectados por las actividades, que son demasiados vagos, que no existen en la actualidad y que no pueden ser recolectados realísticamente, o que no representan el resultado deseado con precisión.

Tomando en cuenta todos los puntos mencionados, la ONU seleccionó 230 indicadores que ayudan a seguir y cuantificar el progreso obtenido en cada uno de los 17 Objetivos. Más adelante, utilizaremos algunos de estos indicadores para medir el avance regional y global, así como relacionarlos con otros factores de interés.

3

Límites Planetarios

El sitio *En Línea* que complementa la información presentada en este capítulo es:
<https://www.sdginpb.com/limites>

3.1. El Equilibrio de la Tierra

Existen cinco *sistemas terrestres* principales. El primero, la *geósfera*, consiste del interior y superficie terrestre, ambos compuestos por rocas. La limitada porción del planeta que permite el desarrollo de la vida humana compone el segundo sistema: la *biósfera*. El tercer sistema se conforma del área terrestre cubierta por grandes cantidades de agua, y se refiere como la *hidrósfera*. La *atmósfera* es el cuarto sistema terrestre que es una envoltura de gases que mantiene cálido al planeta, además de proveer oxígeno para respirar y dióxido de carbono para la fotosíntesis, entre otros elementos. Finalmente, el quinto sistema, el cual se conforma de grandes cantidades de hielo, constituye la *criósfera*. Los cinco sistemas interactúan de manera compleja entre ellos para mantener al planeta tierra en el estado que conocemos.

La estabilidad ambiental del *Holoceno* –el presente periodo interglaciar que comenzó hace 13,000 años– permitió el desarrollo y éxito de la agricultura y de sociedades complejas. Desde entonces, nuestro planeta se ha mantenido dentro del dominio de estabilidad climática –ver la figura 3.1–. Aún si algunos vestigios de las primeras actividades humanas pueden ser visibles en escalas regionales, no existe evidencia concisa de que la humanidad ha afectado previamente el funcionamiento de los sistemas terrestres en una escala global, hasta hace muy poco. Desde el comienzo de la revolución industrial, las actividades humanas han empujado múltiples sistemas claves fuera del rango de estabilidad del Holoceno.

El planeta Tierra ha entrado a una nueva época –el *Antropoceno*– en la cual los humanos representan el principal factor de cambio para los sistemas terrestres. El crecimiento exponencial de las actividades humanas amenaza con presionar los sistemas de nuestro planeta al grado de provocar una desestabilización de sistemas biofísicos críticos y provocar cambios ambientales violentos e irreversibles, con consecuencias catastróficas para el bienestar humano. Este dilema es bastante profundo, pues el presente paradigma del desarrollo social y económico parece ignorar el inminente riesgo de catástrofes ambientales producidas por nuestras actividades.

El Antropoceno nos obliga a preguntarnos: ¿Cuáles son las condiciones planetarias no negociables que la humanidad debe respetar para evitar el riesgo de desencadenar bruscos cambios ambientales a nivel continental o global?

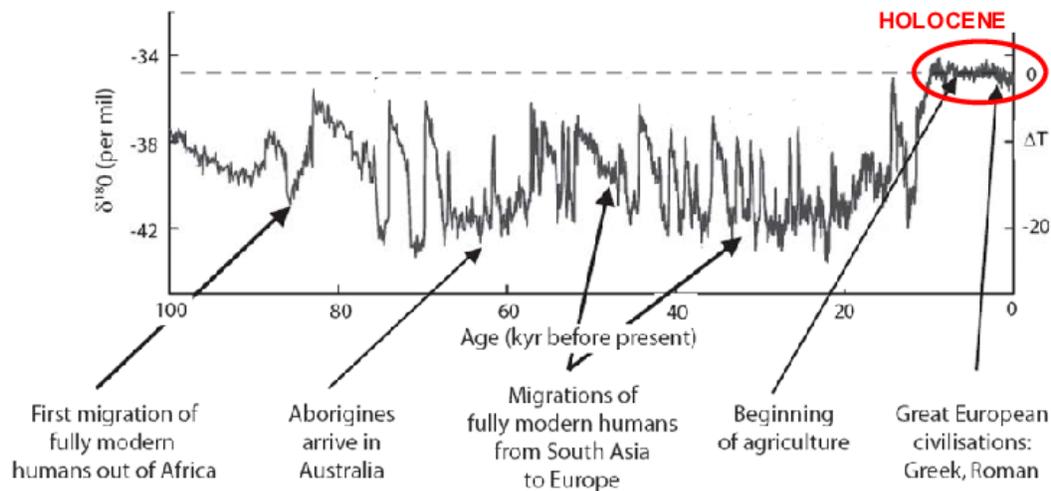


Figura 3.1: El último ciclo glacial y eventos claves en la historia de la humanidad.

Fuente: *Young & Steffen (2009)*.

Nota: El eje vertical izquierdo presenta la medida del **delta-O-18**, una medida Paleo-climática usualmente utilizada para medir la temperatura de la precipitación. El eje vertical derecho representa la temperatura en grados centígrados.

3.2. Los 9 Límites de Nuestro Planeta

El concepto de *límites planetarios* es relativamente nuevo, y ha sido desarrollado principalmente por los investigadores *Johan Rockström, Jorgen Randers* y *Will Steffen*. Además, este se convierte en un tema de alto interés para instituciones de investigación, entre las que destaca el *Centro de Resiliencia de Estocolmo*. El artículo *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, publicado en 2009 en las revistas *Ecology and Society* y *Nature*, da hincapié a la identificación y cuantificación de los límites terrestres que no deben ser violados si se desea permanecer en la estabilidad del Holoceno.

La estructura propuesta se construye sobre –y extiende– los siguientes trabajos:

- Limits to Growth. *Meadows et al. 1972*.
- Safe Minimum Standards. *Ciriacy-Wantrup 1952, Bishop 1978*.
- The Precautionary Principle. *Raffensperger y Tickner 1999*.
- Tolerable Window. *WBGU 1995*.

A lo largo del presente capítulo se introducirá teoría ecológica y de resiliencia ambiental. Debido a la limitada extensión del trabajo, el enfoque y desarrollo de los conceptos están acotados; sin embargo, si se desea profundizar en los temas mencionados se recomienda consultar las siguientes tres publicaciones:

1. *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*. Publicado en la revista *Ecology and Society* por Johan Rockström, Will Steffen y colaboradores [48].
2. *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. Publicado en la revista *Science* por Will Steffen y colaboradores [49].
3. *Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities*. Publicado en la revista *Environmental Science and Technology* por Linn Persson y colaboradores [50].

El sistema terrestre se define como los procesos e interacciones biofísicos y socioeconómicos integrados entre la atmósfera, la hidrosfera y la antroposfera (intervención humana) tanto a escala espacial, desde local a global, como temporal, que determinan el estado ambiental del planeta. Los seres humanos y sus actividades son parte integral del Sistema de la Tierra, interactuando con otros componentes.

Entender la importancia de los límites planetarios requiere el reconocer el riesgo que tiene un sistema a dejar de funcionar de manera óptima. Un *umbral* se define como una transición *no lineal* en el funcionamiento de un sistema. Tómese como ejemplo la abrupta reducción de hielo ártico producto del calentamiento global. Los umbrales son características intrínsecas de los sistemas y muchas veces se definen por un valor dentro del rango de sus *variables de control*. En el ejemplo del hielo ártico, la variable de control podría ser la temperatura terrestre.

Los *límites*, por otra parte, son valores de la variable de control determinados por la humanidad, colocados a una “distancia segura” de un umbral. Determinar esta distancia segura depende de la manera en la que la sociedad decide manejar el *riesgo* y la *incertidumbre*.

La incertidumbre al momento de cuantificar los límites planetarios se debe principalmente a la falta de conocimiento científico de la naturaleza de los umbrales, la incertidumbre del comportamiento de los sistemas complejos y de las formas en las que éstos interactúan entre sí. Esta falta de conocimiento provoca una *zona de incertidumbre* alrededor de cada umbral. La naturaleza y tamaño de dicha zona es crucial para determinar dónde se debe colocar el límite planetario.

En los artículos mencionados anteriormente, se realiza un primer esfuerzo preliminar para identificar los procesos clave del sistema terrestre y se intenta cuantificar para cada proceso el nivel límite que no se debe transgredir si queremos evitar un cambio ambiental global inaceptable. El conjunto de límites planetarios representa el espacio biofísico de los sistemas terrestres dentro del cual la humanidad se ha desarrollado y florecido. Los umbrales de los sistemas existen desconsiderando las preferencias de los humanos, sus valores, ambiciones o compromisos basados en decisiones políticas y socio-económicas. Sin embargo, son nuestras acciones las que determinan la proximidad a –o si cruzamos– un umbral crítico.

El enfoque de los límites planetarios se basa en tres ramas de la investigación científica:

1. La escala de la acción humana en relación con la capacidad de la Tierra para sustentarla.
2. El trabajo de comprender los procesos esenciales del sistema terrestre.
3. El marco de la resiliencia y sus vínculos con la dinámica compleja y la autorregulación de los sistemas vivos.

Se ha realizado una extensa investigación y comprensión de los principales sistemas terrestres y sus variables de control asociadas. Al momento, se han logrado identificar nueve procesos para los cuales se debe determinar un límite que minimice el riesgo de cruzar un umbral crítico y desencadenar resultados catastróficos. Los nueve procesos son: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad (terrestre y marina), la interferencia con los ciclos de fósforo y nitrógeno, el agotamiento de ozono estratosférico, la acidificación de los océanos, el uso del agua dulce, los cambios en los usos de las tierras, la contaminación química y la carga de aerosoles en la atmósfera.

A continuación, se presenta una justificación y cuantificación de los límites planetarios propuestos para los nueve procesos.

3.2.1. Cambio Climático

Existe una creciente convergencia ideológica en torno a un límite máximo de **2°C** –contener el aumento de la temperatura promedio global a no más de 2 grados centígrados arriba de los niveles históricos pre-industriales–. La implementación de este límite está basada en la combinación de argumentos analíticos y políticos, tomando en consideración:

1. Proyecciones científicas de los respectivos impactos esperados para diferentes niveles de calentamiento global.
2. Juicios de valor sobre la inaceptabilidad de tales impactos.
3. Consideraciones políticas de lo que es percibido como objetivos realistas.

Es importante enfatizar que deberemos enfrentar riesgos importantes en torno a impactos climáticos perjudiciales para el ambiente y la sociedad, aún si se logra mantenerse en un incremento de temperatura cercano –pero menor– a 2°C.

El límite del cambio climático pretende minimizar el riesgo de respuestas no lineales, abruptas e irreversibles de los sistemas terrestres vinculados a uno o más umbrales. Cruzar estos umbrales puede desencadenar perturbaciones en los climas regionales, colapsar las principales dinámicas climáticas y acelerar el aumento del nivel del mar. El riesgo de cruzar alguno de estos umbrales aumenta rápidamente debido a la desviación de la variabilidad natural del clima producido por alteraciones antropológicas.

Se propone un acercamiento dual en la definición de un límite planetario para el cambio climático, utilizando tanto la *Concentración Atmosférica de CO₂* y el *Forzamiento Radiativo* –diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta– como variables de control.

La selección de estos límites se fundamenta con:

- Un análisis de la sensibilidad del sistema climático con respecto al forzamiento de los gases de efecto invernadero.
- El comportamiento de las grandes capas de hielo polares bajo un sistema climático más cálido que el pre-industrial.
- El presente estado del sistema climático dados los valores actuales de una concentración de CO₂ rondando 298.5 ppm y un forzamiento radiativo neto de $2.3 \frac{W}{m^2}$ (1.1-3.3 $\frac{W}{m^2}$).

Datos paleo-climáticos de hace 65 millones de años al presente indican que un decremento en la concentración de CO₂ fue el mayor determinante en la dinámica de enfriamiento terrestre durante el periodo. Estos datos revelan que el planeta estaba prácticamente libre de hielo hasta que las concentraciones atmosféricas se redujeron a 450 ppm (± 100 ppm), indicando que existe una *zona de peligro* cuando las concentraciones de CO₂ se encuentran en el rango 350-550 ppm.

Se propone, para el indicador *Concentración Atmosférica de CO₂* un límite planetario de **350 ppm CO₂** con una zona de incertidumbre en el rango 350-550 ppm. Para el segundo indicador, *Forzamiento Radiativo*, se propone el límite planetario de $+ 1 \frac{W}{m^2}$.

Evidencia de la presente transición climática incluyen el deshielo en el Océano Ártico, el deshielo de las montañas alrededor del mundo, la pérdida de masa terrestre en Islandia y el Oeste de la Antártica, un acelerado incremento del nivel del mar en los últimos 15 años, blanqueamiento y muerte de los arrecifes de coral, aumento en el número de inundaciones y una debilitación en procesos como la absorción oceánica del carbón.

3.2.2. Acidificación de los Océanos

La acidificación de los océanos plantea un desafío para la biodiversidad marina y la capacidad de los océanos para seguir funcionando como sumideros CO₂ –actualmente removiendo el 25 % de las emisiones humanas en la atmósfera–. El proceso de eliminación atmosférica incluye tanto la disolución de CO₂ en el agua de mar como la absorción de carbono por parte de los organismos marinos – ver diagrama de la figura 3.2–. La adición de CO₂ a los océanos aumenta la acidez - disminuye el pH - de la superficie marina. El pH de la superficie oceánica ha disminuido aproximadamente 0.1 unidades de pH desde la revolución industrial; esta tasa de acidificación es al menos 100 veces más rápida que cualquier otra en los últimos 20 millones de años.

Muchos organismos marinos son muy sensibles a los cambios en la química del CO₂ del océano, especialmente la biota que usa iones de carbonato disueltos en el agua de mar para formar estructuras protectoras de carbonato de calcio o estructuras esqueléticas. Los organismos marinos secretan carbonato de calcio, principalmente en la forma de *aragonita* –producida por corales, moluscos y otras formas de vida marina– y *calcita* –producida por organismos unicelulares como el plankton–. La aragonita es cerca

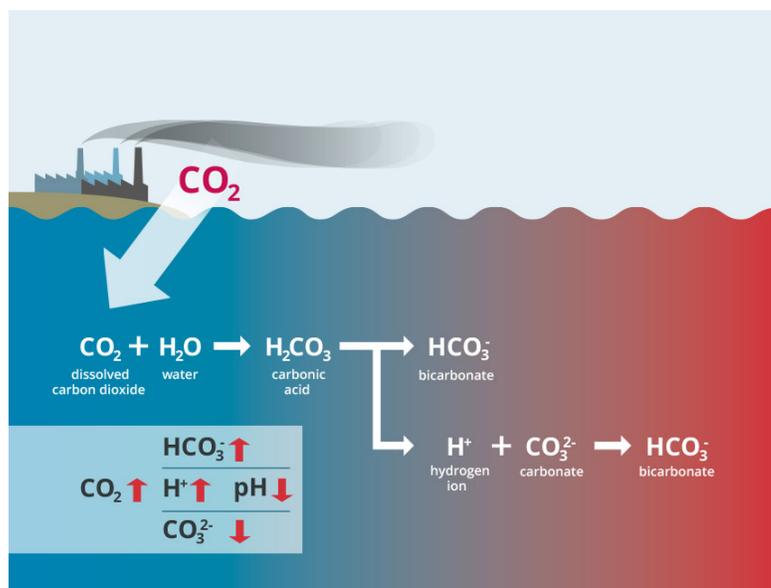


Figura 3.2: **Proceso químico de la captación de CO_2 en los Océanos.**

Fuente: *BIOACID (Biologische Auswirkungen von Ozeanversauerung)*.

del 50% más soluble en agua salada que la calcita; por tanto, con un aumento en la acidez oceánica, las conchas de aragonita se disolverán mucho antes que las conchas formadas por Calcita, a menos que los organismos generen un mecanismo de protección. La concentración de iones de carbonato afecta fuertemente el estado de saturación del mineral en el agua de mar. Si el pH de los océanos disminuye lo suficiente, la reducción concomitante en la concentración de iones de carbonato da como resultado una disminución en la saturación del agua de mar con respecto a la aragonita o la calcita. Si la saturación de carbonato de calcio es menor que uno, entonces el carbonato de calcio producido por organismos marinos se vuelve soluble.

A nivel mundial, el estado de saturación de aragonito $-\Omega_{arag}$ en la superficie del océano está disminuyendo con el aumento de la acidez del océano. Este ha descendido desde un nivel preindustrial de $\Omega_{arag} = 3.44$ al valor actual de 2.9. Aunque los valores de Ω_{arag} promediados a nivel mundial en las aguas superficiales se mantienen por encima de la unidad, se prevé que gran parte del Océano Austral y el Océano Ártico se infrasaturen con respecto al aragonito en los años 2030-2060. La falta de saturación de aragonito significa que estas aguas se volverán corrosivas para las conchas de aragonito y calcita secretadas por una amplia variedad de organismos marinos.

La acidificación de los océanos puede tener impactos graves en los organismos formadores de aragonito, muy por encima del umbral geoquímico de $\Omega_{arag} = 1$, con una reducción en las tasas de calcificación para algunos organismos entre un 10% y un 60% para una duplicación del CO_2 atmosférico. Los arrecifes de coral corren el peligro de quedar expuestos a condiciones marginales (valores de Ω_{arag} entre 3.0-3.5) o condiciones extremadamente marginales (valores de Ω_{arag} menores a 3.0) en casi todas partes para 2050, lo que provocaría cambios sustanciales en la composición de especies y en la dinámica de las comunidades de coral y otros arrecifes.

La combinación de estimaciones del punto en el que las tasas de calcificación comienzan a verse afectadas sustancialmente, los valores de saturación de aragonito en los que las condiciones para los corales pasan de adecuadas a marginales, y el punto en el que las aguas superficiales en latitudes altas comienzan a acercarse a la infrasaturación de aragonito sugiere una ubicación de el límite de acidificación del océano muy por encima del estado de saturación de aragonito en la disolución ($\Omega_{arag} = 1.0$). Se propone un límite planetario donde el estado de saturación de aragonito oceánico se mantenga en el **80% o más del nivel preindustrial** de saturación global de $\Omega_{arag} = 3.44$. Reconociendo que la química del carbonato puede ser variable en escalas de tiempo y estacionales, se sugiere que se incorpore a este límite el intervalo típico de valores diarios y estacionales del estado de saturación del aragonito.

3.2.3. Agotamiento de Ozono Estratosférico

El ozono estratosférico filtra la radiación ultravioleta del Sol. La aparición del agujero de ozono en la Antártida fue un claro ejemplo de un umbral en el Sistema de la Tierra que se cruzó de manera completamente inesperada. La combinación de altas concentraciones de sustancias antropógenas que agotan la capa de ozono, como los clorofluorocarbonos y de las nubes estratosféricas polares, llevaron a la estratosfera antártica a un régimen en el que el ozono desapareció en la estratosfera inferior de esta región durante la primavera austral. Este suceso tiene impactos negativos en los organismos marinos y plantea riesgos para la salud humana.

Se ha elegido enmarcar el límite planetario alrededor del *ozono estratosférico extrapolar*. Hay dos razones principales para la elección del límite. En primer lugar, el umbral del agujero de ozono depende de las sustancias antropogénicas que agotan la capa de ozono, pero también de temperaturas lo suficientemente frías y una cantidad suficiente de vapor de agua. En segundo lugar, aunque los agujeros de ozono polares tienen impactos locales, un adelgazamiento de la capa de ozono extrapolar tendría un impacto mucho mayor en los seres humanos y los ecosistemas. En el caso del ozono estratosférico extrapolar global, no existe un umbral claro alrededor del cual construir una frontera. Se considera que el límite planetario para los niveles de ozono es una **disminución del < 5% en los niveles de columna de ozono**, para cualquier latitud particular, con respecto a los valores de 1964-1980.

Afortunadamente, debido a las acciones tomadas como resultado del *protocolo de Montreal*, parece que estamos en un camino que evita la transgresión de este límite. En 2005, las concentraciones troposféricas de gases que agotan la capa de ozono habían disminuido entre un 8% y un 9% desde sus valores máximos de 1992 a 1994. Aunque hay un lapso de tiempo considerable entre la disminución de la concentración en la troposfera y la recuperación del ozono estratosférico, al menos se está reduciendo el principal impulsor antropogénico del agotamiento del ozono.

3.2.4. Interferencia con los Ciclos Globales de Fósforo y Nitrógeno

La interferencia antropogénica a escala local y regional con el ciclo del nitrógeno y los flujos de fósforo ha inducido cambios bruscos en lagos y ecosistemas marinos.

La *eutrofización* provocada por la alta afluencia de nitrógeno y fósforo –resultado de las actividades agrícolas humanas– puede empujar a los ecosistemas acuáticos y marinos a través de un umbral, generando un cambio abrupto no lineal de, por ejemplo, un estado oligotrófico claro a un estado eutrófico de aguas turbias. La figura 3.3 explica el proceso de la eutrofización de las aguas, conformado por 4 etapas: exceso de nutrientes, aparición de algas, privación del oxígeno, zona muerta.

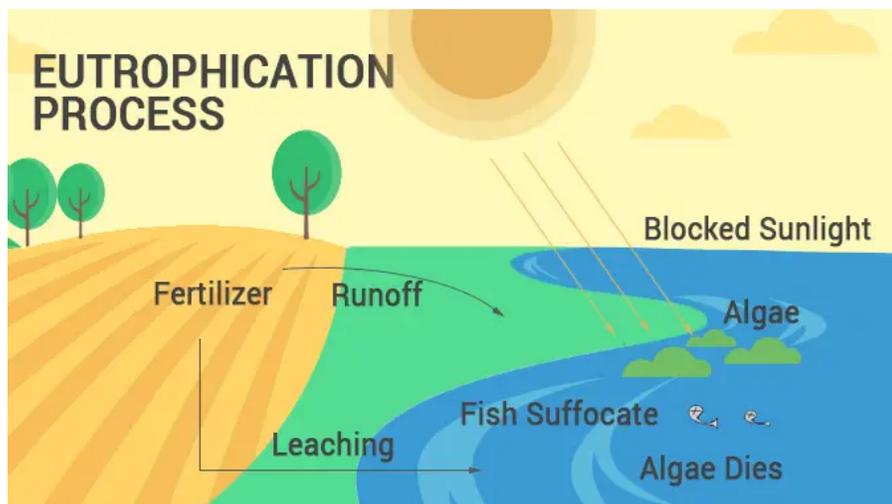


Figura 3.3: Causas y Proceso del fenómeno de Eutrofización.

Fuente: *Earth How - Water Science* [51].

Las modificaciones humanas del ciclo del nitrógeno son abismales. Las actividades humanas ahora convierten más N_2 de la atmósfera en formas reactivas que todos los procesos terrestres de la Tierra combinados, generando aproximadamente 140 millones de toneladas al año (Mt/yr). La conversión impulsada por humanos ocurre principalmente a través de cuatro procesos:

1. Fijación industrial de N_2 atmosférico en amoníaco ($\approx 80 \text{ Mt N anual}$).
2. Fijación agrícola de N_2 atmosférico a través del cultivo de leguminosas ($\approx 40 \text{ Mt N anual}$).
3. Combustión de combustibles fósiles ($\approx 20 \text{ Mt N anual}$).
4. Quema de biomasa ($\approx 10 \text{ Mt N anual}$).

Aunque el propósito principal de este nuevo nitrógeno reactivo es mejorar la producción de alimentos a través de la fertilización, gran parte del nitrógeno reactivo termina incorporándose al medio ambiente, contaminando las vías fluviales y las zonas costeras.

El enfoque más simple y directo es considerar la fijación humana de N_2 de la atmósfera como una válvula gigante que controla un flujo masivo de nuevo nitrógeno reactivo hacia el sistema terrestre. Luego, el límite se puede establecer usando esa válvula para controlar la cantidad de nitrógeno reactivo adicional que fluye hacia el sistema de tierra. Se sugiere que el límite se establezca inicialmente en aproximadamente el 25% de su valor actual, o alrededor de **35 Mt N anual**. Este límite reduciría en gran medida la cantidad de nitrógeno reactivo vertido en la tierra, el océano y los sistemas atmosféricos. Así mismo, eliminaría el flujo actual de nitrógeno en la tierra y podría desencadenar formas mucho más eficientes y menos contaminantes de mejorar la producción de alimentos.

Por otro lado, el fósforo es un material fósil finito extraído para uso humano y agregado naturalmente al Sistema de la Tierra a través de procesos de meteorización geológica. Se ha sugerido que el cruce de un umbral crítico de entrada de fósforo a los océanos es el factor clave detrás de los *eventos anóxicos oceánicos* (EAO) a escala global, lo que podría explicar pasadas extinciones masivas de vida marina.

De las extracciones humanas globales de alrededor de 20 Millones de toneladas anuales (Mt/yr) de fósforo, se estima que entre 8.5-9.5 Mt/yr se pierden de las tierras de cultivo del mundo, la principal fuente de entrada de fósforo a los océanos. La entrada de fósforo antropogénico a los océanos es de 8 a 9 veces mayor que la tasa de fondo natural de 1.1 Mt/yr . Los análisis de modelos tentativos, utilizando el modelo de Handoh y Lenton (2003), muestran que un aumento de 10 veces la tasa de fondo natural en el flujo de entrada de fósforo en los océanos (notar que es un valor poco más grande que el valor actual), si se mantiene durante mil años, aumentaría la fracción anóxica del océano de 0.14 a 0.22.

Se busca, como mínimo, establecer un nivel límite planetario que permita a la humanidad alejarse con seguridad del riesgo de desencadenar los EAO incluso en horizontes de tiempo más largos (> 1000 años). Esto puede requerir que no se permita que la entrada de fósforo antropogénico al océano exceda un nivel inducido por el hombre de alrededor de **10 veces la tasa de fondo natural de 1 Mt P anual**.

3.2.5. Tasa de Pérdida de Biodiversidad

Los cambios en la biodiversidad local y regional pueden tener efectos que repercutan de manera negativa en el funcionamiento de los sistemas terrestres.

Una diversidad de mecanismos funcionales de respuesta a la variación ambiental, entre las especies en un ecosistema, mantiene la resiliencia a las perturbaciones. Los ecosistemas con bajos niveles de diversidad de respuesta dentro de los grupos funcionales son particularmente vulnerables a las perturbaciones y tienen un mayor riesgo de sufrir cambios de régimen catastrófico. La pérdida de especies afecta tanto el funcionamiento de los ecosistemas como su potencial para responder y adaptarse a los cambios en las condiciones físicas y bióticas.

Desde el comienzo del antropoceno, los humanos han aumentado la tasa de extinción de especies entre 100 y 1000 veces más que las tasas de fondo típicas de la historia de la Tierra, resultando una tasa de extinción promedio global actual de más de 100 especies (por cada Millón de Especies) al año (E/MSY). Se proyecta que la tasa de extinción global promedio mundial aumente otras 10 veces (1,000-10,000 E/MSY) durante el siglo actual (Mace et al. 2005). En los últimos 20 años, aproximadamente la mitad de las extinciones registradas han ocurrido en los continentes, principalmente debido al cambio en el uso de tierra, la introducción de especies y el cambio climático, lo que indica que la biodiversidad ahora está en riesgo en todo el planeta.

Se ha propuesto una tasa de extinción de fondo de 1 E/MSY en muchos taxones como punto de referencia para evaluar los impactos de las acciones humanas (Pimm et al. 2006). Existe amplia evidencia de que las tasas de extinción actuales y proyectadas son insostenibles. Sin embargo, de acuerdo con Rockström y su equipo [48], la ciencia es, hasta el momento, incapaz de proporcionar una medida de límites que capte, a nivel agregado, el papel regulador de la biodiversidad.

Se llega a la conclusión de que la humanidad ya ha entrado profundamente en una zona de peligro donde no se puede excluir un cambio de sistema no deseado, si la actual tasa de extinción muy elevada se mantiene durante largos períodos de tiempo. El límite planetario sugerido es de **10 especies (por cada millón de especies) al año**, con un rango de incertidumbre de 10-100 E/MSY. Este límite relativamente seguro de la biodiversidad se está superando claramente en al menos uno o dos órdenes de magnitud [48]. Una advertencia importante al establecer una tasa de extinción segura es la observación de que las especies no son igualmente importantes para la función del ecosistema [48].

Otra variable de control que vale la pena estudiar es el *índice de integridad de la biodiversidad (BII)* [49]. Éste evalúa el cambio en la abundancia de la población como resultado de los impactos humanos, como el uso de la tierra o los recursos, en una amplia gama de grupos funcionales utilizando la abundancia de la era preindustrial como punto de referencia. Los valores de BII para grupos funcionales particulares pueden superar el 100 % si las modificaciones humanas en los ecosistemas conducen a aumentos en la abundancia de esas especies.

Debido a la falta de evidencia sobre la relación entre BII y las respuestas del sistema terrestre, se propone un límite preliminar en el **90 % del BII** pero con un rango de incertidumbre muy amplio.

3.2.6. Uso de Agua Dulce

Los humanos son actualmente la fuerza impulsora dominante que altera el flujo de los ríos a escala global y los patrones espaciales y el tiempo estacional de los flujos de vapor. Se estima que el 25 % de las cuencas fluviales del mundo se secan antes de llegar a los océanos debido al uso de recursos de agua dulce en las cuencas (Molden et al. 2007).

Las manipulaciones globales del ciclo del agua dulce afectan la biodiversidad, la seguridad alimentaria y sanitaria, así como el funcionamiento ecológico. Los procesos afectados incluyen: la provisión de hábitat para el reclutamiento de peces, el secuestro de carbono y la regulación del clima. Esta situación socava la resiliencia de los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Las amenazas a los medios de vida humanos debido al deterioro de los recursos hídricos mundiales son tres [52]:

1. La pérdida de los recursos de humedad del suelo (agua verde) debido a la degradación de la tierra y la deforestación, amenazando la producción de biomasa terrestre y la captura de carbono.
2. Uso y cambios en los volúmenes y patrones de agua de escorrentía (agua azul) que amenazan el suministro de agua y los recursos hídricos acuáticos.
3. Impactos en la regulación del clima debido a la disminución en la retroalimentación de humedad de los flujos de vapor.

Los flujos de agua verde influyen, a escala regional, en los niveles de lluvia a través de la retroalimentación de la humedad y, por lo tanto, en la disponibilidad de recursos de agua azul. La figura 3.4 presenta la interacción e interdependencia entre los dos tipos de flujos. Los umbrales inducidos por el agua verde incluyen el colapso de los subsistemas biológicos como resultado de los procesos regionales de deshidratación. Los umbrales inducidos por el agua azul incluyen el colapso de los hábitats ribereños si se cruzan los umbrales mínimos de flujo de agua ambiental y el colapso de los sistemas lacustres regionales.

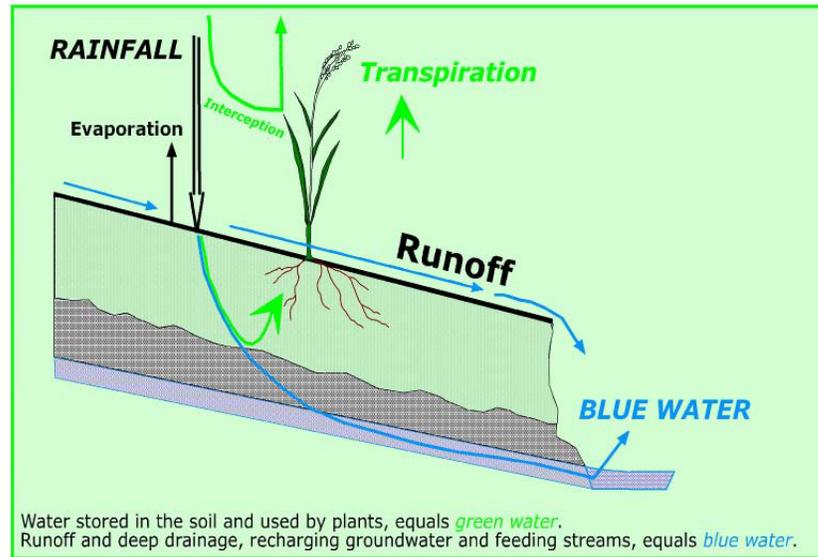


Figura 3.4: **Flujos de Agua Verde y de Escorrentía (Green and Blue, respectivamente)**

Fuente: *After Rockström 1997.*

El límite superior de los recursos de agua azul accesibles se estima en 12,500-15,000 km^3 al año. La escasez física de agua se alcanza cuando las extracciones de agua azul superan los 5000-6000 km^3 al año. Sobre la base de las evaluaciones globales de los impactos del agua verde y azul global, se estima que traspasar un límite de **4,000 km^3 al año de agua azul consuntiva** (con una zona de incertidumbre de 4,000-6,000 km^3 al año) aumentará significativamente el riesgo de acercarse al uso del agua verde y azul a escala regional o continental.

Se debe establecer un límite planetario para los recursos de agua dulce con el propósito de sostener de manera segura suficientes flujos de agua verde para la retroalimentación de la humedad (para regenerar la precipitación), permitir el aprovisionamiento del funcionamiento y los servicios del ecosistema terrestre (secuestro de carbono, crecimiento de biomasa, producción de alimentos y diversidad biológica), y asegurar la disponibilidad de recursos de agua azul para el ecosistema acuático.

Las extracciones actuales de agua azul ascienden a 4,000 km^3 anuales, mientras que el uso consuntivo es de 2,600 km^3 anuales, lo que deja a la humanidad con cierto margen de maniobra. Sin embargo, la presión sobre los recursos mundiales de agua dulce está creciendo rápidamente, principalmente debido a la creciente demanda de alimentos. El uso de agua verde en la agricultura de secano, actualmente estimado en 5,000 km^3 anuales, puede tener que aumentar un 50 % para 2030, a fin de garantizar la seguridad alimentaria, mientras que el uso consuntivo de agua azul para riego puede aumentar entre un 25 % y un 50 % para 2050 (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture 2007). Esto indica que el espacio operativo seguro restante para el agua está comprometido para cubrir las demandas humanas de agua necesarias en el futuro.

3.2.7. Cambios en el Sistema de Tierras

El cambio del sistema de tierras, impulsado principalmente por la expansión e intensificación agrícola, contribuye al cambio ambiental global. La conversión de bosques y otros ecosistemas en tierras agrícolas ha ocurrido a un promedio del 0.8 % por año durante los últimos 40 a 50 años, y es el principal impulsor mundial detrás de la pérdida del funcionamiento y los servicios de los ecosistemas. La humanidad llega al punto en el que una mayor expansión de las tierras agrícolas a escala global puede amenazar seriamente la biodiversidad y socavar las capacidades reguladoras del sistema terrestre.

Como límite planetario, se propone que **no más del 15 % de la superficie terrestre mundial libre de hielo** se convierta en tierra de cultivo.

Para que la humanidad permanezca dentro de este límite, las tierras de cultivo deben asignarse a las áreas más productivas y deben controlarse los procesos que conducen a la pérdida de tierras productivas, como lo son la degradación de la tierra, la pérdida de agua de riego y la competencia con los usos de la tierra, como el desarrollo urbano. Es posible que también sea necesario gestionar los procesos del lado de la demanda [11]; la dieta, el consumo de alimentos por persona, el tamaño de la población y el desperdicio en la cadena de distribución de alimentos.

El límite del sistema terrestre debe implementarse en múltiples escalas a través de una arquitectura terrestre global detallada que:

- Reserva la tierra más productiva para uso agrícola.
- Mantiene bosques de alto valor de conservación y otros ecosistemas en sus estados actuales.
- Mantiene los suelos ricos en carbono y los ecosistemas en su condición intacta o cuidadosamente modificada.

Alrededor del 12 % de la superficie terrestre mundial se encuentra actualmente bajo cultivo. La expansión permitida del 3 %, en relación al límite propuesto (aproximadamente 400 millones de hectáreas) probablemente se alcanzará en las próximas décadas e incluye tierras aptas que actualmente no están cultivadas o están cubiertas por bosques.

3.2.8. Carga de Aerosoles

Los aerosoles son partículas inorgánicas u orgánicas suspendidas en la atmósfera. Se emiten directamente como aerosoles primarios (emisiones de partículas o polvo de los motores diesel) o como aerosoles secundarios que son producidos en reacciones químicas atmosféricas. Los aerosoles varían en tamaño, desde unos pocos nanómetros hasta decenas de micrómetros, y tienen una vida útil que va desde un par de días hasta semanas, se transportan, se transforman químicamente y afectan áreas alejadas de sus orígenes. Los aerosoles tienen tanto un efecto de enfriamiento en el clima al reflejar la radiación solar entrante como un efecto de calentamiento al absorber directamente la radiación de calor. Estos también pueden influir en el ciclo hidrológico al alterar los mecanismos que forman la precipitación en las nubes. Las actividades humanas desde la era preindustrial han duplicado la concentración global de la mayoría de los aerosoles.

La carga de aerosoles atmosféricos se considera un proceso de cambio global antropogénico con un límite planetario potencial por dos razones principales:

1. La influencia de los aerosoles en el sistema climático.
2. Sus efectos adversos en la salud humana a escala regional y mundial.

Desde la perspectiva de los efectos sobre la salud humana, la contaminación del aire por partículas finas, PM_{2.5}, es responsable de alrededor del 3 % de la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares en adultos, alrededor del 5 % de la mortalidad por cáncer de tráquea, bronquios y pulmón, y alrededor del 1 % de la mortalidad por infecciones respiratorias agudas en niños –principalmente en las regiones urbanas alrededor del mundo–. Estos efectos se traducen en unas 800,000 muertes prematuras y una pérdida anual de 6.4 millones de años de vida, predominantemente en los países asiáticos en desarrollo.

El daño a los cultivos por la exposición al ozono, la degradación de los bosques y la pérdida de peces de agua dulce debido a la precipitación ácida, así como los cambios en los patrones de precipitación global y en el balance energético son más ejemplos de los efectos indirectos de la contaminación del aire en el bienestar humano.

La complejidad de los aerosoles, en términos de la gran variedad de partículas involucradas, con diferentes fuentes, impactos y dinámicas espaciales y temporales, dificulta definir un límite planetario por encima del cual los efectos pueden causar cambios inaceptables [48]. Se concluye que **aún no es posible identificar un valor límite seguro** para la carga de aerosoles.

3.2.9. Contaminación Química

La contaminación química afecta negativamente a la salud humana y de los ecosistemas, lo que se ha observado más claramente a escala local y regional, pero ahora es evidente a escala mundial.

La evaluación de por qué la contaminación química califica como un límite planetario [48] se basa en dos formas en las que puede influir en el funcionamiento del sistema terrestre:

1. A través de un impacto global y ubicuo en el desarrollo fisiológico y la demografía de los humanos y otros organismos con impactos finales en la función y estructura del ecosistema.
2. Actuando como una variable de evolución lenta que afecta a otros límites planetarios.

Según las estimaciones actuales, hay entre 80,000 y 100,000 productos químicos en el mercado mundial. Es imposible medir con total exactitud todos los productos químicos posibles en el medio ambiente, lo cual hace que sea muy difícil definir un único límite planetario derivado de los efectos agregados de decenas de miles de productos químicos. Existen algunos datos de toxicidad para algunos miles de estos productos químicos, pero prácticamente no hay conocimiento de sus efectos combinados.

Hay tres condiciones que deben cumplirse para que una sustancia química represente una amenaza para el sistema terrestre:

1. El producto químico tiene un efecto perturbador desconocido en un proceso vital del sistema terrestre.
2. El efecto disruptivo no se descubre hasta que es un problema a escala global.
3. El efecto no es fácilmente reversible.

Aunque la mayoría de los esfuerzos para reducir la contaminación química se han centrado en escalas locales y regionales, el Convenio de Estocolmo de las Naciones Unidas sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) de 2001 reconoció implícitamente que las concentraciones globales de algunos COP específicos (PCB, dioxinas, DDT y varios pesticidas) han cruzado un límite planetario, aún no cuantificado.

Un límite que se centre en los efectos de la contaminación química podría basarse en una reproducción reducida o fallida, déficits neuroconductuales o sistemas inmunológicos comprometidos. Además, un límite de contaminación química debe considerar la interacción con el límite planetario de los aerosoles, porque muchos contaminantes persistentes se transportan largas distancias en partículas de aerosol.

Se concluye que **no es posible en este momento definir un límite planetario claro** para la contaminación química, ni está claro cómo agregar los efectos químicos en un único límite planetario completo. Se recomienda al lector revisar el artículo *Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities* [50], publicado en el 2022 por Linn Persson y colaboradores. En este artículo se propone un límite planetario para la producción de químicos, y se argumenta que la humanidad ya ha trasgredido dicho límite.

El desafío para la comunidad de investigación es desarrollar la base de conocimientos que permita la detección de sustancias químicas, antes de que se liberen al medio ambiente, en busca de propiedades que puedan predisponerlas a convertirse en problemas globales.

3.3. Interacción entre Límites

Las interacciones entre los límites planetarios pueden cambiar el nivel seguro, de uno o varios límites, que se han establecido previamente bajo el supuesto de que no se transgreden otros límites. En realidad, lo que puede parecer un límite físico con un umbral claramente definido puede cambiar de valor como una variable que cambia lentamente.

Por ejemplo, el límite del cambio climático depende de permanecer en el lado seguro de los límites de agua dulce, tierra, aerosoles, nitrógeno-fósforo, océanos y estratosféricos. Transgredir el límite nitrógeno-fósforo puede erosionar la resiliencia de algunos organismos y ecosistemas marinos, reduciendo potencialmente su capacidad para absorber CO₂ y, por lo tanto, afectando el cambio climático [48].

3.4. Discusión

Hasta donde se conoce, hay nueve límites planetarios. Con la condición de que no se transgredan durante demasiado tiempo, la humanidad es libre para perseguir un desarrollo social y económico a largo plazo dentro del dominio de estabilidad proporcionado por la resiliencia del sistema terrestre en el Holoceno.

Sin embargo, quedan muchos vacíos de conocimiento. Existe una urgente necesidad de identificar los Umbrales del Sistema Terrestre, analizar los riesgos e incertidumbres y, aplicando un *principio de precaución*, identificar los límites planetarios para evitar cruzar tales umbrales no deseados [48].

Por lo tanto, la humanidad necesita convertirse en un administrador activo de todos los límites planetarios para evitar el riesgo de una perturbación social y ambiental desastrosa a largo plazo. Los paradigmas actuales de gobernanza y gestión a menudo ignoran o carecen del mandato para actuar sobre estos riesgos planetarios, a pesar de la evidencia de una aceleración de las presiones antropogénicas sobre los procesos biofísicos del sistema terrestre.

El análisis preliminar indica que la humanidad ya ha traspasado tres límites (el cambio climático, la tasa de pérdida de biodiversidad y la tasa de interferencia con el ciclo del nitrógeno), ver figura 3.5. Existe una incertidumbre significativa en torno a al periodo durante la cual se pueden transgredir los límites antes de causar un cambio ambiental inaceptable y antes de desencadenar retroalimentaciones que puedan resultar en el cruce de umbrales que reducen drásticamente la capacidad de regresar a niveles seguros.

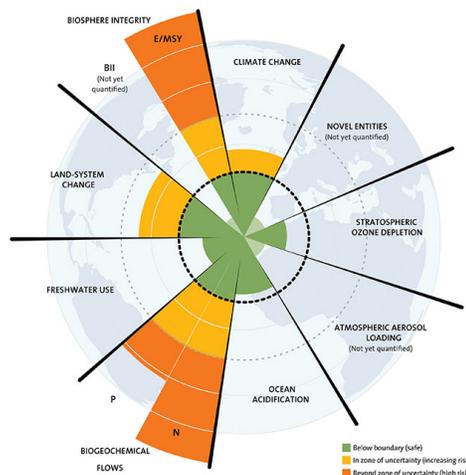


Figura 3.5: Estimaciones de cómo han cambiado las diferentes variables de control para siete límites planetarios desde 1950 hasta el presente.

Fuente: Steffen et al. 2015.

4

Earth Model

El sitio *En Línea* que complementa la información presentada en este capítulo es:
<https://www.sdginpb.com/modelo>

4.1. Modelos Planetarios

Existen varias motivaciones por las cuales a la humanidad le interesa entender y predecir el comportamiento y funcionalidad de los sistemas biofísicos en nuestro planeta. Entre estas motivaciones podemos considerar el prevenir y prepararse contra desastres naturales, evaluar riesgos en expansiones urbanas, garantizar la suficiente producción de alimentos, medir los impactos ambientales provocados por la urbanización, así como muchas otras situaciones que ayudan a prevenir desastres. Es por estas razones que la comunidad científica se ha empeñado en construir modelos que nos ayuden a profundizar en el entendimiento del planeta que habitamos.

Los *modelos del sistema terrestre* (*Earth System Models*, en inglés) y los modelos climáticos globales son una integración compleja de variables ambientales utilizadas para comprender nuestro planeta. Estos sistemas simulan cómo la química, la biología y las fuerzas físicas trabajan juntas.

Para comprender los modelos del sistema terrestre, es útil comprender primero los *modelos climáticos globales*. El clima es el patrón a largo plazo de las muchas variables meteorológicas. Incluye temperatura, lluvia y nevadas, humedad, luz solar y viento. Los modelos climáticos explican cómo pueden cambiar estas variables en el tiempo, utilizando análisis matemáticos basados en la física de cómo se mueven la energía, los gases y los fluidos, combinados con medidas tomadas de experimentos, laboratorios y otras observaciones en el mundo real.

Los modelos climáticos suelen incluir:

1. La atmósfera, considerando las nubes, los aerosoles y los gases.
2. La superficie terrestre; vegetación, nieve y hielo, lagos y ríos, y suelo.
3. El hielo marino y los océanos.
4. La forma en la que todos estos componentes almacenan y mueven el calor y el carbono que calientan la atmósfera terrestre.

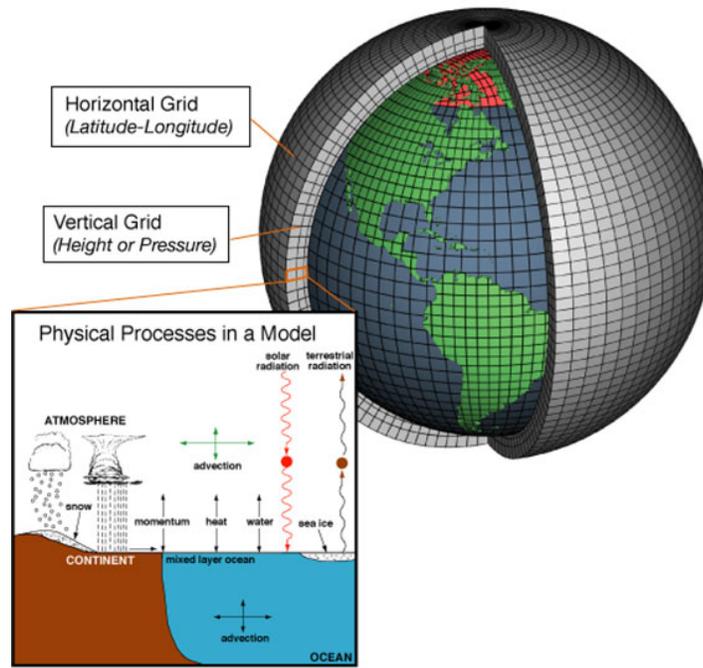


Figura 4.1: **Esquemática de un Modelo Atmosférico y Unidades de Simulación.**
Fuente: *Princeton Education*.

Los modelos climáticos globales tratan a la Tierra como una cuadrícula gigante –ver la Figura 4.1–. El tamaño de cada celda en la cuadrícula está determinado por la potencia de la computadora que ejecuta el modelo. Al igual que un videojuego, una resolución más alta requiere una computadora mucho más potente [53].

Pero a pesar de lo complejo que es el clima, éste es solo una parte de un sistema terrestre aún más complejo. Los modelos del sistema terrestre incluyen todos los factores de los modelos climáticos. El objetivo éstos es comprender cómo funciona la Tierra como un sistema de partes interdependientes. Estas partes incluyen los procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan para dar forma a nuestro planeta y a los organismos que lo habitan [54].

Los modelos del sistema terrestre pueden ayudar a comprender y proporcionar información crítica sobre la disponibilidad de agua, la sequía, el clima y las temperaturas extremas, las capas de hielo y los niveles del mar, y el cambio en el uso de la tierra. Ayudan a los científicos a comprender cómo las plantas, las personas, los animales y los microbios contribuyen y se ven afectados por el clima de la Tierra.

Adicionalmente, los modelos del sistema terrestre pueden incluir el efecto de las decisiones humanas. Es por esto que son herramientas útiles para planificar decisiones relacionadas con la infraestructura, la producción, el uso de energía y el uso del paisaje.

Modelar la Tierra entera o el clima de la Tierra con suficiente precisión es un desafío, pues para aumentar la precisión de un análisis se deben utilizar máquinas y algoritmos de creciente complejidad. Una solución es crear computadoras más poderosas que puedan producir modelos de alta resolución con formas sofisticadas de representar variables del mundo real. Otra solución –si no se cuenta con los recursos tecnológicos– son los modelos de complejidad reducida. Estos modelos proporcionan información climática de menor resolución, pero son más fáciles y rápidos de ejecutar.

El concepto de modelos del sistema terrestre será útil en el estudio que se realizará a continuación de las relaciones entre las actividades antropogénicas y la resiliencia ambiental.

4.2. El Modelo *Earth3*

No debería sorprendernos que la humanidad quiera lograr los 17 objetivos de desarrollo sostenible acordados en el 2015. Estos prometen una vida próspera y digna para todos los integrantes de las sociedades; buena alimentación, acceso a recursos esenciales, erradicación de la desigualdad, infraestructuras que faciliten el desarrollo, etc. Sin embargo, existe la preocupación de que el cumplimiento de las 14 metas socioeconómicas implique un aumento masivo en la huella ecológica humana, dañando la capacidad sostenible de carga del planeta Tierra. El aumento de las actividades humanas, aún si se tiene la intención de cumplir con los objetivos de desarrollo, podría presionar los límites planetarios, deteriorando así los ecosistemas químicos y biológicos. Cruzar los límites planetarios pone en riesgo el funcionamiento de los sistemas terrestres y puede desencadenar un colapso ecológico.

El **propósito de este trabajo** es el de responder las siguientes dos preguntas:

1. Suponiendo que la sociedad global continuase sus tendencias de comportamiento históricas, ¿cuántos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible serán alcanzados en el 2030, y en el 2050?
2. ¿Cuál será la presión resultante sobre los 9 límites planetarios?

Las *tendencias de comportamiento históricas* se refieren a los patrones de decisiones que han seguido los tomadores de decisiones desde 1980. Estos patrones pueden variar entre diferentes regiones geopolíticas.

El proceso por el cual se busca responder las dos preguntas de investigación es mediante la construcción de un *modelo cuantitativo de simulación global*, al cual llamaremos **Earth3** –obligada la mención que dicho modelo fue propuesto por primera vez en el trabajo *Achieving the 17 sustainable development goals within 9 planetary boundaries* [52]–, el cual se encuentra disponible en el siguiente sitio: <https://osf.io/3yp68/>. El modelo intenta imitar el desarrollo que se verá en el planeta, segmentando en 7 regiones socioeconómicas, desde el presente hasta el año 2050. Adicionalmente, se busca representar las relaciones *causa y efecto* que impulsan el desarrollo.

La estructura del modelo Earth3 consiste de 3 submodelos, que interactúan entre ellos. Los submodelos, y sus principales funcionalidades son:

1. **Submodelo Socio-Económico:** Generar predicciones sobre diferentes actividades humanas hasta el año 2050, segmentado por regiones socioeconómicas.
2. **Submodelo Biofísico:** Calcular los impactos biofísicos inducidos por las actividades humanas en ese mismo periodo de tiempo.
3. **Submodelo de Rendimiento:** Calcular el desarrollo en el tiempo de 2 indicadores de rendimiento:
 - Número de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible Alcanzados.
 - Margen de seguridad global con respecto a los límites planetarios.

Los primeros dos submodelos generan escenarios internamente consistentes para los sistemas socioeconómicos y biofísicos entre los años 2018 y 2050. Posteriormente, los resultados son utilizados por el submodelo de rendimiento.

El modelo Earth3 contribuye a los esfuerzos vanguardistas de crear modelos globales relativamente sencillos, diseñados para simular, analizar y entender las complicadas relaciones entre la humanidad y el medio físico que la rodea. En específico, Earth3 está diseñado para medir y entender el impacto ambiental que cierto grado de desarrollo socioeconómico puede provocar.

Con el objetivo de obtener y poder entender la respuesta de las dos preguntas de investigación planteadas, se profundizará en la construcción, estructura y función de los submodelos que conforman a Earth3.

4.2.1. Submodelo Socioeconómico

El primer submodelo que conforma a Earth3 es el socioeconómico. El propósito de este submodelo es generar escenarios consistentes de las actividades humanas, segmentado en 7 regiones socioeconómicas, para el periodo 2018-2050. Los agregados globales de las actividades económicas se obtienen como la suma de las actividades regionales, ponderado por la población total de cada región.

Entonces, ¿cuáles son las actividades e impactos antropogénicos considerados por el submodelo socioeconómico? Los principales son:

- Población.
- Producto interno bruto por persona.
- Tasa de crecimiento del producto interno bruto por persona.
- Crecimiento del mercado laboral.
- Equidad.
- Consumo por persona.
- Gasto gubernamental por persona.
- Uso total de combustibles fósiles.
- Uso total de electricidad por persona.
- Emisión de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero.
- Extracción de agua del ambiente.
- Emisiones humanas de fósforo y nitrógeno.
- Huella ecológica por persona.

La generación de los escenarios requiere datos históricos para crear bases. Las fuentes de información principales, de las cuales se alimenta el submodelo, son:

1. United Nations Population Data.
2. The Penn World Tables.
3. BPs Energy Statistics.
4. Ecological Footprint Data.
5. The World Bank Development Indicators.

Pero, ¿cómo genera el submodelo socioeconómico valores futuros para las diferentes actividades humanas? El lector puede deducir que todas estas actividades se encuentran fuertemente interconectadas, y dependen de muchas variables y situaciones geopolíticas. El secreto se encuentra en utilizar la fuerte correlación entre la evolución de dichas actividades y el Producto Interno Bruto por Persona. Además, es esencial utilizar la *Paridad de Poder Adquisitivo (PPA)* –tasas de conversión de moneda que intentan igualar el poder adquisitivo de diferentes monedas– para poder hacer comparaciones significativas entre las regiones. En esencia, el submodelo socioeconómico funciona de la siguiente manera:

1. Se simula la evolución del Producto Interno Bruto por Persona. Esto se logra mediante *integración numérica*, basada en las correlaciones históricas entre el Producto Interno Bruto por Persona y la Tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto por Persona.
2. El tamaño de la Población Total se simula en base a las tasas de nacimiento y las tasas de muerte. Estas tasas dependen de los valores del Producto Interno Bruto por persona.

donde:

- $a + be^{-GDP_{pp_t}/c}$ es la regresión que se realiza entre el producto interno bruto per cápita y la tasa de nacimiento. Observemos que conforme aumenta el PIB per cápita, la tasa de natalidad disminuye.
- En la expresión $\frac{dt}{AT}$, el término $AT = 20$ es el tiempo de ajuste, pues es el tiempo que usualmente tarda una persona que acaba de nacer en reproducirse, en promedio.

Analizando a profundidad la igualdad anterior, obtenemos que:

$$\begin{aligned} BR_t &= BR_{t-5} - \left(BR_{t-5} - (a + be^{-GDP_{pp_t}/c}) \right) \times \frac{dt}{AT} \\ &= BR_{t-5} \left[1 - \frac{dt}{AT} \right] + (a + be^{-GDP_{pp_t}/c}) \left[\frac{dt}{AT} \right] \\ &= \frac{3}{4} BR_{t-5} + \frac{1}{4} (a + be^{-GDP_{pp_t}/c}) \end{aligned}$$

Por lo tanto $BR(t) = BR(BR(t - 5), GDP(t), POP(t))$.

La Figura 4.3 muestra la interacción histórica de las tasas de nacimiento y mortalidad en China para los años 1970-2015. Recordemos que esta interacción da forma a la población de la región. A partir de estos valores históricos, se hace una regresión con el producto interno bruto por Persona de la región, y es posible predecir valores futuros para el periodo 2015-2050. Esta metodología –simplificada por el indicador económico– se aplica al resto de las actividades socio-económicas.

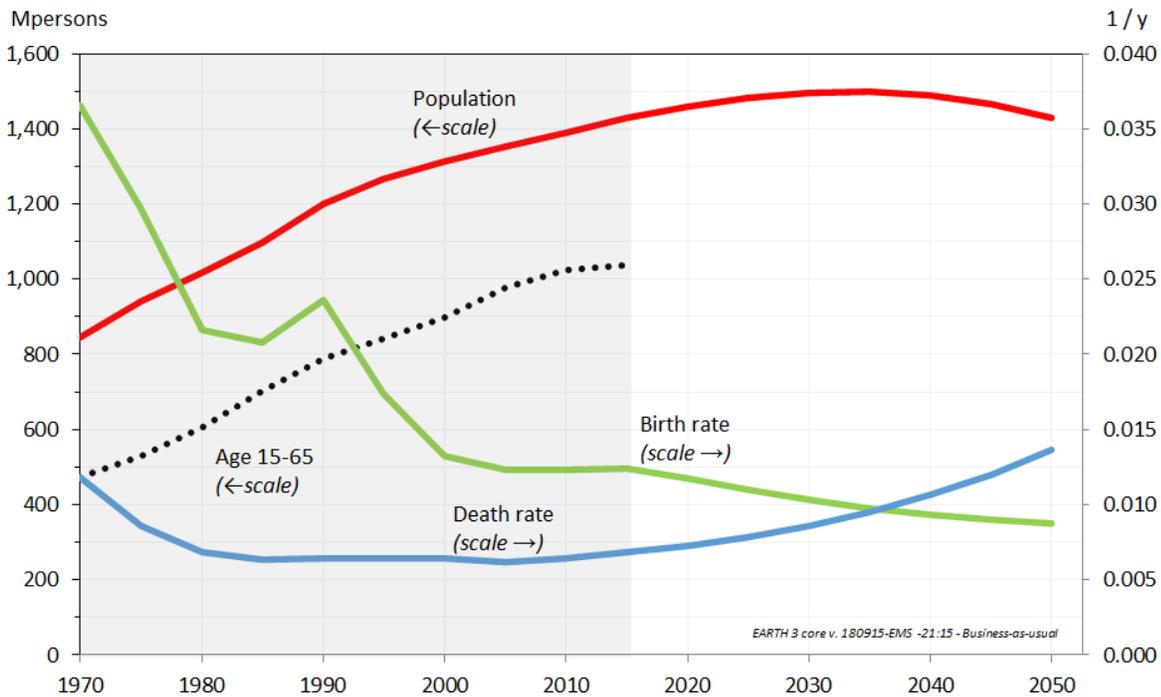


Figura 4.3: **Simulación de la Población en la Región China.**

Fuente: Earth-3 Core Model SpreadSheets [52].

De esta manera, el submodelo socioeconómico puede simular el desarrollo de los diferentes indicadores mencionados para el periodo 2018-2050. Estas predicciones se utilizarán como valores de entrada en los submodelos Biofísicos y de Rendimiento.

4.2.2. Submodelo Biofísico

El submodelo biofísico genera predicciones del impacto ambiental provocado por las actividades humanas, hasta el año 2050. Algunos de los impactos considerados son:

1. Aumento en la temperatura global.
2. Aumento en el nivel del mar.
3. Área de *Bosque Antiguo*.
4. Área Glacial.
5. Tierras de Cultivo y Pastizales.
6. Productividad de la Tierra.

El submodelo biofísico es un modelo de sistemas dinámicos, nombrado **ESCIMO** – construido por el mismo equipo que desarrolló el modelo Earth3– y cuya documentación puede ser encontrada en el enlace: <https://www.earth-syst-dynam.net/7/831/2016/>, escrito en el lenguaje de programación *Vensim*. Este modelo genera resultados promedios globales para diferentes variables geológicas, biológicas y físicas, provocados por las presiones antropogénicas pronosticadas mediante el submodelo socioeconómico.

El submodelo tiene el propósito de relacionar y calcular los efectos biofísicos –y sus evoluciones– que las actividades humanas desencadenan. En la Figura 4.4 se muestran los ciclos causales del submodelo biofísico; observemos que éste incluye la interacción de los sistemas terrestres, mencionados al inicio del capítulo anterior. Aunque en este trabajo se usa el submodelo para estudiar los efectos en el periodo 1980-2050, ESCIMO puede ser empleado para generar predicciones para el periodo 1900-2100.

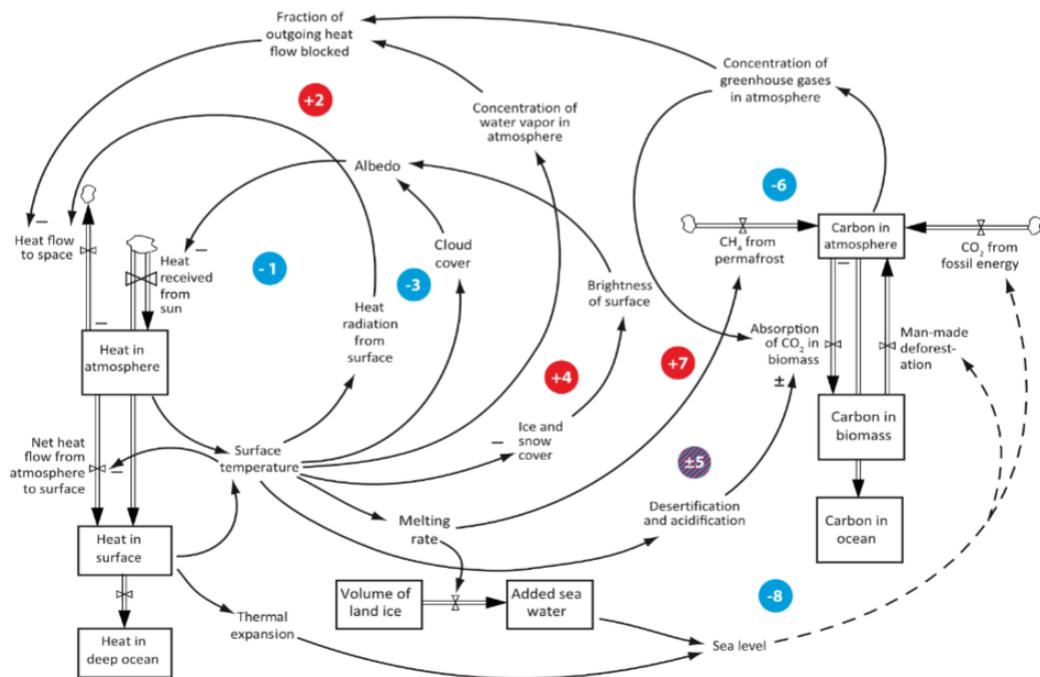


Figura 4.4: Ciclos Causales del submodelo biofísico

Fuente: *Achieving the 17 sustainable development goals within 9 planetary boundaries* [52].

ESCIMO realiza un seguimiento de los flujos y reservas de carbono en el ecosistema global y describe cómo cambian con el tiempo en respuesta a las distintas emisiones humanas de gases de efecto invernadero. ESCIMO también rastrea el flujo de calor global y el cambio en la extensión del área, así como la productividad, de diferentes tipos de tierra, una vez más en respuesta a las actividades humanas.

Por lo tanto, ESCIMO garantiza la conservación del carbono, el calor y la superficie terrestre en las simulaciones de modelos [52].

Aún si ESCIMO resulta relativamente sencillo de usar e implementar; ha sido comprobado que éste genera resultados muy similares a modelos más grandes y complejos, cuando se alimentan con la misma información [52]. La gran ventaja de ESCIMO es que es mucho más simple que dichos modelos y puede ser ejecutado en segundos, utilizando una computadora sencilla. Si el lector desea utilizar, o profundizar en el funcionamiento de ESCIMO, puede encontrar información suficiente en el siguiente enlace: <http://www.2052.info/escimo/>.

La Figura 4.5 ejemplifica un resultado de ESCIMO al ser *alimentado* por datos producidos mediante el submodelo socio-económico suponiendo el caso de que las tendencias históricas del comportamiento humano continuasen. La Figura muestra valores históricos para el aumento de la temperatura global entre los años 1980-2015, posteriormente muestra una simulación de la evolución de éste para el periodo 2015-2050. ESCIMO produce resultados similares para múltiples impactos ambientales.

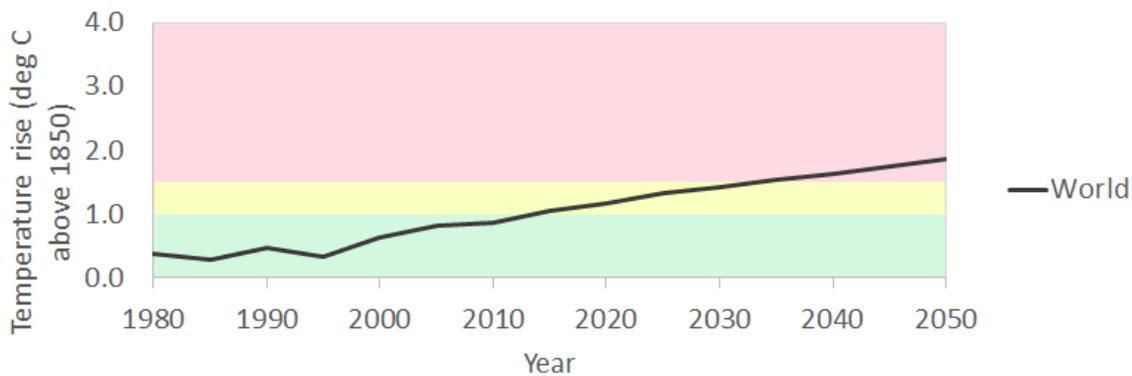


Figura 4.5: **Simulación del aumento global de la Temperatura, producido con ESCIMO**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

4.2.3. Submodelo de Rendimiento

El submodelo de rendimiento calcula el desarrollo temporal de 2 indicadores de rendimiento:

1. Número de Objetivos de Desarrollo Sostenible Alcanzados.
2. Margen de seguridad global con respecto a los límites planetarios.

Estos indicadores darán respuesta a nuestras dos preguntas de investigación. Se explica a continuación la construcción, lógica e implementación de ambos indicadores.

Número de Objetivos de Desarrollo Sostenible Alcanzados

El propósito del indicador es medir el grado en el que cada uno de los 17 Objetivos de Desarrollo es alcanzado, en una escala que va desde **0** –en este caso no hubo progreso alguno– hasta **17** –implicando que los 17 Objetivos fueron alcanzados en su totalidad–.

Pero, ¿cómo medimos el grado de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo? Para cada Objetivo se debe escoger un indicador cuantitativo que represente el progreso que se ha tenido en alcanzar las metas. Para cada indicador podemos definir dos umbrales:

- El primer umbral indica la frontera entre la *Zona Roja* –la cual representa un cumplimiento nulo– y la calificaremos con un valor de 0, y la *Zona Amarilla* –representando un cumplimiento parcial del objetivo– y la calificaremos con un valor de 0.5.
- El segundo umbral indica la frontera entre la *Zona Amarilla* y la *Zona Verde* –la cual representa un total cumplimiento del objetivo estudiado (con respecto al indicador escogido), y se califica con un valor de 1.

Con esta metodología, es posible calcular el progreso total de alcanzar los Objetivos; éste será *la suma de las calificaciones individuales*. Aunque en este trabajo, se ha decidido utilizar un único indicador por objetivo - y únicamente dos umbrales - el lector puede replicar el experimento considerando más de un indicador por objetivo y ponderando la suma de la calificación de éstos utilizando los pesos de su elección. Esto último permitiría darle una mayor *importancia* al cumplimiento de cierto objetivo en comparación al resto.

Debido a que el mundo se divide en regiones socio-económicas que cuentan con recursos e infraestructuras diferentes, el submodelo socio-económico genera futuros escenarios de manera individual para cada una de las 7 regiones consideradas. Así mismo, el submodelo de Rendimiento califica de manera individual el progreso de los Objetivos de Desarrollo en cada región. Debido a la limitada cantidad de información que existe en ciertas regiones del mundo, se ha decidido promediar la información regional en periodos de 5 años. Posteriormente, para obtener una calificación global, se suman los resultados regionales y se pondera por la población de cada región. De esta manera, podemos interpretar la calificación global como el nivel de progreso al cual es expuesto un habitante promedio del mundo.

Las regiones socio-económicas consideradas fueron obtenidas del Banco Mundial, y se conforman por:

1. Estados Unidos.
2. Países Ricos.
3. Economías Emergentes.
4. China.
5. Subcontinente Indio.
6. África Subsahariano.
7. Resto del Mundo.

En la tabla 4.1 se muestran los indicadores cuantitativos, así como sus dos valores de umbral, seleccionados para este modelo. La selección de los indicadores y los umbrales se basa en la compatibilidad con las metas relacionadas a los Objetivos de Desarrollo, la disponibilidad y calidad de los datos históricos y la existencia de una notable correlación con el Producto Interno Bruto por Persona. Se hace notar que el lector puede cambiar dichos indicadores si le parece adecuado y replicar el experimento de manera similar (siguiendo los pasos de la sección siguiente, adaptándolos al nuevo indicador).

Margen de seguridad global con respecto a los límites planetarios

El segundo indicador tiene como propósito medir la fuerza de la presión humana sobre los sistemas de soporte vital de la Tierra en relación con la estimación de los límites del sistema operativo seguro [48]. Es decir, el indicador mide el grado en el que los 9 límites planetarios han sido transgredidos por las actividades humanas.

Siguiendo la lógica del primer indicador, el margen de seguridad global podrá tomar valores entre **9** –representando una nula presión sobre los sistemas de soporte vital de la Tierra– hasta **0** –lo que significaría un total traspaso de los límites planetarios–. A diferencia del primer indicador, la calificación del segundo es únicamente global, pues los límites son planetarios.

Tabla 4.1: **Objetivos de Desarrollo, sus indicadores y umbrales.**

Objetivo de Desarrollo Sostenible	Indicador Cuantitativo	Umbral Frontera Verde-Amarilla	Umbral Frontera Amarilla-Roja
Fin de la Pobreza	Fracción de la población que vive por debajo de \$1.90 al día (%)	< 2 %	< 12 %
Hambre Cero	Fracción de población desnutrida (%)	< 7 %	< 15 %
Salud y Bienestar	Esperanza de vida al nacer (años)	> 75 años	> 70 años
Educación de Calidad	Esperanza de vida escolar (años)	> 12 años	> 10 años
Igualdad de Género	Paridad de género en la escolarización (1)	> 0.95	> 0.8
Agua Limpia y Saneamiento	Fracción de la población con acceso a agua segura (%)	> 98 %	> 80 %
Energía Asequible y No Contaminante	Fracción de la población con acceso a la electricidad (%)	> 98 %	> 80 %
Trabajo Decente y Crecimiento Económico	Crecimiento del mercado laboral (%/a)	> 1 (%/a)	> 0 (%/a)
Industria, Innovación e Infraestructura	PIB por persona en manufactura y construcción (2011 PPA US\$/p-a)	> 6000 (2011 PPA US\$/p-a)	> 4000 (2011 PPA US\$/p-a)
Reducción de las Desigualdades	Proporción del ingreso nacional al 10 % más rico (%)	< 40 %	< 50 %
Ciudades y Comunidades Sostenibles	Concentración de aerosoles urbanos ($\mu\text{g } 2.5\text{M} / \text{m}^3$)	< 10 ($\mu\text{g } 2.5\text{M} / \text{m}^3$)	< 35 ($\mu\text{g } 2.5\text{M} / \text{m}^3$)
Producción y Consumo Responsables	Huella ecológica por persona (gha/p)	<1.4 (gha/p)	< 2 (gha/p)
Acción por el Clima	Aumento de temperatura (grados C por encima de 1850)	< 1 grados C	< 1.5 grados C
Vida Submarina	Acidez del agua superficial del océano (pH)	> pH 8.15	> pH 8.10
Vida de Ecosistemas Terrestres	Área de bosque antiguo (MKm^2)	> 25 MKm^2	> 19 MKm^2
Paz, Justicia e Instituciones Sólidas	Gasto del gobierno por persona (2011 PPA US\$/p-a)	> 3000 (2011 PPA US\$/p-a)	> 2000 (2011 PPA US\$/p-a)
Alianzas para lograr los Objetivos	Exportaciones como fracción del PIB (%)	> 15 %	> 10 %

Para cada límite se define una *zona verde* que vemos como de bajo riesgo (calificada con un puntaje de margen de seguridad de **1.0**), una *zona naranja* que vemos como de riesgo medio (calificada con un puntaje de seguridad **0.5**) y una *zona roja* que vemos como de alto riesgo (calificada con un puntaje de seguridad **0**).

El margen de seguridad global con respecto a los límites planetarios se calcula como la suma de las puntuaciones individuales de los márgenes de riesgo para cada uno de los 9 límites planetarios. Notemos que esta es una manera de cuantificar la presión conjunta que ejerce la humanidad sobre los diferentes sistemas.

La tabla 4.2 muestra los 9 indicadores cuantitativos, así como sus dos valores de umbral –límite de la zona segura y límite a la zona de peligro– seleccionados para este modelo.

Tabla 4.2: Límites planetarios, sus indicadores y umbrales.

Límite Planetario	Indicador cuantitativo	Umbral Límite de la Zona Segura	Umbral Límite a la Zona de Peligro
Calentamiento global	Aumento de temperatura (grados C por encima de 1850)	< 1 grado C	> 2 grados C
Agotamiento del ozono estratosférico	Emisiones de gases de Montreal (Mt/año)	< 0.25 Mt/año	> 2 Mt/año
Acidificación de los océanos	Acidez del agua superficial del océano (pH)	> pH 8.15	< pH 8.10
Cambios en el sistema de tierras	Área de Bosque Antiguo (Mkm^2)	> 25 Mkm^2	< 17 Mkm^2
Sobrecarga de nutrientes	Liberación de nitrógeno bioactivo (Mt/año)	< 100 Mt/año	> 200 Mt/año
Uso de agua dulce	Extracción de agua dulce ($km^3/año$)	< 3000 $km^3/año$	> 4000 $km^3/año$
Tasa de pérdida de biodiversidad	Biocapacidad no utilizada (% de biocapacidad)	> 25 %	< 18 %
Carga de aerosoles	Concentración de aerosoles urbanos ($\mu g 2.5M/m^3$)	< 10 $\mu g 2.5M/m^3$	> 35 $\mu g 2.5M/m^3$
Contaminación química	Liberación de plomo (Mt/año)	< 5 Mt/año	> 10 Mt/año

4.2.4. Interacción de los Submodelos

En resumen, se empleará un modelo de simulación terrestre –compuesto de 3 submodelos– para contestar las siguientes preguntas: si la humanidad continúa con la tendencia en la toma de decisiones de las últimas décadas, ¿cuántos de los objetivos de desarrollo sostenible habremos alcanzado para el 2030 y cuál será el efecto en los sistemas biofísicos vitales? ¿Y para el 2050?

Los tres submodelos trabajan en conjunto. La Figura 4.6 ejemplifica la interacción y los *inputs/outputs* de éstos. El submodelo socio-económico (*Earth3-core* en el artículo original) genera predicciones de las diferentes actividades socio-económicas por región para el periodo de tiempo 2015-2050. Estas predicciones incluyen: tasa de natalidad y mortalidad, tasa de cambio en el producto bruto por persona, y consumo de energía por persona. El submodelo Biofísico (*ESCIMO-plus* en el artículo original) utiliza las predicciones del submodelo Socio-económico para generar futuros escenarios para variables ecológicas importantes, como el aumento de la temperatura global y la distribución del uso de tierras. Finalmente, las predicciones de ambos submodelos son utilizadas por el submodelo de Rendimiento para predecir el desarrollo de indicadores cuantitativos preseleccionados para medir el progreso de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, segregado por región, y la presión antropogénica sobre los límites planetarios. Una vez que las predicciones estén listas, el submodelo califica los valores de los indicadores dado un criterio preestablecido.

Al momento, solo se ha presentado el criterio que el modelo de Rendimiento utiliza para calificar el progreso y peligro –pero esto solo lo podremos aplicar a valores *existentes*–, y los únicos datos que tenemos son datos históricos. Si deseamos medir el progreso en el futuro, es decir, pronosticar el cumplimiento de las metas en un año futuro, debemos poder predecir el comportamiento futuro de los indicadores definidos para medirlo. En el siguiente capítulo, se explicará a detalle la metodología empleada por el submodelo de Rendimiento para generar predicciones de la evolución de los indicadores cuantitativos seleccionados para medir el progreso de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los indicadores seleccionados para medir la trasgresión de los límites planetarios.

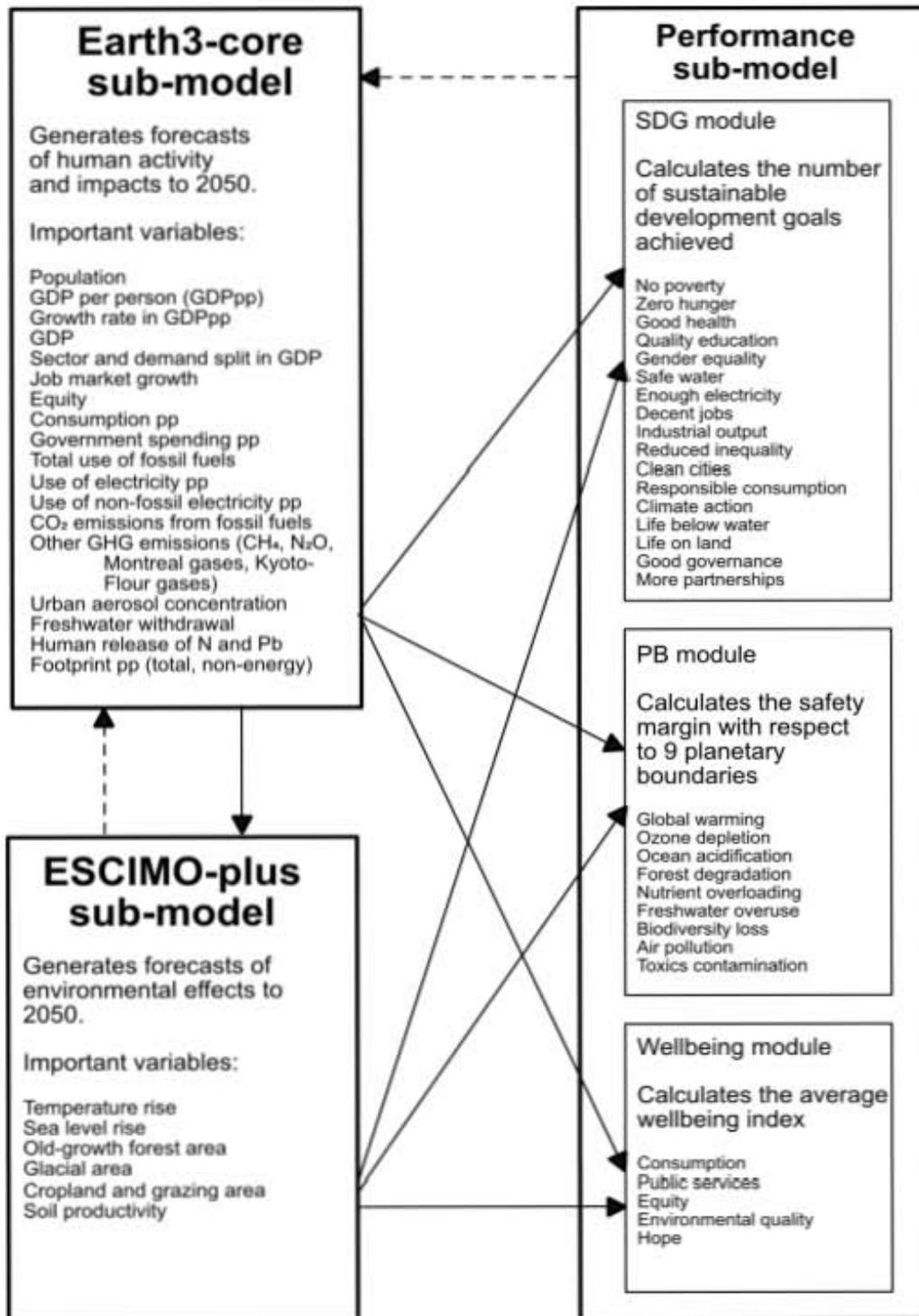


Figura 4.6: Interacción de los submodelos en Earth3

Fuente: *Achieving the 17 sustainable development goals within 9 planetary boundaries* [52].

4.3. Abstracción Matemática del Modelo

En las secciones anteriores, se ha descrito el modelo Earth3 de manera verbal; sin embargo puede resultar útil el describirlo con notación matemática. Abstractar el modelo a lenguaje lógico ayuda a entender de manera rigurosa el proceso que éste aplica a los datos con los que se alimenta, y esto a su vez permite el ajuste de modelos y análisis de la bondad de éstos.

El modelo se divide en la interacción de tres submodelos:

1. Socio-Económico
2. Ecológico
3. Rendimiento

Inicialmente, el **submodelo Socio-Económico**, empleando datos históricos regionales para:

- Producto Interno Bruto
- Población Total

produce predicciones de ambas variables para algún tiempo futuro t .

Así, si contamos con K regiones socioeconómicas, podemos definir:

Producto Interno Bruto

Se define la función regional $GDP_k(t)$ para $k \in \{1, \dots, K\}$.

Esta función fue entrenada con n datos históricos: $\{g_{k1}, g_{k2}, \dots, g_{kn}\}$.

Es posible, mediante Integración Numérica, ajustar una predicción del Producto Interno Bruto al tiempo $t + 1$ considerando únicamente el valor del PIB al tiempo t . Esto implica que:

$$GDP_k(t) = GDP_k(gdp_{t-1}) \text{ donde } gdp_{t-1} = GDP_k(t-1) .$$

Población Total

Se define la función regional $POP_k(t)$ para $k \in \{1, \dots, K\}$. Para entrenar esta función se utilizan tres conjuntos de datos:

1. m datos históricos de la población total regional: $\{p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{km}\}$.
2. Tasa de Natalidad Regional $NR_k : \{nr_{k1}, nr_{k2}, \dots, nr_{km}\}$.
3. Tasa de Mortalidad Regional $MR_k : \{mr_{k1}, mr_{k2}, \dots, mr_{km}\}$.

Recordando que, para todo momento $j \in \{2, \dots, m\}$ se cumple que $p_{kj} = p_{k(j-1)}[nr_{kj} - mr_{kj}]$.

Dado que la Población al tiempo t depende de la población al tiempo $t-1$ y de las tasas de mortalidad y natalidad para el tiempo t , se cumple que:

$$POP_k(t) = POP_k(POP_k(t-1), NR_k(t), MR_k(t)) .$$

Las funciones $NR_k(t)$ y $MR_k(t)$ pueden ser entrenadas utilizando integración numérica alimentada por la información histórica de los conjuntos NR_k y MR_k respectivamente. Adicionalmente, múltiple literatura [11] indica que el Producto Interno Bruto de una región afecta de manera significativa a las tasas de nacimiento y muerte, por lo tanto:

$$\begin{aligned} NR_k(t) &= NR_k(NR_k(t-1), GDP_k(t)), \\ MR_k(t) &= MR_k(MR_k(t-1), GDP_k(t)). \end{aligned}$$

De esta manera, contamos con dos funciones regionales para predecir valores del Producto Interno Bruto y la Población Total para tiempos futuros t . Con esta información es posible construir funciones socioeconómicas que dependen del PIB y la Población.

Funciones Socio-Económicas Consecuentes

De manera regional, se construyen S funciones socioeconómicas que dependan de los valores regionales del PIB y la Población:

$$f_{kj}(t) = f_{kj}(GDP_k(t), POP_k(t)) ,$$

para $j \in \{1, \dots, S\}$.

Un ejemplo de una función socioeconómica regional consecuente sería el *Producto Interno Bruto por persona*;

$$GDPpc_k(t) = \frac{GDP_k(t)}{POP_k(t)} ,$$

para $k \in \{1, \dots, K\}$.

Estas funciones están entrenadas con n_{kj} datos históricos, para $j \in \{1, \dots, S\}$ y $k \in \{1, \dots, K\}$.

De esta manera, el Submodelo Socio-Económico genera funciones que permiten simular valores futuros de:

1. Producción Interna Bruta regional
2. Población Total regional
3. S indicadores socioeconómicos regionales - en función de PIB y Población.

Algo que vale la pena rescatar en este punto de la construcción, es el hecho que las simulaciones dependen fundamentalmente de los valores de Producto Interno Bruto, por lo tanto, este valor tendrá una importancia mayúscula en el análisis de sensibilidad y ajuste de las simulaciones consecuentes.

Funciones Ecológicas

Tras obtener las funciones regionales del Submodelo Socio-Económico, éstas son empleadas por el **Submodelo Ecológico**. Se definen e funciones ecológicas para predecir los impactos ambientales producto de las actividades socio-económicas:

$$E_i(GDP, POP, FSEC),$$

para $i \in \{1, \dots, e\}$, en donde:

- $GDP = T_{GDP}(GDP_1, \dots, GDP_K)$,
- $POP = T_{POP}(POP_1, \dots, POP_K)$,
- $FSEC = T_{FSEC}(T_{FSEC_1}, \dots, T_{FSEC_K})$,
- De la expresión superior: $T_{FSEC_j} = T_{FSEC_j}(f_{j1}, \dots, f_{jS})$ para $j \in \{1, \dots, K\}$.

Estas funciones T_{GDP} , T_{POP} , T_{FSEC} son transformaciones de las funciones regionales del submodelo Socio-Económico. De esta manera, las funciones E_i para $i \in \{1, \dots, e\}$ convierten valores regionales en agregados globales.

Finalmente, el **Submodelo de Rendimiento** emplea las funciones del submodelo socioeconómico y las funciones del submodelo ecológico para construir las siguientes funciones:

Funciones de Rendimiento

Se definen r funciones de rendimiento R_{kl} de indicadores de interés para las K regiones consideradas; $l \in \{1, \dots, r\}$ y $k \in \{1, \dots, K\}$. Estas funciones reciben como parámetros:

- GDP_k
- POP_k
- $T_{FSEC_k}(f_{k1}, \dots, f_{kS})$
- $\{E_1, \dots, E_e\}$

A partir de los parámetros, las r funciones de rendimiento, entrenadas utilizando la correlación encontrada entre valores pasados de los parámetros y valores pasados del indicador, predicen el rendimiento de indicadores de interés.

Recordemos que se cuenta con una metodología que permite predecir valores futuros para los parámetros de la función ajustada R_{kl} , por lo que también será posible predecir valores de esta última.

Función de Calificación

La función de calificación GR_l toma como parámetro $\{R_{1l}, \dots, R_{Kl}\}$ - funciones de rendimiento regionales para el indicador l - y devuelve una calificación $\{gr_{1l}, \dots, gr_{Kl}\}$ de los rendimientos regionales para el indicador l ; $l \in \{1, \dots, r\}$.

$$GR_l(\{gr_{1l}, \dots, gr_{Kl}\}) = \{gr_{1l}, \dots, gr_{Kl}\}.$$

La calificación asignada depende de un criterio pre-establecido, que puede ser idéntico para los r indicadores, o variar.

Función de Resultado

Finalmente, la función de resultado R , toma como parámetro las calificaciones GR_l para $l \in \{1, \dots, r\}$, y basado en un criterio pre-establecido, concluye si el objetivo ha sido o no alcanzado.

De esta manera, los tres submodelos trabajan en conjunto para construir una función resultado que determine si, para algún tiempo t , el objetivo es alcanzado.

5

Generando los Resultados

En el presente capítulo se explica la metodología para predecir el comportamiento de los indicadores cuantitativos seleccionados en el submodelo de Rendimiento. Siguiendo esas instrucciones, se obtienen predicciones para el periodo 2015-2050. Con el propósito de complementar y enriquecer el trabajo escrito, se comparte la liga al siguiente repositorio:

<https://github.com/blankhall98/17in9Thesis/tree/main/models/e3python>

Ahí, el lector podrá descargar y utilizar un código desarrollado en *Python*. Dicho código fue empleado para seguir la metodología descrita a continuación. Las gráficas y resultados presentados pueden ser replicadas ejecutando el archivo *app.py*. Si se desea, el código y las bases de datos empleadas pueden ser modificadas fácilmente para distintos escenarios de evolución o para imitar el modelo con distintos indicadores.

5.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible

En general, para simular el progreso de los diferentes ODS, se ha empleado el siguiente procedimiento:

1. Se presentan los datos históricos del indicador en función del PIBpp. Los datos regionales se promedian durante períodos de cinco años.
2. Luego, se realiza una regresión del indicador (Y) sobre el PIBpp (X), ajustando la curva utilizando una forma funcional adecuada basada en el conocimiento previo y los datos analizados. Se recomienda la sección *Apéndice* para mayor entendimiento. En la mayoría de los casos la fórmula empleada será:

$$Y = a + be^{-cX} .$$

La razón detrás de esta forma funcional es que suponemos que los indicadores sociales y económicos de progreso mejorarán inicialmente muy rápido a medida que crezca el PIBpp [52].

3. Se usan las ecuaciones de regresión resultantes para pronosticar los valores futuros de los indicadores.

Objetivo 1: Fin de la Pobreza

Para el primer objetivo, *Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo*, se escoge el indicador:

Fracción de la población que vive por debajo de 1.90\$ al día (%).

Recordemos que la cantidad monetaria se maneja en términos de la paridad de poder adquisitivo del dolar en el año 2011. Es decir, **n 2011 PPP\$** es equivalente a lo que la conversión de **n** dólares a la moneda del lector le podían comprar en el país donde habita el lector en el año 2011.

Datos históricos del indicador se pueden obtener -por región- desde las bases de datos de *World Bank*. La Figura 5.1 muestra la correlación entre los valores históricos regionales del indicador del objetivo 1 con el producto interno bruto por persona de la misma región.

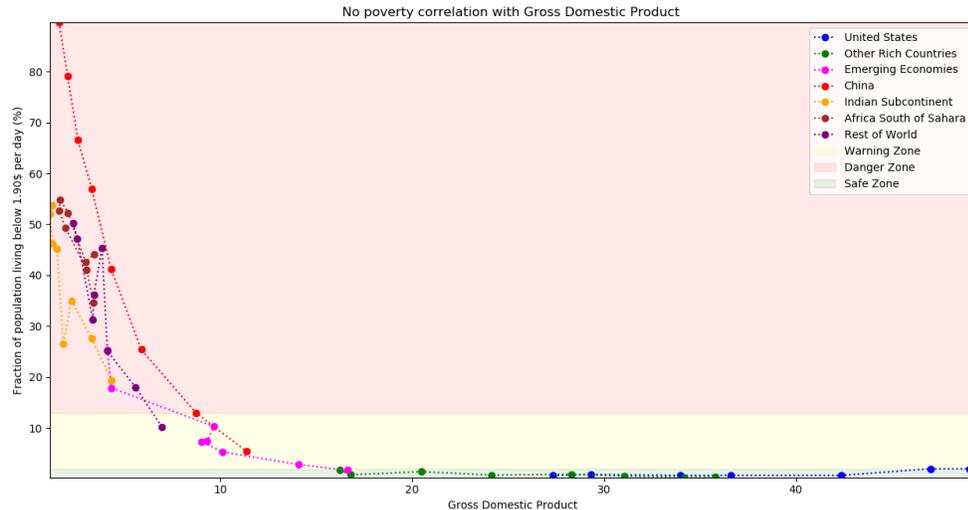


Figura 5.1: **Correlación entre los valores históricos del indicador *Fracción de la población que vive por debajo de 1.90\$ al día (%)* y el Producto Interno Bruto por Persona.**

Fuente: Elaboración propia.

Notemos que el comportamiento del indicador cambia de manera *exponencial descendiente* al variar el ingreso bruto por persona. Es por esto que se propone la siguiente fórmula para el ajuste:

$$y = 100e^{-x/b}.$$

Para todas las regiones. Los datos regionales determinarán el valor de b , mientras que asumimos que en una región donde el producto interno bruto por persona es de 0\$, la tasa de pobreza será del 100%. Es ahora posible encontrar -para cada región- el parámetro que mejor ajuste los datos regionales a la función propuesta. La Figura 5.2 muestra el resultado del ajuste regional. Ahora, nos es posible pronosticar la fracción de la población -por región- que vive en pobreza extrema dado el producto interno bruto por persona de la región.

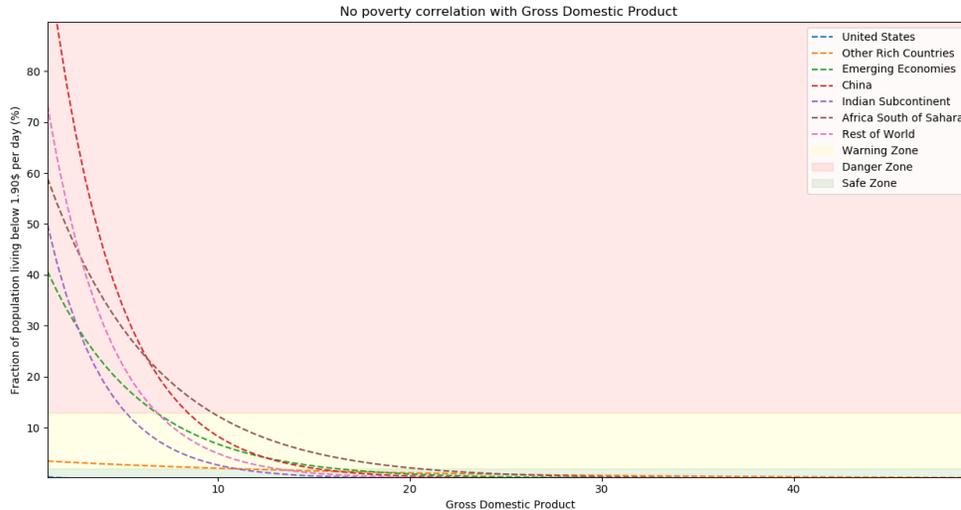


Figura 5.2: Ajuste entre los valores históricos del indicador *Fracción de la población que vive por debajo de 1.90\$ al día (%)* y el Producto Interno Bruto por Persona.
Fuente: Elaboración propia

Con las regresiones obtenidas, y utilizando las predicciones del submodelo socio-económico para futuros valores del producto interno bruto por persona regional, es posible simular el desarrollo del indicador de interés. La Figura 5.3 muestra una combinación de los datos históricos para el indicador, entre los años 1980-2015, junto con los valores pronosticados por el modelo en el periodo 2015-2050.

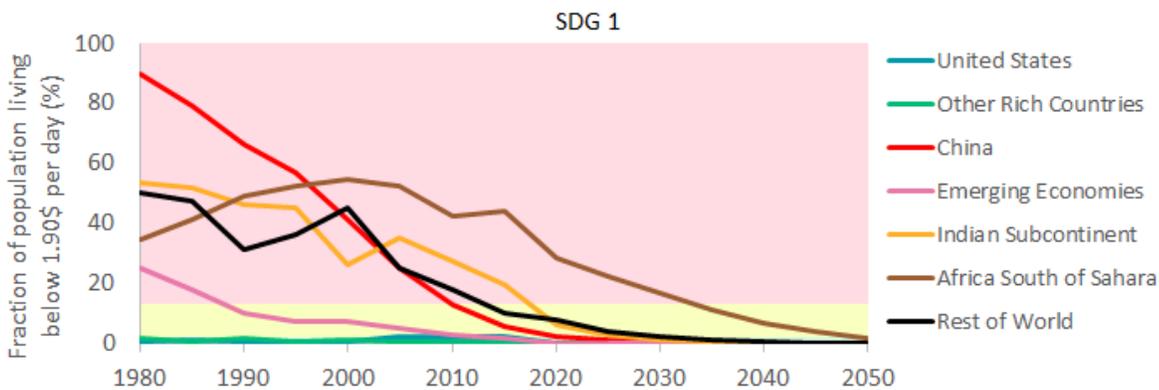


Figura 5.3: **Objetivo 1: Fin de la Pobreza –Simulación Earth3– tendencia histórica**
Fuente: Earth3 Core Model SpreadSheets [52].

De acuerdo con el modelo, la mayoría de las regiones estarán en la región amarilla para el 2020 y en la región verde para el año 2030 –mientras que África Subsahariana alcanzará la región amarilla hasta casi el año 2040–. Notemos el progreso de China en el periodo 1980-2020, comenzando desde más del 80% de su población en situación de pobreza extrema.

Objetivo 2: Hambre Cero

Para el segundo objetivo, *Poner fin al hambre*, se escoge el indicador:

Fracción de la población desnutrida (%).

Los datos históricos, presentados en la Figura 5.4 fueron obtenidos de las bases de datos del Banco Mundial.

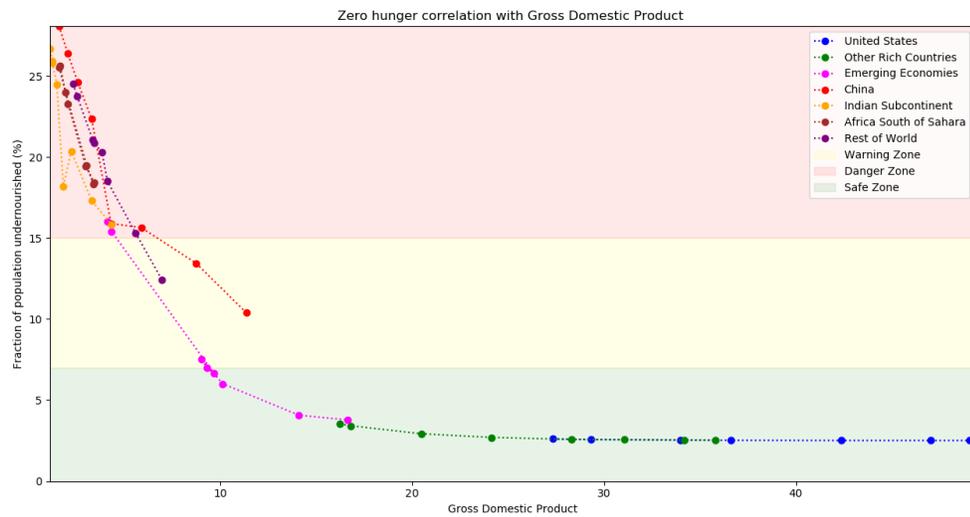


Figura 5.4: **Correlación entre los valores históricos del indicador *Fracción de la población desnutrida (%)* y el Producto Interno Bruto por Persona.**

Fuente: Elaboración propia

Al observar los datos sobre el segundo objetivo –Figura 5.4– encontramos que todas las regiones se comportan de manera bastante similar al primer objetivo. Los datos indican que una función que cruza el eje Y alrededor de 35 parece ser razonable para predecir el comportamiento futuro de la variable. Las dos regiones más ricas –Estados Unidos y Otros Países Ricos– tienen niveles de desnutrición de alrededor del 2.5% en los últimos años. Por estas razones, parece adecuado escoger la siguiente función para la regresión:

$$y = 2.5 + 32.5e^{-x/b}.$$

Nuevamente, los datos históricos regionales entre la correlación del indicador con el producto interno bruto por persona servirán para estimar el parámetro que determine la función de regresión. La Figura 5.5 muestra el resultado del ajuste con la función propuesta.

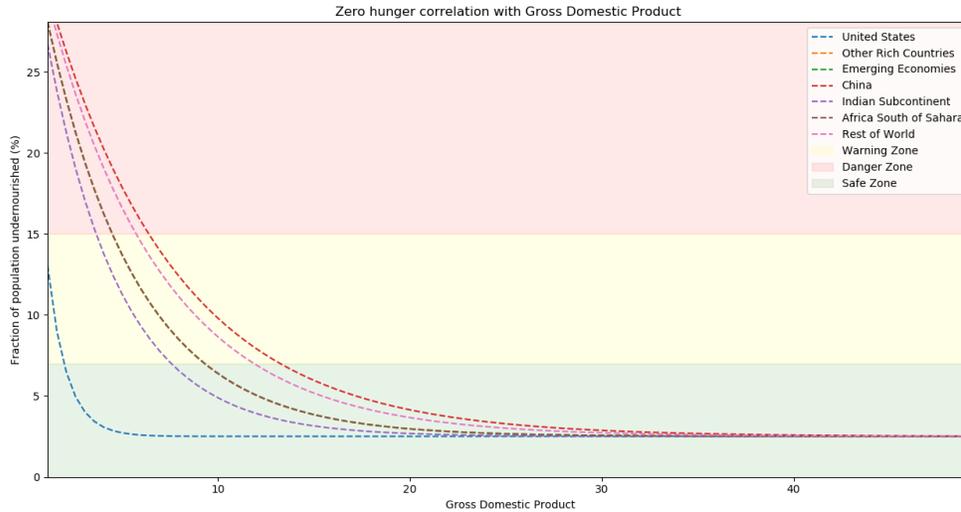


Figura 5.5: **Ajuste entre los valores históricos del indicador *Fracción de la población desnutrida (%)* y el Producto Interno Bruto por Persona**
 Fuente: Elaboración propia .

Utilizando las regresiones estimadas, alimentadas por las predicciones de la variable independiente (PIB_{pp}), es posible generar predicciones para el progreso del Objetivo 2. La Figura 5.6 muestra el progreso estimado: La mayoría de las regiones logran entrar en la zona verde para el año 2030, mientras que África Subsahariana alcanza dicha zona hasta casi el año 2050.

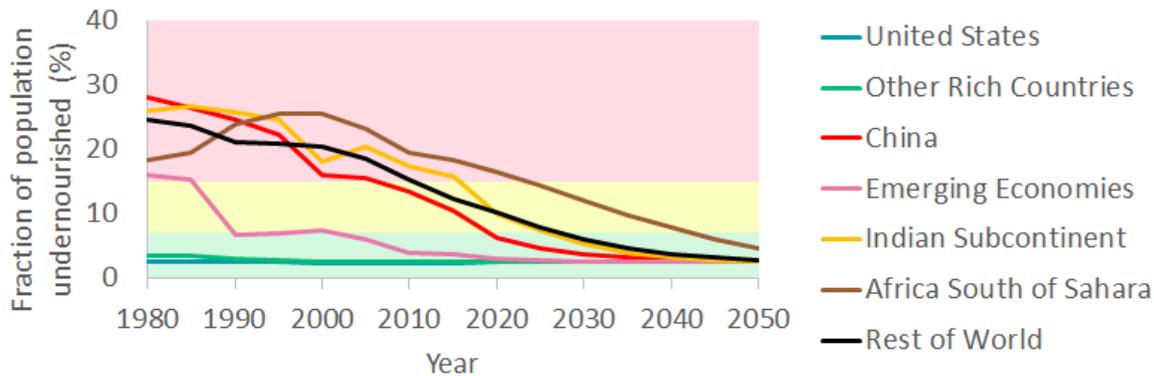


Figura 5.6: **Objetivo 2: Hambre Cero - Simulación Earth3 - Tendencia Histórica**
 Fuente: Earth3 Core Model SpreadSheets [52].

Objetivo 3: Salud y Bienestar

Para el tercer objetivo, *Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades*, se escoge el indicador:

Esperanza de vida al nacer (años).

Los datos históricos de este indicador fueron recopilados de la base de datos *UN Population Statistics*. La Figura 5.7 presenta la correlación entre los datos históricos del indicador y el PIB_{pp} ; observemos que el comportamiento sigue siendo exponencial, pero ahora ascendente.

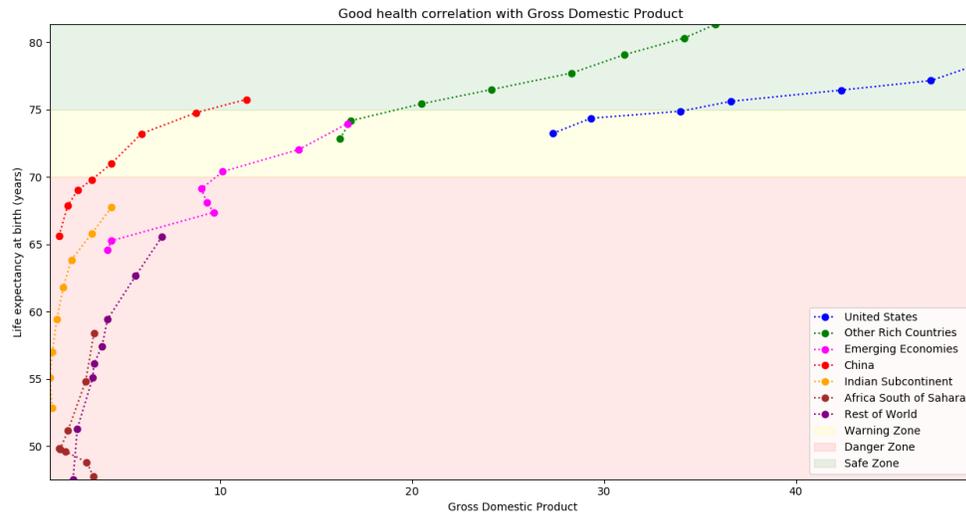


Figura 5.7: **Correlación entre los valores históricos del indicador *Esperanza de vida al nacer* (años).**

Fuente: Elaboración propia

Para el objetivo de Salud y Bienestar se considera que tanto el PIB_{pp} como el avance tecnológico internacional tienen un efecto en el progreso. Es por esto que se decide ajustar una curva compuesta de dos partes:

$$y = (70 + 0.18 \cdot (\text{años desde 1965})) \cdot (1 - ce^{-x/d}).$$

La primera parte de la ecuación, $(70 + 0.18 \cdot (\text{años desde 1965}))$, representa la esperanza de vida máxima y depende del avance tecnológico, se supone que tiene este un efecto lineal por año en la esperanza de vida. La segunda parte de la ecuación considera el efecto económico.

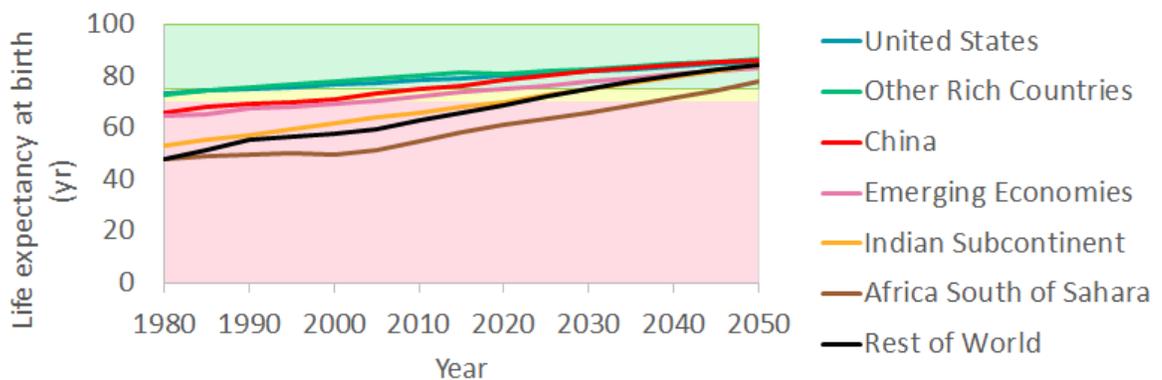


Figura 5.8: **Objetivo 3: Salud y Bienestar – Simulación Earth3– tendencia histórica**

Fuente: Earth3 Core Model SpreadSheets [52].

Con los ajustes de curva, podemos predecir el progreso del tercer objetivo. Este se muestra en la Figura 5.8. Estados Unidos y la región de países ricos ya se encontraban desde hace unos años en la zona

verde, mientras que la mayoría de las regiones alcanzan esa zona hasta el año 2030. África Subsahariana, por otra parte, se encontrará en la zona roja aún en el año 2040, y llegará a la zona verde hasta comienzos de 2050.

Objetivo 4: Educación de Calidad

Para el cuarto objetivo, *Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos*, se escoge el indicador:

Esperanza de vida escolar (años).

La información histórica regional para el indicador se extrae de las bases de datos del Banco Mundial. La Figura 5.9 muestra la correlación entre el indicador y el PIB_{pp} . Observemos que todas las regiones parecen comportarse de la misma manera –exponencial creciente–. Los datos indican que una función que cruza el eje Y alrededor de seis –primaria completada– parece ser razonable para simular el comportamiento futuro del desarrollo. También parece razonable creer que la educación no crecerá para siempre sino que puede saturarse a un nivel de alrededor de 18 años –licenciatura y posgrado–.

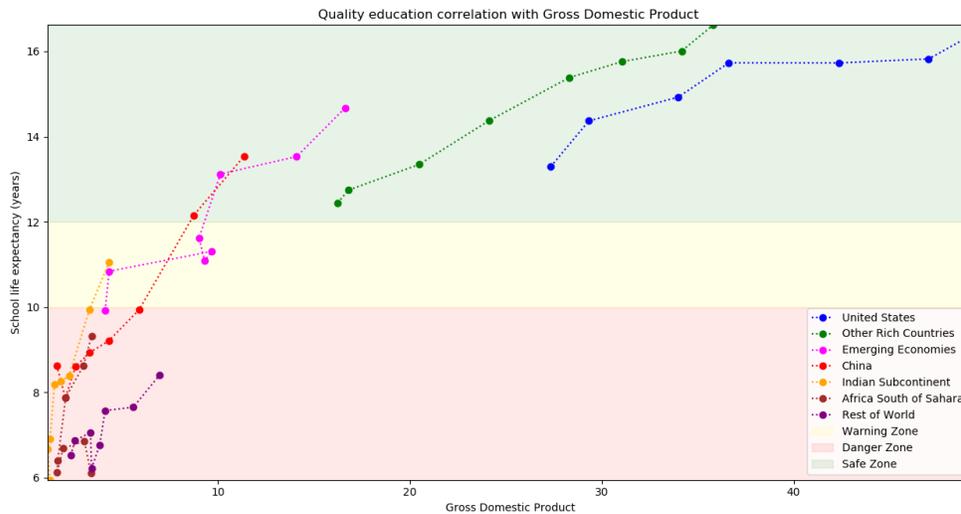


Figura 5.9: **Correlación entre los valores históricos del indicador *Esperanza de vida escolar (años)* y el Producto Interno Bruto por Persona.**

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta estas observaciones, se propone la siguiente función para ajustar los datos:

$$y = 18 - 12 \cdot e^{-x/a}.$$

Notemos que para valores muy altos del PIB_{pp} la función converge a 18, mientras que para valores bajos, se acerca a 6. La Figura 5.10 presenta las curvas ajustadas resultantes. Notemos la importancia de la diferenciación entre regiones, pues aunque la estructura del comportamiento es similar, son muy marcadas las tendencias culturales respecto a la importancia que se le da a la educación.

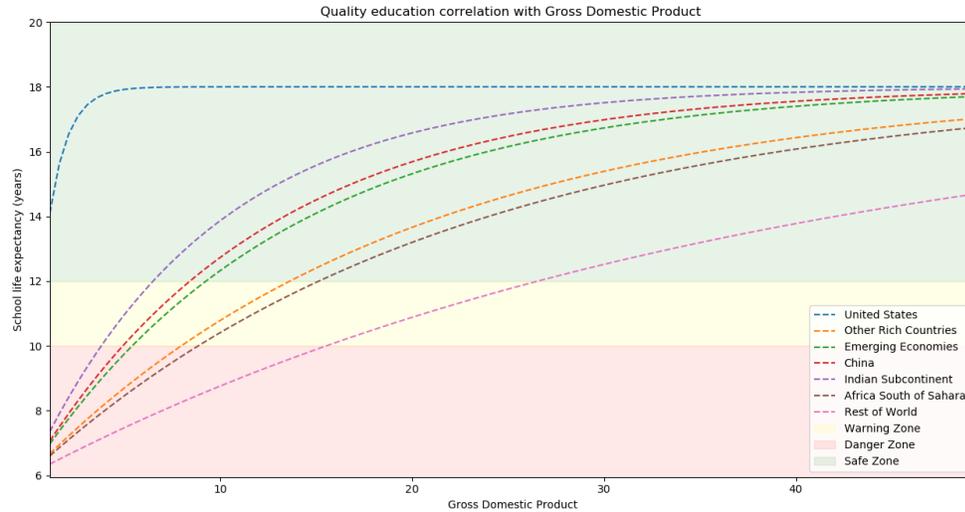


Figura 5.10: Ajuste entre los valores históricos del indicador *Esperanza de vida escolar (años)* y el **Producto Interno Bruto por Persona**.

Fuente: Elaboración propia

A partir de las curvas de ajuste, y de las predicciones futuras para el PIB_{pp} , nos es posible generar una estimación del comportamiento futuro del indicador *Esperanza de vida escolar (años)* –ver Figura 5.11–. Para el año 2030 todas las regiones –excepto África Subsahariana– alcanzan la zona verde. Preocupante es la situación de África, pues no lograría salir de una zona de impacto negativo antes del año 2050.

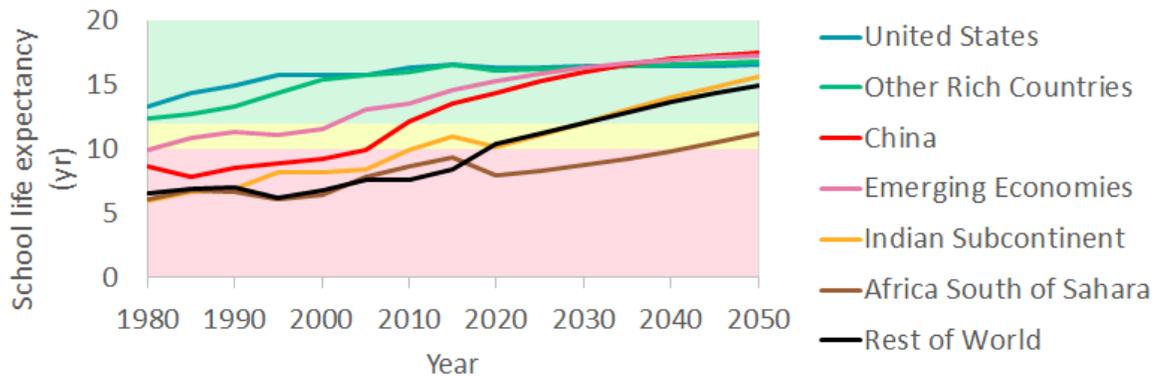


Figura 5.11: **Objetivo 4: Educación de Calidad –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**
Fuente: Earth3 Core Model SpreadSheets [52].

Objetivo 5: Igualdad de Género

Para el quinto objetivo, *Lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas*, se escoge el indicador:

Paridad de género en la escolarización (1).

La paridad de género de los años esperados de escolaridad son los años esperados de escolaridad de las mujeres, divididos por los años esperados de escolaridad de los hombres. Un valor de 1 indica que

tanto hombres como mujeres tienen los mismos años esperados de escolaridad, un valor por debajo de 1 indica que los hombres tienen mayores años esperados de escolaridad. La Figura 5.12 muestra los valores históricos para el indicador, obtenidos de la base de datos del Banco Mundial.

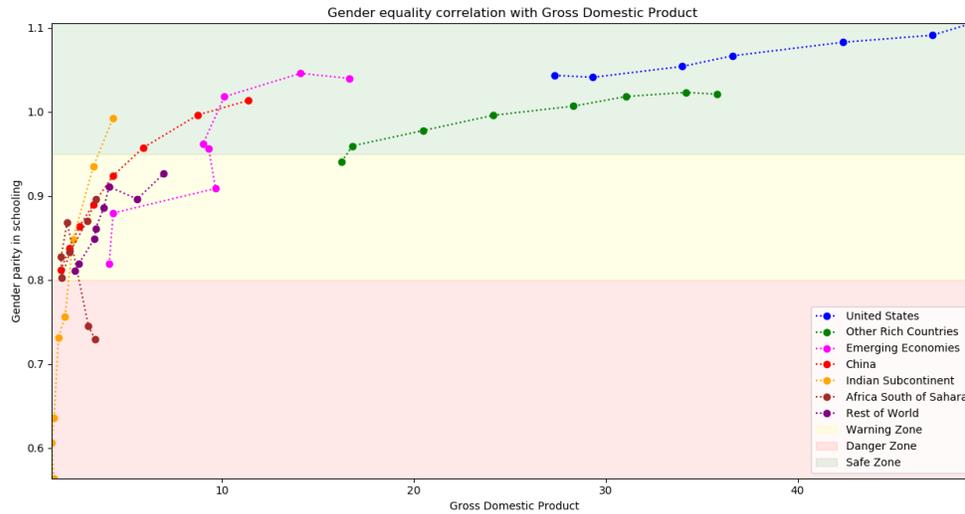


Figura 5.12: **Correlación entre los valores históricos del indicador *Paridad de género en la escolarización (1)* y el Producto Interno Bruto por Persona.**

Fuente: Elaboración propia

Mirando los datos, parece que el índice de paridad de género crece por encima de 1 para niveles altos de PIB_{pp} , como en Estados Unidos y Países Ricos. Además, los datos indican que una función que cruza el eje Y en torno a 0,7 parece razonable para predecir el comportamiento futuro. Incorporando nuestras observaciones, se propone la siguiente fórmula para el ajuste:

$$y = 1.1 - 0.4e^{-x/a}$$

Utilizando los ajustes de curvas, se generan predicciones del comportamiento del indicador de progreso. Estas predicciones se muestran en la Figura 5.13. Afortunadamente, para este objetivo todas las regiones alcanzan la zona verde en años muy cercanos a 2030.

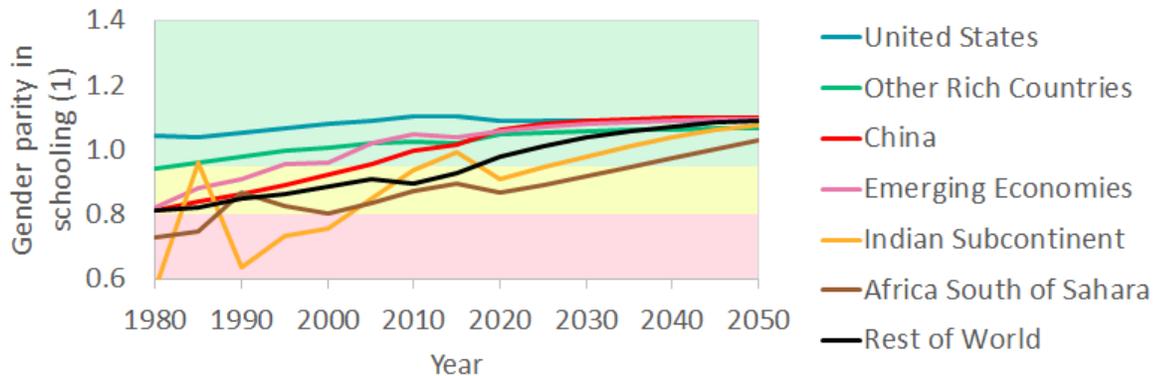


Figura 5.13: **Objetivo 5: Igualdad de Género –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model SpreadSheets [52].

Objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento

Para el sexto objetivo, *Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*, se escoge el indicador:

Fracción de la población con acceso a agua segura (%).

La información histórica puede ser recolectada de las bases de datos del Banco Mundial. La Figura 5.14 muestra la correlación histórica entre el PIB_{pp} y este indicador.

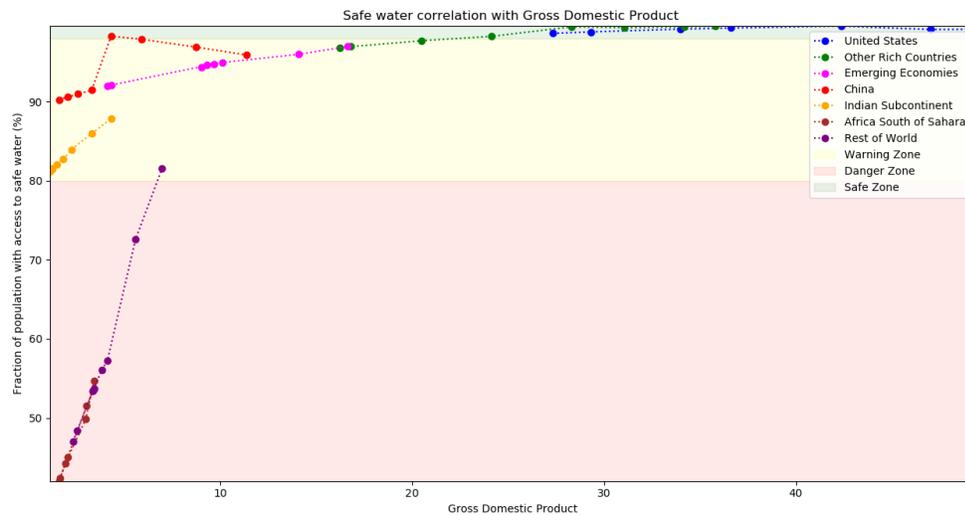


Figura 5.14: Correlación entre los valores históricos del indicador *Fracción de la población con acceso a agua segura (%)* y el *Producto Interno Bruto por Persona*.

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el mayor porcentaje que se puede obtener es 100%, y que existe una fuerte relación positiva entre el PIB_{pp} y el acceso al agua potable, se propone la siguiente fórmula para el ajuste:

$$y = 100 - a \cdot e^{-x/b}.$$

En este caso, se deben ajustar 2 parámetros, de manera regional, utilizando los datos históricos. Esto se debe a que existen regiones donde el agua potable no es un recurso que se le garantiza a todas las personas, independientemente de su estado económico. La Figura 5.15 muestra las predicciones de desarrollo regional resultantes; notemos que la mayoría de las regiones cuentan en la actualidad con niveles *aceptables*, mientras que las regiones del Subcontinente Indio y África Subsahariana se encuentran peligrosamente rezagadas.

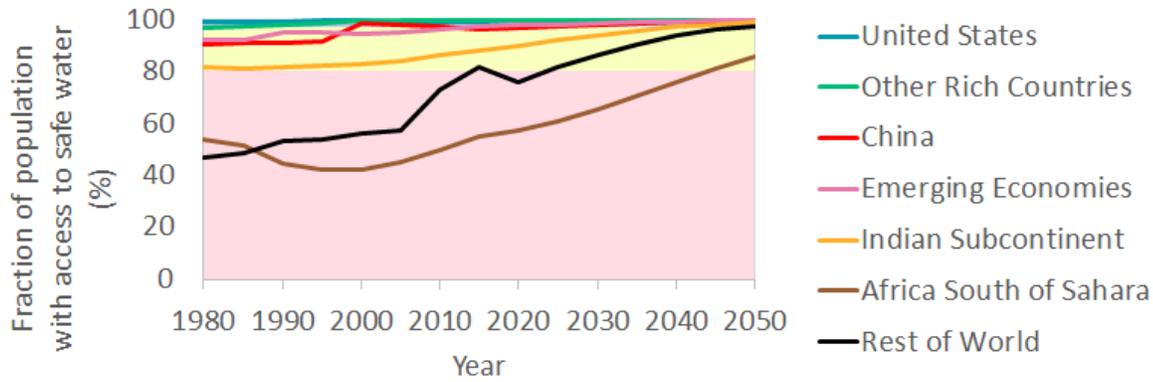


Figura 5.15: **Objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model SpreadSheets [52].

Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante

Para el séptimo objetivo, *Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*, se escoge el indicador:

Fracción de la población con acceso a electricidad (%).

Los datos históricos fueron extraídos de las bases de datos del Banco Mundial. La correlación del indicador con el PIB_{pp} y el indicador se muestra en la Figura 5.16. Notemos la similitud con los datos del objetivo anterior. Por esta razón, se considera adecuado utilizar la misma función de ajuste:

$$y = 100 - a \cdot e^{-x/b}.$$

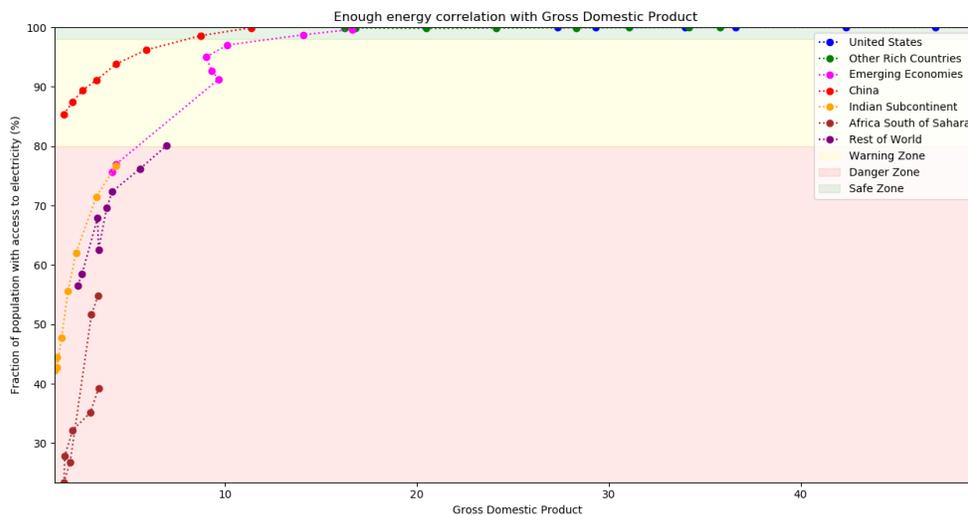


Figura 5.16: **Correlación entre los valores históricos del indicador *Fracción de la población con acceso a electricidad (%)* y el Producto Interno Bruto por Persona.**

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las curvas ajustadas con las correlaciones históricas regionales, es posible alimentar las curvas con valores futuros de PIB_{pp} y generar predicciones para la evolución del indicador de progreso. La

Figura 5.17 presenta dicha evolución. Observemos que, al igual que en el objetivo anterior, la mayoría de las regiones ya cuenta con niveles aceptables. Sin embargo, las regiones del Subcontinente Indio y África Subsahariana carecen aún del importante recurso energético. Recordemos la importancia de alcanzar una distribución equitativa al acceso de energía limpia, y las implicaciones que la carencia de esta puede representar para ambas regiones.

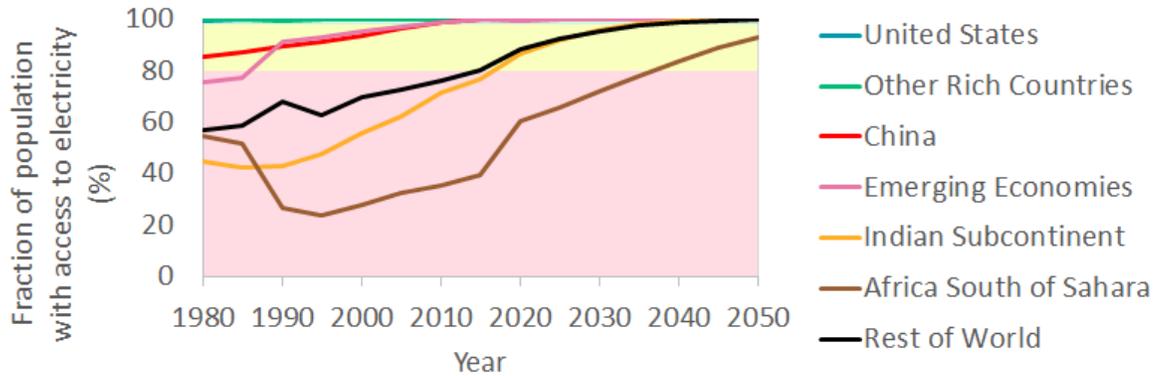


Figura 5.17: **Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheets [52].

Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico

Para el octavo objetivo, *Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos*, se escoge el indicador:

Crecimiento del mercado laboral (%/a).

Se supondrá que el crecimiento del empleo es un punto porcentual inferior a la tasa de cambio del PIB_{pp} :

$$\text{Cambio porcentual del mercado laboral al año } t = \left(\frac{PIB_{pp}(t)}{PIB_{pp}(t-1)} - 1 \right) \%.$$

Esto basado en el supuesto que el aumento de la productividad a muy largo plazo asciende a este porcentaje.

Por lo tanto, para poder modelar el indicador cuantitativo para el octavo objetivo, será necesario modelar la *tasa de cambio* del producto interno bruto por persona. Se calcula la tasa histórica de cambio utilizando los valores del PIB de Penn World Tables de 2011 PPP\$ por año y dividimos eso por la población histórica de la ONU.

Predecir valores futuros para la tasa de cambio del producto interno bruto por persona requiere simular valores para dos indicadores:

1. Tasa de Cambio del PIB;
2. Población.

Los valores futuros de la tasa de cambio del PIB se simularon en función del PIB por persona en el período anterior utilizando la fórmula:

$$y(x) = ae^{\frac{-b}{x}} - ce^{\frac{-d}{x}}.$$

La población futura se calcula pronosticando la tasa de natalidad y mortalidad:

1. **Tasa de Natalidad:** $y(x) = a + be^{-x/c}$

- x es el PIB por persona en el periodo anterior;
- Los valores futuros se ajustan desde el punto anterior con un tiempo de ajuste de 30 años.

2. **Tasa de Mortalidad:** $y(x) = \alpha + \beta e^{-x/\gamma}$

- x es el PIB por persona en el periodo anterior;
- Los valores futuros se ajustan desde el punto anterior con un tiempo de ajuste de 30 años.

De esta manera, es posible calcular valores para el PIB y población futura; estos dos valores generan el Producto Interno Bruto por persona, a partir del cual deducimos el indicador seleccionado para el octavo objetivo.

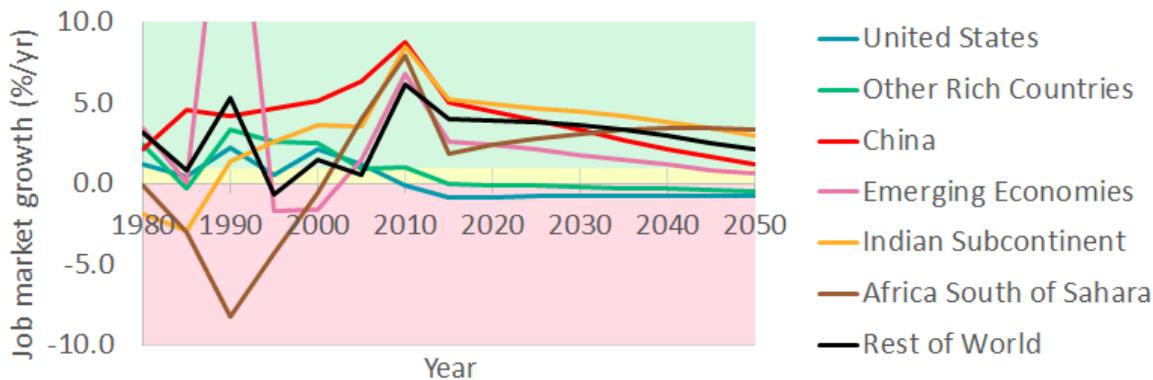


Figura 5.18: **Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52].

La Figura 5.18 presenta valores históricos para el indicador *Crecimiento del Mercado Laboral* para los años 1980-2015, así como los datos simulados con la metodología previamente descrita. Se ha decidido colocar la zona verde a partir de 1% de crecimiento anual, y la zona roja para valores negativos de crecimiento. Notemos que las economías *maduras* tenderán a decrecer su tasa de evolución, mientras que las economías emergentes y poco industrializadas se encuentran en la zona verde - con progresivo decremento. Esto es un fenómeno característico de la evolución de las economías [11].

Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Para el noveno objetivo, *Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación*, se escoge el indicador:

PIB por persona en manufactura y construcción (2011 PPA US\$/p-a).

Para este indicador se calculan los valores históricos a partir de PIB y fracciones de PIB en los sectores primario, secundario y terciario. Los datos sobre el tamaño de los sectores (como % del PIB) se obtienen de las bases de datos del *World Bank*.

Para simular valores futuros, se decide simular el comportamiento de cada uno de los tres sectores:

- Los valores futuros del porcentaje del PIB proveniente de la agricultura se simulan ajustando la curva:

$$w(x) = a + be^{-x/c},$$

donde x es el PIB_{pp} en el periodo anterior.

- Los valores futuros del porcentaje del PIB proveniente del sector de servicios se simulan ajustando la curva:

$$z(x) = \alpha + \beta e^{-x/\gamma} + (1 - e^{-x/\delta}),$$

donde x es el PIB_{pp} en el periodo anterior.

Dado que se cumple que el PIB está desglosado en Manufactura, Agricultura y Servicios, podemos simular el porcentaje del PIB proveniente de la producción industrial de la siguiente manera:

$$y(x) = 1 - w(x) - z(x).$$

Lo cual se ve funcionalmente como:

$$y(x) = e^{-x/\delta} - [a + be^{-x/c}] - [\alpha + \beta e^{-x/\gamma}].$$

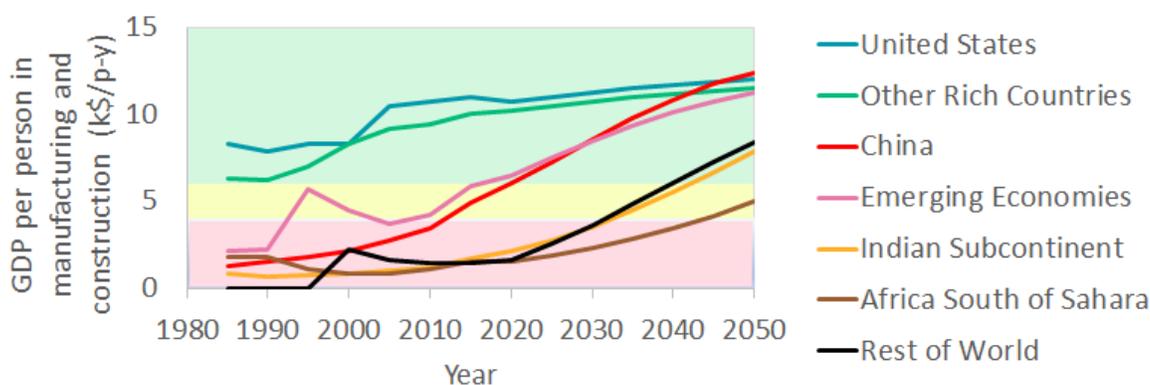


Figura 5.19: **Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52].

La Figura 5.19 presenta los valores históricos, así como los datos simulados con el procedimiento anterior, para nuestro indicador. Observemos que las economías desarrolladas se encuentran en valores elevados del porcentaje de su PIB proveniente de la manufactura, mientras que las economías subdesarrolladas cuentan con valores bajos (esto se debe a que dichas economías se conforman principalmente de actividades de extracción de recursos naturales y materias primas). Nótese la manera en la que China y las Economías Emergentes crecen en su participación en el sector, representando una transición a una economía más madura. Regiones como India y África Subsahariana se encuentran aún rezagadas, pero se pronostica que evolucionen a una economía de mayor producción manufacturera.

Objetivo 10: Reducción de las Desigualdades

Para el décimo objetivo, *Reducir la desigualdad en y entre los países*, se escoge el indicador:

Proporción del ingreso nacional al 10% más rico (%).

La tendencia se calcula a partir de la base de datos del *World Inequality Database*, el porcentaje del ingreso nacional anual antes de impuestos que se acumula en el 10% de los que más ganan. Los valores futuros se calculan de manera manual [52], basándose en las proyecciones económicas de múltiples organismos internacionales.

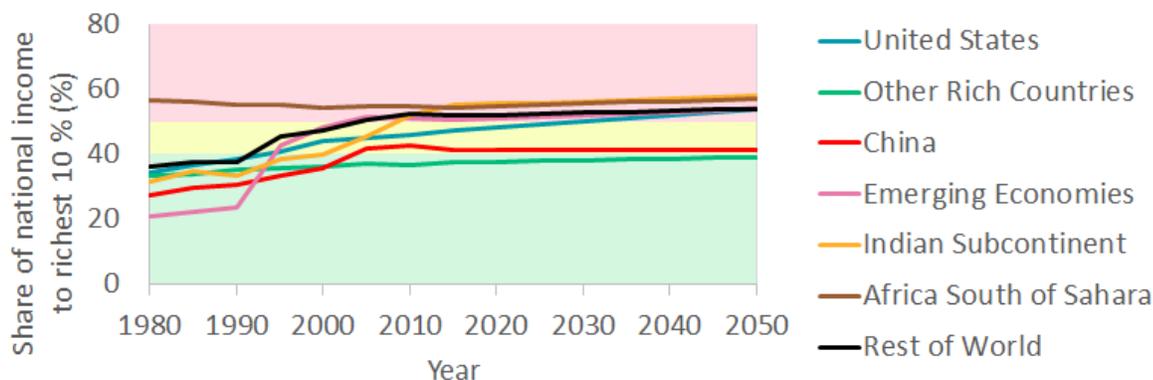


Figura 5.20: **Objetivo 10: Reducción de las Desigualdades –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52].

La Figura 5.20 presenta los valores históricos para los años 1990-2015, así como los valores simulados para el periodo 2015-2050. Es preocupante ver que en la mayoría de las regiones la desigualdad aumenta bruscamente, concentrándose la riqueza en un porcentaje muy pequeño de la sociedad. La mayoría de las regiones presentarán una situación donde el 10% más rico acumulará al menos el 50% de la riqueza regional.

Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

Para medir el progreso del undécimo objetivo, *Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*, se propone el indicador cuantitativo:

$$\text{Concentración de aerosoles urbanos } (\mu\text{g } 2.5\text{M} / \text{m}^3).$$

Este indicador representa el nivel promedio de exposición de la población de una nación a la concentración de partículas suspendidas que miden menos de 2,5 micras de diámetro aerodinámico.

Los datos históricos del indicador seleccionado están disponibles para el periodo 1990-2015 en las bases de *World Bank* para todas las regiones del mundo.

Existen diversas fuentes de contaminación del aire. Se asumió que el desarrollo industrial es el principal impulsor, por lo que el indicador seleccionado se trazó contra el PIB por persona en los sectores primario y secundario. La correlación resultante indica una disminución general en las concentraciones de aerosoles a medida que aumenta el PIB por persona en los sectores primario y secundario. Además, se descubrió que los valores mínimos de concentración, para todas las regiones, rondaba $5 \mu\text{g } 2.5\text{M} / \text{m}^3$. A partir de este razonamiento, se decide ajustar, con los valores históricos recopilados, utilizando la fórmula:

$$y(x) = 5 + ae^{-x/b},$$

donde x es el Producto Interno Bruto por persona proveniente del sector primario y secundario. Recordemos que en el objetivo 9 se simulaban los porcentajes futuros para los diferentes sectores del PIB por región.

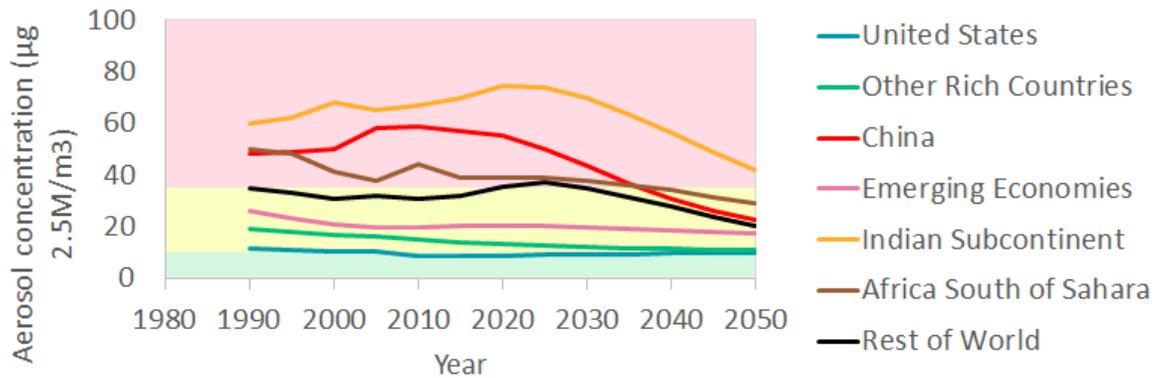


Figura 5.21: **Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52].

La Figura 5.21 presenta los valores históricos y simulados para el indicador seleccionado. Se eligen los niveles de umbral 10 y 35 basados en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y el juicio de expertos sobre el límite planetario de los aerosoles [48]. La simulación indica que la mayoría de las regiones avanzara hacia mejores niveles de concentración de partículas finas, sin embargo, regiones como India, China y África Subsahariana se encuentran - y continuarán encontrándose - en niveles peligrosos.

Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables

Para el duodécimo objetivo, *Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*, se escoge el indicador:

Huella ecológica por persona (gha/p).

La huella ecológica es un indicador para conocer el grado de impacto de la sociedad sobre el ambiente. El concepto fue propuesto en 1996 por William Rees y Malthis Wackernagel. Es una herramienta para determinar cuánto espacio terrestre y marino se necesita para producir todos los recursos y bienes que se consumen, así como la superficie para absorber los desechos que se generan, usando la tecnología actual. La huella ecológica de cada ser humano es de 2.7 hectáreas. Sin embargo, nuestro planeta tan sólo es capaz de otorgar a cada uno de sus habitantes cerca de 1.8 hectáreas (WWF2012).

Los valores históricos fueron obtenidos de las bases de datos del *World Bank*, utilizando el indicador *Huella Ecológica*, y dividiendo el valor entre la población total (obtenida de la ONU).

Los valores futuros fueron simulados en función del Producto Interno Bruto por persona correspondiente al sector agrícola e industrial, ajustando la curva:

$$y(x) = axe^{\frac{-(t-2015)}{c}}$$

Nótese el término exponencial en la ecuación, este busca representar la ayuda que el avance tecnológico tendrá sobre la eliminación de las partículas contaminantes.

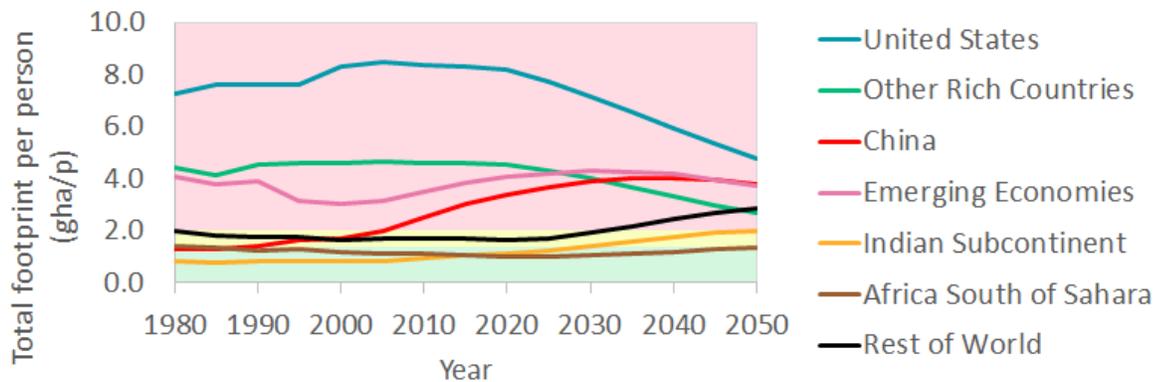


Figura 5.22: **Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52]

La Figura 5.22 presenta los valores históricos y los valores futuros simulados con la regresión anterior. Notemos la gran desigualdad presente entre los Países Ricos y Estados Unidos con los países subdesarrollados; la presión ambiental ejercida por los primeros supera por mucho al del resto de las regiones.

Objetivo 13: Acción por el Clima

Para el decimotercero objetivo, *Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*, se escoge el indicador:

Aumento de temperatura (grados C por encima de 1850).

A diferencia de los objetivos anteriores, el indicador cuantitativo seleccionado para medir el progreso es de carácter global. esto significa que el valor será el mismo para todas las regiones.

Los datos históricos del indicador fueron recopilados de múltiples centros nacionales de información ambiental. Utilizando éstos, así como valores históricos de emisiones de CO₂ y variables geofísicas, el software *ESCIMO* –un modelo de simulaciones basado en las respuestas que variables ambientales de interés tienen ante diferentes grados de actividad humana– genera una predicción del comportamiento del aumento en la temperatura para los años 2015-2050. Recordemos que el submodelo socio-económico generó valores futuros para múltiples actividades humanas (huella ecológica, emisiones de gases de efecto invernadero, emisión de CO₂, cambio en sistema terrestre), donde estos valores alimentan el software y le indica que se busca entender las consecuencias de continuar con la *tendencia de actividad* histórica.

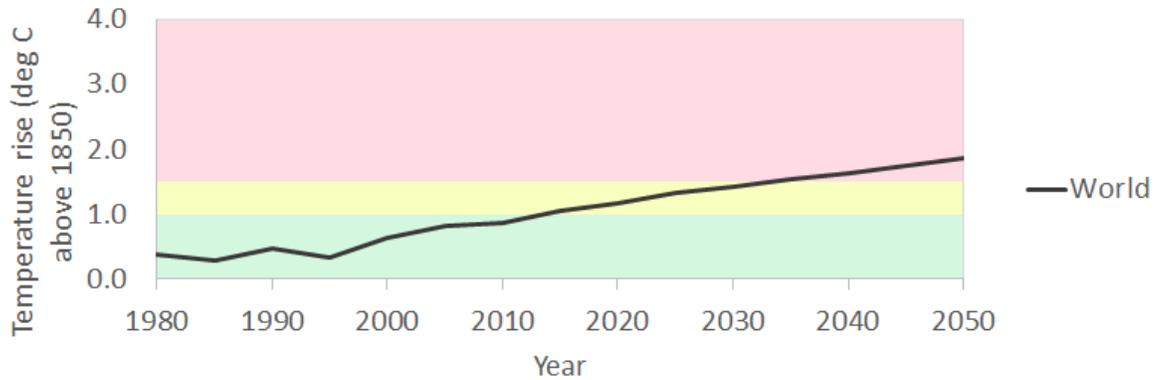


Figura 5.23: **Objetivo 13: Acción por el Clima –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**
 Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

La Figura 5.23 muestra los resultados obtenidos mediante la simulación de ESCIMO. Para este modelo, se ha decidido que la zona verde represente un aumento de la temperatura menor a 1 grado, y la zona roja comience a partir de un aumento de 1.5 grados. Es visible que la tendencia de comportamiento de la temperatura es creciente, alcanzando una zona roja cerca del año 2050 y un crecimiento congruente al alcanzar un aumento de 2 grados.

Objetivo 14: Vida Submarina

Para el decimocuarto objetivo, *Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos*, se escoge el indicador:

Acidez del agua superficial del océano (pH).

De manera similar al objetivo anterior, el objetivo de Vida Submarina emplea un indicador de carácter global. El software ESCIMO, alimentado por múltiples indicadores históricos medidos por el *WHOI Hawaii Ocean Time-Series Station* y el *Bermuda Institute of Ocean Science*, así como los niveles de actividad antropogénica generados por el submodelo socio-económico, produce una simulación de nuestro indicador de interés.

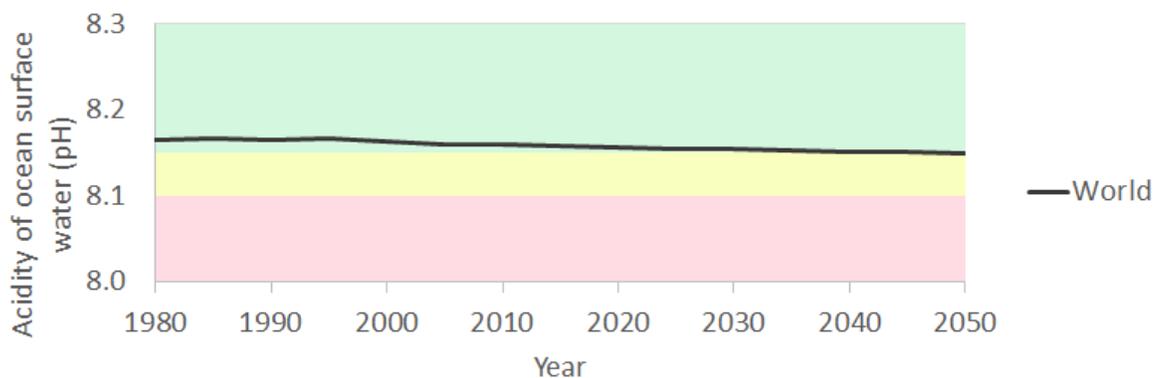


Figura 5.24: **Objetivo 14: Vida Submarina –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**
 Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

La Figura 5.24 muestra los valores históricos recopilados, así como los valores simulados. Se decide utilizar los mismos umbrales que la zona segura y las zonas de alto riesgo para el límite planetario

acidificación del océano, que son un pH de 8.15 como objetivo y 8.10 como punto medio. Observemos que, aunque la humanidad logra mantenerse en la zona verde durante el periodo de la simulación, la tendencia de comportamiento del indicador es de acercarse a las zonas de peligro.

Objetivo 15: Vida de Ecosistemas Terrestres

Para el decimoquinto objetivo, *Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad*, se escoge el indicador:

Área de bosque antiguo (MKm^2).

El indicador seleccionado es el mismo que se empleará para medir la presión humana sobre el cambio de uso de tierras en los límites planetarios. Se trata de un límite de carácter global. Los valores históricos del indicador fueron obtenidos de *FAO's Forest Resource Assessment*.

Utilizando valores históricos del indicador cuantitativo, así como valores de actividades económicas (expansión urbana, demanda de alimentos, emisión de gases) simuladas por el submodelo socio-económico, el software ESCIMO genera valores futuros para nuestro indicador de interés. Estos se muestran en la Figura 5.25. La zona verde se coloca para valores mayores a los 25 millones de kilómetros cuadrados, mientras que la zona roja se alcanza cuando el área de bosque antiguo es menor a los 17 millones de km^2 .

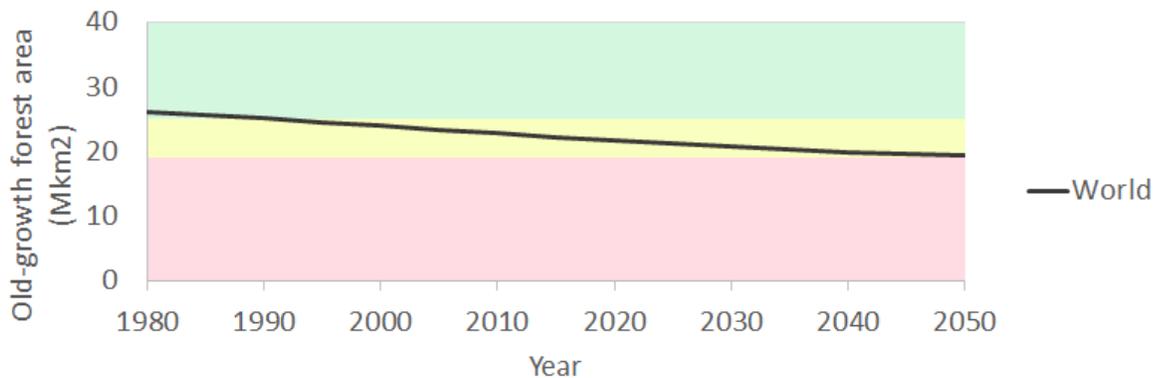


Figura 5.25: **Objetivo 15: Vida de Ecosistemas Terrestres –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Observando la Figura superior, se argumenta que la humanidad retrocede en el cumplimiento del objetivo 15. Esta pasa de una zona verde en el año 1980, y se encamina a alcanzar la zona roja para el año 2050.

Objetivo 16: Paz, Justicia e Instituciones Sólidas

Para el decimosexto objetivo, *Promover sociedades justas, pacíficas e inclusivas*, se escoge el objetivo:

Gasto del gobierno por persona (2011 PPA US\$/p-a).

Los valores históricos del indicador de interés son obtenidos calculando el Producto Interno Bruto de la región y después multiplicándolo por el porcentaje de gasto gubernamental. Esta información histórica está disponible en las bases de datos de *Penn World Tables*.

Debido a que ya contamos con predicciones para futuros valores del Producto Interno Bruto por región, únicamente es necesario simular el porcentaje de este que será empleado en gasto gubernamental.

Claramente, entre mayor sea el Producto Interno Bruto, el gobierno necesitará un menor porcentaje para cubrir los gastos necesarios. Es por esto que se propone la siguiente función de ajuste:

$$y(x) = a + be^{-x/c} + (1 - e^{-x/d}),$$

donde:

- $y(x)$ es el porcentaje del PIB por persona empleado en gasto gubernamental en el periodo t .
- x es el PIB por persona en el periodo $t - 1$.

De esta manera se obtienen simulaciones para nuestro indicador de interés. Estas se muestran en la Figura 5.26. La mayoría de las regiones económicas se encuentran, en el año 2020, en la zona roja. Únicamente dos regiones se encuentran en valores óptimos. Con el avance del tiempo, las regiones tienden a dirigirse hacia la zona verde, pero no la alcanzan hasta el año 2050, mientras que África Subsahariana y el Subcontinente Indio permanecen en la zona roja en toda la simulación.

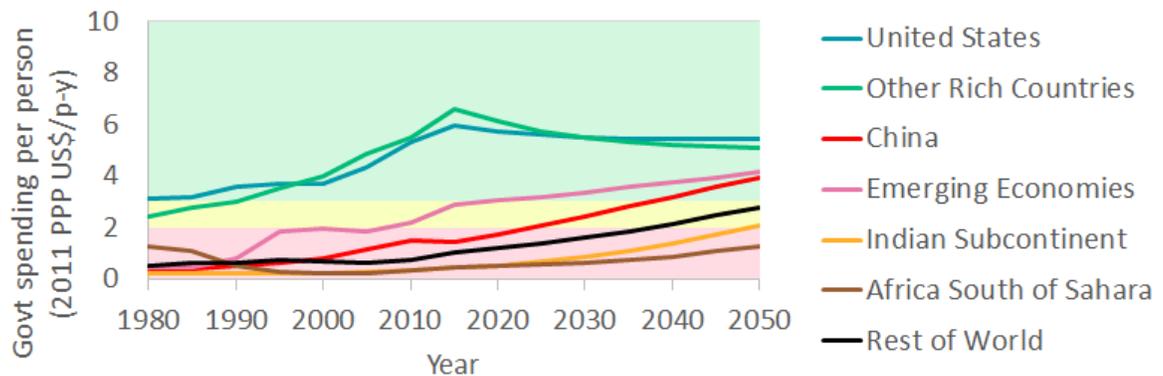


Figura 5.26: **Objetivo 16: Paz, Justicia e Instituciones Sólidas –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52].

Objetivo 17: Alianzas para Lograr los Objetivos

Para el decimoséptimo objetivo, *Revitalizar la Alianza Mundial por el Desarrollo Sostenible*, se escoge el indicador:

Exportaciones como fracción del PIB (%).

Se obtienen valores históricos del indicador de interés calculando el PIB de las regiones y multiplicándolo por el porcentaje del PIB que representa exportaciones. Ambos valores fueron extraídos de las bases de datos de *Penn World Tables*. Los valores futuros son calculados manualmente, basados en supuestos de mantener las tendencias históricas. Si el lector lo desea, estos valores porcentuales pueden ser modificados para ajustarse al modelo económico de su preferencia. Los valores históricos y predicciones para el periodo 2015-2050 se presentan en la Figura 5.27. Se ha decidido colocar la zona verde para un porcentaje mayor al 15 %, y la zona roja para porcentajes menores al 10 %. Esto refleja el supuesto que un mayor porcentaje de exportación implica una relación internacional sana. La mayoría de las regiones parecen mantenerse en la zona verde, excepto por la del Subcontinente Indio.

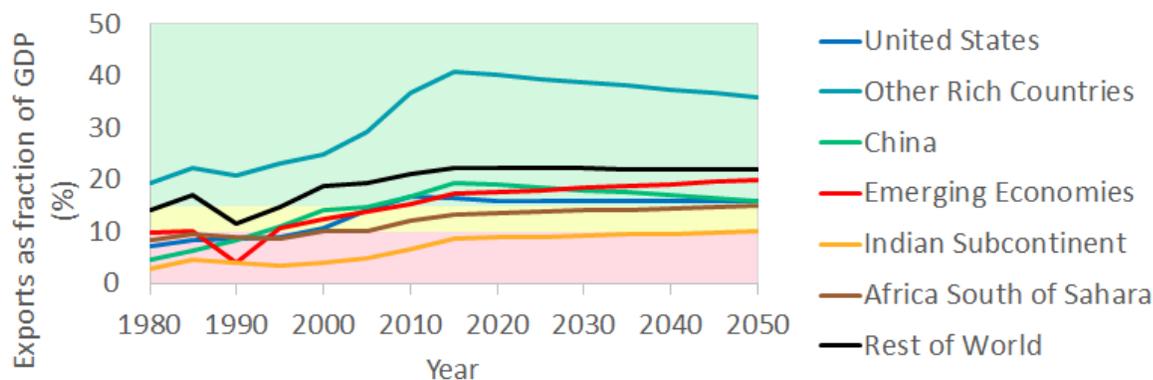


Figura 5.27: **Objetivo 17: Alianzas para Lograr los Objetivos –Simulación Earth3– Tendencia Histórica**

Fuente: Earth3 Core Model Spreadsheet [52].

5.2. Límites Planetarios

Para predecir el margen de seguridad de la humanidad con respecto a los 9 límites planetarios, se utiliza el software *ESCIMO*. Este mide los diferentes efectos de las actividades humanas en los nueve límites planetarios en términos de actividades de producción y consumo que se incluyen en el submodelo socio-económico.

Los límites planetarios –sus procesos, umbrales y teoría– son presentados tal como fue propuesto por Steffen [49] y Rockström [48], los cuales fueron descritos en el tercer capítulo de este trabajo escrito. Por practicidad del modelo, cuando fue posible se utilizaron los indicadores propuestos por los autores. Sin embargo, para otros límites planetarios fue necesario reemplazar el indicador por uno con mayor disponibilidad de información histórica.

Calentamiento Global

El brusco aumento de la temperatura promedio global representa un fenómeno que puede poner en riesgo el sano funcionamiento de múltiples sistemas ecológicos a lo largo del planeta. Para medir la transgresión humana al clima planetario, se decide utilizar la variable:

Aumento de Temperatura en comparación al año 1850 (Grados Centígrados).

Este mismo indicador –y umbrales de seguridad– son aplicados en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13.

Recordemos del Capítulo 3, se menciona que dos variables altamente relacionadas con el aumento de la temperatura son la concentración de CO_2 en la atmósfera y el forzamiento radiativo. Estas variables son consideradas por el software *ESCIMO* para producir escenarios consistentes del aumento de la temperatura.

Para este límite planetario, se decide posicionar la zona segura por debajo de un aumento de **1 grado centígrado** a comparación de la temperatura media pre-industrial. Así mismo, se decide posicionar la zona de peligro arriba de un aumento de **1.5 grados centígrados**.

La Figura 5.28 muestra la simulación correspondiente al impacto que tendría la continuación de las *tendencias históricas* de comportamiento socio-económico sobre el aumento de la temperatura.

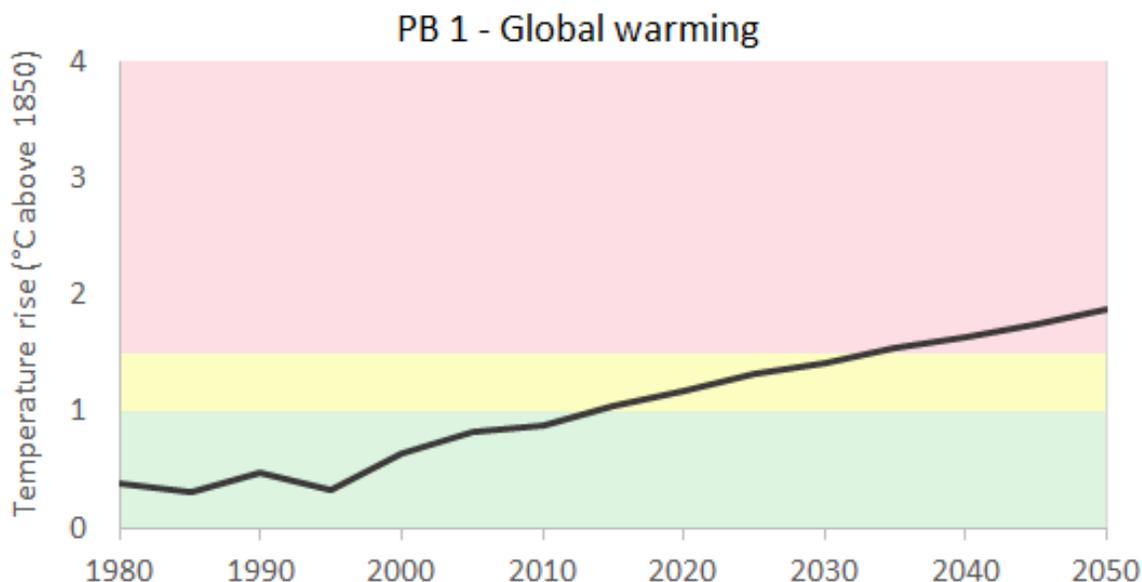


Figura 5.28: Calentamiento Global –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

De acuerdo con la simulación, para el año 2020, la humanidad habrá abandonado la zona segura, y estará alcanzando la zona de peligro a finales del año 2030. Para el año 2050 la humanidad estará cerca de un aumento de 2 grados centígrados –recordemos las implicaciones bioquímicas que un aumento de esta magnitud tendría sobre múltiples sistemas–.

Agotamiento del Ozono Estratosférico

En el Capítulo 3 se argumenta que, para mantener un nivel seguro de ozono y no causar estragos en la salud humana y resiliencia ambiental, era necesario mantener una disminución menor al 5% en los niveles columna de ozono con respecto a los valores de los años 1964-1980. Para este modelo, el indicador seleccionado fue:

Liberación de Gases de Montreal (Millones de Toneladas al año).

Este indicador da una medida de las emisiones derivadas de las actividades de fumar que impulsan el crecimiento del agujero de ozono.

Se ha decidido colocar la zona segura por debajo de una liberación de $0.25 \frac{Mt}{y}$. Así mismo, la zona de peligro se considera a partir de una emisión de $2 \frac{Mt}{y}$ (correspondiente a los niveles de emisiones que impulsaron el surgimiento y la expansión a gran escala del agujero de ozono).

En la Figura 5.29 podemos observar los valores históricos de liberación de gases de Montreal para los años 1980-2015. A consecuencia de los acuerdos internacionales que limitan las emisiones de dichos gases, éstas han disminuido considerablemente desde su punto más alto en 1990.

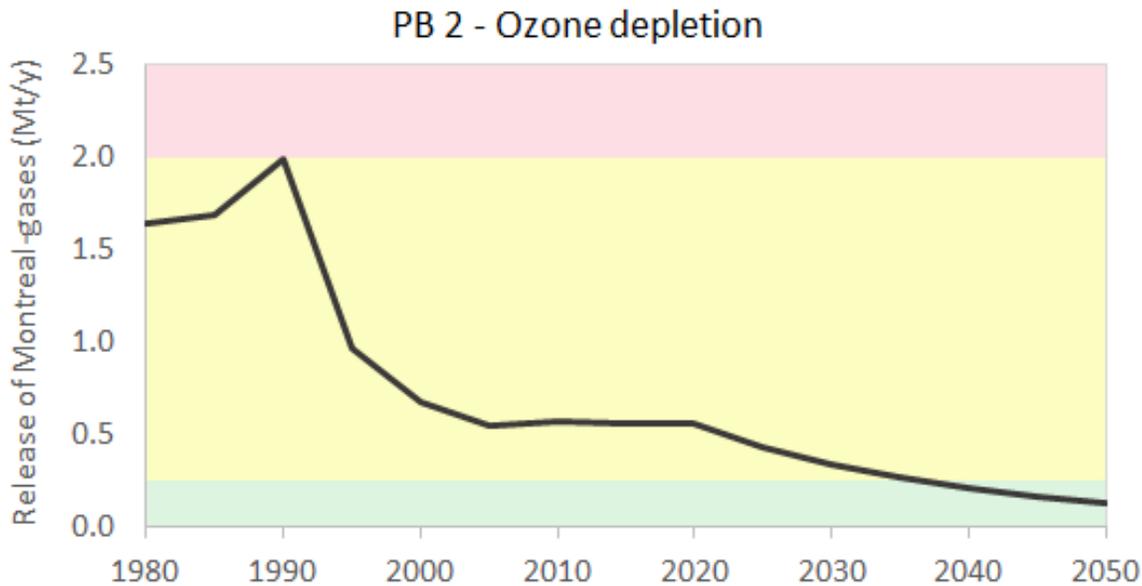


Figura 5.29: Agotamiento de Ozono Estratosférico - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica

Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Para capturar la esencia de declive en las emisiones, se propone la siguiente función de ajuste para la liberación de gases de Montreal, la cual toma como parámetro el Producto Interno Bruto por Persona del periodo anterior:

$$y(x) = ax^{-b}e^{\frac{-(t-2015)}{c}},$$

donde:

- $y(x)$ representa la liberación de gases de Montreal en el periodo t ;
- x representa el producto interno bruto por persona en el periodo $t - 1$;
- $e^{\frac{-(t-2015)}{c}}$ representa la desaparición de gases existentes. Seleccionar $c = 40$ refleja la suposición de que los gases de Montreal se eliminarán gradualmente con una vida media de 40 años.

Nuevamente, en la Figura 5.29, podemos ver para los años 2020-2050 la simulación obtenida al ajustar la curva propuesta a los valores históricos. Se puede notar que a partir del año 2020 la curva pasa a ser *suave* y decreciente. Afortunadamente, la simulación coloca a la humanidad en niveles seguros cerca del año 2035.

Acidificación de los Océanos

El aumento de la acidez oceánica implica una disminución del pH de la superficie marina. Si el pH disminuye lo suficiente, la reducción concomitante en la concentración de iones de carbonato da como resultado una saturación de agua de mar con respecto a la Aragonita. Esto es nocivo para el sano funcionamiento de sistemas marinos. En el Capítulo 3, se justifica la necesidad de mantener la saturación de aragonito oceánico al 80 % o más de nivel preindustrial. El indicador utilizado en el modelo es:

pH de la superficie marina.

El software *ESCIMO*, alimentado por múltiples indicadores históricos medidos por el *Hawaii Ocean Time-Series Station (WHOI)* y el *Bermuda Institute of Ocean Science*, así como los niveles de actividad antropogénica generados por el submodelo socio-económico, produce una simulación de nuestro indicador de interés.

Se decide colocar la zona segura para valores de pH arriba de **8.15**, valor presente en estados de CO_2 atmosférico preindustriales. La zona de peligro se coloca para un pH con valor menor a **8.10**.

La Figura 5.30 presenta los valores históricos del pH para el periodo 1980-2015, así como la simulación para el periodo 2020-2050. Es importante observar que la disminución de pH es lenta, pero constante. Aunque el modelo indica que la humanidad se mantendrá alejada de la zona de peligro en el año 2050, la tendencia se dirige hacia ésta.

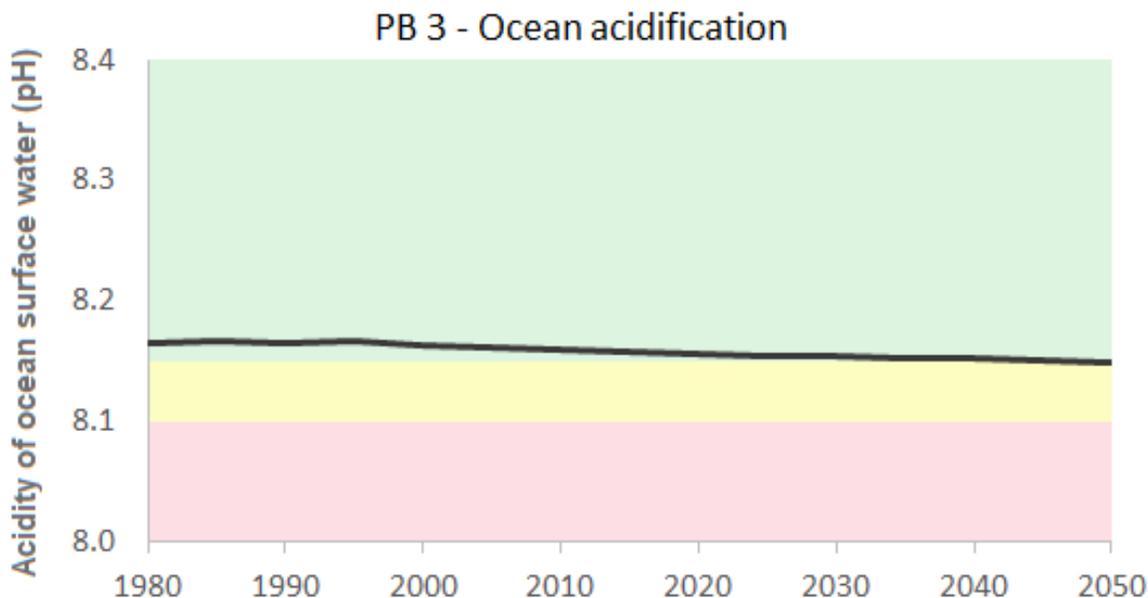


Figura 5.30: **Acidificación de los Océanos - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Cambios en el Sistema de Tierras

La conversión de bosques y otros ecosistemas en tierras agrícolas ha ocurrido en un promedio del 0.8% anual durante los últimos 40-50 años. En el Capítulo 3 se argumenta que, para mantener un sano funcionamiento de múltiples sistemas terrestres, es necesario que no más del 15% de la superficie terrestre mundial libre de hielo sea convertida en tierra de cultivo. El *Bosque Antigo* es particularmente importante en la preservación de la biodiversidad terrestre, y por ende su preservación es de alta importancia. Por esta razón, el indicador seleccionado para el modelo es:

Área de Bosque Antigo (millones de kilómetros cuadrados).

Evidentemente, si el indicador disminuye, la humanidad se expone a un mayor peligro. La zona segura se decide colocar para valores de **25 Mkm^2** de Bosque Antigo, mientras que la zona de peligro se alcanza cuando el área de Bosque Antigo es menor a los **19 Mkm^2** .

El software *ESCIMO* es alimentado por variables demográficas proporcionadas por la *FAO's Forest Resource Assesment* –incluida la expansión urbana, zonas de cultivo, demanda de alimentos, intensidad de irrigación– y variables económicas generadas por el submodelo socio-económico, para generar una simulación de la deforestación de Bosque Antigo. La Figura 5.31 presenta valores históricos y la simulación producida por ESCIMO. De acuerdo con esta, la humanidad alcanzará la zona de peligro cerca del año 2050.

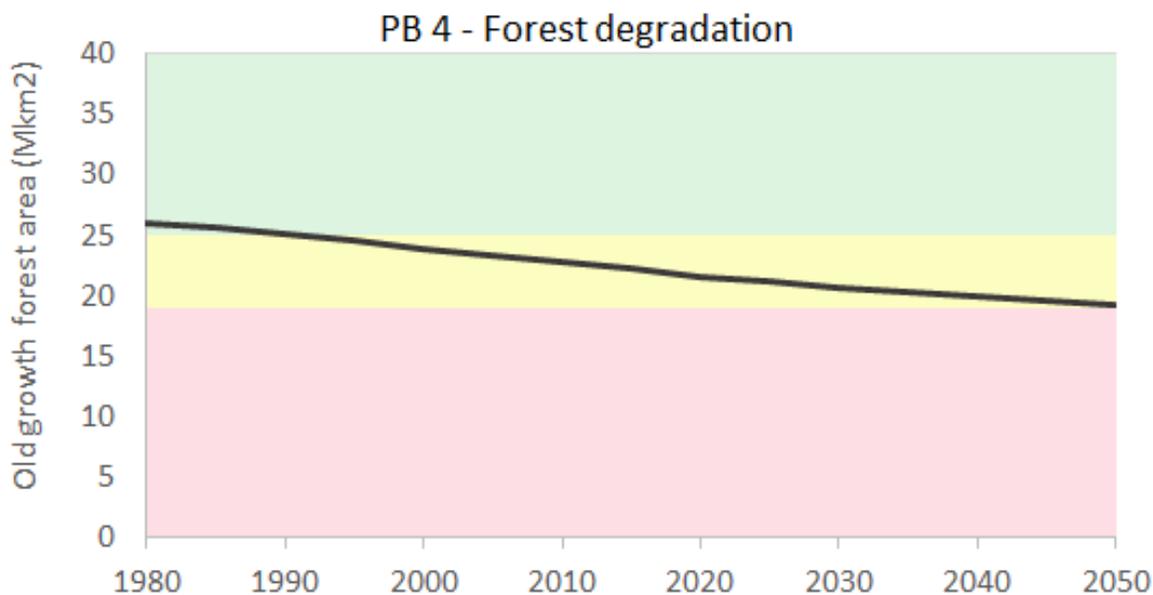


Figura 5.31: **Cambios en el Sistema de Tierras –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Interferencia con los ciclos globales de fósforo y nitrógeno

La eutrofización de sistemas acuáticos es provocada por la alta afluencia de nitrógeno y fósforo. Se decide medir el cambio en los flujos biogeoquímicos de elementos nutrientes en términos de:

La liberación ambiental de nitrógeno bioactivo de las actividades humanas
(millones de toneladas al año).

Actualmente, el indicador toma valores cercanos a los 150 millones de toneladas anuales. Recordemos que en el Capítulo 3 se argumenta que para evitar el colapso de sistemas acuáticos este valor debería reducirse cerca de un 75%. Tomando en cuenta la realidad de las necesidades de consumo de nuestra sociedad, se ha decidido colocar la zona segura con respecto a la liberación de nitrógeno para valores menores a $100 \frac{MtN}{y}$. Así mismo, una zona de peligro será colocada para valores mayores a $200 \frac{MtN}{y}$.

Utilizando valores históricos para el periodo 1980-2015, se busca generar predicciones para el periodo 2020-2050 ajustando la siguiente curva:

$$y(x) = (ax + b)e^{\frac{-(t-2015)}{c}},$$

donde:

- $y(x)$ representa la liberación de N_2 al ambiente en el periodo t ;
- x es el producto interno bruto por persona en el año $t - 1$;
- $ax + b$ representa la tendencia lineal de la demanda del nutriente con respecto al producto interno bruto por persona;
- $e^{\frac{-(t-2015)}{c}}$ representa la degradación del nutriente.

Ajustar dicha curva da como resultado los valores presentados en la Figura 5.32. Notemos que la humanidad ya se encontraba dentro de la zona de incertidumbre desde el año 1990. La simulación indica que la humanidad continuará ejerciendo mayor presión sobre el sistema, pero se mantendrá fuera de la zona de peligro propuesta para este modelo.

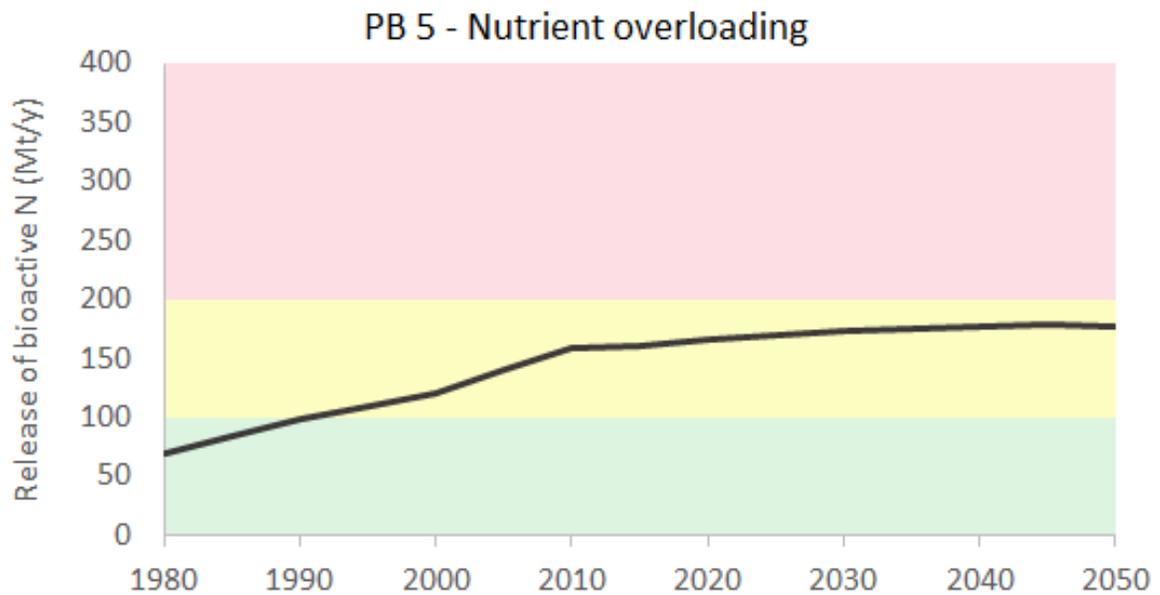


Figura 5.32: **Interferencia con los ciclos globales de fósforo y nitrógeno –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Uso de Agua Dulce

El límite superior de los recursos anuales disponibles de agua azul se estima en 12500-15000 km^3 al año. La escasez física de agua se alcanza cuando las extracciones de agua azul superan los 5000-6000 km^3 al año. Recordemos del Capítulo 3, se aconseja no superar una extracción de 4000 km^3 al año si se busca preservar sistemas relacionados con la humedad y secuestro de carbono. En el modelo de rendimiento, se decide utilizar el indicador:

Extracción de agua dulce (km^3 al año).

Con base en los argumentos del tercer capítulo, se coloca la zona segura para valores menores a **3000** $\frac{km^3}{y}$, mientras que la zona de riesgo se considera para valores de extracción mayores a los **4000** $\frac{km^3}{y}$.

Para generar valores futuros, se decide ajustar una función de la forma:

$$y(x) = ax + b;$$

en donde:

- $y(x)$ representa la extracción de agua dulce en el periodo t ;
- x representa el producto interno bruto por persona en el periodo $t - 1$.

Este ajuste lineal se alimenta de valores históricos para los años 1980-2015. Estos, al igual que los valores simulados para los años 2020-2050, se presentan en la Figura 5.33. A partir del año 2020, la humanidad entra en la zona de incertidumbre, aumentando gradualmente el consumo del recurso.

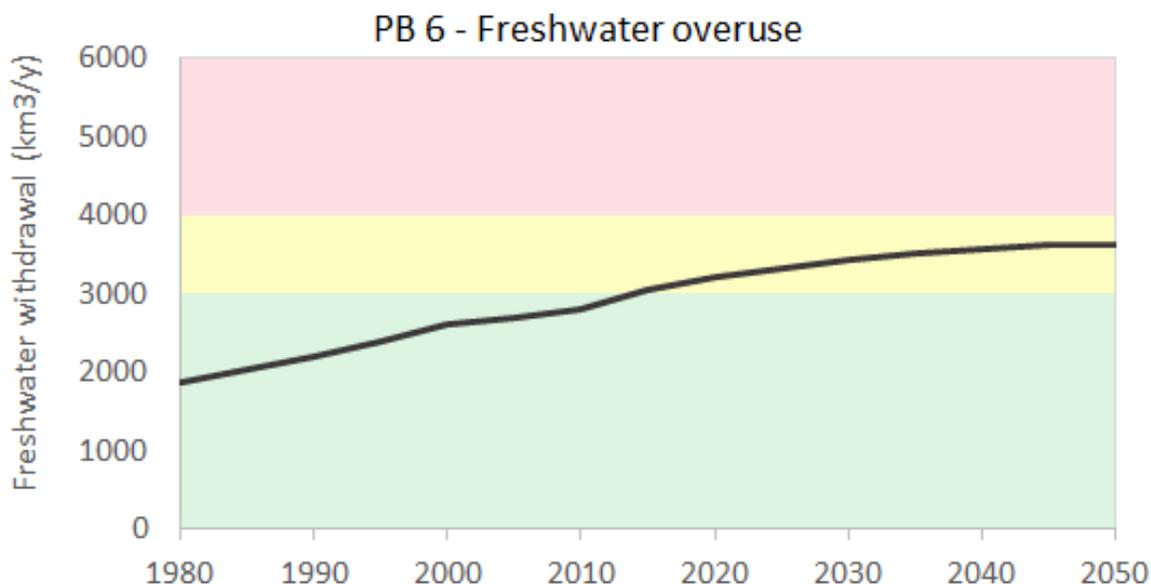


Figura 5.33: **Uso de Agua Dulce –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Tasa de Pérdida de Biodiversidad

Las tasas de extinción actuales –y proyectadas– son insostenibles. En el Capítulo 3 se presentan dos límites que se deberían respetar para preservar la biodiversidad de los sistemas: Mantener las extinciones por millón de especies al año en un valor menos a 10, y preservar al menos en 90 % el Índice de Integridad de la Biodiversidad para múltiples especies. Ambos indicadores están siendo transgredidos de manera severa en la actualidad. Para nuestro modelo, se ha decidido utilizar el indicador:

Biocapacidad no utilizada (%).

La *biocapacidad* es la capacidad de un área biológicamente productiva determinada para producir un suministro continuo de recursos renovables y absorber sus desechos indirectos. La insostenibilidad ocurre si la huella ecológica del área excede su biocapacidad. La métrica de biocapacidad es una desviación del conteo de extinciones propuesto en el Capítulo 3. Se eligió este indicador porque puede representar tanto ganancias como pérdidas en la integridad de la biosfera en el marco temporal del análisis.

Si comparamos valores de la huella ecológica y de biocapacidad (tanto en valores absolutos como por habitante), podremos conocer el nivel de déficit ecológico que caracteriza al determinado territorio que se esté analizando, tanto a escalas nacional, regional y local. Si el valor de la huella ecológica es mayor que el de la biocapacidad, el territorio presenta un déficit ecológico; mientras que si la biocapacidad es igual o mayor a la huella ecológica, el territorio contaría con un excedente ecológico.

La zona segura se decide colocar para valores mayores al **25 %** de la biocapacidad, mientras que la zona de riesgo se coloca para una biocapacidad menor al **12 %**. Los valores históricos para el periodo 1980-2015 son obtenidos del *Global Footprint Network*, y las predicciones para el periodo 2020-2050 se obtienen al calcular la huella ecológica no energética –en función del producto interno bruto por persona– en el submodelo socio-económico. La Figura 5.34 presenta los valores históricos así como los simulados. Estos no son alentadores. De acuerdo con el modelo, la huella ecológica global superará rápidamente la capacidad de la tierra de proveer recursos.

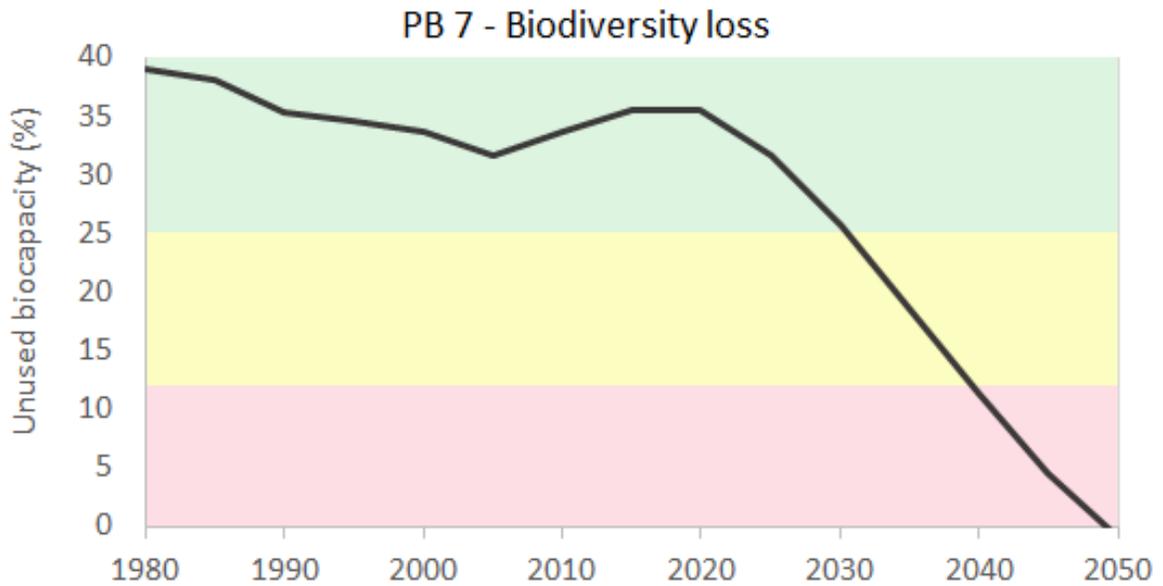


Figura 5.34: Tasa de Pérdida de Biodiversidad –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Es importante mencionar que la huella ecológica de muchos países supera su biocapacidad, y éstos utilizan la biocapacidad de países menos desarrollados para satisfacer sus necesidades. La simulación presentada expone que esta práctica ya no será posible, pues la biocapacidad global se reducirá brutalmente y la huella ecológica global aumentará.

Carga de Aerosoles

En el capítulo anterior se expone que la complejidad de los aerosoles, en términos de la gran variedad de partículas involucradas, con diferentes fuentes, impactos y dinámicas espaciales y temporales, dificulta el definir un límite planetario por encima del cual los efectos puedan causar cambios inaceptables. Sin embargo, se ha demostrado que los cambios climáticos en grandes regiones asociados con la intensa contaminación del aire ya son motivo de preocupación [49]. A partir de esto, se decide utilizar el siguiente indicador:

Concentración de partículas finas en el aire ($PM_{2.5}$) (μg por m^3).

Se decide definir la zona segura para concentraciones menores a **10 μg por m^3** , y la zona de riesgo para concentraciones de partículas finas mayores a **35 μg por m^3** .

Valores históricos para la concentración de partículas finas fueron extraídos de las bases del *World Bank*. La información revela que en países con un producto interno bruto por persona elevado, las concentraciones bajan significativamente. Es por esto que se decide ajustar una función en relación al PIB_{pp} , de la forma:

$$y(x) = a + be^{-x/c},$$

donde:

- $y(x)$ es la concentración de partículas finas en el aire en el periodo t ;
- a es el nivel mínimo de contaminación que se tiene por las actividades humanas;
- $be^{-x/c}$ representa la disminución en la contaminación en el aire con respecto al crecimiento del PIB_{pp} en el periodo $t - 1$.

De esta forma, ajustando la función propuesta a los valores históricos, es posible generar la Figura 5.35. Esta muestra un resultado alentador. Los niveles de concentración se reducirán paulatinamente conforme el PIB_{pp} aumente de manera global. Se pronostica abandonar la zona de peligro cerca del año 2040, con una tendencia hacia la zona segura. Sin embargo, es importante reconocer que actualmente nos encontramos en la zona de peligro para el indicador propuesto.

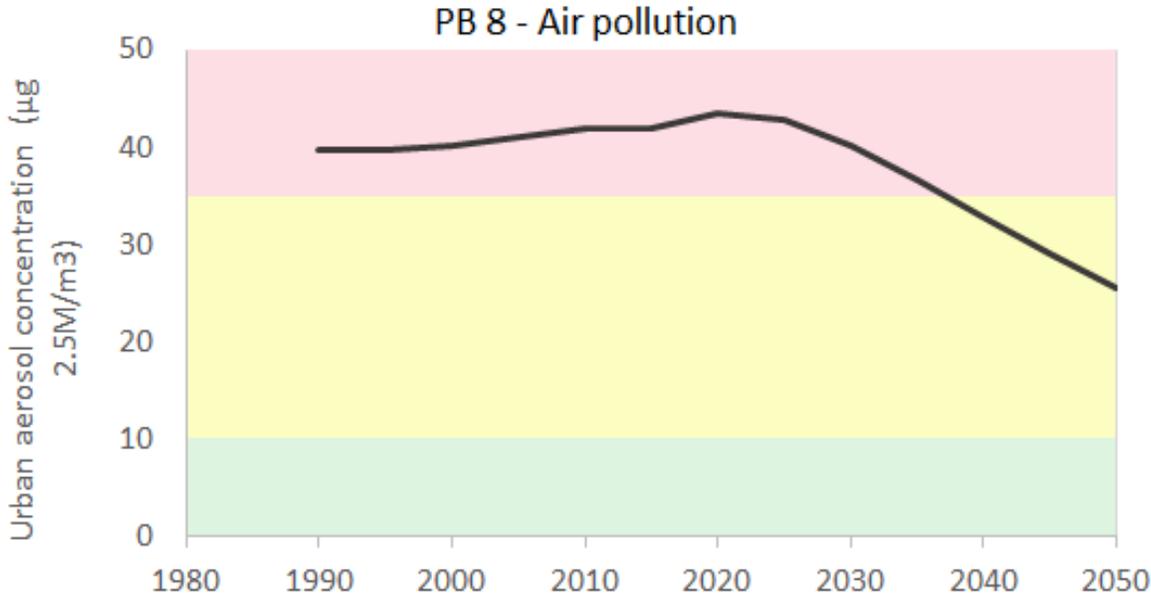


Figura 5.35: **Carga de Aerosoles –Simulación ESCIMO– Tendencia Histórica**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

Contaminación Química

Existen algunos datos de toxicidad para algunos miles de productos químicos, pero prácticamente no hay conocimiento de sus efectos combinados. Similar al caso de Carga de Aerosoles, no es posible aún definir un límite planetario claro para la contaminación química, ni está claro cómo agregar los efectos químicos en un único límite planetario [48]. Sin embargo, se ha propuesto que una manera de cuantificar el daño al ambiente es midiendo la cantidad de material químico producido [50]. El indicador empleado en este modelo para medir la presión química de la humanidad al ambiente es:

Producción total de Plomo (Millones de Toneladas al año).

Se decide colocar la zona segura para una producción menor a las **5** toneladas anuales, y la zona de riesgo a partir de las **10** toneladas.

La producción de plomo se encuentra positivamente relacionada con la producción económica de los países, pues el químico es empleado para múltiples procesos de producción. Utilizando valores históricos, recolectados de la *International Lead Association* es posible ajustar la curva:

$$y(x) = (ax + b)e^{\frac{-(t-2015)}{c}},$$

donde:

- $y(x)$ es la producción de Plomo en el periodo t ;
- x es el producto interno bruto en el periodo $t - 1$;
- $ax + b$ representa la producción de plomo en relación a la producción económica;
- $e^{\frac{-(t-2015)}{c}}$ simula la degradación del químico a lo largo del tiempo.

Ajustando la función superior con los datos históricos, es posible generar la simulación presentada en la Figura 5.36. De acuerdo con esta, y con los valores umbral seleccionados, la humanidad se encuentra en la zona de peligro desde el año 2010, y se mantendrá en la misma al menos hasta el año 2050.

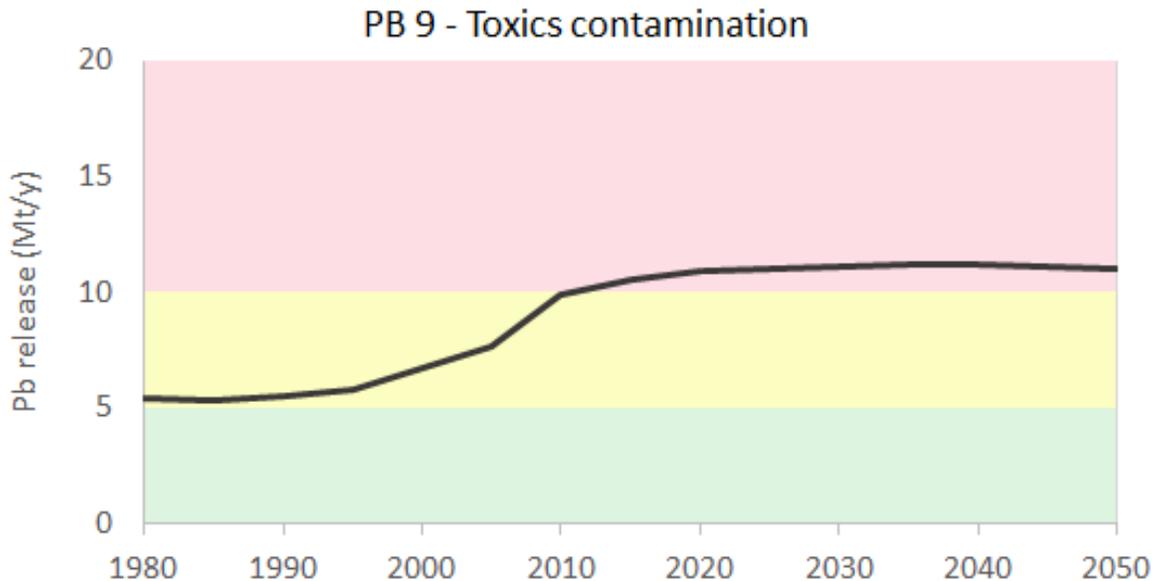


Figura 5.36: **Contaminación Química - Simulación ESCIMO - Tendencia Histórica**
Fuente: ESCIMO Results SpreadSheets [52].

5.3. Resumen de los Resultados

Hemos propuesto un criterio de calificación para los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y los 9 límites planetarios. Se seleccionó un indicador cuantitativo para medir el progreso de cada uno de los objetivos y límites, y mediante correlaciones con valores socio-económicos y biofísicos históricos se ajustaron curvas para describir y simular el progreso futuro de los indicadores en el periodo 2020-2050. Nos es ahora posible aplicar el criterio de calificación a la simulación de los indicadores.

Tabla 5.1: **Resultados Regionales para los ODS siguiendo la tendencia histórica**

Región	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Estados Unidos	13.5	13	13.5	13.5	13	12.5	12.5	12.5	12
Naciones Ricas	14.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13	13	13	12.5
China	10	10.5	11.5	12.5	12.5	12.5	13.5	13.5	13
Economías Emergentes	11.5	11.5	12.5	13.5	13.5	13	13	12.5	12
Subcontinente Indio	5.5	6	7	7.5	9	9.5	10	11	10.5
África Subsahariano	5.5	5	5	5.5	5.5	5.5	7.5	9.5	10
Resto del Mundo	6	7.5	7.5	8.5	9.5	10.5	12	12	11.5
Ponderación Global	8.57	8.83	9.31	9.93	10.42	10.58	11.42	11.84	11.46

La Tabla 5.1 presenta la calificación regional de los indicadores seleccionados para medir el progreso en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en el periodo 2010-2050. Recordemos que una calificación de 17 implica que todos los objetivos se alcanzaron, mientras que una calificación cercana a cero implica un progreso nulo. Con estos resultados, y apoyándonos en las predicciones demográficas generadas por el submodelo socio-económico, es posible ponderar la calificación regional por su porcentaje poblacional.

Sumando dicha ponderación se obtiene la calificación global (último renglón de la tabla).

Así mismo, la Tabla 5.2 muestra el margen de seguridad con respecto a los límites planetarios obtenidos mediante la simulación correspondiente a una continuación de las tendencias de comportamiento históricas. Para cada límite planetario propuesto se presenta su calificación, en donde 1 implica una zona de seguridad, 0.5 implica una ligera transgresión en la zona de riesgo, y una calificación de 0 significa que la humanidad efectivamente traspasó valores que ponen en riesgo la resiliencia y funcionamiento del sistema terrestre. El último renglón de la tabla suma las calificaciones individuales de los límites, esta debe ser entendida como el nivel de transgresión total de la humanidad hacia el sistema terrestre; una calificación cercana a 9 implica nula presión antropogénica, mientras que una calificación próxima a 0 implica una total violación de los límites biogeoquímicos terrestres.

Tabla 5.2: **Resultados de Margen de Seguridad con respecto a Límites Planetarios siguiendo la tendencia histórica**

Límite	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Calentamiento Global	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0
Agotamiento de Ozono Estratosférico	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1
Acidificación de los Océanos	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5
Cambios en el Sistema de Tierras	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Interferencia con los ciclos de nitrógeno	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Uso de Agua Dulce	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Tasa de Pérdida de Biodiversidad	1	1	1	1	1	0.5	0	0	0
Carga de Aerosoles	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5
Contaminación Química	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Margen de Seguridad	6	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	4	4	3.5

En el sexto y último capítulo, se analizarán los resultados obtenidos mediante la interacción de los 3 submodelos para dar respuesta a nuestras dos preguntas de investigación:

1. Suponiendo que la sociedad global continuase sus tendencias de comportamiento históricas, ¿cuántos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible serán alcanzados en el 2030, y en el 2050?
2. Y, ¿cuál será la presión resultante sobre los 9 límites planetarios?

6

Conclusiones

6.1. ¿Es Posible Alcanzar la Meta?

En el presente trabajo se ha empleado una variante del modelo Earth3 para producir escenarios cuantitativos consistentes desde 2018 hasta 2050 para el nivel de actividad humana y los efectos biofísicos resultantes, y para calcular las consecuencias asociadas para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la presión sobre los Límites Planetarios. Los detalles de cada escenario están determinados por la parametrización elegida.

Debido a que buscamos conocer el resultado de continuar con las tendencias de comportamiento humano en las últimas décadas, utilizamos los parámetros que mejor expliquen las tendencias generales en los datos históricos de 1980 a 2015 para proyectar el desarrollo regional y mundial hasta 2050. Los parámetros se eligen para reflejar que los tomadores de decisiones del mundo continuarán percibiendo y respondiendo a los problemas emergentes de la manera convencional [52].

A continuación, se presenta un resumen e interpretación de los resultados obtenidos mediante los tres submodelos que conforman a Earth3. Así como una respuesta a las dos preguntas de investigación planteadas.

Dada una parametrización congruente con las tendencias históricas en el periodo 1980-2015, el *Submodelo Socio-Económico* genera los siguientes resultados:

- Hacia 2050 el crecimiento de la población se ralentizará. En la mayoría de las regiones, la población se estanca y en algunas disminuye, con la excepción de las regiones más pobres, donde continúa el crecimiento demográfico.
- La economía (PIB) continúa creciendo en todo el mundo, a tasas altas en regiones como China y en múltiples economías emergentes, pero con tasas bajas en las regiones ricas, con estancamiento en algunos casos especiales.
- Los ingresos per cápita continúan creciendo, pero la desigualdad continúa aumentando en la mayoría de las regiones, especialmente en las economías de libre mercado.
- El uso de energía aumentará, pero el uso de electricidad crece más rápido que el uso de combustibles fósiles, el cual alcanza su punto máximo alrededor de 2040. La electricidad proviene cada vez más de fuentes renovables, y el uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad alcanza su punto máximo y disminuye en la década de 2030.

- Las emisiones de gases de efecto invernadero también alcanzan su punto máximo, en la década de 2020, debido al aumento de la eficiencia energética.
- El uso de nitrógeno y agua dulce, así como la liberación de plomo, continúan aumentando, pero a un ritmo más lento que el presenciado en las tendencias históricas.

Dados los predicamentos generados por el primer submodelo, el *Submodelo Biofísico* predice los siguientes efectos que las actividades antropogénicas ejercerán sobre los sistemas de funcionamiento terrestre:

- El calentamiento global continúa y alcanza un incremento de 2 grados para el año 2050.
- El nivel del mar crecerá cerca de 30 centímetros.
- El grado de acidificación en los océanos aumentará.
- Los glaciares terrestres se reducirán, al igual que el área del *permafrost*.
- El área de bosque primario disminuirá otro 20 %.
- El efecto de fertilización del CO₂ sobre la productividad del suelo se ve cada vez más contrarrestado por los efectos negativos de temperaturas más altas y precipitaciones más variables.
- En el lado positivo, se presenta una disminución de la concentración de gases de efecto invernadero.

En resumen, los submodelos socio-económico y biofísico simulan que, en caso de continuar con las tendencias presenciadas en el periodo 1980-2015, hacia el año 2050 las sociedades humanas se volverán más ricas, en el sentido de que vivirán en países con mayor PIB per cápita, pero vivirán en sociedades más desiguales, y dentro de un entorno cada vez más dañado por las actividades humanas.

Finalmente, apoyándonos de los resultados obtenidos por los submodelos socio-económico y biofísico, el *Submodelo de Rendimiento*, siguiendo la metodología presentada en el capítulo anterior, nos permite responder a las dos preguntas de investigación planteadas.

Suponiendo que la sociedad global continuase sus tendencias de comportamiento históricas, ¿cuántos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible serán alcanzados en el 2030, y en el 2050?

- Muchos ODS sociales ya se lograron en las regiones ricas del mundo hace mucho tiempo. En otras regiones, se lograrán más ODS en las próximas décadas. La Figura 6.1 presenta la calificación regional del cumplimiento de los ODS simulada por el modelo.
- Muchos ODS en muchas regiones permanecerán en la zona roja, lejos de ser alcanzados.
- En cuanto a los tres ODS ambientales, la situación se deteriora con el tiempo, a medida que aumenta la presión humana sobre el clima, el agua y la tierra. El puntaje de desempeño en las regiones ricas declinará en las próximas décadas, a medida que las presiones sobre el medio ambiente continúen aumentando.
- La humanidad, de acuerdo con la modelación realizada, logrará cumplir **10.5** de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para el año 2030, y **11.5** para el año 2050; comenzando con un cumplimiento de **9** en el año 2015.

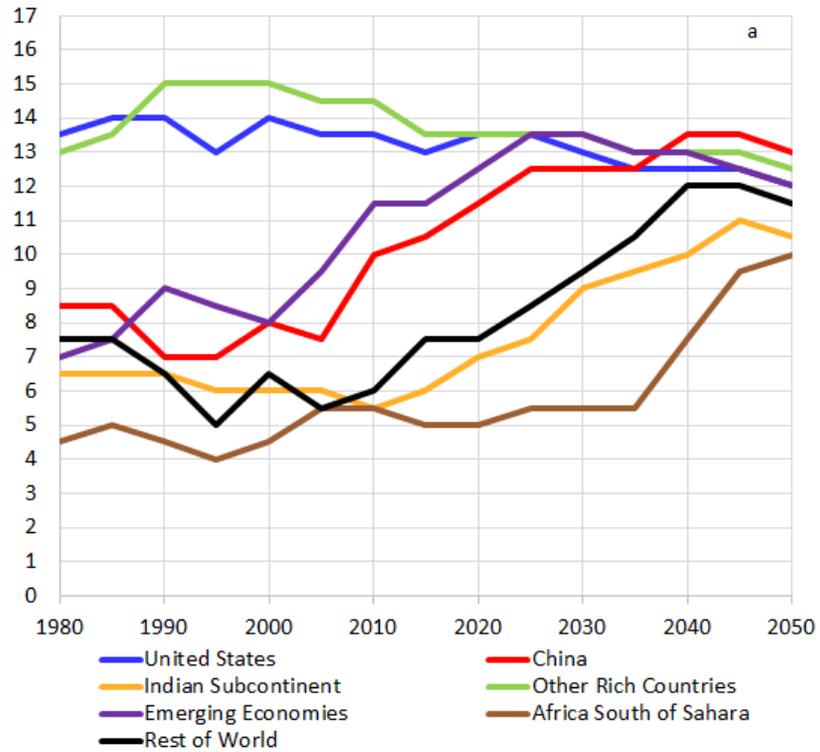


Figura 6.1: Calificación Total –por Región– del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en el modelo

Fuente: *Achieving the 17 sustainable development goals within 9 planetary boundaries* [52].

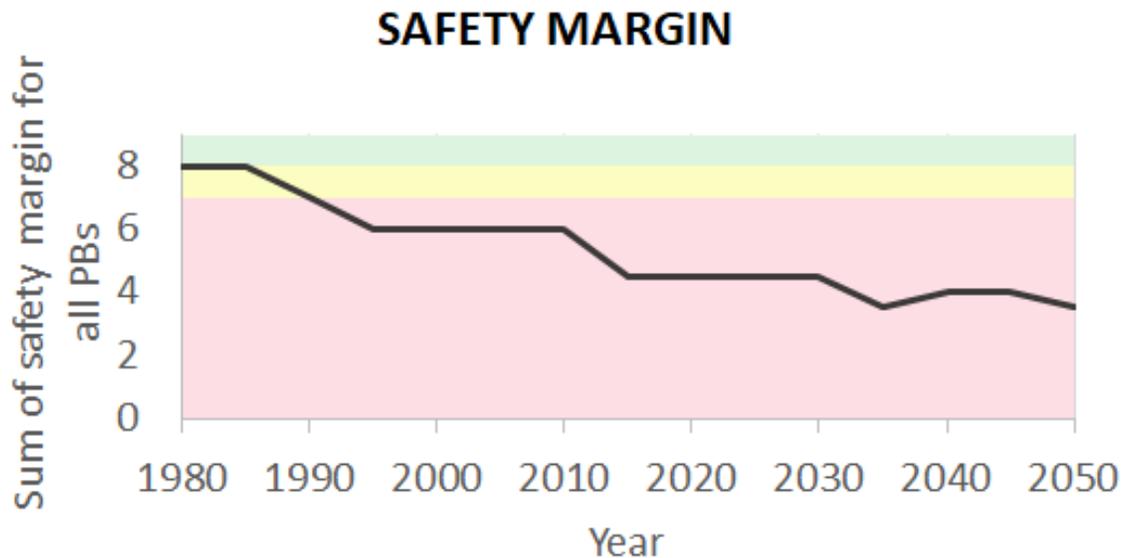


Figura 6.2: Margen de Seguridad Global con respecto a los Límites Planetarios, en el modelo

Fuente: *Achieving the 17 sustainable development goals within 9 planetary boundaries* [52].

Dado el crecimiento poblacional y las actividades económicas simuladas, ¿Cuál será la presión resultante sobre los 9 límites planetarios?

- Para casi todos los límites planetarios, los indicadores se mueven en la dirección equivocada: Alejándose del espacio operativo seguro para las sociedades humanas. La Figura 6.2 ilustra lo mencionado; notemos el rápido decremento de la suma total del margen de seguridad con el paso del tiempo.
- Las únicas excepciones de límites planetarios no transgredidos son el *agotamiento del ozono*, ya que las emisiones de gases de Montreal provocadas por el hombre continúan disminuyendo hacia niveles más seguros, y la *contaminación del aire*, donde la población afectada por la neblina provocada por el hombre disminuye a partir de 2020.
- El margen de seguridad global continúa disminuyendo, de 8 en 1980, pasando por 4.5 en 2030, hasta un 3.5 final en 2050. De acuerdo con el modelo propuesto, para mediados de actual siglo, la humanidad estará en la zona de alto riesgo para 4 de los 9 límites planetarios.

Seguir las tendencias de comportamiento social y económico de las últimas décadas conduce a un aumento en el número de ODS logrados hacia 2050. Pero al mismo tiempo, este mismo comportamiento incrementa la presión humana sobre los límites planetarios, erosionando el margen de seguridad global en relación con los límites planetarios. En resumen, de acuerdo con el modelo propuesto en este trabajo, **la sociedad mundial no alcanza los ODS dentro de los límites planetarios** para 2030, ni siquiera para 2050.

De acuerdo con Randers, Röckstrom, Steffen [52] [11] [48] [49], y muchos otros investigadores que se han dedicado a estudiar la evolución de las actividades humanas y las repercusiones de éstas sobre los sistemas terrestres, se necesitan intervenciones más duras, que aborden de frente los problemas que surgen del aumento de la población, el aumento del consumo, la emisión duradera de gases de efecto invernadero, el aumento de la inequidad y la pobreza persistente en un mundo finito.

En el aspecto metodológico, el modelo Earth3 demuestra la posibilidad de construir modelos de sistema global y emplearlos para analizar el logro futuro de los ODS dentro de los límites planetarios. Una nueva generación de modelos terrestres biofísicos humanos integrados es necesaria para probar y agudizar las conclusiones presentadas, y estudiar la viabilidad y las consecuencias del cambio transformacional.

6.2. Diferentes Futuros Escenarios

A lo largo del presente trabajo, se maneja el supuesto que las tendencias históricas de las actividades socio-económicas antropogénicas presentadas en el periodo 1980-2015 perdurarán en el comportamiento social para el periodo 2015-2050. Basado en esta suposición, se parametriza el submodelo socio-económico para generar predicciones de múltiples actividades humanas. Dichas simulaciones alimentan el submodelo biofísico, y posteriormente el submodelo de rendimiento; generando los resultados presentados previamente. Sin embargo, la construcción del modelo Earth3 permite generar resultados para diferentes patrones de comportamiento.

El reporte *Transformation is feasible: How to achieve the Sustainable Development Goals within Planetary Boundaries* [55], emitido por el Stockholm Resilience Centre, presenta un análisis generado con el modelo Earth3, considerando cuatro diferentes escenarios de comportamiento social. El primer escenario es el mismo que fue presentado en este trabajo escrito; seguir con las tendencias de comportamiento socio-económico de las últimas décadas. El segundo escenario considera un crecimiento económico acelerado en todas las regiones del mundo. El tercer escenario presenta el caso en donde, además de un crecimiento económico acelerado, se destina gran parte de los recursos económicos a la obtención de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El cuarto escenario, el cual es nombrado *Smarter Path*, considera que la humanidad emplea todos sus recursos y esfuerzos siguiendo 5 principios de comportamiento:

1. Crecimiento acelerado de las energías renovables.
2. Productividad acelerada en las cadenas alimentarias.
3. Nuevos modelos de desarrollo en los países más pobres.
4. Reducción activa de la desigualdad.

5. Inversión en educación para todos, igualdad de género y planificación familiar.

Para cada escenario propuesto en el artículo, se selecciona una parametrización adecuada en el submodelo socio-económico; a partir del cual se sigue la misma metodología presentada en los capítulos anteriores para obtener los resultados simulados.

La Figura 6.3 muestra el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, a lo largo del tiempo, para los diferentes escenarios considerados en el artículo. Es posible observar que los primeros tres escenarios tienen un resultado similar, alcanzando cerca de 12 ODS para el año 2050. Esto se debe a que un crecimiento económico acelerado no soluciona la desigualdad económica, ni el acaparamiento de la riqueza o las presiones ambientales ejercidas por la humanidad a causa de sus actividades económicas. Sin embargo, la parametrización seleccionada para describir el cuarto escenario produce una simulación alentadora: se alcanza cerca de 14 ODS para el año 2050.

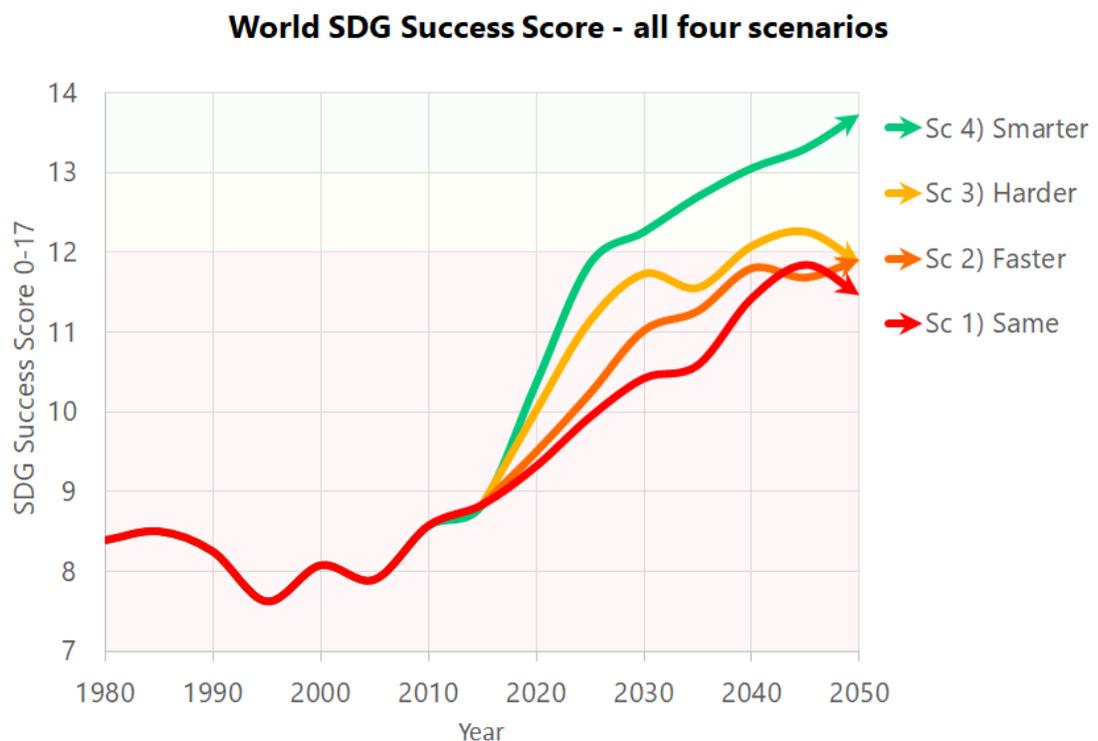


Figura 6.3: Simulación de la calificación total mundial del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, para diferentes escenarios de Comportamiento de la Humanidad

Fuente: *Transformation is feasible - how to achieve the sustainable development goals within planetary boundaries* [55].

Así como la figura anterior, la Figura 6.4 es producto del análisis del artículo [55]. En esta, se muestra el resultado de la transgresión antropogénica sobre los sistemas de funcionamiento terrestre a lo largo del tiempo, para los cuatro escenarios de comportamiento social. Tanto el primer como segundo escenario producen resultados similares. El tercer escenario mejora en comparación a los primeros dos, sin embargo se obtiene una calificación de 5. El cuarto escenario, *Smarter Path*, obtiene una calificación de 6 para el año 2030, y una calificación de 7 para el año 2050; mejorando significativamente el nivel de riesgo al cual es expuesta la sociedad humana.

Este reporte demuestra que es posible utilizar el modelo Earth3 para simular escenarios basados en patrones de comportamiento socio-económico, para determinar el cumplimiento de metas sociales,

económicas y ambientales. Seleccionar un patrón de comportamiento que maximiza la obtención de metas humanas –y que de manera simultánea minimice la presión ejercida sobre sistemas biogeofísicos– es de crucial importancia para determinar y moldear nuestro futuro.

World Safety Margin - all Four Scenarios

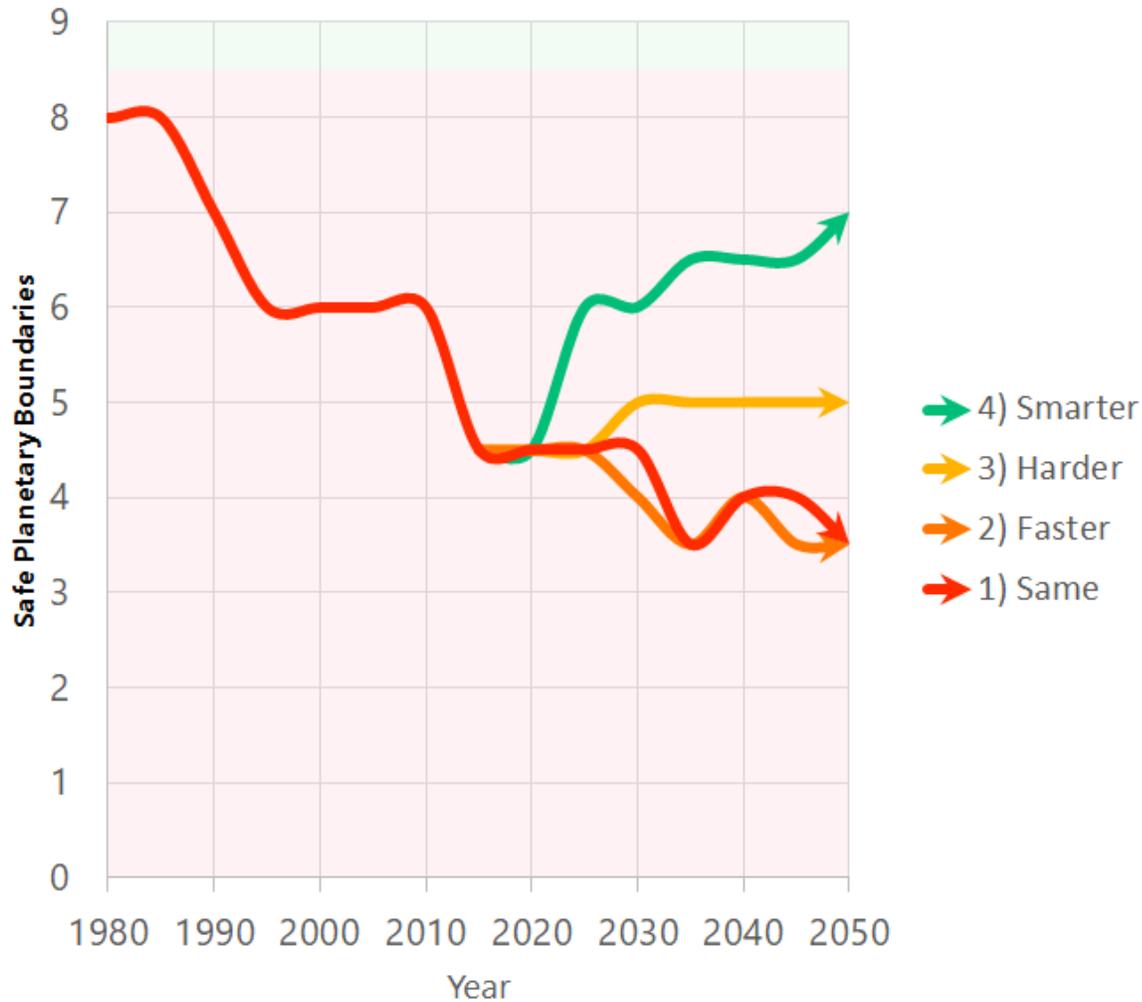


Figura 6.4: Simulación del Margen de Seguridad Global con respecto a los Límites Planetarios, para diferentes escenarios de Comportamiento de la Humanidad

Fuente: *Transformation is feasible - how to achieve the sustainable development goals within planetary boundaries* [55].

Adicionalmente a la consideración de diferentes patrones de comportamiento, el presente trabajo puede profundizarse mediante la construcción de intervalos de confianza para la calificación del cumplimiento de los ODS y el margen de seguridad con respecto a los límites planetarios. Así mismo, se puede desarrollar un análisis de sensibilidad para medir el grado en el que variaciones en los parámetros socio-económicos y bio-físicos afectan los resultados de la simulación. Estos análisis pueden ser de utilidad para considerar el riesgo en la toma de decisiones, así como en la planeación de políticas y desarrollo social.

6.3. ¿El comienzo del fin, o el fin del comienzo?

La información presentada en este trabajo escrito parece poco alentadora. La única manera –según el modelo– en la cual nos será posible como humanidad el alcanzar estándares de vida adecuados para todos en el mundo, y al mismo tiempo preservar el sano funcionamiento del medio que nos rodea, es a través de un radical cambio en el comportamiento de la humanidad. Al mismo tiempo, el modelo pronostica un deterioro general de la calidad de vida y salud del entorno en caso de que continuemos con las tendencias de comportamiento de las décadas pasadas –aún con un incremento en la tecnología–. Al momento de escribir esta conclusión, nos encontramos a comienzos del año 2023, y, desde un punto de vista personal, muchas cosas siguen sin cambiar desde el año 2015. Estamos a 7 años de llegar a la fecha límite para erradicar la pobreza, acabar con el hambre y alcanzar la equidad entre las personas; sin embargo, parece que aún estamos lejos. Me gustaría terminar el trabajo con una petición personal al lector que ha alcanzado el final: no podemos esperar a ponernos de acuerdo todos. Debemos, como individuos, comenzar a actuar con madurez y ética, en lugar de por ambición y apariencias. Debemos comenzar a velar por los que no tienen lo esencial, en lugar de enviciarnos por cosas que nos faltan pero no necesitamos. Debemos sentir empatía por la vida de los animales, incluidos los animales que consumimos. Debemos cambiar nuestra dieta, nuestros hábitos de consumo –tanto de alimentos, como ropa y contenido– y adoptar comportamientos de respeto hacia las vidas con las que compartimos el planeta. Debemos educarnos y educar a las personas que no tienen la facilidad de hacerlo, pues de esta manera los empoderamos. Hay que ejercitarse, procurar nuestra salud mental y reservar momentos para descansar. Así, tendremos una mejora personal diaria, en lugar de un desvanecimiento progresivo. Finalmente hay que intentar ser la mejor versión de uno mismo todos los días, y cuando se falle, meditar el fallo y seguir adelante. Puede que si el lector sigue esta petición, nada suceda, en cuyo caso, me disculpo. Pero puede también suceder que mediante su convicción en alcanzar las metas dentro de los límites planetarios, el lector inspire a personas que a éste rodean a cambiar también. Y puede ser que suficientes personas educadas y motivadas se unan y algo bueno pase.



Appendix

A.1. Regresión Lineal

Consideremos el conjunto Ω conformado por N elementos de la forma (x_i, y_i) :

$$\Omega = \{(x_i, y_i) \mid i = 1, \dots, N\} .$$

El objetivo de una *regresión lineal* es el de ajustar una función $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ de la forma $f(x) = b_0 + b_1x$ (lineal) tal que f cumpla alguna propiedad. El cumplimiento de dicha propiedad se logrará mediante el ajuste de los parámetros b_0 y b_1 .

Observemos que, si se desea encontrar cuánto difiere la función propuesta f de alguna observación, se debe calcular:

$$Error_i = |y_i - f(x_i)| = |y_i - (b_0 + b_1x_i)| \text{ válido } \forall i \in \{1, \dots, N\} .$$

Siguiendo esta lógica, definimos:

$$e_i^2 = [Error_i]^2 = (y_i - f(x_i))^2 \text{ válido } \forall i \in \{1, \dots, N\} .$$

Notemos que $\forall i \in \{1, \dots, N\}$ se cumplen dos propiedades:

1. $e_i^2 \geq 0$;
2. e_i^2 es grande \leftrightarrow $Error_i$ es grande.

De esta manera $e_i^2 = (y_i - f(x_i))^2$ sirve para tener noción del error puntual de estimación, y cumple con la ventaja de ser más fácil de manipular que un valor absoluto.

Utilizando los indicadores e_i , se construye:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 + b_1x_i)]^2 . \end{aligned}$$

A \mathcal{E}^2 se le llama el *error cuadrático medio*. Este explica el promedio del error cuadrático observado.

Teniendo estos estimadores definidos, podemos pedir una función f tal que \mathcal{E}^2 sea mínimo. Para lograr esto, debemos encontrar valores b_0 y b_1 que minimizan la expresión:

$$\mathcal{E}^2(b_0, b_1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 + b_1 x_i)]^2.$$

Esto puede ser logrado siguiendo tres pasos:

1. Derivar la expresión parcialmente con respecto a las variables de ajuste.
2. Igualar las derivadas a cero - creando un sistema de ecuaciones 2×2 .
3. Resolver el sistema para las incógnitas de ajuste.

A continuación, se siguen los pasos mencionados.

Paso 1: Derivar parcialmente respecto a b_0 y b_1 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}^2(b_0, b_1)}{\partial b_0} &= \frac{\partial}{\partial b_0} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 + b_1 x_i)]^2 \right\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\partial}{\partial b_0} [y_i - (b_0 + b_1 x_i)]^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [2[y_i - (b_0 + b_1 x_i)][-1]] \\ &= \frac{-2}{N} \sum_{i=1}^N y_i + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [b_0 + b_1 x_i], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}^2(b_0, b_1)}{\partial b_1} &= \frac{\partial}{\partial b_1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 + b_1 x_i)]^2 \right\} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\partial}{\partial b_1} [y_i - (b_0 + b_1 x_i)]^2 \\ &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (b_0 + b_1 x_i)][-x_i] \\ &= \frac{-2}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [b_0 x_i + b_1 x_i^2]. \end{aligned}$$

Paso 2: Igualar el sistema a cero.

Definimos el sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{E}^2(b_0, b_1)}{\partial b_0} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{E}^2(b_0, b_1)}{\partial b_1} = 0 \end{cases}.$$

Complementando con el primer paso, se obtiene:

$$\begin{cases} \frac{-2}{N} \sum_{i=1}^N y_i + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [b_0 + b_1 x_i] = 0 \\ \frac{-2}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i + \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [b_0 x_i + b_1 x_i^2] = 0 \end{cases}.$$

Paso 3: Resolver el sistema para b_0 y b_1 .

Del segundo paso, se obtiene:

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^N [b_0 + b_1 x_i] = 2 \sum_{i=1}^N y_i \\ 2 \sum_{i=1}^N [b_0 + b_1 x_i^2] = 2 \sum_{i=1}^N x_i y_i \end{cases},$$

lo cual se transforma al sistema conocido como *Ecuaciones Normales*:

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^N x_i + b_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i y_i \end{cases}.$$

De la igualdad superior se obtiene:

$$b_0 = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N y_i - b_1 \sum_{i=1}^N x_i \right].$$

Para mayor comodidad, denotamos:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \\ \bar{X} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \end{aligned}$$

resultando en el estimado de b_0 :

$$\hat{b}_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X}.$$

Sustituyendo el valor encontrado b_0 en la segunda igualdad se obtiene:

$$\begin{aligned} [\bar{Y} - b_1 \bar{X}] \sum_{i=1}^N x_i + b_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 &= \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \frac{1}{N} [\sum_{i=1}^N y_i] - \frac{b_1}{N} [\sum_{i=1}^N x_i]^2 + b_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 &= \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \bar{X} \sum_{i=1}^N y_i + b_1 [\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} [\sum_{i=1}^N x_i]^2] &= \sum_{i=1}^N x_i y_i \end{aligned}$$

Despejando el valor b_1 , se obtiene el estimador de b_1 :

$$\hat{b}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - [\sum_{i=1}^N x_i]^2}.$$

Esto implica que la función $f(x) = b_0 + b_1 x$ que mejor se ajusta a las observaciones $\Omega = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, N\}$ dado el criterio de minimizar \mathcal{E}^2 es:

$$\widehat{y}(x) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x.$$

□

A.2. Ajuste Exponencial

Asumamos nuevamente un conjunto Ω con N observaciones de la forma (x_i, y_i) :

$$\Omega = \{(x_i, y_i) | i = 1, \dots, N\}.$$

Supongamos que las observaciones se comportan similar a una función exponencial, es decir:

$$y_i \approx \hat{b} \exp \left\{ \frac{x_i}{\hat{c}} \right\} \text{ v\u00e1lido } \forall i \in \{1, \dots, N\},$$

para algunos valores desconocidos \hat{b} y \hat{c} . Buscamos entonces ajustar una función de la forma $f(x) = b \exp\{\frac{x}{c}\}$.

Definimos el error de ajuste puntual como:

$$e_i^2 = (y_i - f(x_i))^2 = \left[y_i - \left(b \exp \left\{ \frac{x_i}{c} \right\} \right) \right]^2.$$

El promedio de los errores e_i^2 , aplicado a todo el conjunto de observaciones, se define:

$$\mathcal{E}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[y_i - \left(b \exp \left\{ \frac{x_i}{c} \right\} \right) \right]^2.$$

El objetivo es encontrar una función $f(x, b, c) = b \exp\{\frac{x}{c}\}$ que minimiza \mathcal{E}^2 .

Notemos lo siguiente: Si $f(x) = b \exp\{\frac{x}{c}\}$, entonces $\ln(f(x)) = \ln(b \exp\{\frac{x}{c}\}) = \ln(b) + \frac{1}{c}x$. Es decir, $\ln(f(x)) = \ln(b) + \frac{1}{c}x$ es una función lineal.

Consideremos el conjunto $\ln(\Omega) = \{(x_i, \ln(y_i)) \mid i = 1, \dots, N\}$. Tiene sentido ajustar una función lineal, $\ln(f(x))$, al conjunto $\ln(\Omega)$ tal que minimice:

$$\mathcal{E}_{\ln}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(y_i) - \ln(f(x_i))]^2.$$

Recordemos que $\ln(f(x_i)) = \ln(b) + \frac{1}{c}x_i$. Renombrando obtenemos:

$$\ln(f(x)) = b_0 + b_1 x,$$

donde $b_0 = \ln(b)$ y $b_1 = \frac{1}{c}$.

De la sección *regresión lineal*, sabemos que \mathcal{E}_{\ln}^2 se minimiza cuando:

$$\hat{b}_0 = \frac{n \sum_{i=1}^N x_i \ln(y_i) - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N \ln(y_i)}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - [\sum_{i=1}^N x_i]^2},$$

$$\hat{b}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(y_i) - \frac{\hat{b}_0}{\sum_{i=1}^N x_i}.$$

Así, la función $f(x) = b \exp\{\frac{x}{c}\}$ que mejor ajusta, minimizando \mathcal{E}^2 , el conjunto $\Omega = \{(x_i, y_i) \mid i = 1, \dots, N\}$ será:

$$\widehat{f(x)} = \exp[\widehat{\ln(f(x))}] = \exp \left[\widehat{\ln(b)} + \frac{\widehat{1}}{c} x \right] = \exp[\widehat{b}_0 + \widehat{b}_1 x] = \exp[\widehat{b}_0] \exp[\widehat{b}_1 x].$$

□

Bibliografía

- [1] Richard Bulliet, Pamela Crossley, Daniel Headrick, Steven Hirsch, and Lyman Johnson. *The Earth and Its Peoples: A Global History*, volume 1. Cengage Learning, 6 edition, 2015.
- [2] U Arnason, A Gullberg, and A Janke. Molecular timing of primate divergences as estimated by two nonprimate calibration points. *ournal of Molecular Evolution*, 1998.
- [3] S. Harmand, J. Lewis, and C. Feibel. 3.3-million-year-old stone tools from lomekwi 3, west turkana, kenya. *Nature*, 521:310–315, 2015.
- [4] Adam Hart-Davis. *History: The Definitive Visual Guide: from the Dawn of Civilization to the Present Day*. DK Pub, 2010.
- [5] Paul Rincon. Humans 'left africa much earlier'. <https://www.bbc.com/news/science-environment-12300228>, 2011. BBC News.
- [6] J. M. Roberts and O. A. Westad. *The History of the World*. Oxford University Press, 6 edition, 2013.
- [7] Jerry H. Bentley, Herbert F. Ziegler, and Heather E. Streets. *Traditions & Encounters: From 1500 to the present*. McGraw Hill Higher Education, 2 edition, 2008.
- [8] Emory Richard Johnson, Thurman William Van Metre, and Grover Gerhardt Huebner. volume 1. Nabu Press, 2012.
- [9] European Route of Industrial Heritage. Industrial history of european countries. <https://www.coe.int/en/web/cultural-routes/european-route-of-industrial-heritage>, 2022. Council of Europe.
- [10] McCloskey and Deidre. Review of the cambridge economic history of modern britain. *Times Higher Education Supplement*, 2004.
- [11] Donella H Meadows, Dennis L Meadows, Jørgen Randers, and William W Behrens. *The limits to growth*. Potomac Associates, 1972.
- [12] KOFI A. ANNAN. Informe de la comisión de desarrollo sostenible de la onu 2001. *Organización de las Naciones Unidas*, 2001.
- [13] Organización de las Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo del milenio. <https://www.un.org/development/desa/es/millennium-development-goals.html>. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales.
- [14] Gobierno de México. ¿qué es la agenda 2030 para el desarrollo sostenible? <https://www.gob.mx/agenda2030>, 2017.
- [15] Manos Unidas. Pobreza en el mundo. <https://www.manosunidas.org/observatorio/pobreza-mundo/definicion-pobreza>. Definición de Pobreza.
- [16] Naciones Unidas. Objetivo 1: Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/poverty/>, 2022. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- [17] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Hambre e inseguridad alimentaria. <https://www.fao.org/hunger/es/>, 2022.
- [18] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Land use in agriculture by the numbers. <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/>, 2020.
- [19] Organización Mundial de la Salud. La esperanza de vida ha aumentado en 5 años desde el año 2000, pero persisten las desigualdades sanitarias. <https://www.who.int/es/news/item/19-05-2016-life-expectancy-increased-by-5-years-since-2000-but-health-inequalities-persist>, 2016.
- [20] Organización Mundial de la Salud. World health statistics 2022: monitoring health for the sdgs, sustainable development goals. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240051157>.
- [21] Naciones Unidas. Objetivo 3: Salud y bienestar. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [22] Naciones Unidas. Objetivo 4: Educación de calidad. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [23] UNICEF. Igualdad de género. <https://www.unicef.org/lac/igualdad-de-genero>. América Latina y el Caribe.
- [24] Naciones Unidas. Objetivo 5: Igualdad de género. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/gender-equality/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [25] World Bank. Cinco datos que se deben saber sobre la igualdad de género y el capital humano. <https://blogs.worldbank.org/es/opendata/cinco-datos-que-se-deben-saber-sobre-la-igualdad-de-genero-y-el-capital-humano>. 2019.
- [26] Pacto Mundial. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. <https://www.pactomundial.org/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [27] Naciones Unidas. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [28] Rain Maker Enterprise. Water access is a gender issue. <https://www.rainmakerenterprise.org/blog/2018/5/21/water-access-is-a-gender-issue>. 2018.
- [29] Naciones Unidas. Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [30] United Nations Statistics Division. Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-07/>. 2017.
- [31] Naciones Unidas. Objetivo 7: Trabajo decente y crecimiento económico. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [32] United Nations Conference on Trade and Development. Real gross domestic product: Total and per capita, growth rates, annual. <https://unctadstat.unctad.org/wds/TableView/tableView.aspx>. 2021.
- [33] Naciones Unidas. Objetivo 9: Industrial, innovación e infraestructuras. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [34] Naciones Unidas. Objetivo 10: Reducción de las desigualdades. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/inequality/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [35] WID.WORLD. World inequality report 2022. <https://wir2022.wid.world/>. 2022. World Inequality Lab.
- [36] Naciones Unidas. Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- [37] Naciones Unidas. Objetivo 12: Producción y consumo responsables. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [38] Rebecca Lindsey and LuAnn Dahlman. Climate change: Global temperature. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. Junio 2022. Climate.gov.
- [39] Naciones Unidas. Objetivo 13: Acción por el clima. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [40] Naciones Unidas. Objetivo 14: Vida submarina. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [41] National Geographic. Marine pollution. <https://education.nationalgeographic.org/resource/marine-pollution>. Junio 2022. Learn with us.
- [42] National Geographic. Desertification, explained. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/desertification>. Mayo, 2019. Environment.
- [43] Naciones Unidas. Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [44] IBERDROLA. La pérdida de biodiversidad, un riesgo para el medio ambiente y para la humanidad. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/perdida-de-biodiversidad>. 2022. PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD: CAUSAS, CONSECUENCIAS Y SOLUCIONES.
- [45] Naciones Unidas. Objetivo 16: Paz, justicia e instituciones sólidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/peace-justice/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [46] Naciones Unidas. Promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-16/>. 2022. Statistic Division.
- [47] Naciones Unidas. Objetivo 17: Alianzas para lograr los objetivos. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/globalpartnerships/>. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- [48] Johan Rockstrom, Will Steffen, Kevin Noone, Asa Persson, and Marten Scheffer. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. 2009.
- [49] Will Steffen, Katherine Richardson, Johan Rockström, and Sarah E. Cornell. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. 2015.
- [50] Linn Persson, Bethanie M. Carney Almoth, Christopher D. Collins, and Cornell Sarah. Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. 2022.
- [51] Earth How. How does eutrophication work? causes, process and examples. <https://earthhow.com/eutrophication-causes-process-examples/>. Water Science.
- [52] Jørgen Randers, Johan Rockstrom, Per-Espen Stoknes, and Ulrich Goluke. Achieving the 17 sustainable development goals within 9 planetary boundaries. November 10, 2018.
- [53] SOCCOM. What is an earth system model (esm)? <https://socom.princeton.edu/content/what-earth-system-model-esm>. Princeton Education.
- [54] United States Office of Science. Doe explains... earth system and climate models. <https://www.energy.gov/science/doe-explainearth-system-and-climate-models>. ENERGY.GOV.
- [55] Jørgen Randers, Johan Rockstrom, Per-Espen Stoknes, and Ulrich Goluke. Transformation is feasible - how to achieve the sustainable development goals within planetary boundaries. 2018.