

Escuela de Posgrado

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN  
AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Tesis

**Construcción del modelo matemático 'Remaining  
Path' para determinar el tiempo límite de extinción  
de la biocapacidad**

Jimmy Dusty Lozano Mena

Para optar el Grado Académico de  
Maestro en Ciencias con Mención en  
Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible

Lima, 2023

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Mg. JAIME SOBRADOS TAPIA  
Director Académico de la Escuela de Posgrado

DE : **M.Sc. Leslie Cristina Lescano Bocanegra**  
Asesor del Trabajo de Investigación

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de Trabajo de Investigación

FECHA : 24 de JULIO del 2023

---

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado Asesor del Trabajo de Investigación titulado **“CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO ‘REMAINING PATH’ PARA DETERMINAR EL TIEMPO LÍMITE DE EXTINCIÓN DE LA BIOCAPACIDAD”**, perteneciente a **Bach. JIMMY DUSTY LOZANO MENA**, de la **MAESTRÍA MAESTRIA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**; se procedió con la carga del documento a la plataforma “Turnitin” y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado **10 %** de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores (Nº de palabras excluidas: **10**) SI  NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



Mg. **LESLIE CRISTINA LESCANO BOCANEGRA**  
DNI. N° **01101040**

**Arequipa**  
Av. Los Incas S/N,  
José Luis Bustamante y Rivero  
(054) 412 030

Calle Alfonso Ugarte 607, Yanahuara  
(054) 412 030

**Huancayo**  
Av. San Carlos 1980  
(094) 423 400

**Cusco**  
Urb. Manuel Prado - Lote B, N° 7 Av. Collasuyo  
(084) 480 070

Sector Angostura KM. 10,  
carretera San Jerónimo - Saylla  
(084) 480 070

**Lima**  
Av. Alfredo Mendiola 5210, Los Olivos  
(01) 910 9700

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, LOZANO MENA JIMMY DUSTY, identificado con Documento Nacional de Identidad N° 44246532, de la MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE, de la Escuela de Posgrado de la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. El Trabajo de Investigación titulado "CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO 'REMAINING PATH' PARA DETERMINAR EL TIEMPO LÍMITE DE EXTINCIÓN DE LA BIOCAPACIDAD", es de mi autoría, el mismo que presento para optar el Grado Académico de MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE.
2. El Trabajo de Investigación no ha sido plagiado ni total ni parcialmente, para lo cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. El Trabajo de Investigación es original e inédito, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

Lima, 02 de noviembre de 2023



LOZANO MENA JIMMY DUSTY  
DNI. N° 44246532



Huella

**Arequipa**

Av. Los Incas S/N,  
José Luis Bustamante y Rivero  
(054) 412 030

Calle Alfonso Ugarte 607, Yanahuara  
(054) 412 030

**Huancayo**

Av. San Carlos 1980  
(064) 481 430

**Cusco**

Urb. Manuel Prado - Lote B, N° 7 Av. Collasuyo  
(084) 480 070

Sector Angostura KM. 10,  
carretera San Jerónimo - Saylla  
(084) 480 070

**Lima**

Av. Alfredo Mendiola 5210, Los Olivos  
(01) 213 2760

Jr. Junín 355, Miraflores  
(01) 213 2760

# Turnitin tesis observaciones

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

10%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

1	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	1%
2	<a href="http://dspace.unl.edu.ec">dspace.unl.edu.ec</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	<1%
4	<a href="http://www.portalsolar.com">www.portalsolar.com</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://www.funintec.org.ar">www.funintec.org.ar</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://wano.org.uk">wano.org.uk</a> Fuente de Internet	<1%
9	<a href="http://oa.upm.es">oa.upm.es</a> Fuente de Internet	<1%

---

10	<a href="http://repositorio.cepal.org">repositorio.cepal.org</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://documentop.com">documentop.com</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://www.pnuma.org">www.pnuma.org</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://prezi.com">prezi.com</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://www.cacic2016.unsl.edu.ar">www.cacic2016.unsl.edu.ar</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://www.aecid.es">www.aecid.es</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://e-spacio.uned.es">e-spacio.uned.es</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %

22	<a href="http://expansion.mx">expansion.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
23	<a href="http://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
24	<a href="http://unstats.un.org">unstats.un.org</a> Fuente de Internet	<1 %
25	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
26	<a href="http://repositorio.uta.edu.ec">repositorio.uta.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
27	<a href="http://www.mapei.com">www.mapei.com</a> Fuente de Internet	<1 %
28	<a href="http://repositorio.ucss.edu.pe">repositorio.ucss.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
29	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
30	Esteban Manuel Villena Martínez. "Elaboración de un modelo matemático que permita el análisis de la eficacia de la ósmosis Inversa en el proceso de eliminación de plomo, hierro y manganeso en fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en la alta cuenca alta del río Guadalquivir en Bolivia y su aporte al crecimiento de la oferta de agua y la	<1 %

# disponibilidad sostenible de agua potable a largo plazo", Universitat Politecnica de Valencia, 2022

Publicación

31

[blog.orange.es](http://blog.orange.es)

Fuente de Internet

<1 %

32

[www.planestrajaen.org](http://www.planestrajaen.org)

Fuente de Internet

<1 %

33

Germán Augusto Forero Cantor.  
"Incorporación de consideraciones de estabilidad y sostenibilidad ambiental en la seguridad alimentaria. El caso de España.",  
Universitat Politecnica de Valencia, 2020

Publicación

<1 %

34

[qdoc.tips](http://qdoc.tips)

Fuente de Internet

<1 %

35

[plataforma.responsable.net](http://plataforma.responsable.net)

Fuente de Internet

<1 %

36

[www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx)

Fuente de Internet

<1 %

37

"Energía, ambiente y sociedad. Libro de apoyo a la docencia", Universidad Nacional Autónoma de México, 2022

Publicación

<1 %

38

[dehesa.unex.es:8080](http://dehesa.unex.es:8080)

Fuente de Internet

<1 %

39	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
40	<a href="http://dergipark.org.tr">dergipark.org.tr</a> Fuente de Internet	<1 %
41	Yi Yang, Congxu Yao, Delong Xu. "Ecological compensation standards of national scenic spots in western China: A case study of Taibai Mountain", <i>Tourism Management</i> , 2020 Publicación	<1 %
42	<a href="http://dspace.ucuenca.edu.ec">dspace.ucuenca.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
43	<a href="http://seed.tabasco.gob.mx">seed.tabasco.gob.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
44	<a href="http://www.imta.gob.mx">www.imta.gob.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
45	Submitted to Universidad del Istmo de Panamá Trabajo del estudiante	<1 %
46	<a href="http://xdocs.net">xdocs.net</a> Fuente de Internet	<1 %
47	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
48	<a href="http://tvd.wiki">tvd.wiki</a> Fuente de Internet	<1 %

[laboratorio.manizales.gov.co](http://laboratorio.manizales.gov.co)

49

Fuente de Internet

<1 %

---

50

[view.genial.ly](http://view.genial.ly)

Fuente de Internet

<1 %

---

51

[www.cgtrainternacional.com.ar](http://www.cgtrainternacional.com.ar)

Fuente de Internet

<1 %

---

52

[www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org)

Fuente de Internet

<1 %

---

53

[www.terram.cl](http://www.terram.cl)

Fuente de Internet

<1 %

---

54

[www.volvogroup.com](http://www.volvogroup.com)

Fuente de Internet

<1 %

---

55

[www.yucatan.gob.mx](http://www.yucatan.gob.mx)

Fuente de Internet

<1 %

---

56

[repository.eafit.edu.co](http://repository.eafit.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

---

57

[revistaselectronicas.ujaen.es](http://revistaselectronicas.ujaen.es)

Fuente de Internet

<1 %

---

58

[www.cancilleria.gov.co](http://www.cancilleria.gov.co)

Fuente de Internet

<1 %

---

59

[www.pec-americas.com](http://www.pec-americas.com)

Fuente de Internet

<1 %

---

60

[www11.urbe.edu](http://www11.urbe.edu)

Fuente de Internet

<1 %

---

61	<a href="http://congresomich.gob.mx">congresomich.gob.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
62	<a href="http://ebin.pub">ebin.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
63	<a href="http://mednet2.who.int">mednet2.who.int</a> Fuente de Internet	<1 %
64	<a href="http://blog.globalforestwatch.org">blog.globalforestwatch.org</a> Fuente de Internet	<1 %
65	<a href="http://docobook.com">docobook.com</a> Fuente de Internet	<1 %
66	<a href="http://repositorio.unac.edu.pe">repositorio.unac.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
67	<a href="http://www.clad.org.ve">www.clad.org.ve</a> Fuente de Internet	<1 %
68	"El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022", Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022 Publicación	<1 %
69	<a href="http://observatorio.campus-virtual.org">observatorio.campus-virtual.org</a> Fuente de Internet	<1 %
70	Submitted to Katy Independent School District Trabajo del estudiante	<1 %
71	<a href="http://es.mongabay.com">es.mongabay.com</a> Fuente de Internet	<1 %

72 Sustainability of Integrated Water Resources Management, 2015. <1 %  
Publicación

---

73 Submitted to Universidad Carlos III de Madrid - EUR <1 %  
Trabajo del estudiante

---

74 ods.gov.co <1 %  
Fuente de Internet

---

75 www.dspace.uce.edu.ec <1 %  
Fuente de Internet

---

76 Submitted to Infile <1 %  
Trabajo del estudiante

---

77 Pedro Pujante Alarcón, Carlos Alonso Felgueroso, Jessica Ares Blanco, Paula Morales Sánchez et al. "Correlación entre parámetros glucométricos de la monitorización continua flash y la hemoglobina glucosilada. Experiencia en vida real en Asturias", Endocrinología, Diabetes y Nutrición, 2022 <1 %  
Publicación

---

78 papyrus.bib.umontreal.ca <1 %  
Fuente de Internet

---

79 rua.ua.es <1 %  
Fuente de Internet

---

[www.ararteko.net](http://www.ararteko.net)

80

Fuente de Internet

&lt;1 %

81

[www.nxtbook.com](http://www.nxtbook.com)

Fuente de Internet

&lt;1 %

82

Mejia- Ortega Jhomayra - Thamara, Ordonez-Ordonez Jenny, Izquierdo-Montoya Leonardo, Ochoa- Moreno Wilman-Santiago. "Circular Economy and New Technologies in Latin America as a Contribution to Sustainable Development", 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 2022

Publicación

&lt;1 %

83

[asuncion.intedya.com](http://asuncion.intedya.com)

Fuente de Internet

&lt;1 %

84

[informe2019.gruponutresa.com](http://informe2019.gruponutresa.com)

Fuente de Internet

&lt;1 %

85

[www.amazon.in](http://www.amazon.in)

Fuente de Internet

&lt;1 %

86

[www.elcomercio.com](http://www.elcomercio.com)

Fuente de Internet

&lt;1 %

87

[www.interempresas.net](http://www.interempresas.net)

Fuente de Internet

&lt;1 %

88

Submitted to Ana G. Méndez University

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

89	Elena Escolano-Pérez. "Cognitive-motivational variables of beginner university students in the first year of adaptation to the European Higher Education Area / Variables cognitivo-motivacionales del alumnado de nuevo ingreso en el primer año de adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior", <i>Cultura y Educación</i> , 2014 Publicación	<1 %
90	archive.org Fuente de Internet	<1 %
91	cebem.org Fuente de Internet	<1 %
92	gulfresearchmeeting.net Fuente de Internet	<1 %
93	medioambiente.asturias.es Fuente de Internet	<1 %
94	repositorio.une.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
95	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
96	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	<1 %
97	rio.upo.es Fuente de Internet	<1 %

98 [rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com](http://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com) <1 %  
Fuente de Internet

---

99 Submitted to unsaac <1 %  
Trabajo del estudiante

---

100 [www.1a3soluciones.com](http://www.1a3soluciones.com) <1 %  
Fuente de Internet

---

101 [www.crisinfo.org](http://www.crisinfo.org) <1 %  
Fuente de Internet

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía

Activo

**Asesor**

Mg. Leslie Cristina Lescano Bocanegra

### **Agradecimiento**

A todas las personas que me enseñaron y de las que aprendí.

## Índice

<b>Asesora</b> .....	<b>i</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>iv</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>xii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Capítulo I</b> .....	<b>16</b>
<b>Planteamiento del estudio</b> .....	<b>16</b>
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	16
1.1.1. Planteamiento del problema .....	17
1.1.2. Formulación del problema .....	22
1.2. Determinación de objetivos.....	23
1.2.1. Objetivo general.....	23
1.2.2. Objetivos específicos.....	23
1.3. Justificación e importancia del estudio.....	23
1.3.1. Justificación teórica .....	23
1.3.2. Justificación metodológica.....	23
1.3.3. Justificación práctica.....	24
1.3.4. Justificación social .....	24
1.4. Alcances y limitaciones de la presente investigación.....	25
1.4.1. Alcances .....	25
1.4.2. Limitaciones.....	25
<b>Capítulo II</b> .....	<b>26</b>
<b>Marco teórico</b> .....	<b>26</b>
2.1. Antecedentes de la investigación.....	26
2.2. Bases teóricas .....	43
2.2.1. Objetivos de desarrollo sostenible .....	43
2.2.2. Indicadores ambientales ILAC .....	47
2.2.3. La biocapacidad.....	50

2.2.4.	Factores de rendimiento .....	51
2.2.5.	La huella ecológica .....	52
2.2.6.	Reportes de huella ecológica .....	54
2.2.7.	Modelo matemático .....	58
2.2.8.	Tiempo límite de extinción .....	60
2.3.	Definición de términos básicos .....	62
2.3.1.	Indicadores ambientales .....	62
2.3.2.	Biocapacidad .....	63
2.3.3.	Capacidad de carga.....	63
2.3.4.	Demanda de recursos .....	63
2.3.5.	Huella ecológica .....	64
<b>Capítulo III</b>	.....	<b>65</b>
<b>Hipótesis y variables</b>	.....	<b>65</b>
3.1.	Hipótesis .....	65
3.1.1.	Hipótesis general .....	65
3.2.	Operacionalización de variables .....	65
3.2.1.	Variable 1 .....	65
3.2.2.	Matriz de operacionalización de variables .....	66
<b>Capítulo IV</b>	.....	<b>68</b>
<b>Metodología del estudio</b>	.....	<b>68</b>
4.1.	Método y tipo de investigación.....	68
4.1.1.	Método de investigación .....	68
4.1.2.	Alcance de investigación .....	68
4.2.	Diseño de la investigación .....	68
4.3.	Población y muestra .....	68
4.3.1.	Población.....	68
4.3.2.	Muestra.....	69
4.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	69
4.4.1.	Técnicas de recolección de datos.....	69
4.4.2.	Instrumentos de recolección de datos .....	71
4.4.3.	Proceso de construcción del modelo matemático.....	75
4.5.	Técnicas de análisis de datos .....	84
<b>Capítulo V</b>	.....	<b>84</b>

<b>Resultados</b> .....	<b>84</b>
5.1. Resultados y análisis .....	84
5.1.1. Nomenclatura .....	84
5.1.2. Factores de la dinámica de demanda de recursos .....	87
5.1.3. Sistemas de restauración de biocapacidad .....	96
5.1.4. Construcción del modelo <i>Remaining Path</i> .....	111
5.1.5. Remaining Path en el Perú.....	122
5.1.6. Remaining Path en el mundo .....	134
5.1.7. Tendencias usando el método tradicional de análisis de datos .....	142
5.2. Discusión de resultados .....	143
<b>Conclusiones</b> .....	<b>151</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>152</b>
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>153</b>
<b>Apéndice</b> .....	<b>161</b>
Apéndice A: Matriz de consistencia.....	161
Apéndice B: Tendencias de la biocapacidad.....	164
Apéndice C: Perú - Base de datos de biocapacidad y huella ecológica .....	167
Apéndice D: World - Base de datos de biocapacidad y huella ecológica .....	173
Apéndice E: Código fuente.....	180

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> .....	<b>67</b>
Tabla de operacionalización de variables .....	67

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> .....	<b>50</b>
Framework para calcular la biocapacidad del mundo .....	50
<b>Figura 2</b> .....	<b>52</b>
Framework para calcular la huella ecológica .....	52
<b>Figura 3</b> .....	<b>54</b>
Déficit y reserva de biocapacidad en el mundo - 2018.....	54
<b>Figura 4</b> .....	<b>54</b>
Países con déficit de biocapacidad - 2018 .....	54
<b>Figura 5</b> .....	<b>55</b>
Países con reservas de biocapacidad - 2018.....	55
<b>Figura 6</b> .....	<b>56</b>
Huella ecológica y biocapacidad del mundo en el 2018 .....	56
<b>Figura 7</b> .....	<b>57</b>
Huella ecológica y biocapacidad de Brasil y China en el 2018 .....	57
<b>Figura 8</b> .....	<b>59</b>
Proceso de un modelo matemático .....	59
<b>Figura 9</b> .....	<b>70</b>
Base de datos de biocapacidad y huella ecológica de Perú .....	70
<b>Figura 10</b> .....	<b>71</b>
Tendencia lineal y logarítmica con datos de Perú .....	71
<b>Figura 11</b> .....	<b>73</b>
Sección del código del fichero r_Path_Peru.py .....	73
<b>Figura 12</b> .....	<b>73</b>
Código del fichero def_integrate.py .....	74
<b>Figura 13</b> .....	<b>74</b>
Sección del código del fichero ef_Bc_Peru.py .....	74
<b>Figura 14</b> .....	<b>75</b>
Proceso general de construcción del modelo matemático .....	75
<b>Figura 15</b> .....	<b>75</b>
Proceso extendido de construcción del modelo matemático.....	75
<b>Figura 16</b> .....	<b>77</b>
Proceso de recolección de datos .....	77

<b>Figura 17</b> .....	<b>79</b>
Proceso para filtrar y clasificar datos.....	79
<b>Figura 18</b> .....	<b>80</b>
Proceso de análisis de datos.....	80
<b>Figura 19</b> .....	<b>81</b>
Proceso para relacionar información .....	81
<b>Figura 20</b> .....	<b>83</b>
Proceso del desarrollo del producto .....	83
<b>Figura 21</b> .....	<b>88</b>
Factor de cumplimiento de las ODS.....	88
<b>Figura 22</b> .....	<b>89</b>
Comparación del cumplimiento de los ODS.....	89
<b>Figura 23</b> .....	<b>90</b>
Índice de desarrollo humano al 2021 .....	90
<b>Figura 24</b> .....	<b>91</b>
Comparación del índice de desarrollo humano al 2021 .....	91
<b>Figura 25</b> .....	<b>93</b>
Índice de percepción de corrupción al 2022.....	93
<b>Figura 26</b> .....	<b>93</b>
Comparación de la percepción de corrupción al 2022 .....	93
<b>Figura 27</b> .....	<b>95</b>
Nivel de ingresos del mundo al 2021 .....	95
<b>Figura 28</b> .....	<b>97</b>
Pérdida anual de cobertura arbórea en Perú .....	97
<b>Figura 29</b> .....	<b>98</b>
Situación de pérdida y ganancia arbórea en Perú.....	98
<b>Figura 30</b> .....	<b>100</b>
Población que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura..	100
<b>Figura 31</b> .....	<b>101</b>
Implementación de la gestión integral de los recursos hídricos .....	101
<b>Figura 32</b> .....	<b>103</b>
Cantidad de producción de basura en Perú al 2023 .....	103
<b>Figura 33</b> .....	<b>103</b>

Comparación de la generación de basura de acuerdo al nivel de ingresos 2023	103
<b>Figura 34</b> .....	<b>103</b>
Gestión de residuos de acuerdo al nivel de ingresos .....	104
<b>Figura 35</b> .....	<b>104</b>
Porcentaje del territorio de un país dedicado a áreas protegidas.....	104
<b>Figura 36</b> .....	<b>105</b>
Emisiones de CO2 de Perú al 2019 .....	105
<b>Figura 37</b> .....	<b>105</b>
Emisiones de CO2 de acuerdo al nivel de ingreso al 2023 .....	105
<b>Figura 38</b> .....	<b>106</b>
Países que generan más emisiones de CO2 .....	106
<b>Figura 39</b> .....	<b>108</b>
Capacidad per cápita instalada de energías renovables en Perú al 2020.....	108
<b>Figura 40</b> .....	<b>108</b>
Comparación de capacidad per cápita instalada de energías renovables .....	108
<b>Figura 41</b> .....	<b>109</b>
Acceso a cocinas con energías limpias en Perú .....	109
<b>Figura 42</b> .....	<b>110</b>
Comparación del acceso a cocinas con energías limpias .....	110
<b>Figura 43</b> .....	<b>111</b>
Huella ecológica y biocapacidad del mundo al 1970 .....	111
<b>Figura 44</b> .....	<b>116</b>
Funciones $F_{demand\_Dynamicst}$ , $F_{biocapacity}(t)$ $Patht$ y puntos críticos ....	116
<b>Figura 45</b> .....	<b>118</b>
Áreas definidas por previous biocapacity point y collapse biocapacity point .....	118
<b>Figura 46</b> .....	<b>120</b>
Comparación de áreas de $F_{biocapacity}(t)$ y $F_{demand\_Dynamics}(t)$ en un ..	120
<b>Figura 47</b> .....	<b>121</b>
Descripción de la función Remaining Path .....	121
<b>Figura 48</b> .....	<b>122</b>
Tendencia de la población y la huella ecológica del Perú .....	122
<b>Figura 49</b> .....	<b>123</b>
Cálculo de la dinámica de demanda de recursos y la huella ecológica del Perú	123

<b>Figura 50</b> .....	<b>124</b>
Tendencia de la dinámica de demanda y la huella ecológica del Perú .....	124
<b>Figura 51</b> .....	<b>124</b>
Ajuste de la tendencia de la biocapacidad y la dinámica de demanda de recursos de Perú.....	124
<b>Figura 52</b> .....	<b>125</b>
Entorno de Python y ejecución del fichero R_PATH_PERU.py .....	125
<b>Figura 53</b> .....	<b>127</b>
Relación entre la dinámica de demanda de recursos y biocapacidad de Perú ..	127
<b>Figura 54</b> .....	<b>128</b>
Remaining Path para el límite de biocapacidad para Perú.....	128
<b>Figura 55</b> .....	<b>135</b>
Relación entre dinámica de demanda de recursos y biocapacidad en el mundo	135
<b>Figura 56</b> .....	<b>136</b>
Remaining Path para el límite de biocapacidad en el mundo.....	136
<b>Figura 57</b> .....	<b>142</b>
Tendencia en la biocapacidad y huella ecológica de Perú de acuerdo a métodos tradicionales de extrapolación .....	142

## Resumen

A partir de la revolución industrial, las actividades vinculadas al desarrollo humano están agotando los recursos ambientales. La biocapacidad del planeta experimenta una constante desaceleración mientras que la dinámica de demanda de recursos continua creciendo.

Es necesario que todos los países, en todo nivel de gobierno: local, regional y nacional, cuenten con información que reduzca la incertidumbre acerca del tiempo límite de la extinción de la biocapacidad, con el objetivo de proyectar un conjunto de acciones estratégicas que contribuyan al desarrollo económico y social de manera responsable y sostenible. Esta información también es importante para los capitales privados que buscan garantizar el retorno de sus inversiones en un periodo superior al corto plazo. También es importante para los estudios científicos, para la protección de áreas naturales y para la población en general.

Los datos históricos publicados por la Global Footprint Network muestran que a partir del año 1970 los valores per cápita de la biocapacidad y la huella ecológica se intersecaron en un valor de 2.7 gha. a partir de ese momento, la biocapacidad ha experimentado una caída continua, mientras que la huella ecológica ha experimentado un preocupante crecimiento. La presente investigación tuvo el objetivo de construir un modelo matemático, que fue denominado Remaining Path, para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad. Se analizaron los factores que determinan la dinámica de demanda de recursos y también se analizaron los sistemas de restauración de la biocapacidad del planeta. Se ejecutó el modelo matemático Remaining Path y los resultados para Perú revelan que a partir del año 2091 la biocapacidad colapsará; sin embargo, el año 2102 la biocapacidad experimentará una tendencia de crecimiento: resultado que probablemente sea consecuencia de la puesta en marcha de los sistemas de restauración de la biocapacidad.

**Palabras clave:** Biocapacidad, dinámica de demanda, recursos naturales, huella ecológica, factores de demanda, sistemas de restauración, modelo matemático, tiempo límite, python

## Abstract

Since the Industrial Revolution, activities related to human development are depleting environmental resources. The biocapacity of the planet experiences a constant deceleration while the dynamics of demand for resources continues to grow.

It is necessary that all countries, at all levels of government: local, state and national, have information that reduces uncertainty about the deadline for the extinction of biocapacity, with the aim of projecting a set of strategic actions that contribute to the economic and social development in a responsible and sustainable manner. This information is also important for private capital that seeks to guarantee the return of their investments in a period greater than the short term. It is also important for scientific studies, for the protection of natural areas and for the population in general.

The historical data published by the Global Footprint Network show that starting in 1970 the per capita values of biocapacity and ecological footprint intersected at a value of 2.7 gha. Since then, biocapacity has experienced a continuous drop, while the ecological footprint has experienced worrying growth. This research had the objective of building a mathematical model, which was called Remaining Path, to determine the limit time of extinction of biocapacity in any country. The factors that determine the dynamics of demand for resources were analyzed and the systems for restoring the planet's biocapacity were also analyzed. The Remaining Path mathematical model was executed and the results for Peru reveal that from the year 2091 the biocapacity will collapse; however, in 2102 biocapacity will experience a growth trend: a result that is probably a consequence of the implementation of biocapacity restoration systems.

**Keywords:** Biocapacity, BC, demand dynamics, natural resources, ecological footprint, EF, demand factors, restoration systems, mathematical model, time limit, python

## Introducción

Una de las funciones principales de la biocapacidad del planeta se encarga de proveer los recursos necesarios para el desarrollo de todas las actividades humanas, sin embargo, esta capacidad no es ilimitada: tiene un límite y depende de la dinámica de demanda de recursos por la población que resulta del ajuste realizado a la tendencia de la huella ecológica en base a una serie de factores que serán detallados en la presente investigación.

El objetivo de la presente investigación fue construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad; este modelo matemático fue denominado Remaining Path. Es así que, para obtener el valor esperado, se desarrollaron cuatro objetivos específicos: se analizaron los principales factores que definen la dinámica de demanda de recursos por parte de la población, se analizaron los principales sistemas de restauración para evitar la extinción de la biocapacidad, se seleccionaron las herramientas y métodos necesarios para construir el modelo matemático; finalmente, se aplicó el modelo matemático Remaining Path mediante la realización de pruebas con data a nivel nacional y mundial.

A partir del modelo matemático Remaining Path, se propuso un programa de computadora escrito en el lenguaje Python para lograr calcular, de manera automatizada, el tiempo límite de extinción de la biocapacidad de cualquier país, siempre y cuando existan los inputs necesarios. Por la naturaleza de los modelos matemáticos, se advierte que no es posible considerar absolutamente todas las variables existentes que definen la dinámica de demanda de recursos por la población.

Esta investigación consta de los siguientes capítulos. El primer capítulo presenta la formulación del problema, objetivo, justificación y alcances de la investigación. En el segundo capítulo se expone los antecedentes relacionados a la huella ecológica, biocapacidad, los factores de la dinámica de demanda de recursos y sistemas de restauración de la biocapacidad. El tercer capítulo muestra la hipótesis y la operacionalización de la variable de investigación. En el cuarto capítulo se presenta el método y tipo de investigación, el diseño de la investigación, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, así mismo, se explica

el proceso del desarrollo construcción del modelo matemático, los datos y las herramientas de análisis de datos que se usaron. El quinto capítulo da a conocer los resultados obtenidos, muestra la nomenclatura de todos los índices, funciones, puntos críticos, factores y sistemas que fueron usados, también se analizan los factores y se definen los índices que serán usados en la dinámica de demanda de recursos y los sistemas de restauración de biocapacidad, así mismo, se explica detalladamente la construcción del modelo matemático Remaining Path y se muestran los resultados al aplicarlo en Perú y el mundo, también se muestra los resultados usando el método tradicional; así mismo, en este capítulo, se expone la discusión de los resultados; finalmente se presenta las conclusiones y las recomendaciones.

La importancia de esta investigación se fundamenta en que la ejecución del modelo matemático Remaining Path permitirá que los gobiernos y a la sociedad en general diseñen estrategias que ayuden a prevenir la extinción de la biocapacidad. Este modelo matemático se convierte en una herramienta útil para que los profesionales de ciencias ambientales y sociales gestionen sus proyectos en un horizonte de tiempo que abarque más de una generación.

## **Capítulo I**

### **Planteamiento del estudio**

#### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

Los recursos no son infinitos, ninguna sociedad puede extraer ni consumir recursos ilimitadamente, sean estos naturales o producidos por la humanidad; si bien, nuestro planeta es un sistema que tiene la capacidad de restaurarse de manera natural, este proceso no puede competir con la creciente demanda de recursos en todo el mundo. De acuerdo a Sánchez et al. (2019), en el contexto de la competencia internacional la estrategia de crecimiento se basa en el supuesto de que los recursos naturales disponibles en el planeta son prácticamente infinitos y por tanto se crea un escenario de uso intensivo de recursos. (p. 129)

Tenemos hábitos de consumo de recursos que varían de acuerdo muchos factores, como son la actividad económica, cultura, ubicación geográfica, crecimiento urbano sobre campos agrícolas, entre otros. De acuerdo a Grande (2006), muchos de los hábitos de consumo a nivel personal o familiar son de forma inercial, es decir, no se basan en un proceso de compra racional. (p. 191)

La demanda de recursos por parte de la población presenta dinámicas distintas incluso en un determinado país. Los límites territoriales entre estados, regiones o provincias pueden inducir a errores al momento de aplicar metodologías porque las poblaciones se establecen siguiendo los límites geográficos naturales.

La huella ecológica es un indicador que mide el impacto de nuestras acciones sobre el planeta y es expresada en hectáreas globales, es decir: el número de hectáreas de tierra y agua se necesitan para satisfacer el consumo de recursos ya sea de una persona, país o el mundo entero. Es interesante distinguir que esta información necesita ser presentada en un proyección para que resulte ser informativa de modo que sirva para asumir compromisos y tomar decisiones correctivas a nivel personal y gubernamental.

### **1.1.1. Planteamiento del problema**

El origen de la humanidad se remonta a un periodo en que el planeta mantenía una configuración cambiante de todas las fuerzas naturales que labraron constantemente los relieves y paisajes: nuestras actividades humanas también alteran el planeta. Al respecto, Monroe et al. (2008), afirman que la nuestro planeta es complejo y dinámico: está cambiando de manera continua desde su inicio hace 4,600 millones de años; así mismo, señalan que las acciones que los seres humanos desarrollamos producen cambios en el planeta y afectan de cierta manera al sistema del planeta Tierra. (p. 4)

Este constante cambio del planeta no significa una situación de pureza o armonía orquestada entre todos los seres vivos. Al contrario, siempre existió competitividad entre las especies y esta condición se intensificó con los factores meteorológicos que desde tiempos remotos incidieron en la tierra.

Desde los primeras micro sociedades de Homo Sapiens, las técnicas de caza, pesca y recolección de alimentos se perfeccionaron, al igual que las técnicas de construcción de guaridas, debido a la condición nómada de aquellas personas. En concordancia, Cook (2012), destaca la característica cultural de la huamanidad que consisten en acumular, sin embargo no es sostenible y promueve prácticas nómades que no soportarían un ritmo intensivo como el actual. (p. 38) Es interesante notar que, a diferencia de las muchas especies del reino animal, los primeros humanos superaron el estatus de asegurar el alimento necesario, para incursionar en un nuevo estatus que consistía en demandar más de lo necesario.

Las primeras civilizaciones construyeron asentamientos o ciudades primitivas porque no podían continuar con un sistema nómade. A estas alturas la agricultura y ganadería ya eran indispensables. Es así que, según Cook (2012), hace aproximadamente 10,000 años, en las fértiles tierras cultivables entre Palestina y Mesopotamia, surgió la domesticación de la yerba y consecuentemente del ganado, hecho que a diferencia de otras lugares geográficos, aceleraría el proceso

de consolidación del sedentarismo y el abandono de la tradición nómada. (p. 40)

De manera natural, nunca existieron terrenos destinados a un uso urbano. Las poblaciones seleccionaron los lugares ideales para edificar sus construcciones en base a diversos criterios como son: seguridad, clima, agua, entre otros. Es necesario precisar que los asentamientos se establecieron en tierras que alguna vez fueron un ecosistema que mantenía un sistema equilibrado de flora y fauna.

El crecimiento de las poblaciones requería un ordenamiento social para mantener una estructura segura y continua. Cada civilización que se desarrolló en el planeta definió un sistema social que generalmente se estructuraba con entes rectores supremos: divinidades o dioses, con representantes o herederos de las divinidades: jefes, con población común y finalmente, con población destinada a regímenes de servidumbre o sometimiento. En este sentido, Aslan (2017), las primeras sociedades aumentaron su posibilidad de supervivencia en un entorno altamente competitivo al desarrollar vínculos agrupándose en torno a símbolos aceptados, participando de una experiencia ritual compartida. (p. 30)

Como se mencionó anteriormente, las poblaciones organizadas empezaron a necesitar más recursos de los que necesitaban en ese momento; los motivos fueron diversos, pero principalmente se protegía la seguridad alimentaria que garantizaba la existencia, por tanto, se guardaban alimentos para tiempos en los que no había cosechas.

En este momento podemos insertar dos conceptos muy importantes en el desarrollo de esta investigación: biocapacidad y huella ecológica, los cuales serán abordados con mayor precisión en el segundo capítulo de esta tesis.

Como biocapacidad o capacidad biológica entendemos la suficiencia de restauración que tiene el planeta para recuperar las condiciones iniciales de los ecosistemas antes de ser alterados como consecuencia de la actividad humana.

Mientras tanto, por huella ecológica entendemos a la cantidad de hectáreas de tierra y agua necesarias para producir todos los recursos demandados por la población, en adición a las hectáreas necesarias para absorber todos los desechos generados por la actividad humana. La demanda creciente de recursos por parte de las civilizaciones creó mecanismos de intercambio para superar las barreras de producción insatisfecha y sobre producción de recursos. El intercambio, se tornó ineficiente como mecanismo de intercambio cuando los volúmenes demandados eran demasiado grandes. En referencia, Reston (2007) señalan que cuando las relaciones comerciales de la civilización Maya se hicieron complejas, ciertos productos fueron usados como mediador de intercambio, especialmente las semillas de cacao. Ante estas circunstancias se estandarizó el uso del dinero como instrumento de intercambio, aunque en algunas civilizaciones antiguas ya era usado, no es representaciones metálicas, sino en representaciones de caparazones de moluscos. Es interesante notar en este punto la relación de la deuda con la demanda de recursos, asdfa.

En este momento incluimos el concepto de dinámica de la demanda de recursos por parte de la población para describir las diversas manifestaciones de la demanda de recursos en función de circunstancias heterogéneas que atraviesa o enfrenta cada población. Las dinámica de demanda de recursos se incrementa de una manera sin precedentes durante la revolución industrial. Este es el momento que marca un antes y un después en la huella ecológica de la población y en la biocapacidad del planeta.

Después de la revolución industrial, la demanda de materias primas se traslada hacia los países ricos en recursos naturales. Así mismo, las ciudades se tornan más grandes y las poblaciones rurales dejan el campo para instalarse en alguna industria en la ciudad. Riera et al. (2008) consideran que el desarrollo industrial impulsó la explotación de los recursos ambientales, así mismo, el autor sostiene que se ha tomado conciencia de la escasez de los recursos naturales. (p. 5)

La diversidad geográfica de nuestro planeta y la variada disposición de las poblaciones urbanas y rurales a lo largo de los territorios han generado una dinámica de demanda de recursos claramente distinguible.

El producto bruto interno de algunos países se fundamenta en la minería, en otros casos se fundamenta en la agricultura, en otros países en la tecnología, entre otros. Cada país cuenta con una dinámica de demanda de recursos que se adecúa a sus estrategias geopolíticas y pactos comerciales internacionales.

En las últimas décadas, en todo el mundo, se posicionó como tema de interés gubernamental y ciudadano el cambio climático, que está relacionado directamente con la biocapacidad y la huella ecológica. Muchos ecosistemas, incluso zonas urbanas se ponen en riesgo por el calentamiento global; de acuerdo a asdf, muchas poblaciones de la costa africana sufrirán inundaciones y el aumento del nivel del mar consumirá el hábitat del tigre de Bengala en el Sundarbans. (p. 52)

Para el estudio de los recursos demandados por una población determinada se publicaron a inicios de este milenio indicadores ambientales como son la huella hídrica y la huella de carbono.

No obstante, estos indicadores, mediante sus propias metodologías, hacen una lectura de los recursos consumidos, pero no relacionan este valor con la biocapacidad.

En tanto, el indicador denominado huella ecológica nos permite encontrar nuestras posibles deficiencias después de estimar el consumo actual de recursos y su proyección frente al suministro ecológico disponible Mathis & William E. (1996), es decir: relaciona la biocapacidad con los patrones de consumo de una determinada población.

Es importante destacar la ausencia de la variable tiempo en estas tres metodologías citadas. Si no incorporamos la variable tiempo en la relación entre biocapacidad y demanda de recursos por la población, solo tenemos lectura de valores instantáneos que no ilustran de

manera clara cómo nuestros hábitos de consumo podrían poner en riesgo la continuidad de la humanidad.

Justin et al. (2008) detallan el framework para la metodología de la huella ecológica, evalúan la relación de la tierra de cultivo, tierras de pastoreo, zonas de pesca marina, zonas de pesca interior, tierras forestales e infraestructura con los recursos consumidos por la población. (p. 6)

De acuerdo a la información publicada por la *Global Footprint Network* en su sitio web, la curva de biocapacidad por persona que presenta una tendencia negativa, se interseca con la curva de huella ecológica por persona en el año 1975. Esto significa que la vida de un ciudadano promedio mexicano ya no es sostenible y la pregunta consecuente es ¿por qué hay gente viviendo en un país con un déficit de biocapacidad?, mejor aún: ¿es posible que la vida humana exista en un país con biocapacidad negativa? Esta misma situación crítica ocurrió en China el año 1964, mientras que en Sudáfrica ocurrió el año 1963.

Un caso contrario ocurre en Perú, la misma página de *Global Footprint Network* presenta una biocapacidad positiva para este país; si bien es cierto que la tendencia de la biocapacidad es una curva negativa que tiene tendencia a intersecar a la no muy positiva curva de huella ecológica en un tiempo no muy lejano, surgen las siguientes preguntas: ¿es posible que en un país con biocapacidad positiva la mayoría de sus ciudades no cuenten con agua potable durante muchas horas al día? y ¿un país con biocapacidad positiva puede tener muchas ciudades que vierten aguas residuales directamente a sus ríos?

Posiblemente, la información publicada en la página web antes citada tiene algún margen de error debido a la metodología diseñada o debido a los datos con los que se alimenta el modelo matemático; es necesario que la información sea de fácil lectura para la población.

Sin embargo, la población necesita tener certidumbre acerca del periodo en que la dinámica de la demanda de recursos podrá ser

soportada por la biocapacidad para hacer posible la vida y en base a esta información puedan asumir un compromiso de cambio en base a los sistemas de restauración más indicados para cada circunstancia. En este sentido, García Morales (2020) afirma que el hecho de no poder preveer un futuro es una situación de incertidumbre, equivalente a la imperfección del conocimiento sobre los procesos de la realidad. (p. 120)

Por lo tanto, es necesario que la población tenga información acertada de cuánto tiempo pasará para que se extinga la biocapacidad y por consiguiente, que nuestra propia existencia se encuentre en peligro, en caso no adoptemos una eficiente dinámica de demanda de recursos.

En el Apéndice B, se detallan las tres configuraciones posibles: tendencia al colapso sistémico de la biocapacidad, tendencia a la fatiga sistémica de la biocapacidad y tendencia a la continuidad sistémica de la biocapacidad.

### **1.1.2. Formulación del problema**

El problema general fue planteado para anticiparse a la extinción de biocapacidad del planeta o de un país específico en función del tiempo vivido por una o dos generaciones, es decir: en un mediano plazo.

El primer problema específico se ha establecido para analizar la relación existente entre los hábitos de la demanda de recursos por parte de la población, teniendo en cuenta factores como el funcionamiento gubernamental y el nivel de desarrollo humano.

A continuación, el segundo problema específico fue planteado para analizar la relación existente entre los principales sistemas de restauración de la biocapacidad que han sido diseñados por el ingenio humano.

En seguida, el tercer problema específico ha tenido el propósito estudiar las herramientas disponibles para desarrollar el modelo matemático.

### **A. Problema general**

¿Es posible construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad?

### **B. Problemas específicos**

- a. *¿Cuáles son los principales factores que definen la dinámica de demanda de recursos por la población?*
- b. *¿Cuáles son los principales sistemas de restauración para evitar la extinción de la biocapacidad?*
- c. *¿Qué herramientas y métodos se deben de utilizar para la construcción del modelo matemático?*

## **1.2. Determinación de objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- A. Analizar los principales factores que definen la dinámica de demanda de recursos por parte de la población.
- B. Analizar los principales sistemas de restauración para evitar la extinción de la biocapacidad.
- C. *Seleccionar* las herramientas y métodos necesarios para construir el modelo matemático.
- D. Aplicar el modelo matemático Remaining Path mediante la realización de pruebas con data a nivel nacional y mundial.

## **1.3. Justificación e importancia del estudio**

### **1.3.1. Justificación teórica**

El modelo matemático denominado: Remaining Path (camino restante, en castellano) determinó el tiempo límite de extinción de la biocapacidad. Para lograr este objetivo se incorporaron variables que no son consideradas en las metodologías más populares.

### **1.3.2. Justificación metodológica**

Con el desarrollo de esta metodología se puso a disposición de los profesionales de las ciencias ambientales y sociales una herramienta novedosa para anticiparse al alcance del impacto de sus proyectos

en un horizonte de tiempo que abarque más de una generación. Así mismo, se puso a disposición de los estudiantes una herramienta ambiental amigable, pero a la vez muy poderosa que muestra información muy valiosa acerca del impacto de nuestros hábitos de consumo de recursos en nuestra propia existencia.

### **1.3.3. Justificación práctica**

El modelo matemático construido Remaining Path fue programado en lenguaje Python para que pueda ser usado fácilmente por la población común para conocer el tiempo límite de extinción de la biocapacidad del planeta.

Si bien es cierto que muchas personas sabemos que tenemos una huella ecológica, no sabemos en realidad cuántos años más la biocapacidad del planeta podrá soportar nuestras acciones.

Se ayuda a conducir nuestra cultura ambiental hacia un horizonte sostenible porque estaremos en condiciones de anticipar posibles escenarios en los que nuestros hábitos de consumo podrían generar que la biocapacidad tenga una tendencia de fatiga sistémica o peor aún que se encuentre en un estado de colapso sistémico.

### **1.3.4. Justificación social**

Muchos países del mundo, en todo nivel de gobierno: local, regional y nacional, no cuentan con información que reduzca la incertidumbre acerca del tiempo límite de la extinción de la biocapacidad, la presente investigación ayudará a conocer esta información con el objetivo de proyectar un conjunto de acciones estratégicas que contribuyan al desarrollo económico y social de manera responsable y sostenible. Así mismo, esta información también es importante para las empresas privadas que buscan garantizar el retorno de sus inversiones en un periodo superior al corto plazo. Así mismo, las instituciones que protegen los ecosistemas y especies vulnerables necesitan proyectar la continuidad de la biocapacidad para asignar recursos suficientes para su protección. La población en general puede asumir con mayor

determinación el compromiso de protección ambiental, después de conocer el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

#### **1.4. Alcances y limitaciones de la presente investigación**

##### **1.4.1. Alcances**

- A. En esta investigación, mediante la construcción del modelo matemático Remaining Path, se aproximó a representar la realidad.
- B. A partir del modelo matemático Remaining Path, se escribió un programa en lenguaje Python para lograr calcular de manera automatizada el tiempo límite de extinción de la biocapacidad de cualquier país, siempre y cuando existan los inputs necesarios.
- C. Se aplicó el modelo Remaining Path tanto para Perú y para el mundo y se analizaron los resultados obtenidos.

##### **1.4.2. Limitaciones**

- A. Por la naturaleza de los modelos matemáticos, fue imposible considerar todas las variables existentes que definen la dinámica de demanda de recursos por la población.
- B. No se consideró la validación ni auditoría al modelo matemático.
- C. La información histórica publicada por National Footprint Accounts presenta datos demasiado sintetizados.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

La metodología de huella ecológica aporta mayor información cuando se refiere al resultado per cápita. Con el objetivo de proporcionar un sistema de decisiones para promover el desarrollo sostenible de Yulin, ciudad ubicada en el sureste de China, Jiang et al. (2019) evaluaron y analizaron de manera per cápita la huella ecológica, la carga ecológica y el impacto ecológico. Después de ejecutar una red neuronal basado en un algoritmo mejorado para la aplicación de la metodología de la huella ecológica, obtuvieron cuatro conclusiones: 1) el desarrollo de Yulin en el periodo 2016 – 2020 es insostenible, la huella ecológica per cápita aumentó y la biocapacidad ecológica disminuyó y presenta un déficit ecológico creciente; 2) en relación a la mejora de la eficiencia y precisión de la predicción, las redes neuronales de retro propagación basados en el algoritmo Artificial Bee Colony, son la mejor opción en comparación con las tradicionales redes neuronales de función de base radial; 3) el modelo propuesto está en condiciones de revelar las relaciones complejas y no lineales existentes entre los factores socioeconómicos y la presión ecológica.

En un estudio realizado en Rumania, Dumitran et al. (2019) compararon la huella ecológica del área urbano y la huella ecológica del área rural. Afirman que nuestro planeta no se encuentra en posibilidad de reponer los recursos que la humanidad demanda de la naturaleza. Los autores llevaron a cabo cuatro objetivos: 1) calcularon la huella ecológica de Rumania; 2) calcularon la huella ecológica per cápita de la población rumana; 3) compararon el resultado anterior con el promedio europeo; y 4) compararon la huella ecológica urbana y rural. Concluyen que Rumania está en condiciones de asegurar los servicios ecológicos porque no existen industrias contaminantes en el país y no porque haya un plan estratégico que se venga ejecutando; sin embargo, de acuerdo al cálculo que realizaron, la huella ecológica del país es superior al valor promedio mundial.

En busca del cálculo de la huella ecológica de Beijín, Guo et al. (2018) basaron su estudio en la productividad neta primaria y lo compararon con los modelos tradicionales. Los autores señalan que el método tradicional de la huella ecológica presenta deficiencias como la limitación de cálculo, un pesado centro artificial, función única y terreno único, es decir, la metodología no hace gran diferencia entre un terreno urbano y un terreno agrícola. Ante esta problemática, los autores proponen una mejora a la metodología de la huella ecológica, fundamentándola en la producción primaria neta; es abreviada como EF-NPP (Ecological Footprint algorithm based on Net Primary Productivity). Las principales variables del modelo en referencia son las tierras cultivables, tierras forestales, pastizales y agua. Los resultados en cuanto a la tendencia de la huella ecológica fueron similares en ambas metodologías; en cuanto a la capacidad de carga, los resultados de EF-NPP son 2005>2010>2000 mientras que los resultados de la metodología tradicional son 2000>2005>2010.

La relación entre el sobreconsumo de recursos naturales y el déficit comercial ecológico en China fue analizada en base a la huella ecológica por Gao & Tian (2015). Los autores desarrollaron un indicador de consumo excesivo de recursos basado en dos conceptos: déficit ecológico (huella ecológica de consumo - biocapacidad) y sobregiro ecológico doméstico (huella ecológica de producción - biocapacidad). En consecuencia, calculan el déficit comercial ecológico (huella ecológica de consumo – huella ecológica de producción). Los autores concluyeron que la huella de consumo de China superó su biocapacidad el año 1983; así mismo, la huella de producción superó la biocapacidad el año 1986. Respecto a la biocapacidad, concluyen que durante más de 20 años se ha mantenido relativamente estable. En relación al déficit comercial ecológico, indican que, no solo, China consume en exceso sus recursos, sino que también importa cada vez más recursos. Finalmente, los autores señalan que a pesar que China tiene la reputación de (fábrica mundial) es un importador neto en términos de huellas.

En relación al deterioro ambiental, Moros-Ochoa et al. (2022) enfocan la solución en la transformación de los patrones de producción y consumo. En

este sentido, los autores utilizaron una red neuronal para pronosticar el comportamiento de consumo y regeneración de tierras biológicamente productivas hasta el año 2030, usando data de la Global Footprint. El estudio contempla como variables de análisis las zonas de pesca, tierras de pastoreo, bosques, tierras de cultivo, suelo para edificaciones y huella de carbono. El estudio concluye que, a diferencia de otros continentes, Asia presenta resultados alarmantes; por lo tanto, recomiendan que es necesario estimular la conciencia ambiental y generar innovaciones empresariales que promuevan la creación de modelos de negocio sostenibles. Resaltando que el algoritmo detectó que en el año 2030 la demanda de suelo edificado alcanzará el punto de equilibrio en el que las necesidades y los bienes renovadores del mismo son similares cuando se calculan en densidad poblacional.

En Hungría, Nagypál et al. (2019) investigaron la relación existente entre el uso de agua y la huella hídrica de las granjas lecheras. Explican que las granjas lecheras, en su afán de conseguir productos ricos en proteínas, realizan modificaciones en la dieta de las vacas y consecuentemente, hacen uso de mayores cantidades de agua. También identifican que la industria ganadera y agrícola competirán por el uso de agua. Así mismo, afirman que el 98% de la huella hídrica de la industria de producción de animales se refiere a su alimentación y que el 87% de la huella hídrica proviene del agua de precipitaciones almacenadas en la tierra.

Respecto a la gestión de huella de carbono, Pourakbari-Kasmaei et al. (2020) proponen la reducción inteligente de las emisiones. Destacan que gran parte de las investigaciones solían considerar la generación como la principal fuente de emisiones, pero, en realidad la generación está impulsada por la demanda y en consecuencia, los consumidores deben de considerarse como los principales agentes responsables de las emisiones de carbono. En relación de la demanda, en el estudio plantean la viabilidad de la reducción del consumo de energía apoyando la política de carbono y participando en el ajuste del proceso de la demanda. Mientras que, en relación a la generación, una disminución de la demanda que reduzca el beneficio, aumentará las ganancias.

En la industria tecnológica, Wang et al. (2018) modelan un sistema estocástico para minimizar el costo de operación de los data center en Beijing, China. Definieron un modelo de minimización de huella hídrica que fue simulado en MATLAB para simular el error de pronóstico de la planificación diaria. Concluyen que el uso de energía limpia: eólica y fotovoltaica, muestran una notable reducción del consumo de agua.

En relación al desarrollo de una economía baja en carbono, Zhiyong Tian & Zheng (2010) proponen un sistema de análisis de huella de carbono de la industria logística que mediante una interfaz híbrida de inteligencia artificial y humana se comunica de manera bidireccional con el usuario, así mismo, este sistema es alimentado por otro sistema de análisis y procesamiento de datos, que a la vez alimenta a un sistema de administración de base de datos. A nivel de diseño, la unidad central comprende cuatro sistemas principales que traducidos al castellano son: 1) sistema de evaluación de huella de carbono de la industria logística; 2) sistema de optimización logística baja en carbono; 3) sistema base del modelo; finalmente 4) sistema base del método.

Es muy frecuente el uso de vehículos autónomos y su uso seguirá difundándose en todos los países. Reddy et al. (2020) compararon la huella ecológica de vehículos conducidos de manera autónoma y por humanos en las intersecciones con semáforos. Los autores afirman que el diseño de sistemas inteligentes de gestión de tráfico que hasta la actualidad son diseñados bajo dos criterios principales: maximización del rendimiento y la seguridad de los usuarios, deben de considerar también los factores ambientales y la salud humana para superar las situaciones de desperdicio de combustible y emisiones de gases tóxicos a la atmósfera. Evaluaron dos métodos de gestión de tráfico: el método Round-Robin que admite automóviles de forma consecutiva y el método SIMP que admite múltiples vehículos. Concluyeron que el método SIMP hace que los vehículos consuman menos combustible y, en consecuencia, que emitan menos gases tóxicos al ambiente; por lo tanto, la aplicación de este método hace que se reduzca la huella ecológica.

En base a un modelo tridimensional mejorado de la metodología de la huella ecológica, durante el periodo comprendido entre 2011 y 2020, Guo et al.

(2022) analizaron los cambios dinámicos en las series temporales y los patrones especiales del capital natural en la provincia de Qinghai, ubicada sobre la meseta del Tíbet en China. Los autores aplicaron el modelo de huella ecológica de tres dimensiones que es igual al producto de la amplitud de la huella ecológica por la profundidad de la huella ecológica. A su vez, la amplitud de la huella ecológica es igual a la biocapacidad, mientras que la profundidad de la huella ecológica es igual a uno más la división del déficit ecológico entre la biocapacidad. Las conclusiones fueron las siguientes: 1) La huella ecológica per cápita aumentó en aproximadamente 24% entre el 2011 y el 2020. 2) La profundidad de la huella ecológica aumentó en aproximadamente 9% durante el mismo periodo. 3) La región estudiada cuenta con un gran potencial de pastizales naturales y tierras forestales. 4) La profundidad de la huella ecológica fue mayor en el este y menor en el oeste de la región estudiada. 5) El consumo de energía, construcción ecológica, consumo social, población y el desarrollo económico afectan el aumento de la utilización del capital natural, mientras que el comercio exterior, el progreso científico y tecnológico y la contaminación ambiental afectan con impactos bajos en la utilización del capital natural de la región estudiada.

Para analizar la relación entre la huella ecológica, producto bruto interno, capital humano; entre otros, de Brasil y China Kumar Tiwari et al. (2022). Emplearon el método cuantil autorregresivo de retraso distribuido: QARDL (quantile autoregressive distributed lag). Los principales hallazgos reflejan que el consumo de energía hidroeléctrica reduce la huella ecológica en China y en cuantiles más altos en Brasil.

La creciente demanda de recursos también se ve reflejada en la demanda de energía. Ali et al. (2020) analizar los sistemas energéticos que se enfrentan al alza de precios, sobrecarga de la red, problemas ambientales, brechas de seguridad digital, entre otros. Para corregir esta situación, los autores proponen un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés) que consiste en una red de energía inteligente que está conformada por generadores distribuidos y respuestas de demanda que programar de manera óptima los electrodomésticos y así, reducir el costo energético y las emisiones de efecto invernadero. La estructura del proceso del EMS consta de cinco

capas: 1) la capa de usuarios, que comunica de manera bidireccional las preferencias de uso de electrodomésticos de los usuarios con la base de datos y que comunica de manera direccional las tarifas y reportes climatológicos con la base de datos; 2) la capa de base de datos, que se comunica de manera bidireccional con el EMS; 3) la capa de optimización, que se comunica de manera bidireccional con el enlace de comunicaciones; 4) la capa de comunicación, que se comunica de manera bidireccional con los electrodomésticos y las fuentes de energía; y finalmente, 5) la capa de servicio.

La estrategia de seguridad energética de China es analizada por Yu et al. (2020). China es el país que más energía demanda, el consumo de energía se basa principalmente en la energía fósil, que es de baja eficiencia energética. El año 2018 el uso de energías limpias representó el 22.1% del total. Así mismo, el consumo per cápita de energía se ubica en el puesto 63 a nivel mundial, sin embargo, la industria es la que demanda mayor energía: el 2017 demandó el 64% del total. Los principales desafíos son 1) controlar las emisiones de carbono, porque el 2013 China superó las emisiones de los países europeos juntos; 2) La contaminación del aire en las ciudades es alarmante, ocupa el puesto 69 de 72 países de la lista. En relación a la tercera revolución industrial, se promueve la integración de la nueva energía con la internet, fomentando el desarrollo del mercado eléctrico de las provincias y regiones chinas. Se resalta la gran importancia de la masificación de la energía eléctrica en todo el país, por su mejor desempeño frente a la energía generado por el carbón y el petróleo. Se busca que esta energía sea distribuida por una red inteligente. A nivel estratégico, se ha definido la responsabilidad política, económica y social del gobierno chino para atender la demanda de energía del país por ser el precursor de la economía, el desarrollo social y la seguridad nacional.

El desarrollo económico está relacionado a la disponibilidad de los recursos. Gabbi et al. (2021) estudiaron la relación entre el crecimiento económico y la biocapacidad. Los autores, analizan la sostenibilidad desde un punto sistémico y enfatizan la relación de los recursos naturales en el desarrollo de la sociedad, específicamente en el desarrollo económico. Así mismo,

sostienen que el indicador propuesto por la OCDE (Organisation for Economic Co-operation and Development), el cual evalúa el crecimiento del PBI ajustado por la contaminación, presenta dos problemas: 1) se centra en el crecimiento por abatimiento de la contaminación y, 2) la contaminación no mide la capacidad del ambiente en favor del crecimiento económico. En tanto, los autores proponen el indicador de crecimiento por biocapacidad: BAG (Biocapacity Adjusted Growth), el cual permite evaluar los patrones de desarrollo de un país en función de la sostenibilidad.

Las turberas son ecosistemas desarrollados en miles de años y cumplen una función importante en la retención de CO<sub>2</sub> bajo la superficie. En Escocia, Horsburgh et al. (2022), estudiaron los beneficios de la restauración de las turberas. Los autores afirman que para avanzar en el cumplimiento de los ODS, es importante que los países tengan en cuenta su demanda de recursos naturales y lo entiendan en el contexto de los recursos que están disponibles a nivel mundial. Así mismo, distinguen que, la metodología de la huella ecológica no considera dentro de los seis tipos de suelo a las turberas, aunque destacan que incluir esta variable en la metodología de la huella ecológica es un desafío porque debido a la escasez de datos que describan las turberas a nivel global. Los autores afirman que la biocapacidad de las turberas escocesas equivale al 2% de la biocapacidad total de Escocia. También, realizaron estimaciones de rentabilidad de la restauración de las turberas y concluyeron que brindan ahorros de gases de efecto invernadero.

En Perú se ubica una de las reservas de turberas más grandes del trópico. Schulz et al. (2019) estudiaron el uso, manejo y el significado cultural de las turberas de la amazonía peruana, en un área comprendida entre la Reserva Nacional Pacaya-Samiria y el Abanico del río Pastaza, en la región Loreto, al noreste del Perú. Los autores documentaron el punto de vista de la población de las comunidades de Nueva York y Nueva Unión, acerca de las turberas; estudiaron a la población indígena Urarina y a una población mestiza que existe desde hace 85 años, cuyos fundadores eran originariamente caucheros. Los autores señalan que las poblaciones locales no usan las turberas de manera directa, sino de manera indirecta, haciendo uso de los recursos vegetales, animales y de construcción que pueden encontrar, sin

olvidar la importancia cultural que tiene para la comunidad Urarina. Los autores afirman que ninguna de las dos comunidades tenía prácticas de manejo ambiental para las turberas, salvo la mancomunada decisión de limitar el uso del recurso ictiológico; sin embargo, debido a la inexistencia de alternativas de alimentación, muchos pobladores afirmaron haber incumplido la pesca restringida. Concluyeron que el manejo ambiental de las turberas es limitado porque condiciona a que los pobladores se encuentren alejados de estas áreas; así mismo, concluyeron que la pérdida de la cultura Urarina hace que las poblaciones no consoliden la migración geográfica para asentarse en nuevos territorios, esta tradición permitiría dotar de un tiempo prudente al ecosistema para que recupere sus niveles de biocapacidad.

Cheng et al. (2010) evaluaron el sistema de conservación del agua en Shanghái, China. Para esta investigación utilizaron cinco parámetros: sistemas de desarrollo de ahorro de agua, sistemas de recursos, sistemas ambientales ecológicos y sistemas sociales económicos. La configuración global de estos sistemas evaluó el estado de conservación del agua en el año 2005 y concluyó que el nivel de ahorro de agua en Shanghái sigue siendo bajo, con una puntuación de 64.89. A pesar de las medidas de ahorro de agua por los últimos gobiernos, la contaminación sigue incidiendo en la escasez de agua.

La industria de los sistemas de energía prestará especial atención a los compromisos económicos y de emisiones Pourakbari-Kasmaei et al. (2014) señalan que los efectos ambientales son una variable muy compleja para representar con modelos lineales. Los métodos tradicionales no pueden encontrar una solución aceptable para los sistemas a gran escala, mientras que los métodos metaheurísticos demandan mucho tiempo. Ante esta situación, los autores proponen una metodología para relacionar de manera eficiente la función objetivo de costos y la función objetivo de emisiones presentan inconvenientes porque los sistemas no funcionan en sus límites máximos. Para aplicar esta metodología se consideran tres funciones: la primera, es de orientación económica que encuentra la menor cantidad de costo para el sistema; la segunda, es orientada a las emisiones que busca la

menor cantidad de emisiones para el sistema y la tercera, orientada al compromiso, que fijará un compromiso mediante la metodología propuesta. El vínculo entre ecología y salud en los países del Medio Oriente y el Norte de África fue estudiado por Terhempa Iorember et al. (2022). Explican la importancia del capital humano y el uso de energía en esta región que se caracteriza por tener problemas ecológicos y conflictos transfronterizos. Los autores diseñaron un modelo para estimar los resultados de la variable salud, para tal fin sumaron las variables huella ecológica, biocapacidad, capital humano y consumo de energía, multiplicando cada una de estas por sus respectivos parámetros numéricos; finalmente se adiciona un término estocástico situado en el periodo comprendido entre 1990 y 2017. Los resultados obtenidos muestran que el uso de energía tiene un efecto negativo en los resultados de salud, es decir, el estado actual del uso de energía en los países de la región es insostenible.

La calidad de vida contemporánea está siendo afectada a causa de la degradación ambiental. Korkut Pata et al. (2023) utilizaron redes neuronales para pronosticar la biocapacidad y huella ecológica a nivel mundial hasta el año 2030. La premisa principal es que en lugar de limitar los patrones de consumo de la población o desarrollar tecnologías sofisticadas y costosas, la solución a la degradación ambiental está en la transformación progresiva de los patrones de producción y consumo. Los datos para la red neuronal se obtuvieron desde Footprintnetwork.org pero, al tratarse de información de una sociedad globalizada, requiere métodos sofisticados que permitan encontrar las tendencias de los 128 países. Se obtuvieron los siguientes resultados: 1) los bancos de peces tienen un gran potencial renovable en la región asiática, 2) en América del Sur y África, los pastos naturales ofrecen un gran potencial en la generación de productos agrícolas, 3) las tierras forestales se deterioran de manera progresiva y exponencial, especialmente en Asia, 4) las tierras de cultivo tienen un equilibrio entre huella ecológica y biocapacidad; 5) el suelo edificado genera grandes impactos en el desarrollo y la regeneración en otros territorios.

Una perspectiva interesante sobre cómo se interpreta la sostenibilidad desde la metodología de la huella ecológica fue planteada por Syrovátka (2020). De

acuerdo a la autora, la metodología de huella ecológica muestra que la biocapacidad territorial de algunos países presenta déficit o saldo negativo, lo cual implica (insostenibilidad); ante este escenario, considera que la huella ecológica no debe ser establecida como la metodología predeterminada para analizar la sostenibilidad. Así mismo, respecto al análisis de la sostenibilidad de un país, propone que se debería medir el (desempeño local) en relación a que los recursos internos no se agoten; y medir el (desempeño global) en relación a si el país contribuye al agotamiento de los recursos de otros países. Los datos publicados acerca de la biocapacidad y huella ecológica representan la situación del país, pero las poblaciones no se distribuyen de manera homogénea en sobre el territorio. En Japón, Hori et al. (2023), desarrollaron un método para representar la información de la huella ecológica y la biocapacidad a una resolución de un kilómetro cuadrado. Los autores advierten que los estudios no generan datos de alta resolución, es decir, son datos en resoluciones espaciales altas. Para tal fin, usaron dos enfoques, el enfoque ascendente calculó la huella ecológica de todos productos individuales demandados por una población y los promedió, mientras tanto, el enfoque denominado “de arriba hacia abajo” calculó la huella ecológica a nivel nacional y a continuación derivó las huellas subnacionales de acuerdo a las poblaciones locales. Al aplicar el método en Japón, los autores notaron que la huella ecológica per cápita evidenció grandes diferencias entre municipios de las mismas prefecturas. Así mismo, los autores notaron que los valores medio de la huella ecológica per cápita para todas las categorías de consumo fueron significativamente mayores para las familias unipersonales en comparación con las familias de más de dos integrantes. También encontraron que los valores altos de biocapacidad se se distribuyen ampliamente en las tierras de cultivos y urbanizadas ubicadas en áreas planas. Los autores recomiendan replicar en países asiáticos, que al igual que Japón, experimentan el excesivo consumo de recursos en áreas desarrolladas y la riqueza de recursos ecosistemas ubicados en áreas rurales. Para diseñar las medidas necesarias que eviten la pérdida de biocapacidad, es necesario contar con información que anticipe los posibles escenarios futuros. Moros-Ochoa et al. (2022), diseñaron un modelo de redes neuronales

para determinar el pronóstico de la biocapacidad y la huella ecológica a nivel mundial hasta el año 2030. De esta manera los autores pueden identificar tendencias para diseñar modelos de negocio sostenibles. La red neuronal trabajó con datos publicados por la Footprint Network. Los autores resaltan que las interacciones anuales entre países son altamente volátiles y puede obedecer a dinámicas dependientes de factores como son el crecimiento económico, exportaciones, entre otros. Para el análisis de la biocapacidad y la huella ecológica, los autores establecieron una red neuronal de secuencial de cuatro capas con 128, 64, 32 y 1 nodo cada una; como datos de entrada establecieron series de tiempo correspondientes a las hectáreas registradas en registros de 20 años.

Todas las poblaciones del mundo se interrelacionan con los recursos ambientales para generar el desarrollo de la sociedad. Precisamente, la condición de desarrollo sostenible de una determinada ciudad fue estudiada por Wiedmann & Allen (2021) en un trabajo que relacionó las huellas ambientales de las ciudades con los SDGs (Objetivos de Desarrollo Sostenible, en español). El estudio evaluó el panorama bibliográfico y se constató que el monitoreo de las SDGs en relación a los límites planetarios necesarios para las ciudades es un tema no muy estudiado. Los autores sostienen que las ciudades son los principales vectores o impulsores del consumo mundial de recursos: bienes y servicios; en tanto, afirman que es fundamental que las ciudades consideren sus impactos de consumo de recursos, los cuales se extienden mucho más allá de sus fronteras. Es así que, afirman que un gran desafío para evaluar la sostenibilidad de las ciudades se relaciona con los métodos utilizados para el evaluar el progreso y combinar los indicadores de los SDGs con las métricas de huella de una manera que sea comparable, intuitiva y fácil de comunicar.

Los países latinoamericanos están experimentando un proceso de desarrollo, este desarrollo es posible medirlo con el HDI (índice de desarrollo humano, en español). El trabajo publicado por Bilynkievycz dos Santos et al. (2017), presenta un modelo de pronóstico del HDI de los países de América Latina haciendo uso de la minería de datos. Los autores destacan que la ocurrencia de errores es común en grandes volúmenes de datos. Así mismo, afirman que

el HDI es un índice robusto que se caracteriza por presentar una gran previsibilidad y vulnerabilidad. La previsibilidad puede ayudar en la toma de decisiones a nivel gubernamental y las contradicciones entre los valores previstos y los valores reales pueden ayudar a tomar decisiones para sustentar las de cambios políticos y económicos.

El desarrollo económico se relaciona directamente con la demanda de recursos, a través de la industria o del consumo en general. Un modelo OLS (mínimos cuadrados ordinarios, en español) fue propuesto por Ahmed et al. (2021), en un estudio que relacionó el impacto del desarrollo económico con la sustentabilidad ambiental. Los autores sostienen que, en comparación con las sociedades tempranas, actualmente tenemos acceso a un estilo de vida más alto y también un nivel de ingresos más altos, entonces, para garantizar este estatus todos los actores o grupos de interés deben de buscar la sostenibilidad ambiental para que exista el equilibrio ecológico mundial. Así mismo, afirman que la huella ecológica se ha convertido en un indicador ambiental familiar para medir la sustentabilidad ambiental. Curva Kuznets Los autores. Los autores concluyen que existe una relación lineal positiva significativa entre el PBI per cápita y la huella ecológica, es así que el incremento en 1% del PBI per cápita afecta alrededor del 40,2% en el incremento de la huella ecológica en el subgrupo de tierras absorbentes de carbono. Mientras tanto, los subgrupos: tierras de cultivo, zonas de pesca, y productos forestales evidencian que existe una relación no lineal entre el PBI per cápita y la huella ecológica, siguen la curva de Kuznet. La investigación, muestra que la relación entre el crecimiento económico per cápita sobre la biocapacidad per cápita se representa con una curva en forma de U invertida de Kuznets: los autores afirman que una de las posibles razones es que con el aumento del crecimiento económico, también aumenta el apoyo a los movimientos favorables al medio ambiente.

La biocapacidad podría estar relacionada al nivel de percepción de corrupción. En Finlandia, Arminen & Menegaki (2019) estudiaron la relación entre la corrupción, el clima y el nexo entre energía, medio ambiente y desarrollo; para tal fin, utilizaron tres variables: PBI, consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>. Los autores señalan que la corrupción impacta en el

suministro y precio de energía por medio del fortalecimiento de los monopolios de proveedores de energía, sumado a la falta de regulación. Sostienen los autores que es muy probable que la corrupción no favorezca la eficiencia energética pero, destacan que, la literatura no ha examinado de manera constante la relación entre estas variables. Los resultados indican que la relación entre consumo de energía y PBI es bidireccional; y que, tanto el clima como las variaciones meteorológicas son mucho más determinantes a la hora de demandar energía, frente a los niveles de corrupción. Los autores concluyen que debido a la evidencia contradictoria entre el crecimiento de energía y el medio ambiente, hace necesario que se inicien investigaciones que relacionen el crecimiento económico, consumo de energía y contaminación. El estado de conservación de los bosques incide en la conservación de los ecosistemas y por lo tanto, de la biocapacidad. Muchos países aún no logran recuperar la cobertura arbórea perdida. Al respecto, Du et al. (2023) señalan que el cambio climático y el uso de la tierra han modificado la cobertura arbórea del planeta. Los autores realizaron el análisis de ganancia forestal y concluyeron que más del 60% de la superficie forestal ganada en el mundo corresponden a los resultados obtenidos por Rusia, Canadá, Estados Unidos, Indonesia y China. Mientras tanto, el estudio de los autores mostró que en América del Sur, la ganancia forestal es liderada por Chile y Brasil. Es importante señalar que aproximadamente la mitad de la ganancia forestal mundial ocurrió entre los años 2001 y 2010.

La dinámica de la vegetación terrestre tiene una relación directa con el sistema climático. En Beijing, China, He et al. (2021), estudiaron la relación entre los patrones globales de respuesta de la vegetación y la disponibilidad de agua superficial. Los autores sostienen que el sistema climático produce efectos significativos en la dinámica de la vegetación por medio del ciclo del carbono y del agua terrestre. Es así que, el estudio sugiere una fuerte relación entre dos variables: SSM (humedad superficial del suelo) y la VOD (profundidad óptica de vegetación). Los autores concluyeron que el tiempo de memoria de la vegetación tiende a ser más largo en biomas herbáceos, mientras que el tiempo de reacción de la planta es más largo en biomas con cubierta arbórea; es decir, existe una anticorrelación entre estas dos

variables. Esto significa que los biomas herbáceos podrían ser más vulnerables a las perturbaciones de las aguas superficiales durante los cambios climáticos. Así mismo, los autores explican que la anticorrelación encontrada podría explicarse por los efectos compensadores de la absorción de agua superficial y profunda de las raíces en biomas con diferentes funciones ecosistémicas.

La salud humana se vincula al consumo de agua de calidad, el agua de calidad garantiza salud, alimentos saludables, protección de cuencas hidrográficas, entre otros. En Malasya, los autores Akhtar et al. (2021) indican que la calidad del agua está relacionada con la salud humana, producción de alimentos, reducción de pobreza, entre otros, ante esta situación, los autores diseñaron una metodología para modificar el proceso para el cálculo del (WQI) índice de calidad de agua, para este fin, revisaron 46 índices de calidad del agua; el desafío principal en este proceso consistió en superar la rigidez, incertidumbre y eclipsamiento de los índices. El estudio se basó en los métodos MCDM (método de toma decisiones multicriterio), MACBETH (método de evaluación basado en categorías) y AHP (proceso de análisis jerárquico). Los autores recomiendan mejorar la credibilidad del indicador de calidad de agua cuantificando el nivel de incertidumbre del indicador así como un conjunto fijo de parámetros para aguas superficiales, subterráneas, aguas para fines domésticos, industriales y de riego agrícola.

El desarrollo sostenible y su relación con el agua fue estudiado por Bozorgzadeh & Mousavi (2023) en el contexto de Teherán, Irán, los autores enfocan la debilidad existente en óptima asignación del agua para apoyar las funciones económicas, sociales y ambientales, frente al crecimiento demográfico y la crisis del agua. En el trabajo de investigación, proponen un modelo de optimización para la asignación de agua intersectorial denominado WCGD (Water-constrained green development), este modelo trabaja con el indicador EAW (economically-allocable water) para asignar el agua restante después de la demanda efectuada para el agua potable, agua de saneamiento y ambiental. El objetivo de esta asignación es utilizar el agua restante como un bien económico que puede elevar el PBI en el sector agricultura, industria y servicios. Para tal fin, el modelo trabaja con los los siguientes parámetros:

coeficiente de autosuficiencia para los productos estratégicos y el coeficiente de mejora de consumo de agua; el resultado de ejecutar el modelo.

La gestión de los residuos que genera la demanda de recursos es un reto importante para los gobiernos. En España, Ndiribe (2023) identifica la problemática actual acerca de la demanda de recursos, es decir: la población mundial continua creciendo y al mismo tiempo aumenta el consumo de recursos y por tanto es inevitable que los desechos generados sean vertidos de manera indiscriminada en el medio acuático y terrestre. El modelo denominado NFWR (The Nature Fit Concept of Waste Reduction) se enfoca en el concepto ajuste natural de la reducción de los desechos generados; y propone una estructura de organización denominada EPCD (Extraction, Production, Consumption, Disposal) o componente cardinal, los cuales son: extracción, producción, consumo y eliminación. Es así que, la autora propone canalizar los desechos de los recursos demandados para que estos sean beneficiosos, aunque, se destaca que las plantas de conversión de residuos en energía (WEP, Waste-to-energy plants) aún no han sido adoptadas de la manera esperada. La autora señala ciertas debilidades en los inputs del modelo NFWR, específicamente: no todos los desechos se sintetizan en una fábrica y por tanto no se cuenta con la información de trazabilidad de todo el proceso, también señala que no todos los municipios tienen una gestión y fiscalización efectiva de las plantas industriales en el mundo.

Las áreas protegidas contribuyen a contener la tendencia a la extinción de muchas especies. En China, Zeng et al. (2023) evaluaron la red global de áreas protegidas para salvaguardar las especies en riesgo. Afirman que la creación y conservación de reservas naturales es esencial para proteger a muchas especies que son vulnerables a las actividades humanas que causan impactos dañinos al ambiente. Los autores encontraron que cerca del 70% de especies tienen baja representación en la áreas protegidas o se encuentran en reservas que están experimentando cambios en la legislación ambiental. Además, afirman que 107 especies podrían ser afectadas por la reducción de restricciones legales otorgadas a las reservas naturales. Los autores resultados obtenidos señalan que si se logra expandir en 1% la superficie terrestre para fortalecer las redes de reservas naturales, se podría preservar

los hábitats irremplazables de más de 1,191 especies vulnerables a la extinción. El análisis de los autores sugiere que se beneficiaría a una gran cantidad de especies vulnerables poniendo en marcha la restauración de los hábitats en áreas protegidas alrededor de los Andes tropicales, Afromontano oriental y en la región Indo-Birmana.

El auge de las industrias asiáticas está generando que las emisiones de CO<sub>2</sub> sean mayores en el hemisferio sur. Meng et al. (2023) indican que aconteció una redistribución de las actividades de producción desde los países del norte global, que comprende a los países desarrollados; hacia el sur global, que comprende a los países en desarrollo. Los autores señalan que los menores costos de producción de las fábricas de India y China incidieron entre el 75% y 84% de las emisiones netas de CO<sub>2</sub>. El estudio se realizó con la versión 11 de la base de datos de la Global Trade Analysis Project (GTAP) que incluyó 141 regiones y 65 sectores entre los años 2004 y 2017.

Las tecnologías de utilización de CO<sub>2</sub> han sido estudiadas por Shah et al. (2023), señalan que el aumento de las concentraciones en CO<sub>2</sub> propiciará el calentamiento global que generarán desastres naturales y patrones climáticos extremos, afirman que esta situación puede afrontarse poniendo en práctica las técnicas de recolección exitosa de CO<sub>2</sub> que sea rentable y sostenible. Los autores justifican que el avance lento de estas tecnologías puede deberse en parte a los riesgos e incertidumbres en cuanto a tecnología y economía. Señalan que la utilización del CO<sub>2</sub> puede ser diversificarse en: métodos de restauración mejorados (petróleo, gas y metano), conversión en combustibles (hidrógeno, metanol, metano, dimetil éter), productos químicos (úrea, polímeros, ácidos fórmico), mineralización, conversión biológica de CO<sub>2</sub> con algas o bacterias. Sin embargo se presentan los desafíos de producir productos con una reducción neta de emisiones de CO<sub>2</sub> durante su vida útil y producir productos de alta calidad a precios competitivos. Los autores señalan que el uso de CO<sub>2</sub> representa una opción rentable para utilizar colectivamente las emisiones de CO<sub>2</sub> para proporcionar valor económico para compensar los costos de captura de CO<sub>2</sub>.

Las economías de E7 (China, Turquía, India, Rusia, Brasil, Indonesia y México) están experimentando un crecimiento económico y de población.

Sarpong et al. (2023) señalan que la sostenibilidad ambiental está en peligro a causa de las emisiones CO<sub>2</sub> y afirman que la solución consiste en proporcionar una fuente de financiamiento para las iniciativas de energía limpia. Los impuestos pueden ser usados para internalizar los costos de contaminación. Así mismo, los autores proponen que para persuadir a los países E7 a que reduzcan sus emisiones es necesario que estos cuenten con políticas ambientales similares. Así mismo, destacan que el estudio realizado se enfocó en las economías E7 debido al rol que desempeñan en el desarrollo de la economía mundial y porque estos países pueden conducirse hacia un crecimiento verde siempre y cuando se implanten políticas tempranas. Los autores concluyen que el impuesto ambiental está causando un impacto positivo en el medio ambiente de las economías E7. Por lo tanto, añaden los autores, es necesario que cambiar a fuentes de energía renovables de aquellas que producen dióxido de carbono.

El uso de cocinas con combustible limpio reduce la contaminación ambiental y mejora la salud de las personas. En Bangladesh Jabin et al. (2022), estudiaron cómo la desigualdad social y la contaminación del aire doméstico influyen en los nacimientos. Los autores señalan la asociación entre la exposición de la madre gestante a la contaminación del aire por cocinar con combustibles de la biomasa y los resultados adversos en los partos y generaciones futuras. Los autores encuentran que el bajo peso al nacer se relaciona con el bajo nivel socioeconómico y en consecuencia, la presencia de una cocina ubicada en el interior de la vivienda. Así mismo, encontraron que el nivel socioeconómico modificó significativamente las asociaciones entre ubicación de la cocina y peso al nacer.

El modelo de las finanzas verdes hace énfasis en las soluciones ambientales. En China, Sun et al. (2023), estudiaron la relación entre el desarrollo de las finanzas verdes y el despliegue de energía renovable y el cambio climático en China. Utilizaron datos de 2010 al 2021 para examinar cómo el financiamiento verde que despliega la energía renovable influye en el cambio climático de China. Afirman que entre los países que han implementado políticas para combatir la amenaza del cambio climático, China ha puesto en marcha las siguientes: impuestos verdes, préstamos verdes, financiamiento verde,

innovación verde, empleos verdes y transporte verde, por lo que, los autores recomiendan que China debería intentar que sus sistema financiero verde sea más eficiente y atraer más capital privado a proyectos económicos verdes. Los resultados muestran que el financiamiento verde reduce la contaminación ambiental en China, siendo más efectiva en las regiones desarrolladas, por tanto, los autores sugieren que los legisladores Chinos deberían instituir políticas de incentivos en las regiones menos desarrolladas para que puedan avanzar fácilmente hacia el desarrollo sostenible.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Objetivos de desarrollo sostenible**

La existencia humana está condicionada a muchos factores, por ejemplo: ambiente benévolo, agua, alimento, entre otros. Al respecto, los puntos de vista son diversos y dependiendo de cada realidad pueden ser valorados más determinados factores.

Según la Organización Internacional del Trabajo (2017), a diferencia de los ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) que se centran en terminar con el hambre y la pobreza, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) también tienen en cuenta criterios sociales y económicos.

Esta diferencia es muy importante porque permite entender la real dimensión de la existencia humana: el alimento y la vivienda son provistos por el trabajo y el dinamismo económico de la oferta y demanda. Precisamente, la dinámica de demanda de recursos por parte de la población pretende garantizar la continuidad de la existencia humana bajo ciertos criterios de confortabilidad, según cada población; en la actualidad, esta demanda continúa creciendo y ahora estamos experimentando el déficit de la biocapacidad, posiblemente algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible no se puedan cumplir por este fenómeno.

En ese sentido, se consideró el Marco de indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible Naciones Unidas (2018) como una guía para contrastar los indicadores propuestos en esta investigación;

cabe mencionar que estos objetivos serán contrastados desde la perspectiva ambiental. Estos son los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible:

- A. Poner fin a la pobreza, este objetivo busca garantizar que todas las personas, especialmente las personas en condiciones de pobreza, tengan acceso a los recursos mínimos para poder vivir. La extinción de la biocapacidad pondría en peligro este objetivo.
- B. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible, respecto a este objetivo, si extinguimos la biocapacidad del planeta, los efectos más catastróficos serán relacionados a la alimentación porque los terrenos para agricultura están siendo utilizados para edificación, el cambio climático pondrá en peligro la pesca, entre otros.
- C. Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades, la vida sana se garantiza con un ambiente armonioso que es el resultado de la saludable biocapacidad. Promover el bienestar definitivamente involucra una atmósfera si gases de efecto invernadero, con acceso a agua y alimentos. Está claro que la cobertura sanitaria universal es muy necesaria pero este punto no pertenece al alcance de esta investigación.
- D. Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos, este objetivo es muy importante para que muchas de las estrategias planteadas en esta investigación puedan ser adoptadas por la población en general.
- E. Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas, en muchas sociedades las mujeres y niñas no tienen las mismas oportunidades para acceder a educación y a empleo. Con igualdad de género, la enseñanza de madres a hijos puede hacer que la demanda de recursos sea más responsable. El empoderamiento de las mujeres y niñas es esencial para forjar lideresas que promuevan el cuidado del ambiente.

- F. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, este objetivo es primordial y coincide con los indicadores que se plantearon en esta investigación. Posiblemente estamos viviendo cerca al tiempo límite de la extinción de la biocapacidad y las ciudades con estrés hídricos podrían ser la manifestación de esta afirmación.
- G. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos, el acceso a energías limpias contribuye a minimizar el déficit de la biocapacidad.
- H. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo, sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos, este objetivo tiene mucha relación con esta investigación. Es necesario que el crecimiento económico sea sostenible, tenemos que evitar la demanda descontrolada de los recursos para evitar la extinción de la biocapacidad.
- I. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación, la industria de la construcción demanda demasiados recursos, por ejemplo, la arena y piedras se obtienen realizando trabajos de dragado en río, la madera es obtenida de los bosques, el agua usada en el proceso de construcción muchas veces es potable. Este objetivo es muy importante porque la industria es sostenible evitará la extinción de la biocapacidad.
- J. Reducir la desigualdad en los países y entre ellos, la dinámica de demanda de recursos es muy diversa entre ciudades y entre países. Generalmente las poblaciones que más recursos demandan, obtienen estos recursos de las poblaciones que menos demandan y el proceso para obtener estos recursos puede ser altamente contaminante.
- K. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, este objetivo es muy importante porque así se evitan que las poblaciones asentadas en tierras no destinadas para este fin pongan en riesgo los

ecosistemas cercanos para dar solución a sus necesidades domésticas: redes de alcantarillado improvisadas que evacúan en ríos, o botaderos clandestinos de basura.

- L. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, la reducción de desechos mediante una producción más limpia, acciones de reciclado y reutilización de materiales en la industria en general evita la demanda irracional de recursos. Estas acciones ayudan a evitar que la biocapacidad presente una tendencia a la extinción.
- M. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, este objetivo busca combatir una de las amenazas contemporáneas más letales que pueden poner en riesgo nuestra propia existencia. Al respecto, en esta investigación coincidimos con anticiparnos al límite de la extinción de la biocapacidad para evitar poner en riesgo nuestra existencia. El cambio climático afecta a todos los países al igual que el déficit de la biocapacidad, por lo tanto, es necesario tomar acciones inmediatas.
- N. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible, los océanos son fuente de alimento para la humanidad. La pesca ilegal e indiscriminada de especies pone en peligro la continuidad de muchas especies marinas y de toda la cadena alimentaria relacionada. También, muchas actividades industriales ponen en riesgo la continuidad de la vida en el mar, por ejemplo: el derrame provocado en el Golfo Pérsico en 1991 o el derrame del Golfo de México en 2010. Estos acontecimientos ponen en riesgo la biocapacidad y si se producen con frecuencia, causaremos un déficit en la biocapacidad.
- O. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres..., este objetivo busca evitar el uso incorrecto de los ecosistemas terrestres. El uso inadecuado de tierras es causante de inundaciones, sequía o desertificación y por consecuencia, de pérdida de biodiversidad y biocapacidad. Las

tareas de conservación y reforestación evitan la extinción de la biocapacidad

- P. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible..., la institucionalidad afirmada en los países, el estado de derecho, la eficacia y autonomía de las instituciones es muy importante para que las políticas y legislación vigente sea ejecutada. El desarrollo sostenible es indispensable para la garantizar la continuidad de la biocapacidad.
- Q. Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible, este objetivo es muy importante para evitar la extinción de la biocapacidad. Todas las estrategias necesitan de la cooperación de todas las naciones a nivel financiero, tecnológico y comercial. Es importante que a nivel macroeconómico y microeconómico, las naciones alcancen cierta estabilidad para que las políticas ambientales sean aplicadas de manera suficiente.

### **2.2.2. Indicadores ambientales ILAC**

La siguiente estructura de indicadores ambientales fue de utilidad para contrastar la propuesta de los indicadores que definimos en esta investigación.

La Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible, PNUMA (2004), definió una serie de indicadores ambientales que permitan monitorear el avance de las metas establecidas. Estos indicadores ambientales están clasificados en seis grupos principales:

- A. La diversidad biológica, es un indicador que buscar controlar cuatro parámetros fundamentales: 1) el aumento de la superficie boscosa, 2) el territorio bajo áreas protegidas, 3) recursos genéticos, así como la distribución equitativa de los beneficios; y 4) la diversidad marina.

Se puede entender que PNUMA (2004), enlaza los primeros tres parámetros para identificar la diversidad biológica, el tercer parámetro está enfocado a proteger el principio activo de distintas

plantas medicinales usadas por los pueblos originarios con el fin de evitar la (biopiratería). El cuarto parámetro puntualiza en los ecosistemas marinos y costeros.

Es necesario distinguir que la diversidad biológica, como indicador ambiental, también debe procesar datos acerca de la fauna y también en la pérdida de bosques para el uso agrícola que acontece en muchos países latinoamericanos.

- B. La gestión de recursos hídricos, se enfoca en cuatro parámetros: 1) suministro de agua, 2) manejo de cuencas, 3) manejo marino costero y recursos; y 4) mejorar la calidad de las aguas terrestres. PNUMA (2004), no hace una distinción entre agua potable y aguas de uso industrial para el establecer el primer parámetro. Respecto al segundo parámetro, está claro que se relaciona con el primer parámetro y es muy importante controlar información de la disponibilidad del agua desde la gestión de las cuencas hidrográficas. El tercer parámetro debería estar relacionado con el tercer y cuarto parámetro del indicador ambiental anterior. Finalmente, el cuarto parámetro procesa datos en relación a la calidad del agua considerando la disminución de descargas contaminantes; este parámetro debería estar enlazado directamente al primer y segundo parámetro.
- C. La vulnerabilidad, asentamientos humanos y ciudades sostenibles, es un indicador que reúne siete parámetros: 1) ordenamiento territorial, 2) áreas afectadas por procesos de degradación, 3) contaminación del aire, 4) contaminación del agua, 5) desechos sólidos, 6) vulnerabilidad ante los desastres antropogénicas, así como aquellos causados por los fenómenos naturales; y 7) vulnerabilidad y manejo de riesgos.

Es importante destacar que PNUMA (2004), relaciona los dos primeros parámetros como controles del cambio de uso del suelo por diversos motivos como la expansión de agricultura, minería, entre otros. El tercer parámetro controla el crecimiento de la flota vehicular y las emisiones de CO<sub>2</sub>. El cuarto parámetro es muy

importante, aunque debe ser manejado de una manera estratégica porque se evidencia que es repetitivo y fomenta la duplicidad de recursos de análisis. El quinto parámetro está relacionado al primer parámetro y se entiende que tiene por objetivo controlar la gestión adecuada de los recursos en una población. Los dos últimos parámetros se relacionan para controlar la mitigación de riesgos que pueden ser ocasionados por omisiones de seguridad al momento de asentar poblaciones y el impacto de los fenómenos naturales estacionarios.

- D. Los temas sociales que incluyen la salud, inequidad y pobreza, es un indicador que analiza tres parámetros: 1) salud y ambiente, 2) ambiente y generación de empleo; y 3) pobreza e inequidad.

PNUMA (2004), relaciona los tres indicadores como causal de muchas acciones relacionadas a la pobreza. Muchas poblaciones se asientan en lugares que no ofrecen las condiciones de un ambiente saludable. El segundo y tercer indicador controlan las actividades industriales ilegales en las que las personas en pobreza trabajan: minería ilegal o tala ilegal de bosques.

- E. Los aspectos económicos incluyendo la competitividad, el comercio y los patrones de producción y consumo: 1) energía, 2) producción más limpia; y 3) instrumentos económicos.

En relación a la energía, PNUMA (2004), propone indicadores que controlan el acceso a energía y el uso de energías limpias. Es necesario promover el uso racional de la energía doméstica o industrial. La industria de generación hidroeléctrica puede causar impactos severos al momento de generar represas. Las redes de distribución de energía a veces cruzan zonas vulnerables.

- F. Los aspectos incluidos: 1) educación ambiental, 2) formación y capacitación de recursos humanos, 3) evaluación e indicadores; y 4) participación de la sociedad.

Es importante notar que PNUMA (2004) define cuatro indicadores que en conjunto promueven la educación de la sociedad para que los compromisos ambientales sean asumidos con seriedad y de

manera voluntaria. Estos indicadores son muy importantes para que la puesta en marcha de cualquier política ambiental sea satisfactoria. En muchas sociedades, la falta de educación ambiental hace que las poblaciones tomen decisiones apresuradas sin obtener ningún beneficio real.

### 2.2.3. La biocapacidad

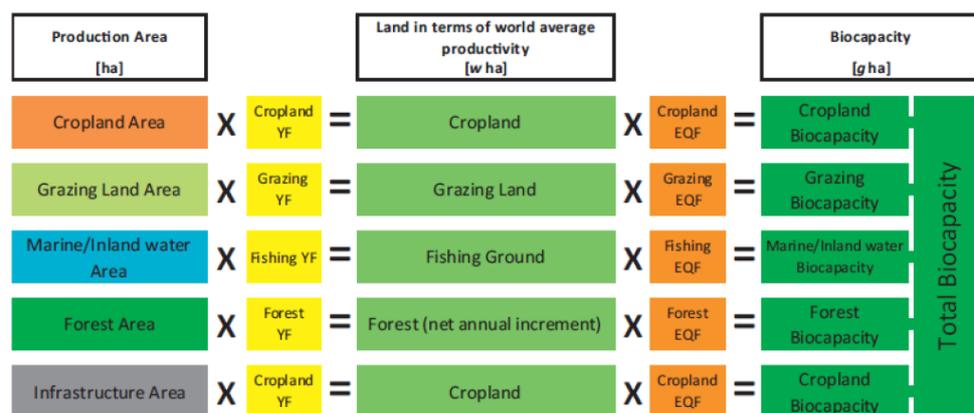
La biocapacidad es una variable importante que se usó en la presente investigación, para tal fin, el documento *Working Guidebook to the National Footprint Accounts* Lin et al. (2018), expone la metodología a seguir para calcularla.

De acuerdo a Lin et al. (2018), todos los demás tipos de uso de la tierra tienen un cálculo de biocapacidad correspondiente a excepción de una cifra de biocapacidad para la absorción de carbono. En el caso de las tierras de cultivo, la biocapacidad es igual a la huella de producción porque el proceso de producción está definido por el uso humano.

El *framework* propuesto por Lin et al. (2018) considera el área de producción (expresado en el promedio de hectáreas nacionales: *nha*) y la tierra en términos de promedio de productividad anual (expresado en el promedio de hectáreas mundiales: *wha*) para calcular la biocapacidad total (expresado en hectáreas globales: *gha*).

**Figura 1**

*Framework para calcular la biocapacidad del mundo*



Fuente: Global Footprint Network (Lin et al., 2018), publicado con el título (The framework of the National Footprint Accounts)

De acuerdo a Lin et al. (2018), la biocapacidad es medida en hectáreas globales (gha). El cálculo de la biocapacidad de un determinado tipo de uso de la tierra ( $BC$ ) se obtiene del producto del área de un determinado tipo de uso de la tierra dentro de un país ( $A$ ) por el factor de producción de un determinado tipo de uso de la tierra dentro de un país ( $YF$ ) por el factor de rendimiento intertemporal de un tipo de uso de la tierra dado para ese año ( $IYF$ ) por el factor de equivalencia para un tipo de uso de la tierra dado ( $EQF$ ). Es decir, la biocapacidad es:  $BC = A * YF * IYF * EQF$ .

Así mismo, Lin et al. (2018) señala que la biocapacidad hace referencia a la cantidad de áreas de tierra y agua biológicamente productivas disponibles dentro de los límites de un país determinado. La biocapacidad del suelo edificado existe, aunque el suelo edificado no genera recursos, porque los edificios y la infraestructura ocupan la biocapacidad del suelo que cubren. La huella de carbono no tiene la biocapacidad porque se entiende como una demanda de biocapacidad de las tierras forestales. Se considera seis variables: 1) tierras de cultivo, 2) tierras de pastoreo, 3) zonas de pesca marina, 4) zonas de pesca en aguas continentales, 5) suelos forestales; y 6) infraestructura.

#### **2.2.4. Factores de rendimiento**

De acuerdo a Lin et al. (2018), para calcular la biocapacidad es necesario incorporar los factores de rendimiento. Estos reflejan la productividad relativa de las hectáreas de tierra nacionales y mundiales de un determinado tipo de uso. Se considera seis variables: 1) tierras de cultivo, 2) tierras de pastoreo, 3) zonas de pesca marina, 4) zonas de pesca en aguas continentales, 5) suelos forestales; y 6) infraestructura.

Mientras tanto, según Lin et al. (2018), el cálculo de los factores de rendimiento para un determinado tipo de uso de la tierra ( $YF_N^t$ ) se obtiene al dividir el rendimiento para un determinado tipo de uso de la tierra dentro de un país ( $Y_N^t$ ) entre el rendimiento promedio mundial para un tipo de uso de la tierra ( $Y_W^t$ ). Es decir,  $YF_N^t = Y_N^t / Y_W^t$ . El

resultado obtenido es expresado en unidades de promedio de hectáreas mundiales: (*wha*).

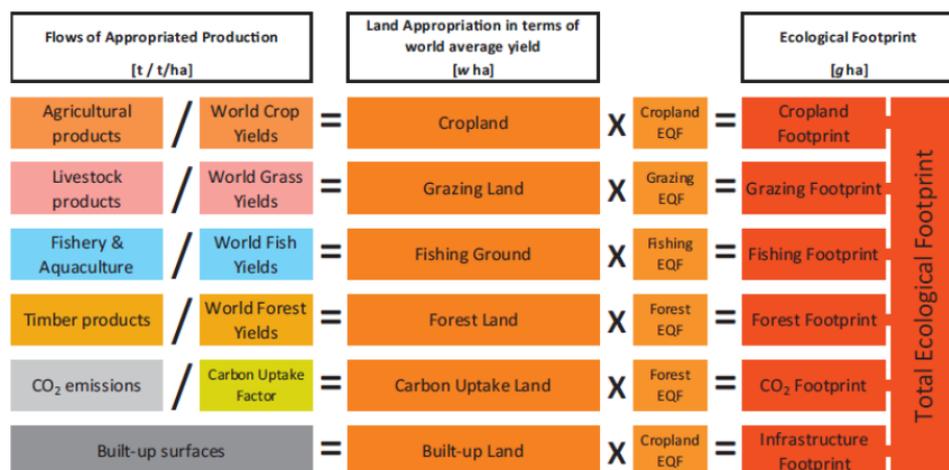
### 2.2.5. La huella ecológica

Se consideró el documento *Working Guidebook to the National Footprint Accounts* de Lin et al. (2018) como una metodología de referencia para contrastar la propuesta metodológica de esta investigación. En consecuencia, establecemos los conceptos de huella ecológica y la dinámica de recursos por la población como como dos conceptos cercanos, pero no equivalentes.

El *framework* propuesto por Lin et al. (2018) considera el flujo de producción y la asignación de tierras en términos de promedio de producción anual para calcular la huella ecológica total. La huella ecológica se mide en hectáreas globales (gha). El cálculo de la huella ecológica de consumo asociada a un producto o residuo ( $EF_C$ ) se obtiene sumando la huella ecológica de producción asociada a un producto o residuo ( $EF_P$ ) con la huella ecológica de las importaciones asociadas a un producto o residuo ( $EF_I$ ) menos la huella ecológica de las exportaciones asociada a un producto o residuo ( $EF_E$ ). Es decir,  $EF_C = EF_I + EF_P - EF_E$ .

**Figura 2**

*Framework para calcular la huella ecológica*



Fuente: Global Footprint Network (Lin et al., 2018), publicado con el título (The framework of the National Footprint Accounts)

A continuación, la estructura de las dimensiones de la metodología:

- A. Huella ecológica de tierras de cultivo: representa la cantidad de tierra agrícola necesaria para cultivar los alimentos para consumo humano y para alimento de ganado, es decir: productos agrícolas, alimento para animales de mercado, pastos cultivados utilizados como alimento para el ganado, entre otros. En tanto, la huella ecológica de las tierras de cultivo y la huella ecológica de pastoreo tienen relación entre sí, debido a que una mayor alimentación de los cultivos puede reducir la demanda de capacidad de pastoreo. Considera cuatro variables: 1) productos de cultivo, 2) cultivo en ganadería doméstica, 3) cultivo en ganadería comercial; y 4) cultivo en pescado, Lin et al. (2018).
- B. Huella ecológica de tierras de pastoreo: de acuerdo a los autores el cálculo de esta huella es más compleja, representa la demanda de tierras de pastoreo para alimentar al ganado y la demanda incorporada de tierras de pastoreo en bienes comercializables. En esta huella se estiman los requisitos totales de alimentación de la producción ganadera y los requisitos de energía derivados de alimentos concentrados, cultivos forrajeros y residuos de cultivos. Considera dos variables: 1) pastoreo doméstico y 2) ganado de pastoreo, Lin et al. (2018).
- C. Huella ecológica de zonas de pesca: representa la demanda de la industria pesquera de los ecosistemas acuáticos como el área de superficie de mar requerida para soportar de manera sostenible pesca de un país. Considera cuatro variables: 1) pesca marítima, 2) pesca en aguas continentales, 3) piscicultura; y 2) materias primas, Lin et al. (2018).
- D. Huella ecológica de suelos forestales: representa la demanda de los productos de los bosques del mundo. Para calcular la huella ecológica de los productos forestales, las cosechas de madera se comparan con las tasas netas de crecimiento anual de los bosques del mundo. Se compone de dos tipos primarios: madera utilizada como combustible; y madera y pulpa utilizadas como materia

prima. Considera cuatro variables: 1) productos derivados de madera y 2) combustible de madera, Lin et al. (2018).

E. Huella ecológica de tierras de absorción de carbono: representa el área de tierra forestal para capturar las emisiones de dióxido de carbono generadas por la industria y actividades humanas en general. Considera cuatro variables: 1) emisiones de combustibles fósiles, 2) otras fuentes, 3) electricidad comercializada; y 4) transporte internacional, Lin et al. (2018).

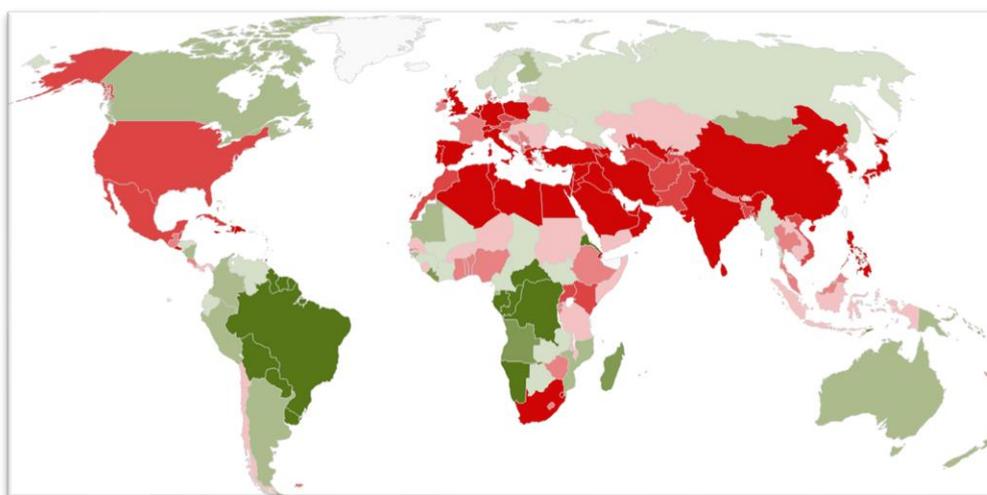
F. Huella ecológica de suelo edificado: representa el área de suelo bioproductivo que ha sido físicamente ocupado por actividades humanas. Se calcula el área de suelo de infraestructura necesaria para la vivienda, el transporte y la producción industrial. Se asume que el área de infraestructura cubre antiguas tierras de cultivo y aplican los factores de rendimiento y equivalencia para tierras de cultivo, *Lin et al. (2018)*.

#### 2.2.6. Reportes de huella ecológica

En la Figura 3, se muestran en color rojo los países con déficit de biocapacidad, mientras que, en color verde se observan los países con reservas ecológicas.

**Figura 3**

*Déficit y reserva de biocapacidad en el mundo - 2018*



Fuente: Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

**Figura 4**

*Países con déficit de biocapacidad - 2018*

COUNTRIES WITH BIOCAPACITY DEFICIT	
PERCENTAGE THAT ECOLOGICAL FOOTPRINT EXCEEDS BIOCAPACITY	
Singapore	10,400%
Réunion	2,540%
Israel	2,440%
Barbados	2,030%
Cyprus	1,770%
Bahrain	1,660%
Kuwait	1,480%
United Arab Emirates	1,470%
Qatar	1,450%
Saudi Arabia	1,110%

Fuente: Adaptado de la Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

Una relación de los países con déficit de biocapacidad se muestra en la Figura 4. Se observa que Singapur es el país con mayor déficit de biocapacidad, unas cuatro veces superior al déficit de biocapacidad que tiene la isla de La Reunión en el océano Índico. Es importante distinguir que los países que lideran la tabla de déficit de biocapacidad, son países con la menor extensión de territorio.

#### Figura 5

*Países con reservas de biocapacidad - 2018*

COUNTRIES WITH BIOCAPACITY RESERVE	
PERCENTAGE THAT BIOCAPACITY EXCEEDS ECOLOGICAL FOOTPRINT	
French Guiana	4,810%
Suriname	2,520%
Guyana	2,030%
Gabon	869%
Congo	754%
Uruguay	641%
Central African Republic	524%
Bolivia	358%
Brazil	233%
Paraguay	228%

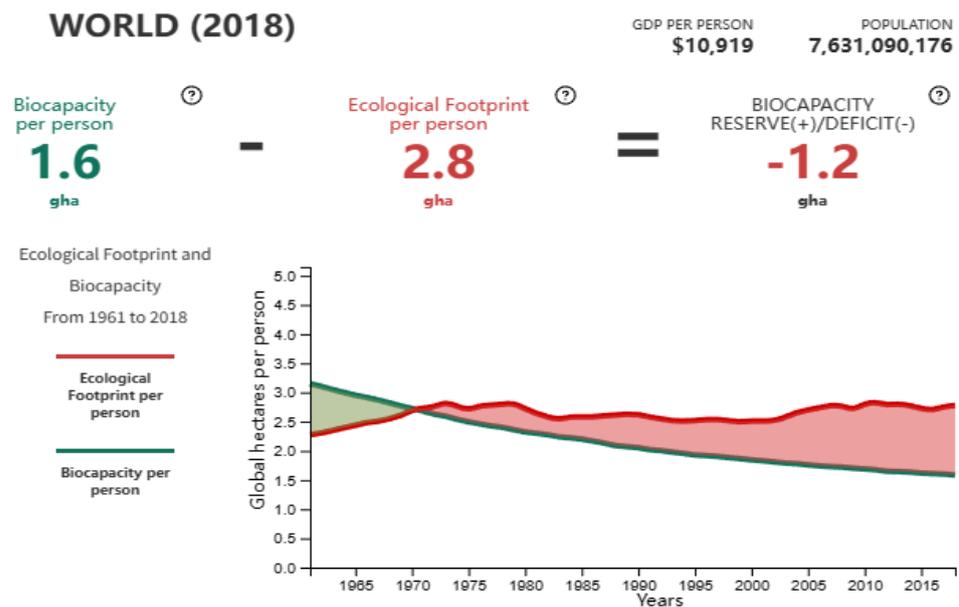
Fuente: Adaptado de la Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

La Figura 5 muestra una lista de los países con mayores reservas de biocapacidad. Se observa que la Guyana Francesa es el país con mayor reservas de biocapacidad, casi dos veces más que el segundo

país de la tabla: Surinam; en tercer lugar, se ubica Guayan. Es importante distinguir que los países que lideran la tabla de déficit de biocapacidad se ubican juntos, al norte de Brasil y al este de Venezuela, en las costas del océano Atlántico: países de pequeño territorio. Nótese que, siete de los diez países con mayores reservas de biocapacidad del mundo, están ubicados en América del Sur.

**Figura 6**

*Huella ecológica y biocapacidad del mundo en el 2018*



Fuente: Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

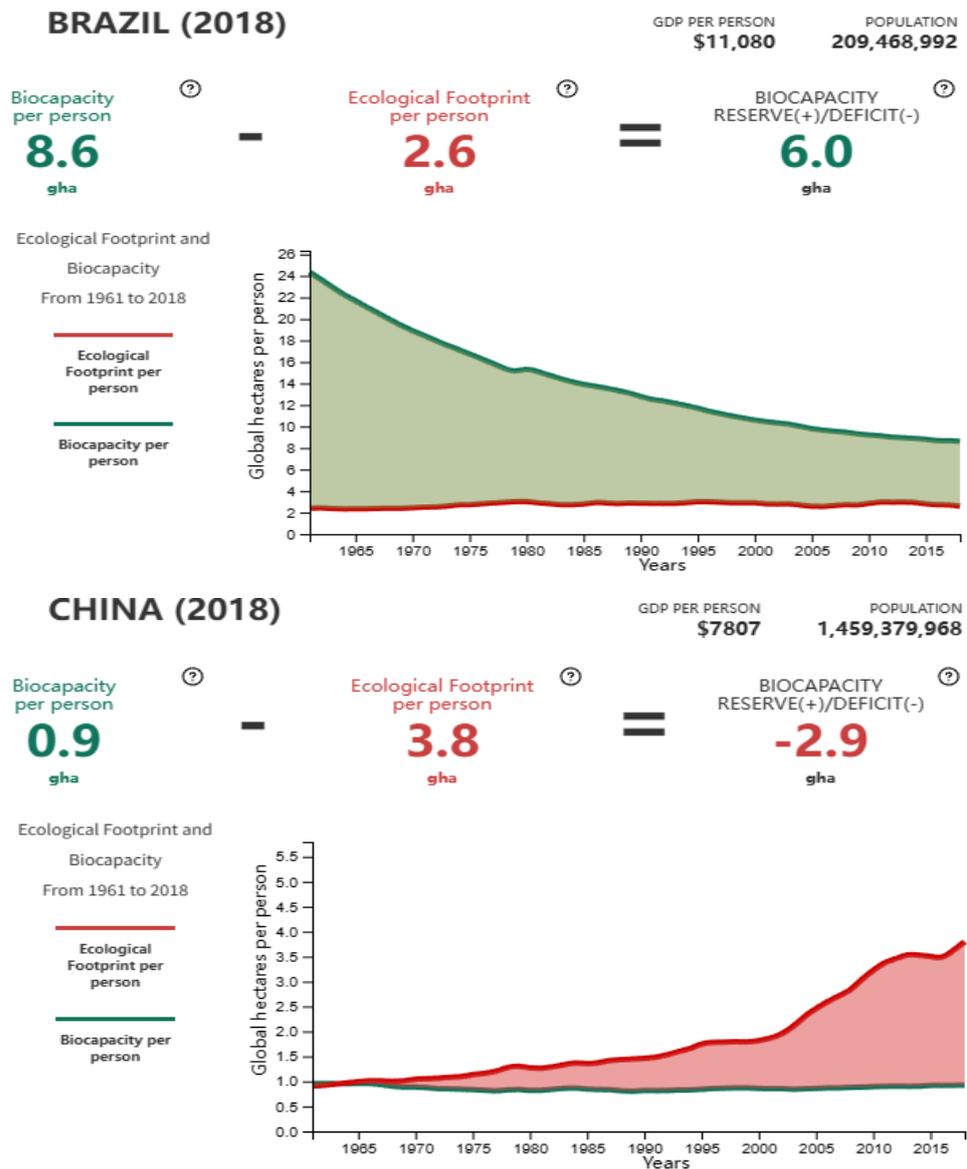
La Figura 6 muestra las curvas de la huella ecológica per cápita (igual a 2.8 hectáreas globales) en relación con la biocapacidad per cápita (igual a 1.6 hectáreas globales) a nivel mundial. De la diferencia de estos datos, se obtiene que el déficit de biocapacidad per cápita es de 1.2 hectáreas globales; es importante distinguir que el año 1971 las curvas de huella ecológica y biocapacidad se intersecan, es decir, la diferencia de ambos datos fue igual a cero. Es posible entender que a partir del año 1971 la biocapacidad del mundo era menor a huella ecológica del mundo.

El caso de Brasil se aprecia en la parte superior de la Figura 7. La huella ecológica per cápita (igual a 2.6 hectáreas globales) es cercana al promedio mundial, mientras que la biocapacidad per cápita (igual a 8.6 hectáreas globales) es aproximadamente cinco veces al promedio

mundial. De la diferencia de estos datos, se obtiene que las reservas de biocapacidad per cápita de Brasil es de 6.0 hectáreas globales, cinco veces el promedio mundial, aunque, la curva de biocapacidad presenta una tendencia negativa.

**Figura 7**

*Huella ecológica y biocapacidad de Brasil y China en el 2018*



Fuente: Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

En la parte inferior de la Figura 7, se observa qué acontece en China. La huella ecológica per cápita (igual a 3.8 hectáreas globales) es aproximadamente superior en 60% al promedio mundial, mientras que la biocapacidad per cápita (igual a 0.9 hectáreas globales) es

aproximadamente la tercera parte del promedio mundial. De la diferencia de estos datos, se obtiene que el déficit de biocapacidad per cápita de China es igual a 2.9 hga, aproximadamente siete veces el promedio mundial. El año 1965 las curvas de huella ecológica y biocapacidad se intersecan, es decir, la diferencia de ambos datos fue igual a cero. A partir del año 1965 la biocapacidad del China era menor a huella ecológica del mundo.

### **2.2.7. Modelo matemático**

De acuerdo a Kalman (2023), el término modelo hace referencia a la idea de simplificar o reducir en escala; teniendo en cuenta la naturaleza cíclica del desarrollo y el uso de los modelos matemáticos. Indica también que el propósito de un modelo matemático es predecir el futuro de un problema mediante la recopilación de datos. Es así que, los modelos matemáticos pueden ser perfeccionados hasta lograr resultados de alta precisión. (p. 6)

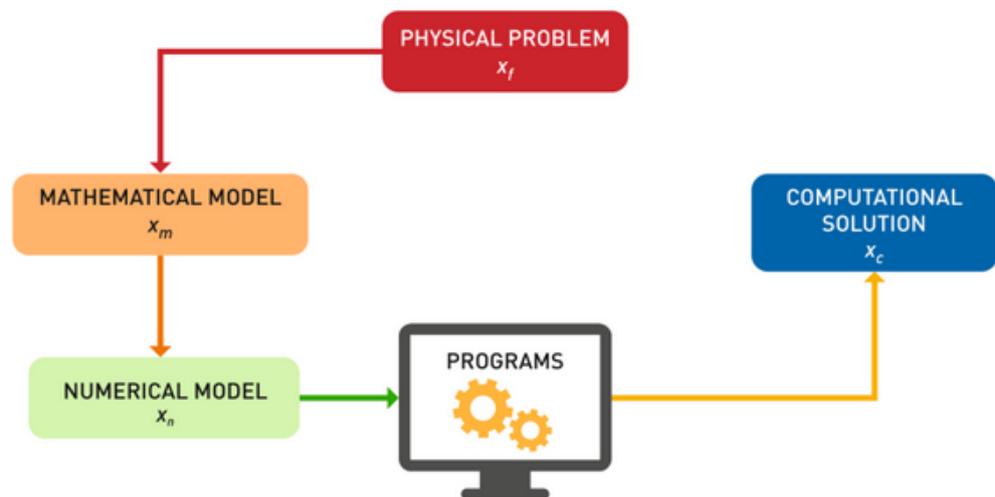
Para Quarteroni & Gervasio (2020), las interacciones existentes en el mundo real pueden describirse mediante fórmulas, funciones y ecuaciones matemáticas. El modelado matemático es un proceso que busca traducir problemas del mundo real en problemas matemáticos: es un proceso que surge de un problema real de interés práctico. Sin embargo, intentar resolver un modelo matemático puede resultar muy complicada o incluso imposible con métodos manuales. Esta condición se debe a dos factores: el primer factor implica que la fórmula identificada necesita de una gran cantidad de cálculo que podría llegar a tardar muchos años, el segundo factor, que es el más común, es que no podemos escribir una fórmula para solucionar el problema. (p. 2)

De acuerdo a Kalman (2023), existen tres tipos de métodos para construir un modelo matemático: numéricos, gráficos y teóricos. Los métodos numéricos manipulan directamente los datos en una tabla para comprender las relaciones existentes en ese conjunto de datos. Mientras tanto, los métodos gráficos utilizan representaciones gráficas para ilustrar y comunicar las relaciones existentes en un

conjunto de datos, a través de nuestra comprensión visual podemos entender la información representada en una tabla. Los métodos teóricos son conocidos también como métodos analíticos o simbólicos; combinan herramientas de ambos métodos: de los métodos numéricos utilizan los procesos de cómputo matemático y de los métodos gráficos hacen uso de los procesos matemáticos gráficos; este método utiliza variables, álgebra y un entendimiento sólido de las herramientas de las que dispone las matemáticas (p. 2) Como se muestra en la Figura 8, el proceso de un modelo matemático surge cuando un problema físico necesita ser solucionado, a continuación se genera un modelo matemático el cual posteriormente será representado como un modelo numérico. Finalmente, por medio de tecnología basada en software, se seleccionan los programas necesarios para finalmente desarrollar una solución computacional.

**Figura 8**

*Proceso de un modelo matemático*



Fuente: “A Primer on Mathematical Modelling”, Quarteroni & Gervasio (2020) Quarteroni & Gervasio (2020), sostienen que los modelos numéricos representan un puente entre el modelo matemático y una máquina informática que bien podría ser la aplicación móvil de un teléfono o cualquier software para computadora. La etapa final del proceso de modelado de un problema físico es la solución computacional. (p. 3). Es muy importante entender que los modelos matemáticos están en evolución y por lo tanto pueden ser mejorables. Al respecto, Kalman

(2023) afirma que al momento de representar la realidad, las herramientas matemáticas tendrán un alcance limitado; por tanto, el análisis humano se centrará en modelos que implican cambios a lo largo del tiempo y cambios en sentido restringido con el objetivo de encontrar patrones para que estos puedan simplificarse y así puedan representarse con matemáticas elementales. (p. 6)

Quarteroni & Gervasio (2020) explican el proceso de un modelo matemático y un modelo numérico. El proceso de un modelo matemático se inicia con el *input* datos matemáticos que son aproximaciones de los datos físicos y concluye con un *output* que es una solución matemática que se aproxima a la solución física real del problema que queremos resolver; el poder de un modelo matemático es que puede trabajar sobre diferentes datos sin llegar a realizar cambios en su esencia. Mientras tanto, el modelo numérico es una herramienta que trabaja con el *input* datos numéricos que son una aproximación de los datos matemáticos y concluye con un *output* que es una solución numérica que es una aproximación a la solución matemática. Respecto a la solución computacional, ésta es generada por una computadora a través de la ejecución del programa escrito para automatizar el modelo numérico. Al respecto, el desarrollo del programa de computadora, de manera inevitables, no está libre de generar errores; puesto que normalmente la solución numérica y la solución computacional no son lo mismo. (p.4 )

#### **2.2.8. Tiempo límite de extinción**

El concepto de límite es antecedido por el concepto de secuencias infinitas. Es así que, Hight (1977) describe la secuencias de eventos, es decir existe un primer evento, un siguiente evento, un siguiente y así sucesivamente, los cuales son representados por números naturales o enteros y se denominan términos de la secuencia que, en el caso de ser infinita, se denomina función, la cual asocia un número para cada valor de la secuencia. (p. 1)

Una secuencia no infinita, tiene un límite. Sokolowski (2021) sugiere que los límites son herramientas matemáticas que permiten evaluar fórmulas algebraicas en situaciones en las que no es posible una evaluación directa. (p. 57)

Dasgupta et al. (2019) sostienen que el crecimiento de nuestra demanda de recursos es uno de los factores que impulsan la extinción de especies. Es interesante notar que la dinámica poblacional es enfocada en los países desarrollados, en los cuales las tasas de nacimientos es baja; incluso en algunos de estos países no existe una relación directa entre crecimiento demográfico y el uso directo de recursos naturales. Sin embargo, el continente africano está experimentando un crecimiento acelerado de su población y para el año 2050, sumará más de 1,300 millones de habitantes: más de la mitad del crecimiento población que el mundo proyecta y en consecuencia se está convirtiendo en un asunto importante en de la política mundial. (pp. 229-230)

Para Goldin (2014), solo tenemos un planeta tierra y sus activos naturales son fijos: el agotamiento físico tiene límites. Los intentos por evaluar los límites de nuestra capacidad biofísica proporcionan un concepto denominado: un espacio operativo seguro; sin embargo, mucho antes que el planeta alcance los límites físicos de agotar su capital natural, alcanzará sus límites económicos; por ejemplo, la comprensión de la escases de agua se deriva en el costo económico de entregar agua al consumidor.

La humanidad siempre demandó recursos que nuestro planeta estaba en condiciones de ofrecer por los altos niveles de biocapacidad, sin embargo en poco más de doscientos años nuestra demanda de recursos ha crecido de manera nunca antes registrada. De acuerdo a (Pearce, 2022), desde la revolución industrial demandamos más recursos e desechamos residuos a una velocidad superior a la que los ecosistemas pueden generar y depurar: hemos sobrepasado de manera alarmante la biocapacidad del planeta.

Washington (2013) manifiesta que los seres humanos dependemos de los servicios ecosistémicos y estos dependen de la biodiversidad. El uso de los servicios ecosistémicos está creciendo rápidamente que están llegando a ser degradados para aumentar el suministro de recursos como alimentos, agua y otros. Esta idea no suele ser recepcionado por la población con la importancia necesaria y el autor considera que posiblemente es consecuencia de la ignorancia ecológica de la población y nuestra capacidad de negar aquellas realidad que resultan desagradables de asumir. (pp. 34-35)

Respecto a la extinción, Hunter et al. (2021) sostienen que de manera análoga a la muerte de un ser vivo, la extinción es el destino de las especies: posiblemente más del 99.9% de especies que existieron alguna vez en la tierra ya se extinguieron. Las especies pueden desaparecer como consecuencia de un callejón sin salida evolutivo o pueden evolucionar hacia una nueva especie (p. 130)

Para da Veiga (2017), el cuidado de la biocapacidad y de los ecosistemas de los cuales dependemos, permitirá que la humanidad no continúe reduciendo el plazo de su extinción como especie. (p. 10)

En relación a la idea que conlleva el término: extinción. Sachsman et al. (2021) explican las implicancias sociales del uso excesivo del término extinción durante las últimas décadas: posiblemente, la población tiene una postura de cansancio y complacencia, es decir, se ha reducido a ruido blanco.

## **2.3. Definición de términos básicos**

### **2.3.1. Indicadores ambientales**

Para poder comparar diversos ecosistemas entre sí, además de compararlos con un estado anterior es necesario estandarizar los indicadores. De acuerdo a Quiroga Martínez (2009), los indicadores son resultantes del proceso de una serie de estadísticas con el objetivo de mostrar un fenómeno importante. Existen muchos indicadores ambientales, por ejemplo: huella ecológica, huella de carbono, huella hídrica, entre otros.

### **2.3.2. Biocapacidad**

De acuerdo a Marazzi (2017), la biocapacidad es la capacidad de los ecosistemas para producir un suministro continuo de recursos renovables y absorber desechos; si esta es excedida se vuelve insostenible. Justin (2008) afirma que la biocapacidad es un concepto que relaciona la cantidad de áreas biológicamente productivas de tierra y la cantidad de agua disponible en un determinado país. Así mismo, de acuerdo a la Comunidad Andina (2009) es la habilidad que el ecosistema tiene para absorber los desechos producidos por la humanidad.

### **2.3.3. Capacidad de carga**

Una perspectiva interesante es propuesta por Thornbush (2021). Para el autor, el capital natural mundial o nacional opera como un límite superior para abastecer la demanda humana, definiendo así la noción de (capacidad de carga) para expresar la capacidad de la tierra para suministrar recursos necesarios para la actividad humana.

Es importante distinguir dos conceptos: capacidad de carga se refiere al número de personas soportadas por cada unidad de área de tierra, mientras que biocapacidad se refiere al área de tierra necesaria para sustentar a una población en particular. Es decir, son inversamente proporcionales.

### **2.3.4. Demanda de recursos**

La segunda acepción registrada para la entrada (*demand*, demanda en castellano) en el *Oxford Dictionary of Economics*, Black et al. (2012) es: La cantidad de un bien o servicio que los agentes económicos están dispuestos a comprar a un precio determinado, mientras que la primera acepción registrada es: El deseo y la capacidad de adquirir un bien o servicio. Por tanto, la demanda se relaciona la necesidad de adquirir un recurso y a un determinado precio.

### 2.3.5. Huella ecológica

A mediados de la década del noventa, el término original (*Ecological footprint, en ingles*) fue conceptualizado por Mathis & William E. (1996) como una herramienta de contabilidad que permite estimar el consumo de recursos por parte de una población y expresarla en términos de un área de tierra productiva.

Normalmente, la huella ecológica es entendida como un indicador o un parámetro, sin embargo, también debe ser entendida como una metodología, y es así que podemos comprender su potencial. Según Mathis & William E., (1996), la huella ecológica de cualquier población se puede usar para medir el consumo de una población en comparación con el suministro ecológico disponible.

Para, Marazzi (2017), la huella ecológica no se trata de lo mal que están las cosas: se trata de la continua dependencia que tenemos de la naturaleza y las acciones que podemos realizar para asegurar la capacidad de la tierra para asegurar la existencia de la humanidad.

En tanto, el indicador denominado huella ecológica nos permite encontrar nuestras posibles deficiencias después de estimar el consumo actual de recursos y su proyección frente al suministro ecológico disponible Mathis & William E. (1996), es decir: relaciona la biocapacidad con los patrones de consumo de una determinada población.

## **Capítulo III**

### **Hipótesis y variables**

#### **3.1. Hipótesis**

##### **3.1.1. Hipótesis general**

Sí, es posible construir el modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad, analizando los factores que determinan la dinámica de demanda de recursos y los sistemas de restauración de la biocapacidad; utilizando las técnicas de análisis, correlación, dispersión y tendencia de datos; haciendo uso de la tecnología de Microsoft Excel, Python y las librerías Matplotlib, NumPy y Sympy para automatizar los procesos de análisis matemático y cálculo integral que se aplicaron.

#### **3.2. Operacionalización de variables**

##### **3.2.1. Variable 1**

Construcción del modelo matemático '*Reimaining Path*' para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

### 3.2.2. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 01

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de valoración	Instrumento	
V1: Construcción del modelo matemático 'Remaining Path' para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.	De acuerdo a Eppen et al. (1998) la construcción de un modelo tiene cuatro etapas: abstracción del mundo real en términos matemáticos, análisis, interpretación y validación del modelo; finalmente, se tiene que aplicar en el	El modelo matemático se construye relacionando los factores que determinan la dinámica de demanda de recursos y los sistemas de restauración de la biocapacidad; utilizando las técnicas de análisis, correlación, dispersión y tendencia de datos; haciendo uso de la tecnología de Microsoft Excel, Python y las	Factores de demanda de dinámica de recursos	SDGI: Índice de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible	0 < SDGI < 1	Estadística, reportes, registros y bases de datos	
				HDI: Índice de desarrollo humano	0 < HDI < 1		
				CPI: Índice de percepción de corrupción	0 < CPI < 1		
				ILI: Índice de nivel de ingresos	0 < ILI < 1		
			Sistemas de restauración de biocapacidad	FRI: Índice de restauración de bosques	0 < FRI < 1	Estadística, reportes, registros y bases de datos	
				WAI: Índice de disponibilidad de agua y saneamiento	0 < WAI < 1		
				EPI: Índice de protección del entorno	0 < EPI < 1		
				ETI: Índice de transición energética	0 < ETI < 1		
			Técnicas y herramientas	Descripción			
				Análisis descriptivo de datos, correlación de datos, dispersión de datos y tendencia de datos			Técnicas estadísticas
				Análisis matemático Cálculo integral			Métodos matemáticos
				Microsoft Excel 2021			Hoja de cálculo
				Python 3.11.2			Lenguaje de programación
Matplotlib 3.7.0		Librerías para Python					

	<p>mundo real. (p. 22)</p>	<p>librerías Matplotlib, NumPy y Sympy para automatizar los procesos de análisis matemático y cálculo integral que se aplicaron.</p>		<p>NumPy 1.24.2 Sympy 1.11.1</p>	
				<p>Visual Studio Code 1.79</p>	<p>Editor de código</p>

## **Capítulo IV**

### **Metodología del estudio**

#### **4.1. Método y tipo de investigación**

##### **4.1.1. Método de investigación**

El enfoque del presente trabajo de investigación es cuantitativo. Según Gómez (2006), un estudio cuantitativo analiza las variables en un contexto y establece una serie de conclusiones respecto de las hipótesis, así mismo, se fundamentan en un proceso deductivo, es decir: extraen una muestra de la población y extienden los resultados obtenidos a toda la población.

##### **4.1.2. Alcance de investigación**

De acuerdo al alcance es trabajo de investigación es descriptivo, propositivo. Para Jiménez-Ottalengo y Carreras-Zamacona (2005) una investigación descriptiva es adecuada para una situación poco estudiada y por su naturaleza puede conducir a plantear una hipótesis pero no parten de ésta; y, propositiva porque se diseña un proceso o conjunto de pasos para lograr un objetivo específico: en este tipo de estudio, se parte de un supuesto mas no lo prueba. (p. 18)

#### **4.2. Diseño de la investigación**

El diseño de la presente investigación es no experimental. Según Rodríguez Rodríguez et al. (2021), en las investigaciones de naturaleza no experimental no se manipulan las variables, solo son observadas para analizar las relaciones asociadas entre sí.

#### **4.3. Población y muestra**

##### **4.3.1. Población**

La población del presente trabajo de investigación está representada por la publicación de información en todos los países. De acuerdo a Borda Pérez (2013) , todos los integrantes de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidos, además ubica la dimensión de espacio y tiempo en la cual se ejecutará el trabajo de investigación.

### **4.3.2. Muestra**

La muestra del presente trabajo de investigación está representada por la publicación de información de datos producidos por Perú y datos producidos por el mundo. Es preciso resaltar que los datos producidos por el mundo son los valores generales, los cuales son distintos a los datos producidos por cada país en específico. Borda Pérez (2013) afirma que la muestra es definida cuando por diversas limitaciones no pueda estudiarse a toda la población.

## **4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **4.4.1. Técnicas de recolección de datos**

Para Hernández Sampieri et al. (2014), es necesario utilizar adecuadamente las técnicas de recolección de datos y de análisis estadísticos.

La presente investigación se basa en la técnica de búsqueda de información documental. Para Bares (1989), la búsqueda documental tiene como primera finalidad elaborar una selección de las referencias de documentos, sistemas de información, entre otros.

Para Hardy & Bryman (2004), el análisis de datos es un proceso de clasificación de información en el cual separamos la buena información del error para clasificar los patrones lógicos; este proceso siempre implicará una noción de reducción de la cantidad de datos que hemos recopilado para que se puedan asignar afirmaciones resumidas sobre ellos.

#### **A. *Análisis descriptivo***

La base de datos acerca de biocapacidad, huella ecológica y demás indicadores y sistemas de restauración estudiados en la presente investigación, fueron importadas al formato de Microsoft Excel para que los datos sean procesados de manera dinámica. También fue usado para presentar las gráficas de los datos obtenidos, así como las proyecciones de las tendencias de los datos analizados. De acuerdo a Salafranca Cosialls et al. (2005), el proceso de análisis descriptivo no puede ser dejado de lado porque nos proporciona un primer acercamiento a la información

que podemos rescatar de los datos, en tal sentido, la exploración de datos es un paso imprescindible. Ver Figura 9.

**Figura 9**

*Base de datos de biocapacidad y huella ecológica de Perú*

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Country Name	Short Name	year	Record	Built-up Land	Carbon	Cropland	Fishing Ground
3	Peru	Peru	1961	EFConsPerCap	0.056570176	0.12994683	0.31003354	0.741234828
5	Peru	Peru	1962	EFConsPerCap	0.055053378	0.16597329	0.31156107	0.762413888
7	Peru	Peru	1963	EFConsPerCap	0.04695898	0.24282003	0.29787432	0.743647053
9	Peru	Peru	1964	EFConsPerCap	0.044471489	0.2574925	0.30640138	0.794103355
11	Peru	Peru	1965	EFConsPerCap	0.041749701	0.28279105	0.32093785	0.608160281
13	Peru	Peru	1966	EFConsPerCap	0.047330494	0.32292298	0.33206331	0.697490108
15	Peru	Peru	1967	EFConsPerCap	0.047658631	0.28823086	0.33770807	0.778772694
17	Peru	Peru	1968	EFConsPerCap	0.042142945	0.24346496	0.31090559	0.680292853
19	Peru	Peru	1969	EFConsPerCap	0.046259673	0.27763904	0.32858017	0.659531857
21	Peru	Peru	1970	EFConsPerCap	0.048139026	0.31521498	0.32154186	0.803547324
23	Peru	Peru	1971	EFConsPerCap	0.046926997	0.35004393	0.31445892	0.724772115
25	Peru	Peru	1972	EFConsPerCap	0.03965537	0.34959845	0.28440437	0.376898502
27	Peru	Peru	1973	EFConsPerCap	0.03907497	0.46420286	0.25043376	0.349047711
29	Peru	Peru	1974	EFConsPerCap	0.038809025	0.46918476	0.27585118	0.366245529
31	Peru	Peru	1975	EFConsPerCap	0.038625641	0.48397884	0.30233533	0.259646913

Fuente: Adaptado de la Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

### B. **Correlación de datos**

Se usó Microsoft Excel en el procesamiento de datos descargados desde los repositorios de bases de datos. También fue usado para presentar las gráficas de los datos obtenidos, así como las proyecciones de los datos. De acuerdo a (Ross, 2005), la correlación mide la asociación entre dos variables mas no la casualidad; mientras el valor sea igual a 1, indica que existe una relación lineal perfecta, si el valor se aproxima a 0, significa que la relación lineal es débil.

### C. **Dispersión de datos**

Se usó Microsoft Excel en el procesamiento de datos descargados desde los repositorios de bases de datos. También fue usado para presentar las gráficas de los datos obtenidos, así como las proyecciones de los datos. Para (Ross, 2005), el diagrama de dispersión puede ser de utilidad para comprobar si los valores altos de x se corresponden con los valores altos de y, o si no existe ninguna relación entre ambos valores .

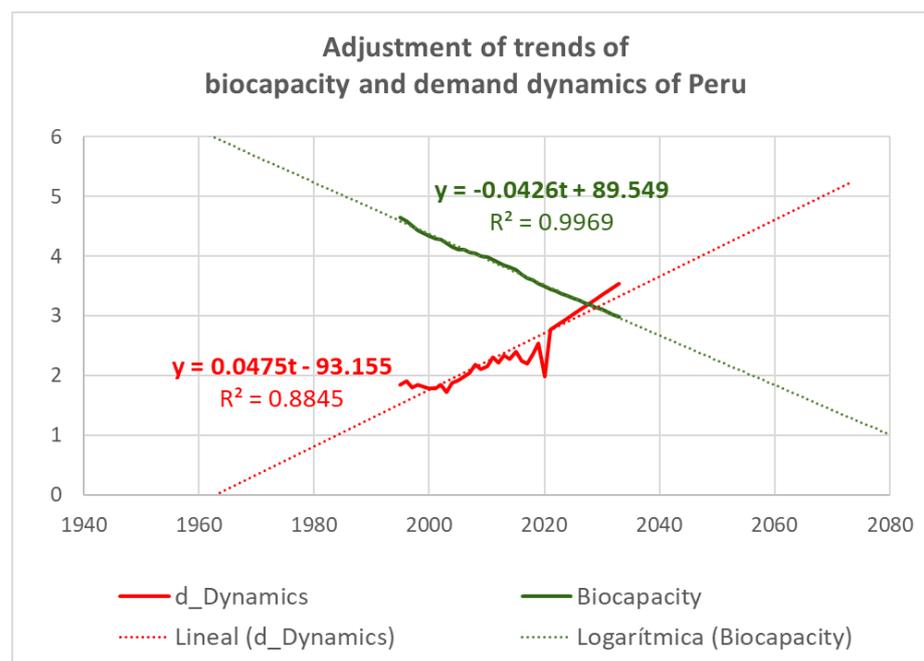
### D. **Tendencia de datos**

Se usaron tendencia lineal de la forma  $ax + b$ , tendencia polinómica de segundo y tercer grado. El criterio de selección se

basó en el valor de  $R^2$  que se acerque al valor de 1, al respecto, Cañadas Osinski & San Luis Costas (2018) mencionan que un modelo matemático debe mostrar su fiabilidad, validez y utilidad; por tanto, se debe valorar que el valor  $R^2$  sea el mejor posible. Ver Figura 10.

**Figura 10**

*Tendencia lineal y logarítmica con datos de Perú*



Se procuró que la curva de la biocapacidad no corte el eje de las abscisas en un tiempo notoriamente anterior al estimado.

#### 4.4.2. Instrumentos de recolección de datos

De acuerdo a Hernández Sampieri et al. (2014), los instrumentos de recolección de datos reúnen tres características: 1) confiabilidad: referida a si su aplicación repetida produce resultados iguales, 2) validez: el grado en el que la aplicación del instrumento mide realmente la variable y 3) objetividad: cuando la aplicación del instrumento resiste a la influencia de sesgos o tendencias de los investigadores.

Para Hernández Sampieri et al. (2014), es necesario utilizar adecuadamente las técnicas de recolección de datos y de análisis estadísticos. En tanto, Somani & Chandra Deka (2018), afirman que la calidad de los resultados del análisis dependen de los métodos

utilizados y del uso efectivo de las herramientas por lo que el análisis de datos de mediana escala pueden usar librerías de inteligencia artificial de Python.

Para la recolección y análisis de los datos se utilizó Microsoft Excel, el lenguaje de programación Python y sus respectivas librerías.

#### **A. Hoja de cálculo**

Se usó Microsoft Excel 2021 en el procesamiento de datos descargados desde los repositorios de bases de datos. También fue usado para presentar las gráficas de los datos obtenidos, así como las proyecciones de los datos. De acuerdo a Salafranca Cosialls et al. (2005), Microsoft Excel nos permite obtener información descriptiva sobre una o más variables por medio de sus herramientas para elaborar tablas y gráficos dinámicos.

#### **B. Lenguaje de programación**

Se usó la versión 3.11.2 de Python, publicada el 8 de febrero de 2023. De acuerdo a Qamar & Summair Raza (2023), Python es uno de los lenguajes de programación más comunes para proyectos de ciencias de datos por el número de librerías y herramientas disponibles para codificar. En este lenguaje se programó el modelo matemático Remaining Path con el objetivo de optimizar y agilizar los cálculos.

En términos generales, se programaron tres ficheros: a) fichero *r\_Path\_Peru.py* junto a su homólogo *r\_Path\_World.py*, b) fichero *def\_integrate.py*; c) fichero *ef\_Bc\_Peru.py* junto a su homólogo *ef\_Bc\_World.py*.

##### **a. *r\_Path\_Peru.py***

Este fichero, ver *Apéndice E*, junto a su homólogo *r\_Path\_World.py* contienen en programa principal que ejecuta el modelo matemático Remaining Path, versión 1.0. Ver *Figura 11*.

Como *inputs*, es necesario ingresar los valores de la ecuación de la función de la biocapacidad y la ecuación de la función de la dinámica de demanda de recursos. Estas funciones son graficadas como rectas, las cuales están definidas de la forma:

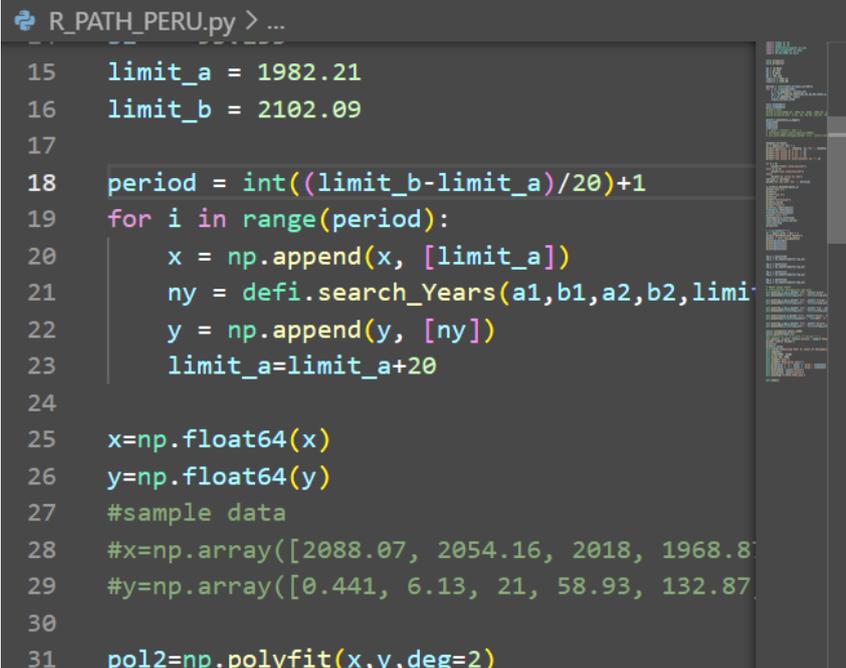
$$F_{biocapacity}(t) = -bt + c; t > 0; r \geq 0$$

$$F_{demand\_Dynamics}(t) = dt + e; t > 0; r \geq 0$$

Así mismo, es necesario ingresar el rango de tiempo en el que se evaluará el modelo. Estos datos son obtenidos al graficar los valores históricos que figuran en la base de datos.

**Figura 11**

Sección del código del fichero *r\_Path\_Peru.py*



```

R_PATH_PERU.py > ...
15  limit_a = 1982.21
16  limit_b = 2102.09
17
18  period = int((limit_b-limit_a)/20)+1
19  for i in range(period):
20      x = np.append(x, [limit_a])
21      ny = defi.search_Years(a1,b1,a2,b2,limit_a)
22      y = np.append(y, [ny])
23      limit_a=limit_a+20
24
25  x=np.float64(x)
26  y=np.float64(y)
27  #sample data
28  #x=np.array([2088.07, 2054.16, 2018, 1968.87])
29  #y=np.array([0.441, 6.13, 21, 58.93, 132.87])
30
31  pol2=np.polyfit(x,y,deg=2)

```

**b. *def\_integrate.py***

Este fichero, ver *Figura 12*, se ejecuta para realizar el cálculo del área bajo la curva en un periodo determinado de tiempo usando el algoritmo de Risch-Norman. Es decir, calcula la integral definida de la ecuación y retorna el valor del *limit\_year* que será usado en el programa general.

**Figura 12**

Código del fichero `def_integrate.py`

```
def_integrate.py > search_Years
1 def search_Years(a,b,a2,b2,limit_a, limit_b):
2     import sympy as sp
3     import undef_integrate as undi
4     x = sp.Symbol('x')
5     y=a*x+b
6     region=sp.integrate(y,(x,limit_a,limit_b))
7     limit_year=undi.search_Year(region, a2, b2, limit_a)
8     return limit_year
```

### c. `ef_Bc_Peru.py`

Este fichero, ver *Figura 13*, es ejecutado para graficar la relación entre la curva de la dinámica de demanda de recursos y la biocapacidad.

**Figura 13**

Sección del código del fichero `ef_Bc_Peru.py`

```
EF_BC_PERU.py > ...
1 from matplotlib import pyplot
2 import numpy as np
3 import sympy as sp
4 x = sp.Symbol('x')
5
6 a1 = -0.0426
7 b1 = 89.549
8 a2 = 0.0475
9 b2 = -93.155
10 limit_a = 1974.48
11 limit_b = 2103
12
13 bc = a1*x + b1
14 dd = a2*x + b2
15 def f1(x):
```

### C. Librerías

- a. *Matplotlib*: versión 3.7.0, publicada el 13 de febrero de 2023.  
Para generar gráficos.
- b. *NumPy*: versión 1.24.2, publicada el 5 de febrero de 2023.  
Para realizar operaciones de cálculo numérico.
- c. *Sympy*: versión 1.11.1, publicada el 31 de agosto de 2022.  
Para realizar matemáticas con símbolos.

### D. Editor de código

Se usó Visual Studio Code, versión 1.79, publicada en mayo de 2023.

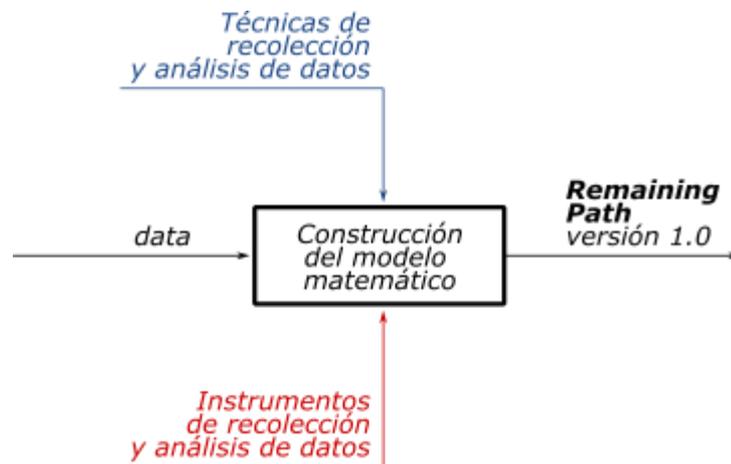
#### 4.4.3. Proceso de construcción del modelo matemático

De acuerdo al objetivo definido en la presente investigación, el cual consiste en construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

En la Figura 14, se observa de manera general el proceso que se siguió para la construcción del modelo matemático. El *input* es la data que fue recolectada, mientras que el *output* es el modelo matemático que se denominó *Remaining Path* versión 1.0 y, también se hace uso de técnicas e instrumentos de recolección de datos.

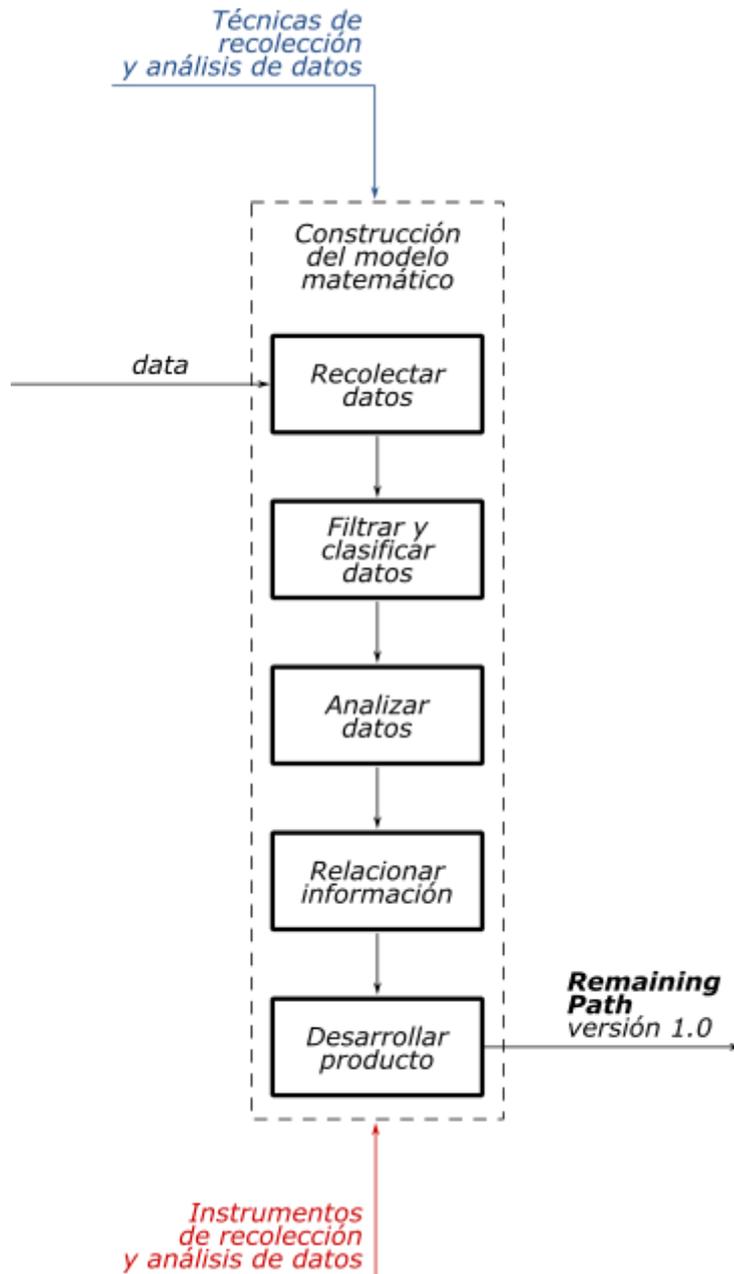
**Figura 14**

*Proceso general de construcción del modelo matemático*



**Figura 15**

*Proceso extendido de construcción del modelo matemático*



En la Figura 15 se observa que el proceso de la construcción del modelo matemático contiene cinco subprocesos, los cuales también cuentan con sus propios subprocesos: Inicialmente los datos son captados en el proceso de recolección de datos, ver la Figura 16. A continuación se filtran y clasifican los datos de acuerdo a los criterios establecidos, ver Figura 17.

En seguida se realiza el proceso de análisis de datos, ver Figura 18; para continuar con el proceso de establecer relación de la información obtenida, ver Figura 19. El último proceso, denominado desarrollar

producto, resulta en el modelo matemático denominado *Remaining Path* y su metodología de aplicación, ver Figura 20.

#### **A. Proceso de recolección de datos**

El propósito de este proceso es generar como *output* data validada. Este proceso cuenta con cinco subprocesos, ver la Figura 16; se inicia con el subproceso que define los objetivos de recolección de datos, teniendo como *input* el objetivo definido en la presente investigación: construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

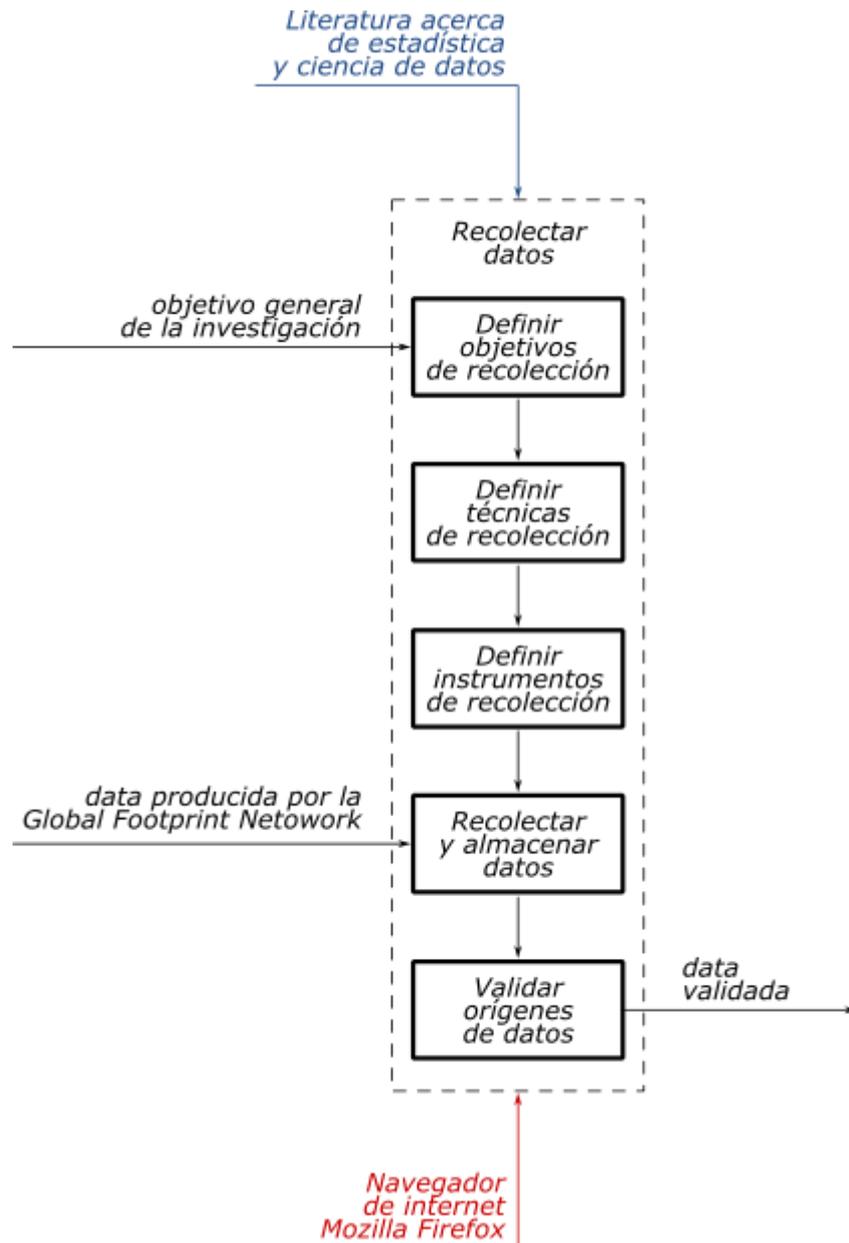
Los dos siguientes subprocesos definen las técnicas e instrumentos que se usarán para la recolección de datos.

A continuación, el cuarto proceso que tiene por objetivo recolectar y almacenar datos se inicia con el *input* que son los datos diversos mostrados en el repositorio de datos de la *Global Footprint Network* que contiene registros acerca de la biocapacidad y la huella ecológica. Esta data se encuentra publicada en diversas unidades. Se almacena la base de datos que exprese la biocapacidad en hectáreas globales per cápita.

Finalmente, se validan los orígenes de datos para asegurar su confiabilidad. La *Global Footprint Network* es una fuente confiable que permite producir el *output* denominado data validada, por lo tanto, los datos recolectados y almacenados tienen que provenir exclusivamente desde el enlace del repositorio de datos oficial: <https://data.footprintnetwork.org>.

#### **Figura 16**

*Proceso de recolección de datos*



### B. Proceso de filtro y clasificación de datos

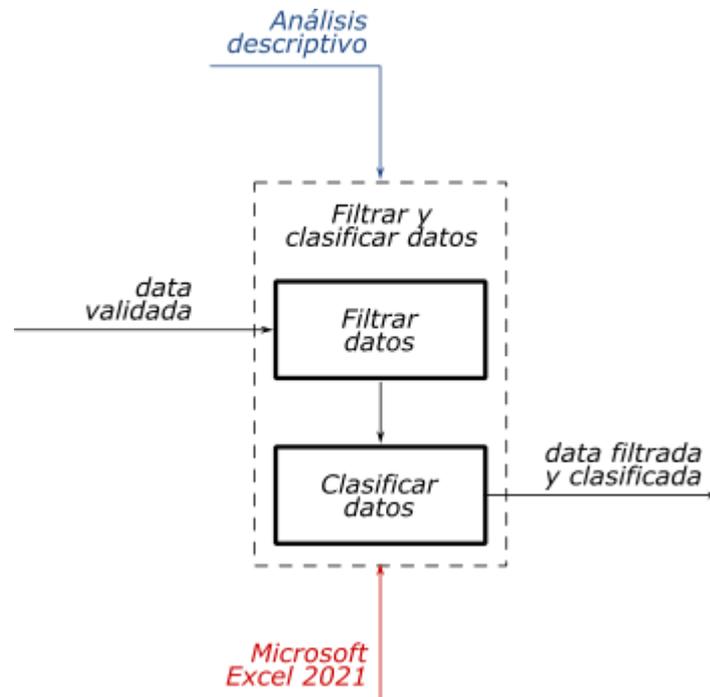
Este proceso tiene dos subprocesos, ver la Figura 17, el primero de ellos que se denomina filtrar datos y se inicia con el *input* data validada, el objetivo de este proceso es importar, hacia un archivo de Microsoft Excel, la base de datos almacenada para poder filtrar los registros de biocapacidad y huella ecológica.

A continuación, el segundo proceso nos permite clasificar esta data para que se almacene en dos tablas distintas: biocapacidad

y huella ecológica. El proceso resulta en el *output*: data filtrada y clasificada.

**Figura 17**

*Proceso para filtrar y clasificar datos*



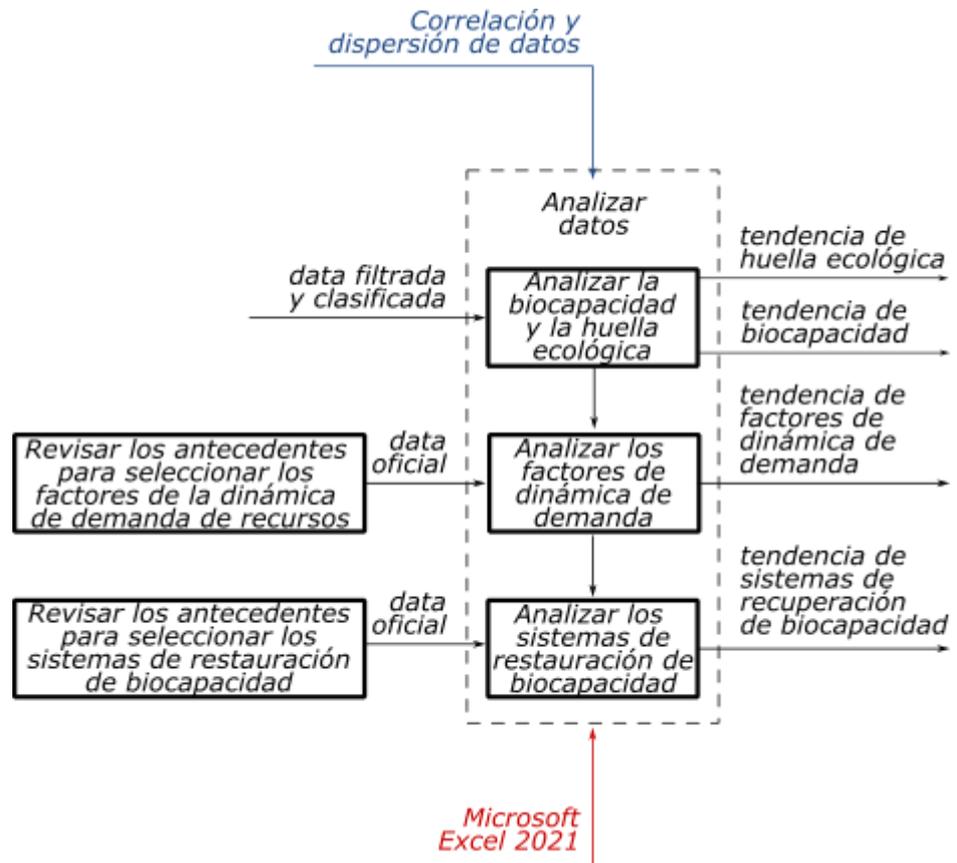
### C. Proceso de análisis de datos

Este proceso inicia con el *input* data filtrada y clasificada, ver Figura 18. El primer subproceso analiza la correlación y dispersión de los data referente a la biocapacida y huella ecológica. El segundo proceso busca resolver el primer objetivo específico de esta investigación: *analizar los principales factores que definen la dinámica de demanda de recursos por parte de la población*, por lo tanto, se analiza la correlación y dispersión de la data referente a los factores de dinámica de demanda de recursos; es importante destacar que este proceso se desencadena después de realizar el proceso que consiste en revisar los antecedentes para seleccionar los factores de la dinámica de demanda de los recursos; así mismo, el criterio de selección de estos factores depende de cantidad de estudios reridos a un determinado factor; mientras

tanto, la data analizada proviene de fuentes confiables que publican y actualizan esta información en sus repositorios de internet.

**Figura 18**

*Proceso de análisis de datos*



De manera similar, el tercer proceso busca resolver el segundo objetivo específico de esta investigación: *analizar los principales sistemas de restauración para evitar la extinción de la biocapacidad*; en consecuencia, se analiza la correlación y dispersión de la data referente a los sistemas de restauración de biocapacidad; es importante destacar que este proceso se desencadena después de realizar el proceso que consiste en revisar los antecedentes para seleccionar los sistemas de restauración de biocapacidad; así mismo, el criterio de selección de estos sistemas depende de cantidad de estudios referidos a un determinado sistema; mientras tanto, la data analizada proviene

de fuentes confiables que publican y actualizan esta información en sus repositorios de internet. Los *output* de este proceso son cuatro: tendencia de la huella ecológica, tendencia de biocapacidad, tendencia de factores de dinámica de demanda y tendencia de sistemas de restauración de biocapacidad.

#### **D. Proceso de relación de información**

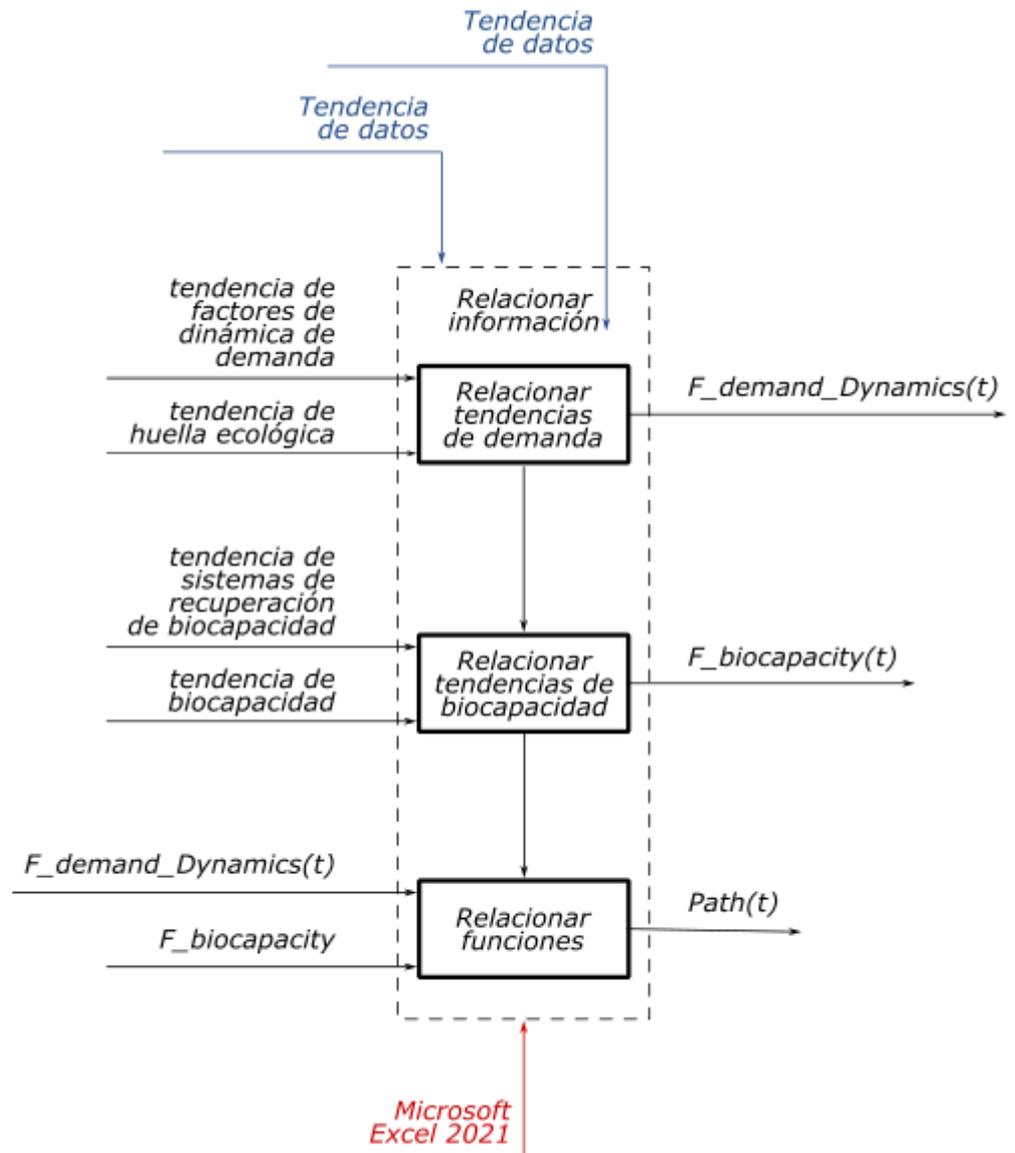
De acuerdo a la Figura 19, el primer subproceso recibe como *input* la tendencia de factores de dinámica de demanda y la tendencia de la huella ecológica con el objetivo de relacionarlas para determinar si el impacto de la primera sobre la segunda es notaria a corto o largo plazo. El segundo subproceso recibe como *input* la tendencia de los sistemas de restauración de biocapacidad junto a la tendencia de la biocapacidad con el objetivo de relacionarlas para determinar si el impacto de la primera sobre la segunda es notaria a corto o largo plazo.

El *output* del primer subproceso es una función matemática que describe el comportamiento de la dinámica de la demanda de recursos en función del tiempo:  $F\_demand\_Dynamics(t)$ . Mientras tanto, el *output* del segundo subproceso es una función matemática que describe el comportamiento de biocapacidad en función del tiempo:  $F\_biocapacity(t)$ .

El tercer subproceso busca relacionar las funciones resultantes de los dos primeros subprocesos generando un nuevo output denominado  $Path(t)$ . Esta función resultante será importante para establecer los puntos de continuidad, estrés, fatiga y colpaso de la función de biocapacidad  $F\_biocapacity(t)$ .

#### **Figura 19**

*Proceso para relacionar información*



Es importante resaltar que el impacto de los factores de dinámica de demanda de recursos en la huella ecológica pueden hacer efecto en un periodo corto, mientras que, el impacto de los sistemas de restauración en la biocapacidad pueden ser evidenciados en periodos mucho más extensos. Los cambios perceptibles en la humanidad son más rápidos que los cambios en los ecosistemas.

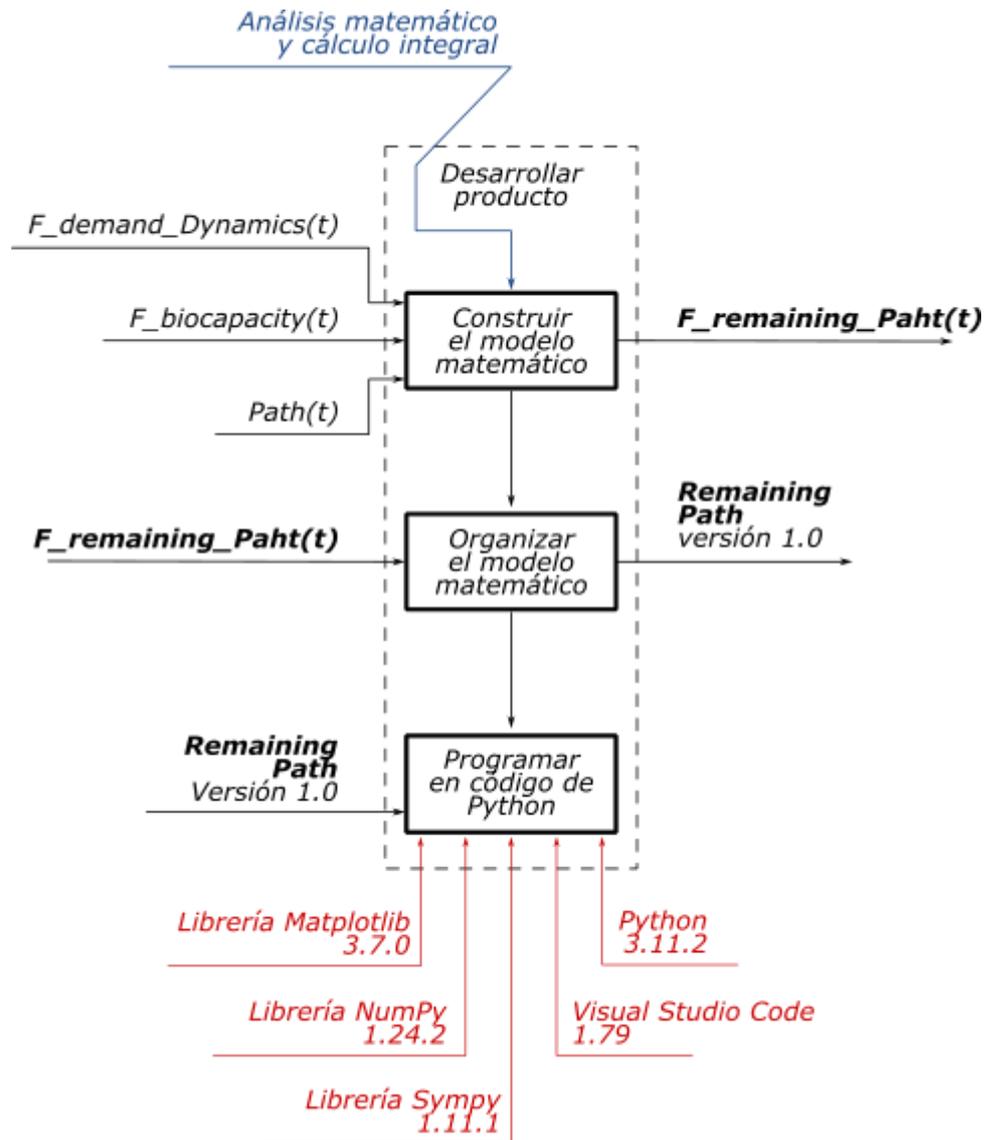
### **E. Proceso de desarrollo del producto**

El propósito de este proceso es resolver al objetivo general de esta investigación: construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad, poniendo el marcha

la realización del tercer objetivo específico de esta investigación: *seleccionar las herramientas y métodos necesarios para construir el modelo matemático.*

**Figura 20**

*Proceso del desarrollo del producto*



De acuerdo a la Figura 20, el objetivo del primer subproceso es construir el modelo matemático y se inicia con tres *input*:  $F\_demand\_Dynamics(t)$ ,  $F\_biocapacity(t)$  y  $Path(t)$ . El *output* de este subproceso es la función  $F\_remaining\_Path(t)$ ; esta función calcula el tiempo límite de extinción de biocapacidad para cada punto año evaluado.

El segundo subproceso tiene el objetivo de organizar toda la información relacionada al input  $F_{remaining\_Path}(t)$ ; para de esta manera cumplir con el objetivo general de esta investigación y así obtener el *output* que es el modelo matemático Remaining Path en su versión 1.0.

El tercer subproceso es necesario para cumplir posteriormente con el tercer objetivo específico de esta investigación: aplicar el modelo matemático Remaining Path mediante la realización de pruebas con data a nivel nacional y mundial. Este subproceso busca programar el *input* Remaining Path versión 1.0, haciendo uso de Python y librerías específicas.

#### **4.5. Técnicas de análisis de datos**

Al tratarse de una investigación cuyo objetivo es la construcción de un modelo matemático, no se han obtenido registros relacionales que permitan un análisis estadístico.

De acuerdo a Ortiz Valencia et al. (2011), un modelo matemático debe ser bueno para cumplir su propósito de diseño. Los autores señalan que realizar la validación de los modelos matemáticos es difícil y costoso, por este motivo, la confiabilidad de los modelos matemáticos debe desarrollarse teniendo en cuenta que debe lograrse que éste se ajuste a los datos observados, describiendo bien el sistema real.

Por su parte, Eppen et al. (1998) explican que la validación de un modelo no puede caer en una lógica de un método imperfecto que consiste en ponerlo en marcha para predecir la historia. (p. 22)

## **Capítulo V**

### **Resultados**

#### **5.1. Resultados y análisis**

##### **5.1.1. Nomenclatura**

###### **A. Índices**

- a. *SDI (Sustainable Development Index): Índice de desarrollo sostenible*

- *SPI (SDG Progres Index): Índice de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*
- b. *HDI (Human Development Index): Índice de desarrollo humano*
- c. *CPI (Corruption Perception Index): Índice de percepción de corrupción*
- d. *ILI (Income Level Index): Índice de nivel de ingresos*
- e. *FRI (Forest Restoration Index): Índice de restauración de bosques*
  - *TCL (Tree Cover Loss): Índice de pérdida de cobertura arbórea*
  - *TCG (Tree Cover Gain): Índice de ganancia de cobertura arbórea*
- f. *WAI (Water Availability Index): Índice de disponibilidad de agua y saneamiento*
  - *DWM (Drinking Water Management Index): Índice de gestión de agua potable*
  - *WRM (Water Resources Management Index): Índice de gestión integral de recursos hídricos*
- g. *EPI (Environmental Protection Index): Índice de protección del entorno.*
  - *WGI (Wasted Generated Index): Índice de generación de basura*
  - *PAI (Terrestrial and marine Protected Areas Index): Índice de áreas terrestres y marinas protegidas*
  - *CEI (CO2 Emissions Index): Índice de emisiones de CO2*
- h. *ETI (Energy Transition Index): Índice de transición energética.*
  - *RCI (Renewable Capacity Index): Índice de capacidad instalada de generación de energía renovable*
  - *CCI (Access to Clean Cooking Index): Índice de acceso a cocinas limpias*

## **B. Funciones**

- a. *F\_remaining\_Path (Remaining Path Function): Función de Remaining Path*
- b. *F\_demand\_Dynamics (Demand Dynamics Function): Función dinámica de demanda de recursos*
- c. *F\_biocapacity (Biocapacity Function): Función de biocapacidad*
- d. *Path (Path Function): Función de relación*

## **C. Puntos críticos**

- a. *Cn\_p (Continuity point): Punto de continuidad de la biocapacidad*
- b. *St\_p (Stress point): Punto de estrés de la biocapacidad*
- c. *Ft\_p (Fatigue point): Punto de fatiga de la biocapacidad*
- d. *CL\_p (Collapse point): Punto de colapso de la biocapacidad*
- e. *Rv\_p (Recovery point): Punto de restauración de la biocapacidad*

## **D. Factores de la dinámica de demanda**

- a. *Factor\_demand\_Dynamics (Demand Dynamics Factor): Factores de la dinámica de demanda*
- a. *Factor\_sustainable\_Development (Sustainable Development Factor): Factor de desarrollo sostenible*
- b. *Factor\_human\_Development (Human Development Factor): Factor de desarrollo humano*
- c. *Factor\_corruption\_Perception (Corruption Perception Factor): Factor de percepción de corrupción*
- d. *Factor\_income\_Level (Income Level Factor): Factor de nivel de ingresos*

## **E. Sistemas de restauración de biocapacidad**

- a. *S\_biocapacity\_Restoration (Biocapacity Restoration System): Sistemas de restauración de biocapacidad*
- b. *S\_forest\_Restoration (Forest Restoration System): Sistemas de restauración de bosques*

- c. *S\_water\_Availability (Water Availability System): Sistemas de disponibilidad de agua*
- d. *S\_environmental\_Protection (Environmental Protection System): Sistemas de protección del entorno.*
- e. *S\_energy\_Transition (Energy Transition Index): Sistemas de transición energética*

### **5.1.2. Factores de la dinámica de demanda de recursos**

El criterio de selección de estos factores se fundamentó en la cantidad de antecedentes publicados en las distintas revistas científicas. Se podrían considerar otros factores que modifiquen la dinámica de demanda de recursos, sin embargo, existen pocos o ningún estudio que permitan considerarlos. La data analizada proviene de fuentes confiables publicadas en los repositorios oficiales. Se analizaron cuatro factores que alteran la dinámica de demanda de recursos: *Factor\_sustainable\_Development (factores de desarrollo sostenible)*, *Factor\_human\_Development (factores de desarrollo humano)*, *Factor\_corruption\_Perception (factores de percepción de corrupción)* y *Factor\_income\_Level Development (factores de nivel de ingresos)*. El *Public Data Package (framework contenido en un libro de MS-Excel)* publicado por la NFA (*The National Footprint and Biocapacity Accounts*), en su versión 2022 presentan data, sin embargo, esta no es utilizada para la obtención de los resultados finales de la huella ecológica y biocapacidad: calidad de datos, índice de cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, expectativa de vida, PBI per cápita, región, grupo de ingresos y población. Algunas de estas variables ya están relacionadas entre sí; por tanto, en esta investigación se mantuvieron tres de estas variables y se renombraron como: índice de desarrollo sostenible (*SDI*), índice de desarrollo humano (*HDI*), índice de nivel de ingresos (*ILI*); adicionalmente, se añadió una cuarta variable: índice de percepción de la corrupción (*CPI*).

$$Factor\_demand\_Dynamics = (SDI + HDI + CPI + ILI) * \frac{1}{4}$$

Los países que lideran la gestión de los factores de la dinámica de demanda son los que tiene un valor de *Factor\_demand\_Dynamics* cercano a 1; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares en la gestión de los factores de la dinámica de demanda tienen un valor de *Factor\_demand\_Dynamics* cercano a 0.

#### A. **Factor de desarrollo sostenible**

Se ha considerado como el primer factor que modifica la dinámica de la demanda de recursos al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible que se ha representado como:

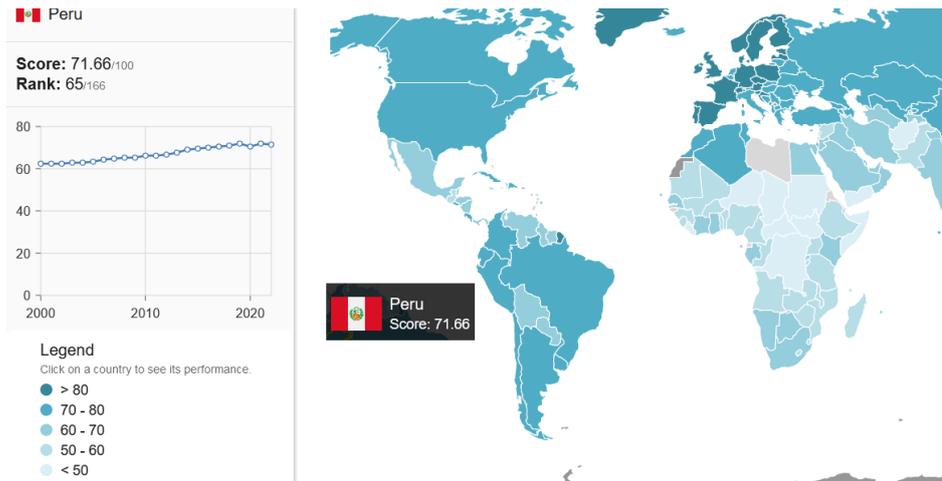
$$Factor\_sustainable\_Development$$

Para tener referencia de la situación actual de factores de desarrollo sostenible, se usará el indicador *SPI* (SDG progress index). Este indicador es calculado de acuerdo a la información publicada por el portal Sustainable Development Report, específicamente de acuerdo a los valores globales del cumplimiento de los ODS.

Los países que progresaron de manera esperada en el cumplimiento de las ODS garantizan que la población demande de manera responsable los recursos. En la Figura 21, se observa que en Perú, hasta el año 2022, el cumplimiento de los ODS tiene un valor de 71.66, mientras que, en la Figura 22, se observa que el valor para Finlandia, Venezuela y Sudán del Sur es de 86.76, 62.88 y 38.68 respectivamente; en comparación del valor de 67.55 para el promedio mundial.

#### **Figura 21**

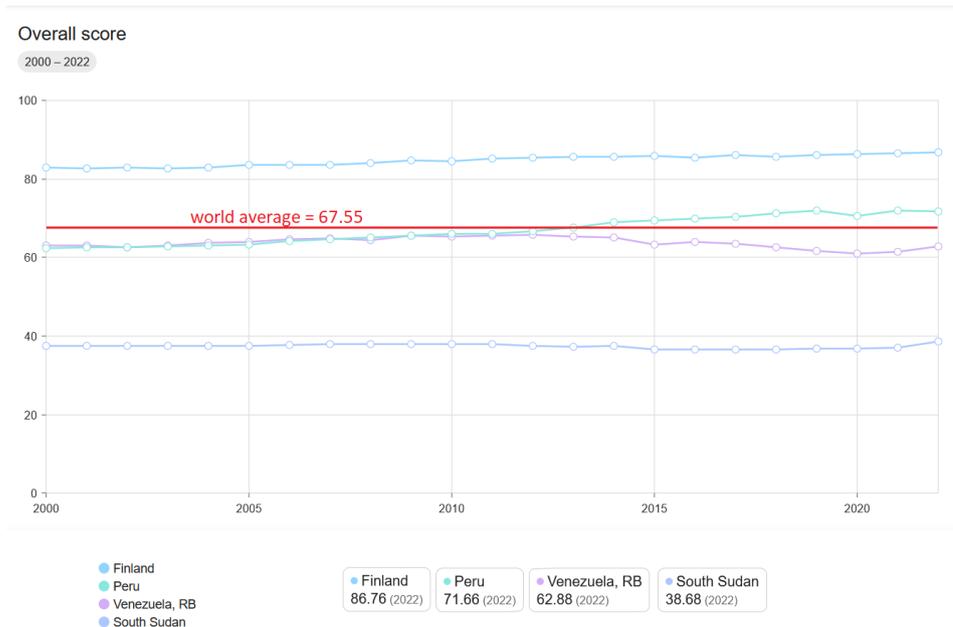
*Factor de cumplimiento de las ODS*



Nota: Fuente Sustainable Development Report <https://www.sdqindex.org>

**Figura 22**

*Comparación del cumplimiento de los ODS*



Nota: Fuente Sustainable Development Report <https://www.sdqindex.org>

Los factores de desarrollo sostenible necesitan ser alcanzados para que la cultura de consumo de recursos sea eficiente. Los países podrán erradicar la pobreza y proteger el planeta: se conseguirá un equilibrio entre el consumo de recursos y la seguridad de la biocapacidad.

Los factores de desarrollo sostenible modifican la función  $F_{demand}(t)$ ; entonces, para calcular el valor de  $SDI$  (índice de desarrollo sostenible) se ha expresado el valor del cumplimiento de los ODS ( $SPI$ ) de la siguiente manera.

$$SDI = \frac{SPI}{100}$$

$$0 < SDI < 1; \text{step} = 0.01$$

Los países que gestionan de manera eficiente los factores de desarrollo sostenible tienen un valor de *SDI* cercano a 1; mientras que, los países que gestionan de manera deficiente los factores de desarrollo sostenible tienen un valor de *SDI* cercano a 0.

### **B. Factor de desarrollo humano**

Los factores de desarrollo humano ofrecen una gran oportunidad para gestionar los aspectos fundamentales que permitan desarrollar la calidad de vida de una sociedad. Cuando los factores de desarrollo no cuentan con una gestión adecuada por parte de los gobiernos, se genera un entorno de caos, en el que se demandan muchos recursos ambientales, incluso burlando las barreras legales. El segundo factor que se consideró como modificador de la dinámica de la demanda de recursos es el desarrollo humano, representado como:

#### *Factor\_human\_Development*

Para medir el factor de desarrollo humano, se usó el índice representado como *HDI* (human development index) que es un índice que mide los adelantos de un país en base a tres aspectos fundamentales: esperanza de vida, educación y alfabetización. Este índice cuenta con un historial desde 1990 y es elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

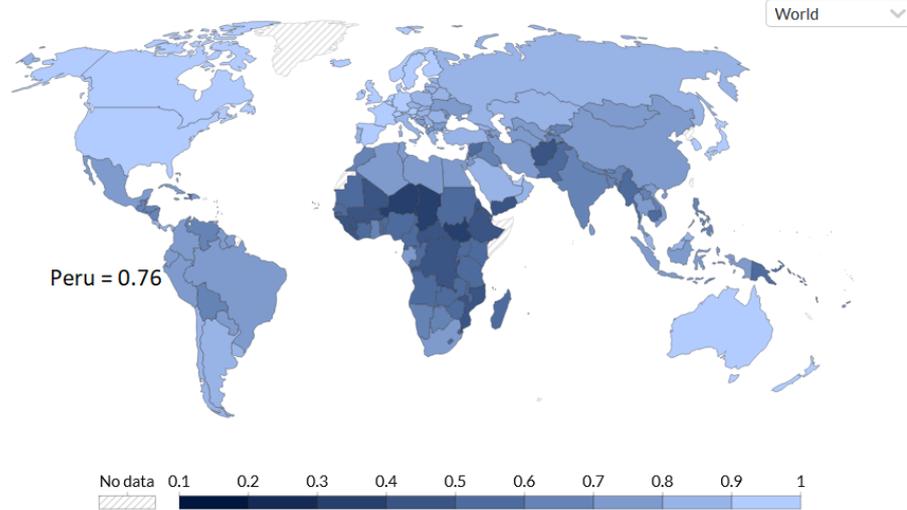
### **Figura 23**

*Índice de desarrollo humano al 2021*

## Human Development Index, 2021

The Human Development Index (HDI) is a summary measure of key dimensions of human development: a long and healthy life, a good education, and having a decent standard of living.

Our World  
in Data



Source: UNDP, Human Development Report (2021-22)

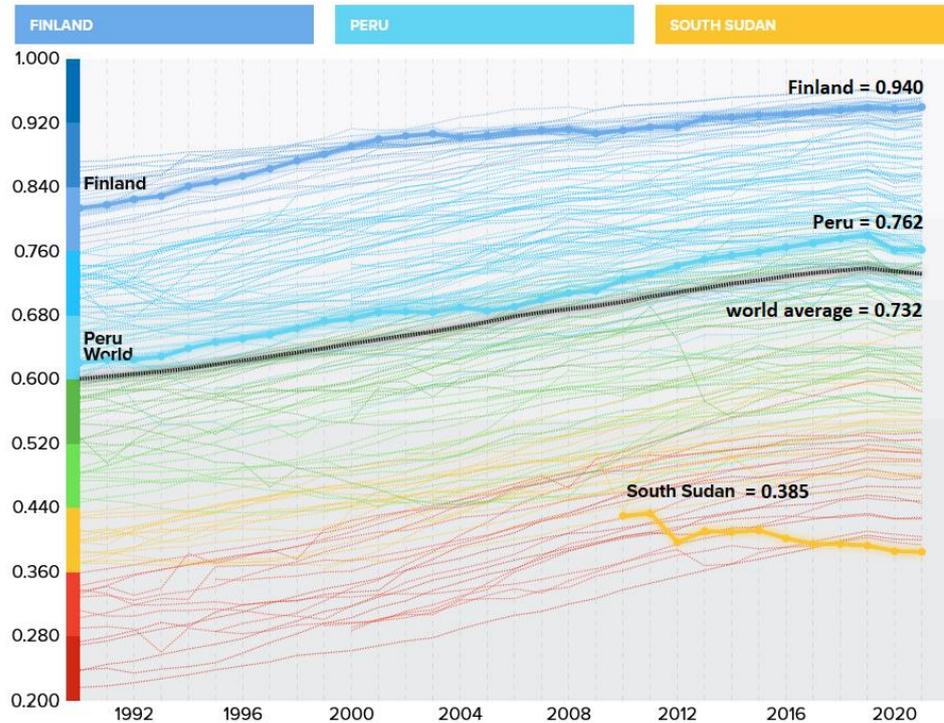
OurWorldInData.org/human-development-index/ • CC BY

Nota: Fuente Human Development Reports <https://www.hdr.undp.org>

En la Figura 23, se observa que el valor del HDI de Perú en el año 2021 fue de 0.76. En la Figura 24, se observa que Finlandia tenía un valor alto de 0.940, Sudán el Sur un valor bajo de 0.385; en relación al promedio mundial que tenía un valor de 0.732.

### Figura 24

Comparación del índice de desarrollo humano al 2021



Nota: Fuente Human Development Reports <https://www.hdr.undp.org>

Los factores de desarrollo humano deben de impulsarse en todas sus dimensiones: salud, educación e ingreso para que la población mejore sus condiciones de vida y de esta manera, se logre demandar de manera responsable los recursos, comprendiendo el impacto que nuestros hábitos de demanda generan en la biocapacidad de planeta.

Los factores de desarrollo humano modifican la función  $F\_demand(t)$ ; se ha expresado el valor del desarrollo humano (*HDI*) con dos decimales.

$$0 < HDI < 1; step = 0.01$$

Los países que se ubican en los primeros lugares de esta lista son percibidos como los que mejor condición de vida ofrecen a sus habitantes: con un puntaje cercano a 1.0; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares de la lista, son aquellos con precarias condiciones de vida: con puntajes cercanos a 0.

### C. **Factor de percepción de corrupción**

La percepción de corrupción es factor que analiza de manera planificada la corrupción en el sector Público de cada país. La percepción de corrupción evalúa la situación de un determinado país en relación a la malversación de fondos, sobornos, lucro personal, y demás criterios que alteran el curso normal de la demanda de recursos. La corrupción instalada en los gobiernos vulnera la seguridad de la biocapacidad. Por ejemplo, la minería ilegal continúa operando porque realizan pagos indebidos a los órganos de fiscalización. El tercer factor que se consideró como modificador de la dinámica de la demanda de recursos es la percepción de corrupción, representado como:

$$Factor\_corruption\_Perception$$

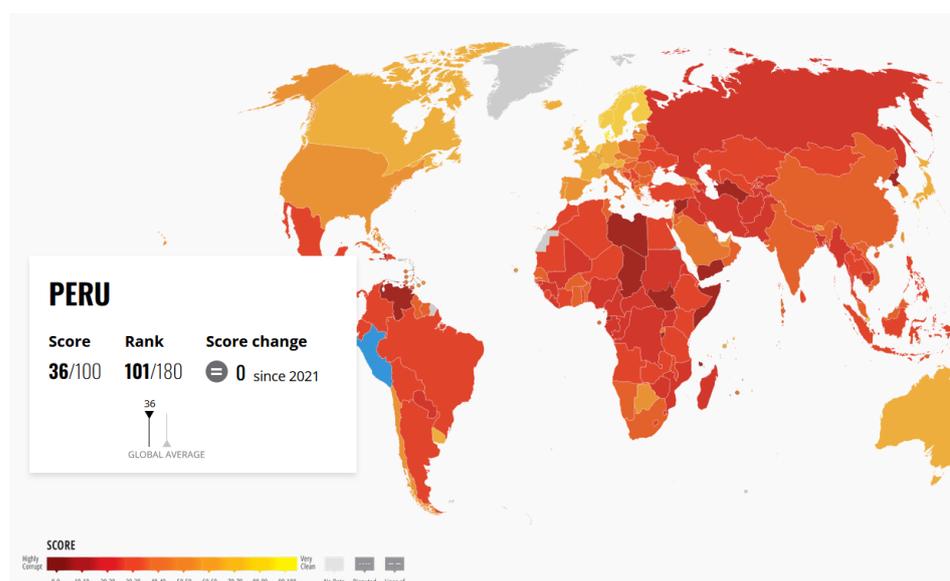
La percepción de corrupción en los países será medida con el índice representado como *CPI* (corruption perception index), es un índice que mide la percepción de corrupción del desempeño del sector público en 180 países. Este índice es publicado por la Transparencia Internacional, organización fundada en 1993, con

sede en Berlín, Alemania. La escala usada por este indicador está comprendida entre 0 y 100; el valor de 100 se refiere a países limpios de corrupción mientras que, 0 se refiere a los totalmente países corruptos.

En la Figura 25, se observa que el valor del *CPI* de Perú entre los años 2012 y 2022 fue de 0.36. En la Figura 26, se observa que Finlandia tenía un valor alto de 0.87, mientras que el valor promedio mundial que tenía un valor de 0.42.

**Figura 25**

*Índice de percepción de corrupción al 2022*



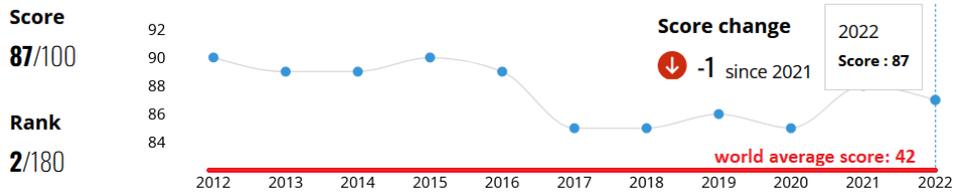
Nota: Fuente Transparency International

<https://www.transparency.org/en/cpi/2022/>

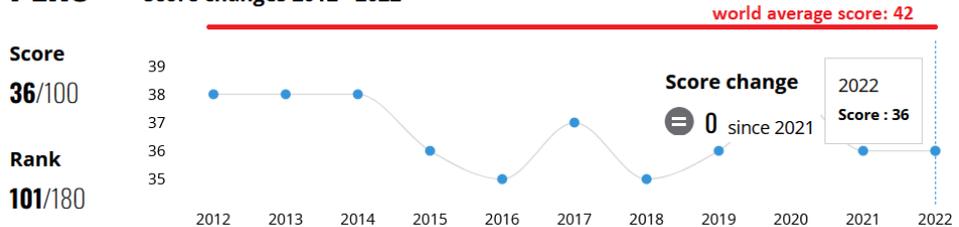
**Figura 26**

*Comparación de la percepción de corrupción al 2022*

## FINLAND Score changes 2012 - 2022



## PERU Score changes 2012 - 2022



Nota: Fuente Transparency International

<https://www.transparency.org/en/cpi/2022/>

El factor de percepción de corrupción debe ser controlado por todos los gobiernos. Es prioritario garantizar sociedades libres de sobornos, malversación de fondos públicos, funcionarios que lucran a costa del estado, burocracia, nepotismo, y demás. Las sociedades libres de corrupción garantizan la gestión eficiente y honesta de sus recursos naturales.

El factor de percepción de corrupción modifica la función  $F\_demand(t)$ ; se ha expresado el valor del desarrollo humano (CPI) con dos decimales.

$$0 < CPI < 1$$

$$step = 0.01$$

Los países que se ubican en los primeros lugares de esta son percibidos como los menos corruptos: con un puntaje cercano a 100; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares de la lista, son percibidos como altamente corruptos: con puntajes cercanos a 0.

### D. Factor de nivel de ingresos

El nivel de ingresos de un país es un factor que determina la demanda de recursos. Por razones claras, los países con altos

ingresos tienen oportunidades para comprar más cosas mientras que los países con ingresos bajos son más propensos a vender sus recursos. Se consideró como modificador de la dinámica de la demanda de recursos es el nivel de ingresos de una población y está representado como:

*Factor\_income\_Level*

El nivel de ingreso de los países fue es medido con el índice representado como *ILI* (income level index), es un índice que mide el nivel de ingresos de 218 países. Este índice es publicado por el World Bank y se cuenta con registros desde 1987. De acuerdo al World Bank Atlas method, los países con ingresos anuales per cápita menores o iguales a \$1,085 son considerados como países con economía baja (low-income economies: *ILI<sub>LI</sub>*), los países con ingresos entre \$1,086 y \$4,255 son considerados como países con economía medio baja (lower middle-income economies: *ILI<sub>LM</sub>*), los países con ingresos entre \$4,256 y \$13,205 son considerados como países con economía medio alta (upper middle-income economies: *ILI<sub>UM</sub>*) y los países con ingresos mayores o iguales a \$13,205 son considerados como países con economía alta (high-income economies: *ILI<sub>HI</sub>*).

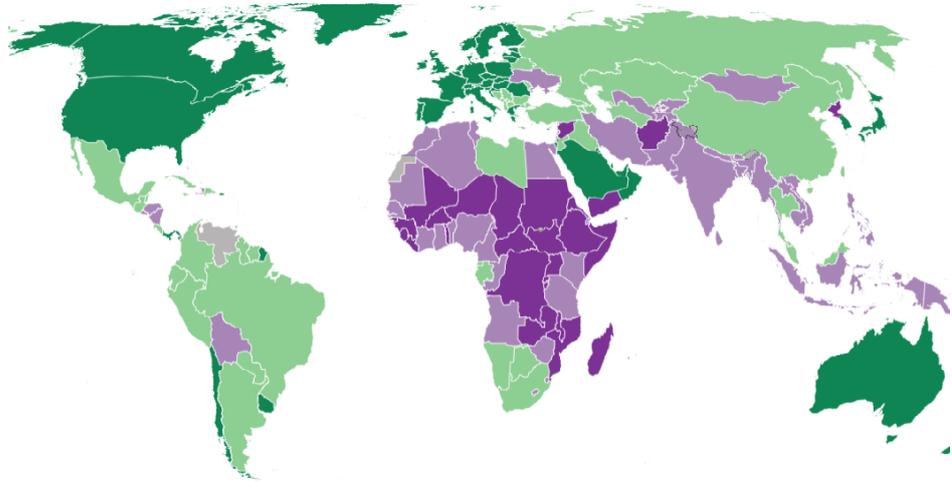
En la Figura 27, se observa que el continente africano es predominantemente conformado por países con economías de ingresos bajo medio y bajo. En América del Sur el nivel de ingreso de los países es mayormente medio alto. En una escala conveniente: Perú, Finlandia, Venezuela y Sudán del Sur tienen valores de 0.6, 0.8, 0.4 y 0.2 respectivamente. El promedio mundial es de 0.57.

**Figura 27**

*Nivel de ingresos del mundo al 2021*

The world by income - 2021

Low income Lower middle income Upper middle income High income



Nota: Fuente Transparency International

<https://www.transparency.org/en/cpi/2022/>

El factor de nivel de ingresos modifica la función  $F_{demand}(t)$ ; se ha expresado el valor del factor de nivel de ingresos ( $CPI$ ) de acuerdo a una escala conveniente:

$$ILI_{LI} = 0.20; ILI_{LM} = 0.40; ILI_{UM} = 0.60; ILI_{HI} = 0.80$$

### 5.1.3. Sistemas de restauración de biocapacidad

Los sistemas de restauración de la biocapacidad son una fuerza conjunta que ayuda a regular y contrarrestar los impactos causados por la dinámica de demanda de recursos.

El criterio de selección de estos sistemas de restauración de biocapacidad se fundamentó en la cantidad de antecedentes publicados en las distintas revistas científicas. Se podrían considerar otros sistemas de restauración que modifiquen la biocapacidad, sin embargo, existen pocos o ningún estudio que permitan considerarlos. La data analizada proviene de fuentes confiables publicadas en los repositorios oficiales. Se analizaron cuatro sistemas de restauración de biocapacidad: sistemas de restauración de bosques ( $FRI$ ), sistemas de disponibilidad de agua ( $WAI$ ), sistemas de protección del entorno ( $EPI$ ) y sistemas de transición energética ( $ETI$ ).

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (FRI + WAI + EPI + ETI) * \frac{1}{4}$$

Los países que lideran la puesta en marcha de los sistemas de restauración de biocapacidad son los que tiene un cercano a 1; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares en puesta en marcha de los sistemas de restauración de biocapacidad tienen un valor cercano a 0.

#### A. **Sistemas de restauración de bosques**

Los sistemas de restauración de bosques tienen la función de contrarrestar la pérdida de cobertura arbórea y, en consecuencia, la restauración de la biocapacidad. Se ha representado como:

$$S_{forest\_Restoration}$$

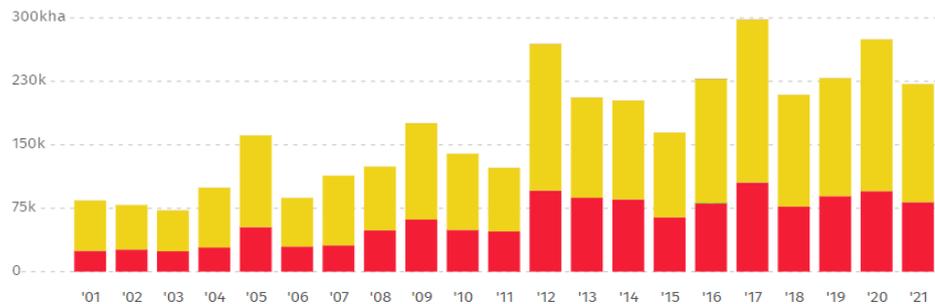
Para tener referencia de la situación actual de los sistemas de restauración de bosques, se usó el indicador *FRI* (Forest Restoration Index) el cual está en función de los siguientes indicadores: *TCL* (Tree Cover Loss) y *TCG* (Tree Cover Gain). Ambos indicadores: *TCL* y *TCG* son calculados de acuerdo a la información publicada por el portal The Global Forest Watch, que monitorea los bosques con datos históricos que van desde el año 2001 hasta el año 2022.

Respecto al indicador *TCL*, la pérdida de cobertura arbórea genera que muchas especies se encuentren en condición vulnerable y que nuestra propia integridad se vea amenazada. En la Figura 28, se observa que para el caso de Perú, entre los años 2002 a 2021, se perdió aproximadamente 3.53 millones de hectáreas de cobertura arbórea, mientras que a nivel mundial se perdieron 459 millones de hectáreas de cobertura arbórea en un periodo similar: de 2001 a 2022. Precisamente en este periodo, Rusia, Brasil y Canadá experimentaron la mayor pérdida de cobertura arbórea con 80.3 millones de hectáreas, 66.1 millones de hectáreas y 48.9 millones de hectáreas respectivamente.

#### **Figura 28**

*Pérdida anual de cobertura arbórea en Perú*

2017	
Total	298kha
● Silvicultura	267ha
● Agricultura itinerante	192kha
● Incendio forestal	303ha
<i>Impulsores de la deforestación permanente:</i>	
● Urbanización	2ha
● Deforestación impulsada por productos básicos	105kha



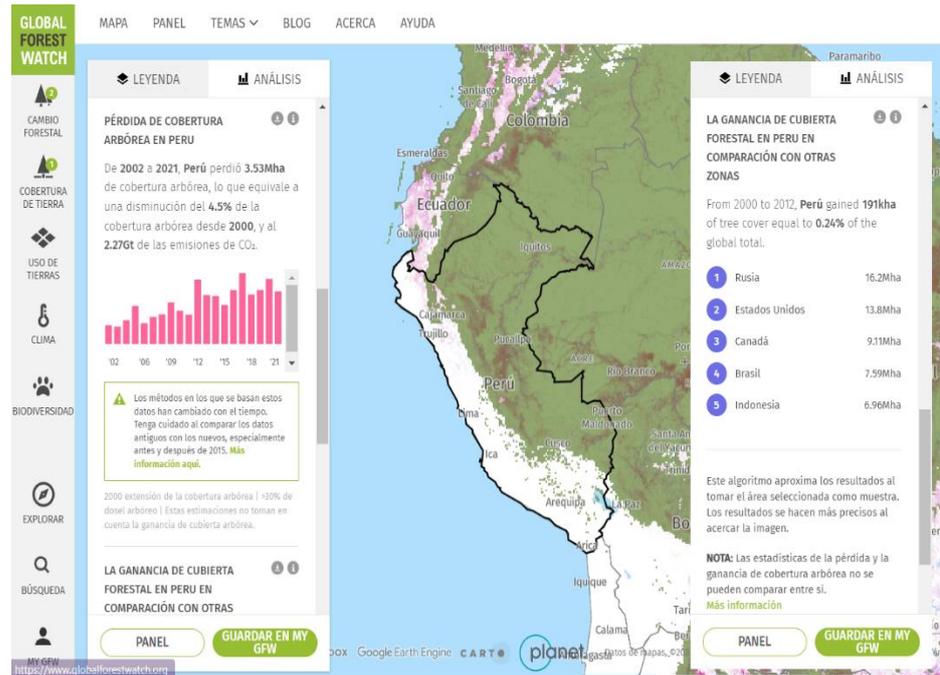
Fuente: The Global Forest Watch, <https://www.globalforestwatch.org/>

En relación al indicador TCG, se evidencia que la ganancia de cobertura arbórea se presenta como una gran alternativa para la restauración de la biocapacidad. En la Figura 29, se observa que entre el año 2000 y 2012, el Perú ganó 191 mil hectáreas de cobertura arbórea, mientras que los países que lideraron este proceso fueron Rusia y Estados Unidos con 16.2 y 13.8 millones de hectáreas respectivamente.

Los sistemas de restauración de bosques necesitan ser impulsados para generar un avance sostenible en la restauración de los impactos generados por factores ambientales. Es necesario que los gobiernos centren sus objetivos en poner en marcha sistemas que reduzcan la pérdida de cobertura arbórea y que, por el contrario, generen una notable ganancia de cobertura arbórea. Para este fin, se debe impulsar una agricultura itinerante sostenible y la gestión sostenible de los productos básicos.

**Figura 29**

*Situación de pérdida y ganancia arbórea en Perú*



Fuente: The Global Forest Watch, <https://www.globalforestwatch.org/>

Los sistemas de restauración de bosques modifican la función  $F_{biocapacity}(t)$ ; entonces, para calcular el valor de  $FRI$  (índice de restauración de bosques) se ha calculado la relación entre el valor de la ganancia de cobertura arbórea ( $TCG$ ) y el valor de la pérdida arbórea ( $TCL$ ).

$$FRI = \frac{TCG}{TCL}$$

$$0 < FRI < 1;$$

$$step = 0.01$$

Los países que lideran la puesta en marcha de los sistemas de restauración de bosques tienen un valor de  $FRI$  cercano a 1; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares en puesta en marcha de los sistemas de restauración de bosques tienen un valor de  $FRI$  cercanos a 0.

### B. **Sistemas de disponibilidad de agua**

Los sistemas de disponibilidad de agua tienen la función de garantizar la disponibilidad de este recurso para toda la humanidad, salvaguardando su pureza y existencia para todo el ecosistema presente a lo largo de las cuencas hidrográficas. Se ha representado a estos sistemas como:

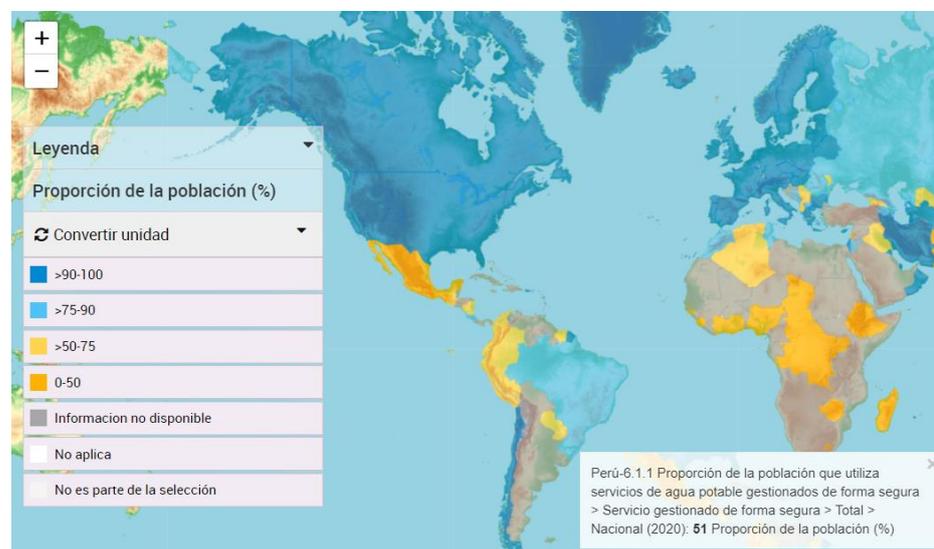
### *S\_water\_Availability*

Para tener referencia de la situación actual de los sistemas de disponibilidad de agua, se usará el indicador *WAI* (Water Availability index). Este indicador es calculado de acuerdo a la información publicada por el portal de datos del ODS 6 de ONU, específicamente a las siguientes dos variables: gestión de agua potable y el grado de implementación de la gestión integral de los recursos hídricos.

Existen países que gestionan de manera más eficiente los servicios de agua potable y, en consecuencia, la población hace uso de este recurso sin tener la necesidad de hacerlo por su propia cuenta, muchas veces alterando de manera irreparable los ecosistemas. En la Figura 30, se observa que en Perú, los servicios de agua potable se encuentran gestionados de manera deficiente, a diferencia de Chile y Brasil.

**Figura 30**

*Población que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura*



Fuente: United Nations - Water, <https://sdg6data.org/en/maps>

La gestión integral de los recursos hídricos nos ofrece otro panorama de cómo algunos países aseguran un aprovechamiento responsable que garantice la conservación de los ecosistemas relacionados a los recursos hídricos. En la Figura 31, se observa que el grado de implementación de la gestión integrada de

recursos hídricos en Perú se encuentra en un nivel medio con tendencia a bajo, a diferencia de Brasil y Colombia que presentan un nivel medio alto.

En este sentido, los sistemas de disponibilidad de agua que se necesitan impulsar son los encargados de llevar a cabo una eficiente gestión de agua potable y de implementar una eficiente gestión integrada de los recursos hídricos.

**Figura 31**

*Implementación de la gestión integral de los recursos hídricos*



Fuente: United Nations - Water, <https://sdg6data.org/en/maps>

Los sistemas de disponibilidad de agua y saneamiento modifican la función  $F_{biocapacity}(t)$ ; entonces, para calcular el valor de  $EPI$  (*índice de disponibilidad de agua y saneamiento*) se ha promediado en escalas similares el valor de la gestión de agua potable ( $DWM$ ) y el valor de la gestión integrada de los recursos hídricos ( $WRM$ ).

$$WAI = \left[ DWM + \left( \frac{WRM}{100} \right) \right] * \frac{1}{2}$$

$$0 < WAI < 1;$$

$$step = 0.01$$

Los países que lideran la puesta en marcha de los sistemas de disponibilidad de agua tienen un valor de  $WAI$  cercano a 1; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares en puesta en marcha de los sistemas de disponibilidad de agua, tienen un valor de  $WAI$  cercano a 0.

### **C. Sistemas de protección del entorno**

Los sistemas de protección del entorno ayudan a conservar y recuperar los ecosistemas en general, Se ha representado como:

#### *S\_environmental\_Protection*

Para tener referencia de la situación actual de los sistemas de protección del entorno, se usó el indicador *EPI* (*Environmental Protection Index*), el cual está en función de los siguientes indicadores: *WGI* (*Waste Generation index*), *PAI* (*Terrestrial and marine Protected Areas Index*) y *CEI* (*CO2 Emissions Index*),

El indicador *WGI* es calculado de acuerdo a la información publicada por el portal ATLAS of Sustainable Development Goals 2023 del Banco Mundial, en referencia al ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles). El indicador *PAI* es calculado de acuerdo a la información publicada por el portal Datsa del Banco Mundial. Finalmente, el indicador *CEI* es calculado de acuerdo a la información publicada por el portal ATLAS of Sustainable Development Goals 2023 del Banco Mundial, en referencia al ODS 13 (Acción climática).

Respecto al indicador *WGI*, los residuos sólidos de origen municipal tienen que ser tratados de manera adecuada para evitar las condiciones insalubres de una población que desencadenen en la contaminación del suelo y el agua. En la Figura 32, se observa que el año 2020, la generación per cápita de basura en el Perú, alcanzó los 270 kilogramos, en relación al promedio mundial que fue de 376 kilogramos. A continuación, en la Figura 33, es posible distinguir que la mayoría de basura generada en el mundo, corresponde a los países con niveles de ingreso medio alto y alto. Así mismo, la Figura 34 muestra que más de la mitad del tratamiento de la basura en los países con niveles de ingresos bajo y medio se lleva a cabo al aire libre, mientras que en los países con niveles altos de ingresos, el tratamiento de la basura se gestiona mayoritariamente con procesos de reciclaje y en rellenos sanitarios controlados.

**Figura 32**

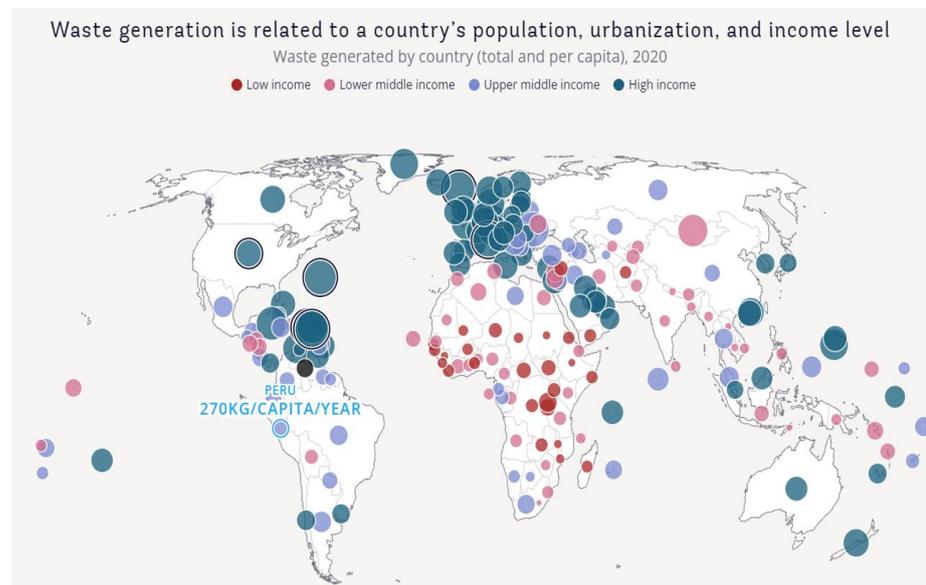
*Cantidad de producción de basura en Perú al 2023*



Fuente: The World Bank, ATLAS of Sustainable Development Goals 2023, <https://datatopics.worldbank.org/sdggatlas/goal-11-sustainable-cities-and-communities>

**Figura 33**

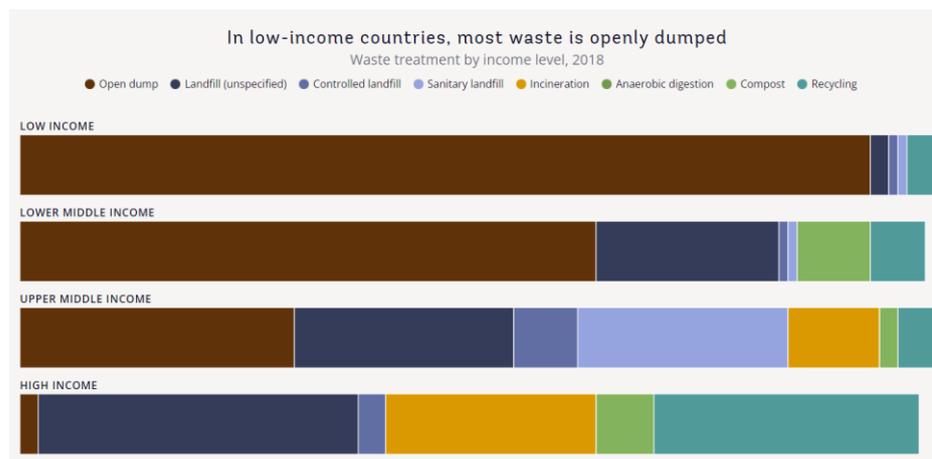
*Comparación de la generación de basura de acuerdo al nivel de ingresos 2023*



Fuente: The World Bank, ATLAS of Sustainable Development Goals 2023, <https://datatopics.worldbank.org/sdggatlas/goal-11-sustainable-cities-and-communities>

**Figura 34**

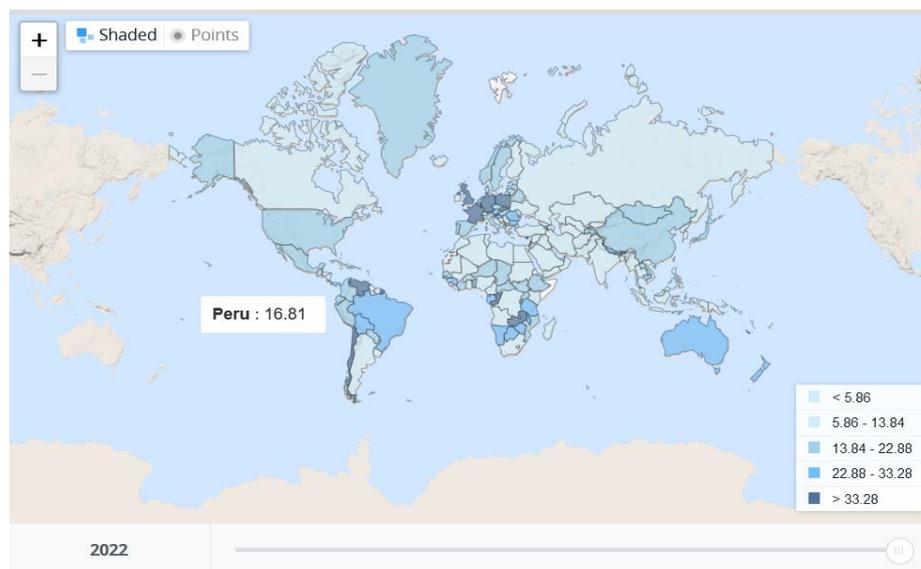
## Gestión de residuos de acuerdo al nivel de ingresos



Fuente: The World Bank, ATLAS of Sustainable Development Goals 2023, <https://datatopics.worldbank.org/sdgatlas/goal-11-sustainable-cities-and-communities>.

### Figura 35

Porcentaje del territorio de un país dedicado a áreas protegidas



Fuente: The World Bank, Data, <https://data.worldbank.org/indicator/ER.PTD.TOTL.ZS?end=2022&start=2016&type=shaded&view=map&year=2022>

En relación al indicador PAI, las áreas protegidas terrestres y marítimas tienen un rol fundamental para contener los impactos producidos en el ambiente y así, garantizar la disponibilidad de los recursos propios de cada ecosistema como son: material genético, recursos para el desarrollo, regulación del clima, entre otros. En la Figura 35, se observa que el año 2020, el Perú contaba con el

16.81% del territorio entre áreas protegidas terrestres y marítimas, mientras que el promedio mundial era de 14.8%. En este mismo gráfico se observa que Venezuela cuenta con mejores niveles en América del Sur, mientras tanto, Argentina presenta un nivel inferior.

Respecto al indicador *CEI*, es importante que los países pongan en marcha acciones para cumplir el objetivo de limitar el calentamiento global a un máximo de 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales. En la Figura 36, se observa que el año 2019, el Perú generaba 3.1 toneladas de emisiones de CO2 per cápita, mientras que el promedio mundial era de 6.2 toneladas de emisiones de CO2 per cápita. En la Figura 37, se puede distinguir que los países con niveles de ingreso medio alto son los responsables de las mayores emisiones de gases de efecto invernadero. Mientras que en la Figura 38 se muestra que China es el mayor generador de gases de efecto invernadero del mundo con 7.61 toneladas de emisiones de CO2 per cápita, haciendo un total 10,707 millones de toneladas de emisiones de CO2 per cápita,

### Figura 36

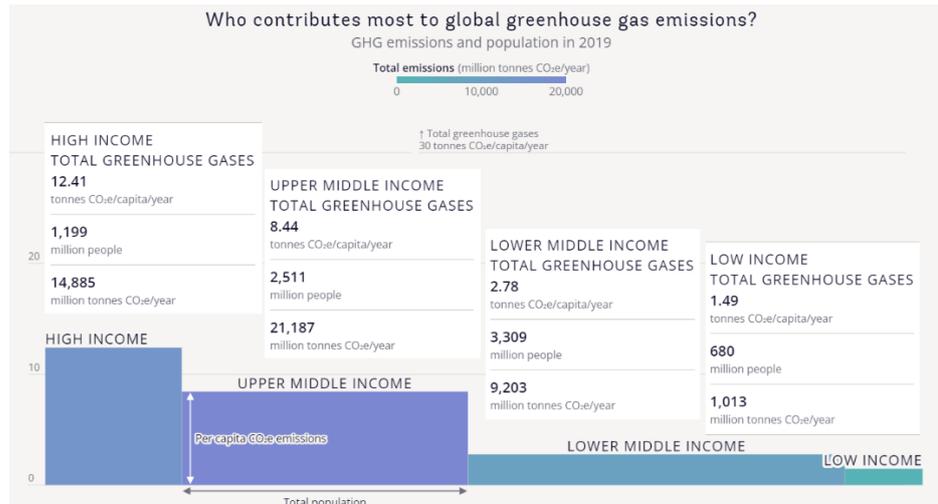
*Emisiones de CO2 de Perú al 2019*



Fuente: The World Bank, ATLAS of Sustainable Development Goals 2023, <https://datatopics.worldbank.org/sdgsatlas/goal-13-climate-action/>

### Figura 37

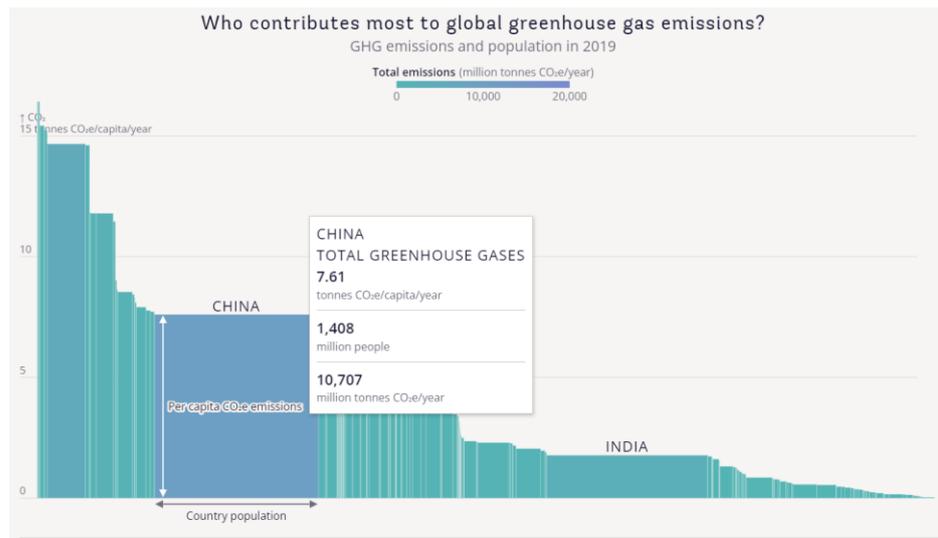
*Emisiones de CO2 de acuerdo al nivel de ingreso al 2023*



Fuente: The World Bank, ATLAS of Sustainable Development Goals 2023, <https://datatopics.worldbank.org/sdgtatlas/goal-13-climate-action/>

**Figura 38**

*Países que generan más emisiones de CO<sub>2</sub>*



Fuente: The World Bank, ATLAS of Sustainable Development Goals 2023, <https://datatopics.worldbank.org/sdgtatlas/goal-13-climate-action/>

En este sentido, los sistemas de protección del entorno necesitan impulsar la eficiente gestión de los residuos sólidos generados, tanto en el área municipal e industrial. Así mismo, las áreas protegidas tienen que contar con los recursos suficientes para su administración. Es importante continuar con las acciones de mitigación climática y adaptación climática para reducir el impacto de los fenómenos meteorológicos.

Los sistemas de protección de entorno modifican la función  $F_{biocapacity}(t)$ ; entonces, para calcular el valor de  $EPI$  (*índice de protección de entorno*) se ha promediado en escalas similares el valor de la generación de basura ( $RCI$ ), el valor de las áreas terrestres y marinas protegidas ( $PAI$ ); y, el valor de las emisiones de CO2 ( $CEI$ ).

$$EPI = \left[ \left( 1 - \frac{WGI}{1400} \right) + \frac{PAI}{33.28} + \left( 1 - \frac{CEI}{30} \right) \right] * \frac{1}{3}$$

$$0 < EPI < 1;$$

$$step = 0.01$$

Los países que lideran la puesta en marcha de los sistemas de protección del entorno tienen un valor de  $EPI$  cercano a 1; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares en la puesta en marcha de los sistemas de de protección del ambiente, tienen un valor de  $EPI$  cercano a 0.

#### **D. Sistemas de transición energética**

Los sistemas de transición energética fomentan el uso eficiente de energía y, en consecuencia, la disminución de demanda de combustibles contaminantes. Se ha representado como:

$$S_{energy\_Transition}$$

Para tener referencia de la situación actual de los sistemas de transición energética, se usó el indicador  $ETI$  (Energy Transition Index) el cual está en función de los siguientes indicadores:  $RCI$  (Renewable Capacity Index) y  $CCI$  (Access to Clean Cooking Index).

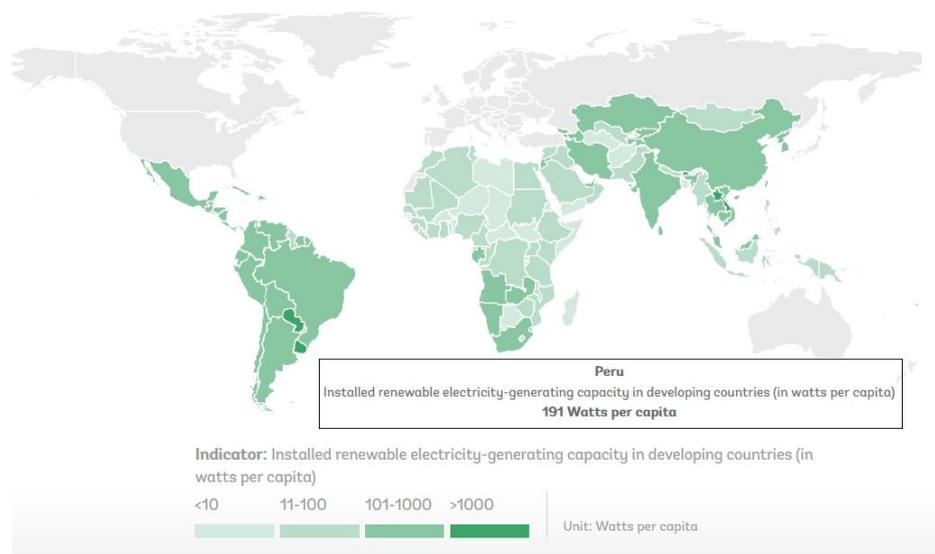
Ambos indicadores:  $RCI$  y  $CCI$  son calculados de acuerdo a la información publicada por el portal TRACKING SDG 7 – The Energy Progress Report.

Respecto al indicador  $RCI$ , en los últimos años, los países en desarrollo han logrado aumentar su capacidad para generar electricidad por medio de fuentes renovables. Entre 2015 y 2020 la tasa de crecimiento de energía renovable fue del 9.5% en los países en desarrollo, 5.2% para los países menos desarrollados y

2.4% para los países en desarrollo sin litoral, proyectando un retraso de aproximadamente cuarenta años. En la Figura 39, se aprecia que en Perú, la capacidad instalada de generación de energía renovable entre el año 2011 y 2020 es de 191 watss per cápita, inferior a China o India; en la Figura 40, se observa que este valor es de 746 watts per cápita generados en Brasil, 716 watts per cápita son generados en China y el promedio mundial, respecto a países en desarrollo, que fue de 268 watts per cápita.

**Figura 39**

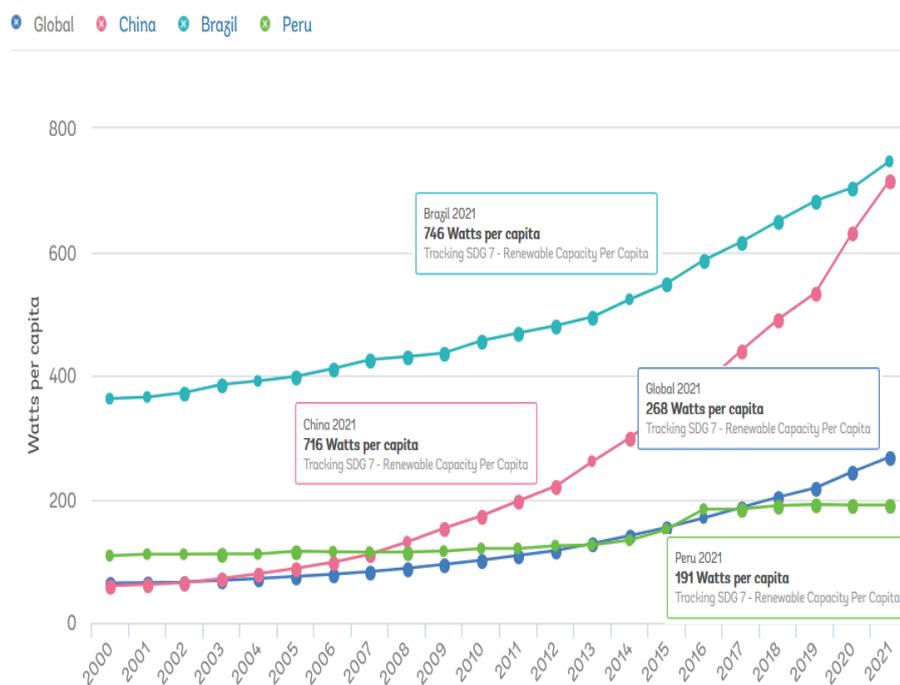
*Capacidad per cápita instalada de energías renovables en Perú al 2020*



Fuente: Tracking SDG 7, <https://trackingsdg7.esmap.org/>

**Figura 40**

*Comparación de capacidad per cápita instalada de energías renovables*



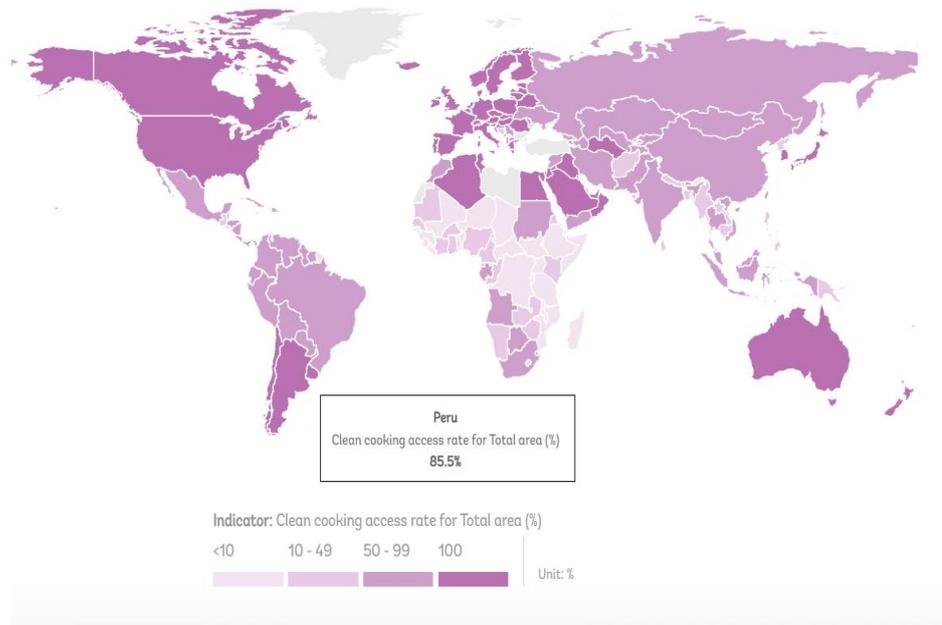
© International Renewable Energy Agency (IRENA)

Fuente: Tracking SDG 7, <https://trackingsdg7.esmap.org/>

En relación al indicador CCI, los países con niveles de ingresos bajo y medio bajo, continúan cocinando sobre fuego abierto en el hogar y estas acciones generan graves perjuicios a los integrantes de la familia y también al ambiente. El uso de cocinas no limpias hace que la demanda de combustibles contaminantes continúe vigente y por lo tanto muchos ecosistemas son destruidos para conseguir estos recursos. En la Figura 41, se aprecia que en Perú, el 85.5% de la población cuenta con acceso a cocinas con energía limpia, superior a los países del centro y oriente del continente Africano; mientras tanto, en la Figura 42, se observa que en Finlandia este valor es del 100%, en China 83.2% y el promedio mundial es de 71.1%

**Figura 41**

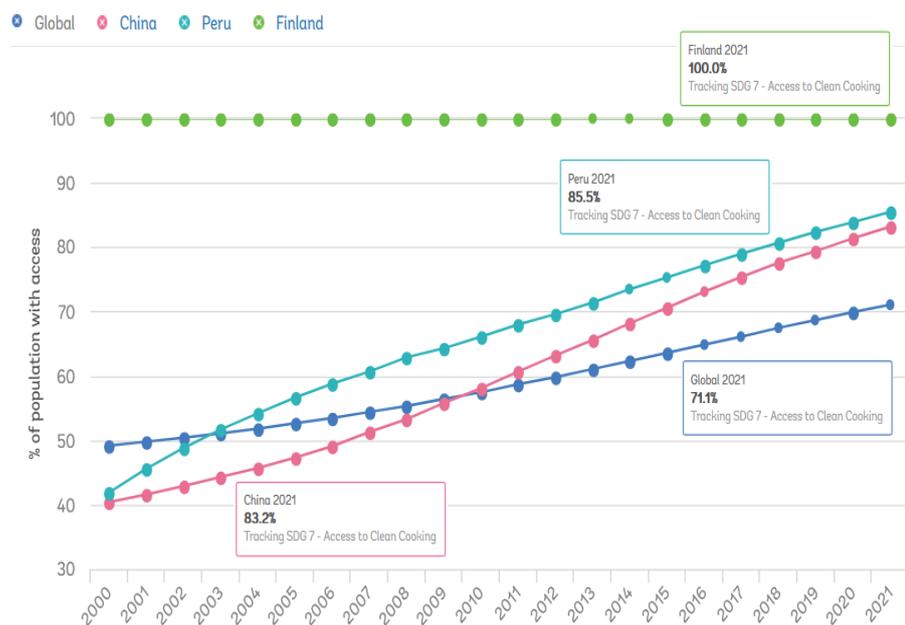
*Acceso a cocinas con energías limpias en Perú*



Fuente: Tracking SDG 7, <https://trackingsdg7.esmap.org/>

**Figura 42**

*Comparación del acceso a cocinas con energías limpias*



© World Health Organization. Population data based on the 2018 Revision of World Urbanization Prospects.

Fuente: Tracking SDG 7, <https://trackingsdg7.esmap.org/>

Es así que, los sistemas de transición energética necesitan ser impulsado en todas sus dimensiones. Es necesario que los gobiernos superen la capacidad instalada de generación de energía renovable y el acceso a cocinas con energía limpia.

Los sistemas de transición energética modifican la función  $F_{biocapacity}(t)$ ; entonces, para calcular el valor de  $ETI$  (*índice de transición energética*) se ha promediado en escalas similares el valor de la capacidad instalada de gestión de energía renovable ( $RCI$ ) y el valor de acceso a cocinas con energía limpia ( $CCI$ ).

$$ETI = \left( \frac{RCI}{1000} + CCI \right) * \frac{1}{2}$$

$$0 < ETI < 1;$$

$$step = 0.01$$

Los países que lideran la puesta en marcha de los sistemas transición energética tienen un valor de  $ETI$  cercano a 1; mientras que, los países que se ubican en los últimos lugares en la puesta en marcha de los sistemas transición energética, tienen un valor de  $ETI$  cercano a 0.

#### 5.1.4. Construcción del modelo *Remaining Path*

Para ilustrar la necesidad de construir el modelo matemático *Remaining Path*, es necesario observar la Figura 43, obtenida de *la Global Footprint Network*. Esta figura ilustra la relación existente entre la huella ecológica por persona y la biocapacidad por persona en el mundo: dibujadas en color rojo y verde respectivamente.

Es interesante notar que en el año 1970 ambas curvas se intersecan con un valor de 2.7 gha; a partir de este año la biocapacidad presenta una clara tendencia a disminuir y la huella ecológica tiene una tendencia a seguir creciendo.

Han pasado más de cinco décadas y estas tendencias continúan acentuándose. Este gráfico: Figura 43, presenta una situación alarmante para el futuro de la humanidad. En el presente apartado explicaremos de manera detallada la construcción del modelo matemático *Remaining Path* haciendo énfasis en los detalles no conocidos de la tendencia de la biocapacidad.

#### Figura 43

*Huella ecológica y biocapacidad del mundo al 1970*

## WORLD (1970)

GDP PER PERSON  
\$5204

POPULATION  
3,700,440,064

Biocapacity  
per person

2.7

gha

Ecological Footprint  
per person

2.7

gha

BIOCAPACITY  
RESERVE(+)/DEFICIT(-)

0.0

gha

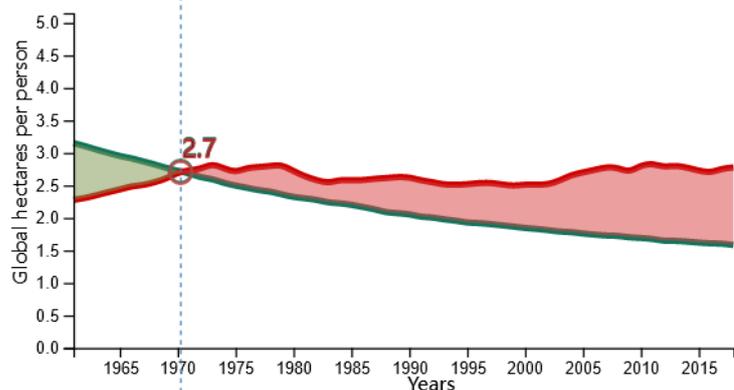
Ecological Footprint and

Biocapacity

From 1961 to 2018

Ecological  
Footprint per  
person

Biocapacity per  
person



Fuente: Global Footprint Network: [data.footprintnetwork.org](http://data.footprintnetwork.org)

Para dar una visión general del proceso de construcción del modelo matemático Remaining Path, hacemos referencia al apartado 4.4.3. del capítulo 4 de la presente investigación, donde se detalla el proceso de construcción del modelo matemático. De acuerdo a la Figura 15, el proceso consta de cinco procesos principales: recolectar datos, filtrar y clasificar datos, analizar datos, relacionar información y desarrollar el producto.

El primer proceso denominado recolectar datos, ver Figura 17, se enfoca en el objetivo principal de la presente investigación, así mismo se definen las técnicas e instrumentos de recolección de datos, se recolectan y almacenan en formato de Microsoft Excel los datos desde la página web de la Global Footprint Network, validando que el origen de la data sea genuino.

A continuación, el segundo proceso que es denominado filtrar y clasificar datos. Recibe como *input* la data validada proveniente del proceso anterior para filtrar los datos y a continuación clasificarlos en Microsoft Excel. Entonces, el *output* de este proceso es la base de datos filtrada y clasificada de biocapacidad y huella ecológica a nivel

de Perú y a nivel del mundo. Estas bases de datos están disponibles en los apéndices C y D de la presente investigación.

En el proceso denominado analizar datos, ver Figura 18, analiza la data filtrada y clasificada de la biocapacidad y la huella ecológica, también, se revisan los antecedentes disponibles en las revistas científicas indexadas para seleccionar los factores de la dinámica de demanda de recursos y los sistemas de restauración de biocapacidad para posteriormente analizarlos y así generar cuatro *output*: tendencia de huella ecológica, tendencias de biocapacidad, tendencia de los factores de la dinámica de demanda de recursos y tendencia de sistemas de restauración de biocapacidad. Todo este proceso ha sido detallado en los apartados 5.1.2 y 5.1.3 del presente capítulo.

En seguida, el proceso denominado relacionar información, ver Figura 19, relaciona los *output* del proceso anterior para generar tres funciones matemáticas denominadas:  $F\_demand\_Dynamics(t)$ ,  $F\_biocapacity(t)$  y  $Path(t)$ ; las cuales serán respectivamente detalladas en las secciones A, B y C del presente apartado.

Finalmente, como se observa en la Figura 20, el proceso denominado desarrollar producto, hace uso de los *output* del proceso anterior y tiene como objetivo construir el modelo matemático mediante las técnicas del análisis matemático y el cálculo integral; es así que se genera como *output* la función  $F\_remaining\_Path(t)$ ; esta función cumple con la finalidad del objetivo principal del presente trabajo.

A continuación, en el siguiente subproceso, haciendo uso de la función resultante del subproceso anterior, se tiene el objetivo de organizar el modelo matemático para presentarlo con la denominación Remaining Path, versión 1.0. Estos dos subprocesos son desarrollados en la sección C del presente apartado. Mientras tanto, el tercer subproceso, tiene por objetivo programar en código Python el modelo matemático; el código de programación se detalla en el Apéndice E de la presente investigación

#### **A. Función Demand Dynamics**

Describe la demanda de dinámica de recursos, ver Gráfico 44. La función  $F\_demand\_Dynamics(t)$  es una ecuación lineal que resulta de la proyección de la tendencia de los datos que resultan de unir los datos históricos de huella ecológica publicados por la National Footprint Accounts (*graficada con línea continua de color rojo*) y la función  $EF\_Adjust(t)$  que es el resultado de realizar el ajuste a la tendencia de la curva de la huella ecológica (*graficada con línea entrecortada de color rojo*), posterior a los datos históricos, teniendo en cuenta la tendencia de la curva de la población junto a los cuatro factores de la dinámica de demanda de recursos.

La definición matemática de la función es la siguiente:

$$F\_demand\_Dynamics(t) = dt + e; t > 0; r \geq 0$$

$$F\_demand\_Dynamics(t) =$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{last\_year} \\ \bigcup_{t=first\_year} \text{data\_EF}(t) + \text{projection} \\ \bigcup_{t=first\_year} \text{EF\_Adjust}(t) \end{array} \right]$$

$$EF\_Adjust(t) = d_{adjust} * t + e_{adjust}$$

$$\text{Where: } d_{adjust} = \text{slope}; e_{adjust} = (\text{slope} * t_{EFLY}) - EFLY$$

$$\text{slope} = SAF + DFI$$

$$SAF = \text{average}(\text{slope}_p, \text{slope\_EF})$$

$$\text{population} = \text{slope}_p * t + c$$

$$\text{ecological\_Footprint} = \text{slope\_EF} * t + b$$

$$DFI = (1 - \text{average}(SDI, HDI, CPI, ILI)) * 0.1$$

Where:

$t$  = time

$SAF$  = Slope adjust factor

$DFI$  = Demand factor index

$EFLY$  = Ecological footprint of the last year

$data\_EF(t)$  = Ecological footprint records up to 2018

$EF\_Adjust(t)$  = Adjusted ecological footprint projection

$slope_p$  = Slope from population trend

$slope_{EF} = \text{Slope from ecological footprint trend}$

### B. **Función Biocapacity**

Esta función describe el comportamiento de la biocapacidad, ver Figura 44. La función  $F_{biocapacity}(t)$  es una ecuación lineal que resulta de la proyección de la tendencia de los datos que resultan de unir los datos históricos de la biocapacidad publicados por la National Footprint Accounts (*graficada con línea continua de color verde*) y la función  $BF_{Trend}(t)$  (*graficada con línea entrecortada de color verde*) que es el resultado de calcular la tendencia de la curva de la biocapacidad, posterior a los datos históricos.

La función  $F_{biocapacity}(t)$  varía lentamente respecto a la puesta en marcha de los sistemas de recuperación; por esta razón la ecuación de la biocapacidad no cuenta con una función de ajuste de parámetros.

La definición matemática de la función es la siguiente:

$$F_{biocapacity}(t) = bt + c; t > 0; r \geq 0$$

$$F_{biocapacity}(t) =$$

$$\left[ \bigcup_{t=first\_year}^{last\_year} data\_BC(t) + \bigcup_{t=last\_year}^{projection} BC\_Trend(t) \right]$$

Where:

$t = \text{time}$

$data\_BC(t) = \text{Biocapacity records up to 2018}$

$BC\_Trend(t) = \text{Biocapacity trend up to projection}$

$first\_year = \text{Year of first record of biocapacity}$

$last\_year = \text{Year of last record of biocapacity}$

$projection = \text{Year of projection of biocapacity}$

### C. **Función Path**

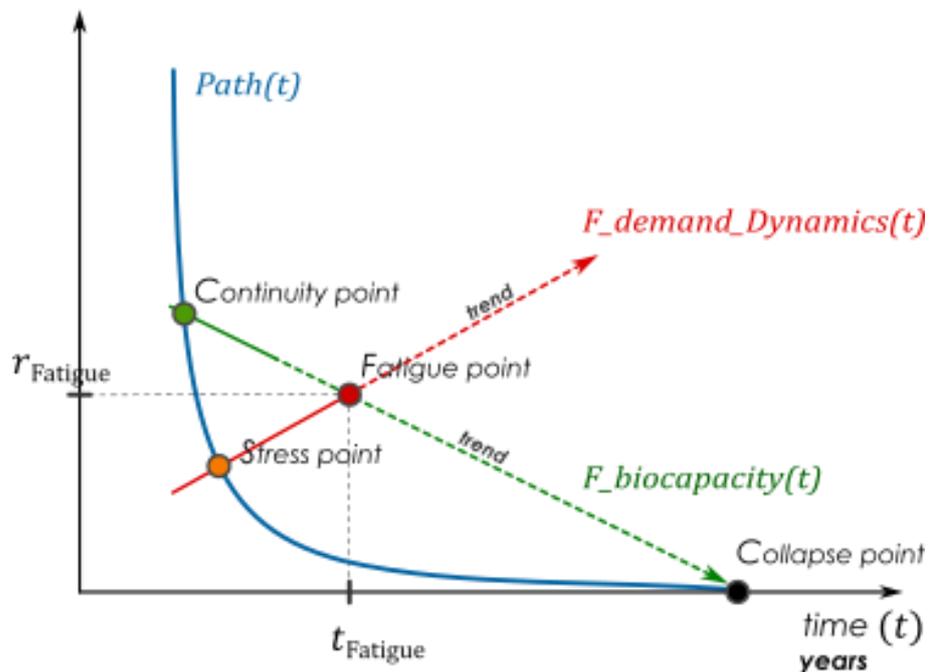
A continuación, como se observa en la Figura 44, representamos la relación existente entre la función  $F_{biocapacity}(t)$  y la función  $F_{demand\_Dynamics}(t)$ , esta relación es graficada con una línea continua de color azul y su denominación es  $Path(t)$ .

$$Path(t) = \frac{F\_biocapacity(t)}{F\_demand\_Dynamics(t)}; t > 0; r \geq 0$$

En la Figura 44 se muestra la intersección de las tres funciones:  $F\_demand\_Dynamics(t)$ ,  $F\_biocapacity(t)$  y  $Path(t)$ ; entonces, se generan tres puntos de intersección sobre la función  $Path(t)$ : Continuity point (*punto de continuidad de la biocapacidad*), Stress point (*punto de estrés de la biocapacidad*) y Collapse point (*punto de colapso de la biocapacidad*). Mientras tanto, de la intersección de las funciones  $F\_demand\_Dynamics(t)$  y  $F\_biocapacity(t)$  se genera Fatigue point (*punto de fatiga de la biocapacidad*).

**Figura 44**

Funciones  $F\_demand\_Dynamics(t)$ ,  $F\_biocapacity(t)$   $Path(t)$  y puntos críticos resources ( $r$ ) hga/person



*Continuity point* (graficado en color verde) se ubica en el periodo en el que la biocapacidad experimenta una tendencia de continuidad. Expresado en hga per cápita, en este periodo el valor evaluado en la curva de la biocapacidad es mayor que el valor evaluado en la curva de la dinámica de demanda de recursos. En este periodo la población tiene suficientes recursos disponibles para usarlos en las diferentes actividades humanas.

*Stress point (graficado en color naranja)* se ubica en el periodo en el que la biocapacidad experimenta una tendencia de estrés, es decir, experimenta una tendencia negativa frente a una tendencia de crecimiento de la dinámica de demanda de recursos. Expresado en hga per cápita, en este periodo el valor evaluado en la curva de la biocapacidad se acerca al valor evaluado en la curva de la dinámica de demanda de recursos. En este periodo la población inicia un proceso de consumo masivo de recursos. De acuerdo al Gráfico 43, en el caso del mundo, esta periodo fue anterior al año 1970.

*Fatigue point (graficado en color rojo)* representa el periodo en que la biocapacidad experimenta una tendencia de fatiga, es decir, se aproxima al colapso: situación que no es evidente para la población. Expresado en hga per cápita, en este momento el valor evaluado en la curva de la biocapacidad es igual al valor evaluado en la curva de la dinámica de demanda de recursos. A partir este momento, la población se aproxima al colapso: se pone en riesgo la continuidad de la humanidad. De acuerdo al Gráfico 43, en el caso del mundo, este periodo inicia en el año 1970.

*Collapse point (graficado en color negro)* representa el periodo en que la biocapacidad experimenta el colapso. Expresado en hga per cápita, cerca a este momento el valor evaluado en la curva de la biocapacidad es cercano a cero, mientras que el valor evaluado en la curva de la dinámica de demanda de recursos se dispara. Es una situación no deseada a la cual nos acercamos cada día.

#### **D. Función Remaining Path**

Representada como  $F\_remaining\_Path(t)$ , es el resultado de cumplir con el objetivo principal de esta investigación: construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

En este apartado se terminaron de definir estas tres funciones:

$$F\_biocapacity(t) = -bt + c; t > 0; r \geq 0$$

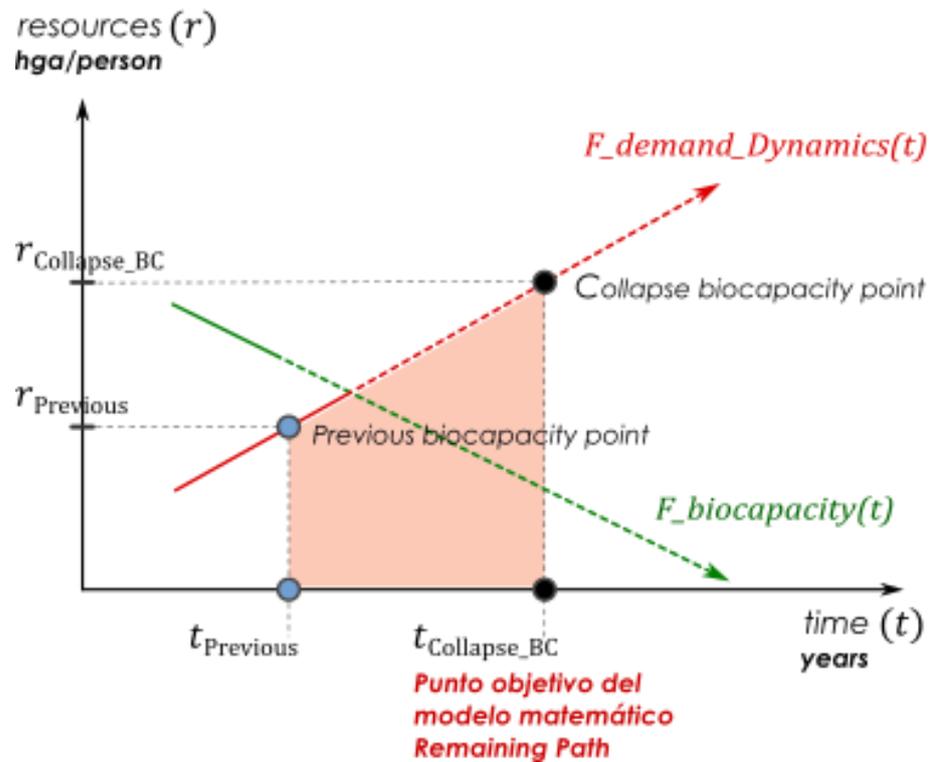
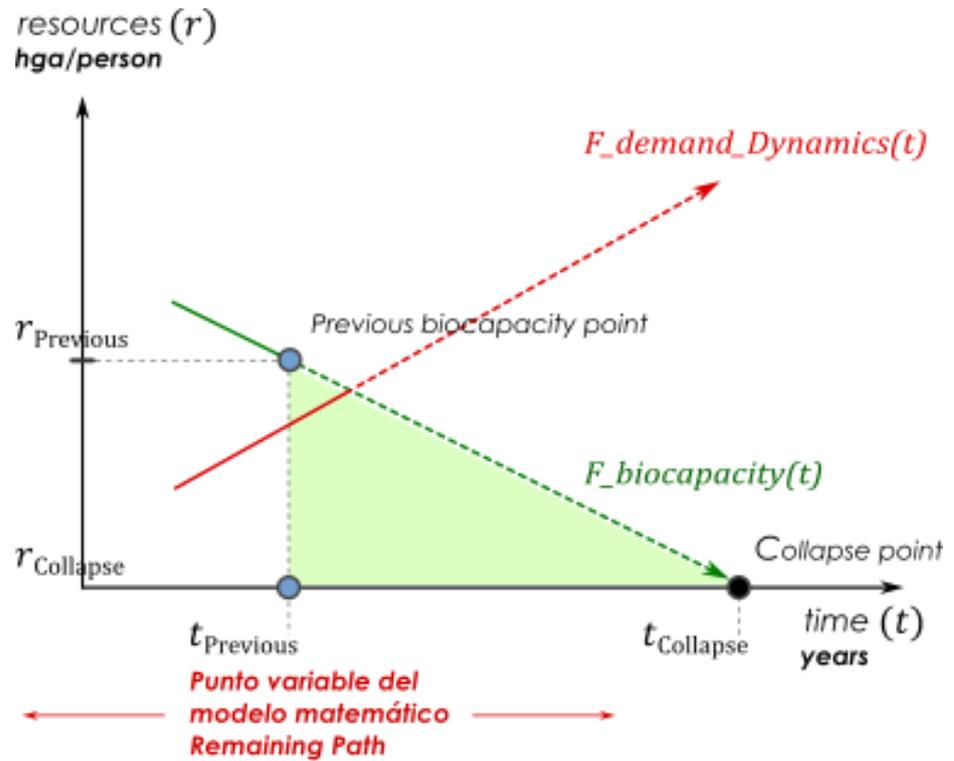
$$F\_demand\_Dynamics(t) = dt + e; t > 0; r \geq 0$$

$$Path(t) = \frac{F\_biocapacity(t)}{F\_demand\_Dynamics(t)}; t > 0; r \geq 0$$

Como se observa en la Figura 46, la función  $F\_biocapacity(t)$  tiene una tendencia negativa que aparentemente termina el año definido como  $t_{collapse}$ , sin embargo, esta idea no es verdadera, porque el tiempo no transcurre de manera estática.

**Figura 45**

*Áreas definidas por previous biocapacity point y collapse biocapacity point*



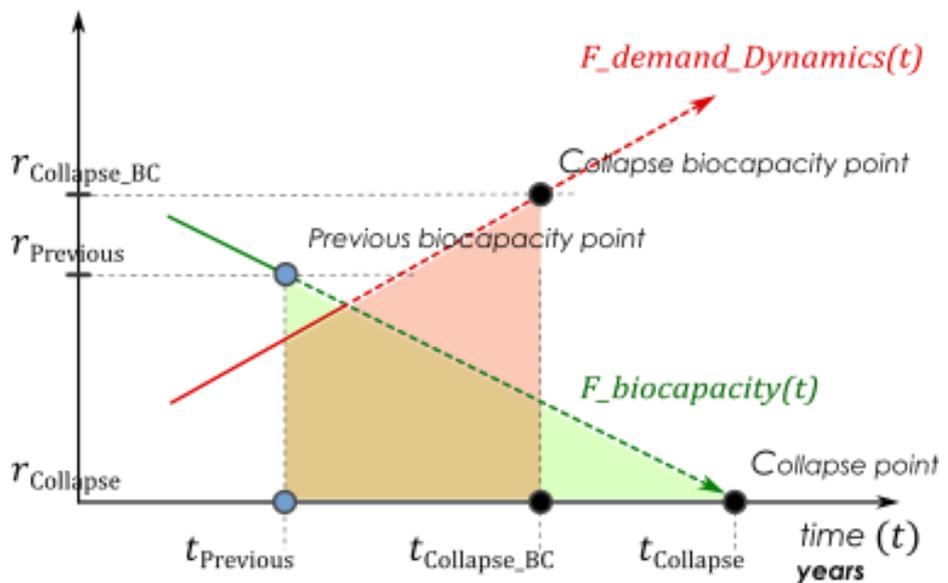
La función  $F_{\text{remaining\_Path}}(t)$  compara el área bajo la curva de la función  $F_{\text{biocapacity}}(t)$  con el área bajo la curva de la función  $F_{\text{demand\_Dynamics}}(t)$ . En términos generales, se compara la cantidad de recursos disponibles (*triángulo de color verde*) con la

cantidad de recursos consumidos por la población (*trapecio de color rojo*). Ver Figura 45.

El mecanismo de la función  $F\_remaining\_Path(t)$  consiste en que el área bajo la curva de la función  $F\_biocapacity(t)$  en el periodo cuyo límite constante superior es  $t_{Collapse}$  y cuyo límite inferior:  $t_{Previous}$ , puede ser cualquiera, siempre que sea menor al límite superior, debe ser igual al área bajo la curva de la función  $F\_demand\_Dynamics(t)$  en el periodo cuyo límite inferior es  $t_{Previous}$  y cuyo límite superior sea  $t_{Collapse\_BC}$ , el cual es precisamente el punto objetivo del modelo matemático Remaining Path y el objetivo general de esta investigación. Ver Figura 45.

**Figura 46**

Comparación de áreas de  $F\_biocapacity(t)$  y  $F\_demand\_Dynamics(t)$  en un  $resources (r)$  *hga/person*



En la Figura 45, se observa que el área bajo la curva de la función de biocapacidad puede ser expresada como la integral definida de  $F\_biocapacity(t)$  desde un tiempo inicial  $t_0$  hasta un tiempo final  $t_f$ .

$$\int_{t_0}^{t_f} F\_biocapacity(t) dt$$

Así mismo, la Figura 45 muestra que el área bajo la curva de la función de dinámica de demanda de recursos puede ser

expresada como la integral definida de la función  $F\_demand\_Dynamics(t)$  desde un tiempo inicial  $t_0$  hasta un tiempo final  $t_f$ .

$$\int_{t_0}^{t_f} F\_demand\_Dynamics(t) dt$$

Al reemplazar los valores, se obtiene la ecuación que obtendrá los valores para construir la función  $F\_remaining\_Path(t)$ , esta ecuación se denomina: ecuación Remaining Path. Ver Figura 46.

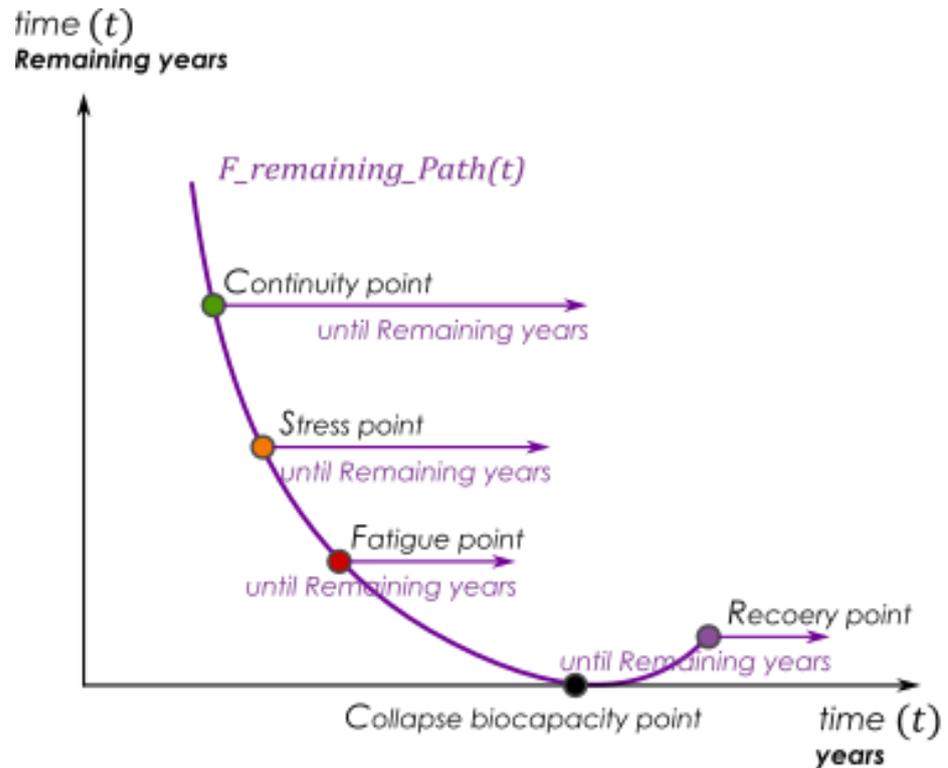
$$\int_{t_{Previous}}^{t_{Collapse}} F\_biocapaity(t) dt = \int_{t_{Collapse}}^{t_{Collapse\_BC}} F\_demand\_Dynamics(t) dt$$

El valor de  $t_{Collapse\_BC}$ , es el valor que busca el modelo matemático y el objetivo general de esta investigación: construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

Finalmente, la función  $F\_remaining\_Path(t)$  fue construida después de ejecutar la ecuación Remaining Path de manera iterativa mediante un programa escrito en Python. Sobre la función se ubicaron los puntos críticos que fueron detallados en el Gráfico 44 para mostrar los años restantes en cada punto; también se añadió el punto de recuperación de biocapacidad (Recovery point). Ver Figura 47.

#### **Figura 47**

*Descripción de la función Remaining Path*



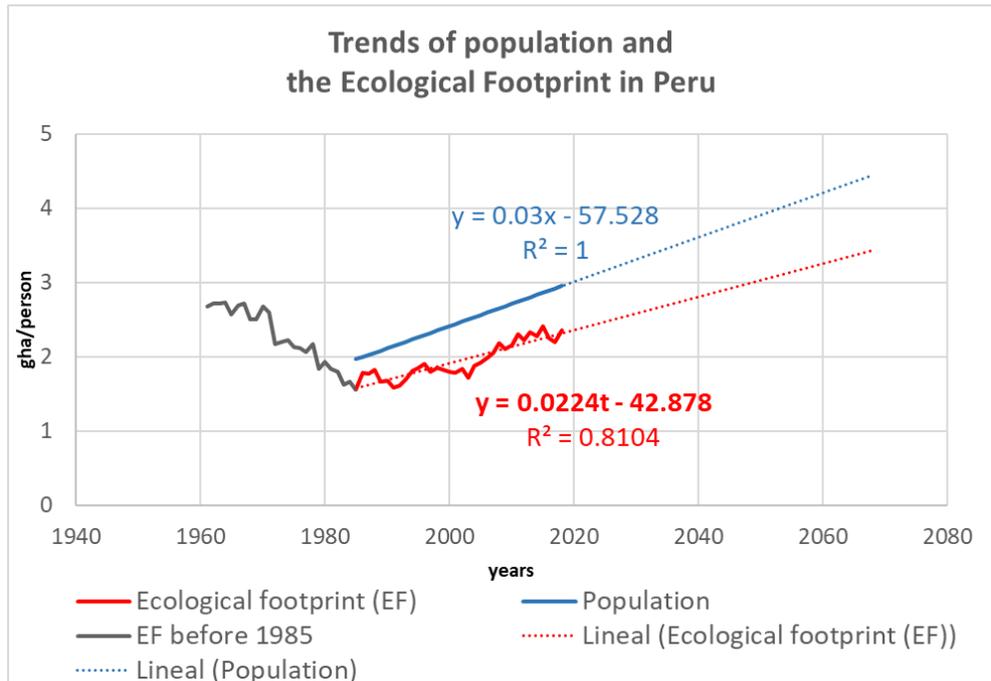
#### 5.1.5. Remaining Path en el Perú

Para determinar el tiempo límite de la extinción de la biocapacidad del Perú se utilizó la base de datos disponible en la página web oficial de *Global Footprint Network*. Esta base de datos cuenta con registros desde el año 1961 hasta el año 2018 para la biocapacidad y la huella ecológica. Ver Apéndice C.

De acuerdo a la base de datos obtenida, desde el año 1960 se evidencia una tendencia decreciente de la curva de la huella ecológica del Perú; hasta que el año 1985 se hace evidente un punto de inflexión. Esta tendencia negativa se confirma con las crisis políticas, económicas y sociales que Perú experimentó durante esas casi tres décadas. En la Figura 48 se observa que a partir del año 1985 existe una tendencia creciente que presenta la curva de población peruana y la gráfica de la huella ecológica de Perú, curvas graficadas en color azul y rojo respectivamente.

**Figura 48**

*Tendencia de la población y la huella ecológica del Perú*



En la tabla de datos que se muestra en la Figura 49 se observa los valores de los factores de dinámica de demanda: SDI, HDI, CPI e ILI utilizados para el cálculo de la curva del ajuste de la huella ecológica (*graficada en líneas entrecortadas de color negro en la Figura 50*) que en unión a la curva de la huella ecológica comprendida en el periodo de 1985 a 2018 (*graficada en línea continua de color rojo en la Figura 50*) se convertirá en la curva de la demanda de dinámica de recursos. El proceso que se utilizó para calcular el ajuste de la tendencia de la huella ecológica se encuentra detallado en el numeral A del apartado 5.1.4. de la presente investigación.

En la Figura 50 se visualiza la tendencia lineal de las curva de la dinámica de demanda de recursos y la curva de la biocapacidad de Perú. El valor de  $R^2$  es superior a 0.9. Así mismo, se establecen las ecuaciones de ambas curvas para ser usadas posteriormente en el modelo matemático. Nótese que la curva graficada en línea continua de color rojo dejó de ser la curva de la huella ecológica y paso a ser la curva de la dinámica de demanda de recursos

**Figura 49**

*Cálculo de la dinámica de demanda de recursos y la huella ecológica del Perú*

$F\_demand\_Dynamics(t) = dt + e$								Demand Dynamics of Peru				
$t$	ECOLOGICAL FOOTPRINT REAL DATA 1985	ECOLOGICAL FOOTPRINT REAL DATA	ECOLOGICAL FOOTPRINT ADJUST TREND	ECOLOGICAL FOOTPRINT NORMAL TREND	$e$	$d$	SLOPE ADJUST FACTOR	DEMAND FACTOR INDEX	SUSTAINABLE DEVELOP. INDEX	HUMAN DEVELOP. INDEX	CORRUPTION PERCEPTION INDEX	INCOME LEVEL INDEX
Ecological Footprint (EF)			$d*t-EFLY$		SAF+DFI	avg(p, EF)	Demand Factor Index (DFI) = avg(SDI, HDI, CPI, ILI)					
year	EF Before 1985	EF After 1985	EF Trend	EF Adjust	adjust_Factor	slope	SAF	DFI	SDI	HDI	CPI	ILI
2033			2.6459	3.3391971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2032			2.6236	3.2737471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2031			2.6013	3.2082971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2030			2.579	3.1428471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2029			2.5567	3.0773971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2028			2.5344	3.0119471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2027			2.5121	2.9464971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2026			2.4898	2.8810471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2025			2.4675	2.8155971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2024			2.4452	2.7501471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2023			2.4229	2.6846971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2022			2.4006	2.6192471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2021			2.3783	2.5537971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2020			2.356	2.4883471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2019			2.3337	2.4228971	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2018		2.357447099	2.3114	2.3574471	129.7206529	0.06545	0.0262	0.0393	0.710	0.760	0.360	0.600
2017		2.197512694	2.2891									
2016		2.251837204	2.2668									
2015		2.403247894	2.2445									
2014		2.275358668	2.2222									
2013		2.335343838	2.1999									
2012		2.221571873	2.1776									
2011		2.307970601	2.1553									
2010		2.153748336	2.133									
2009		2.100926039	2.1107									
2008		2.182305817	2.0884									
2007		2.052400639	2.0661									

Figura 50

Tendencia de la dinámica de demanda y la huella ecológica del Perú

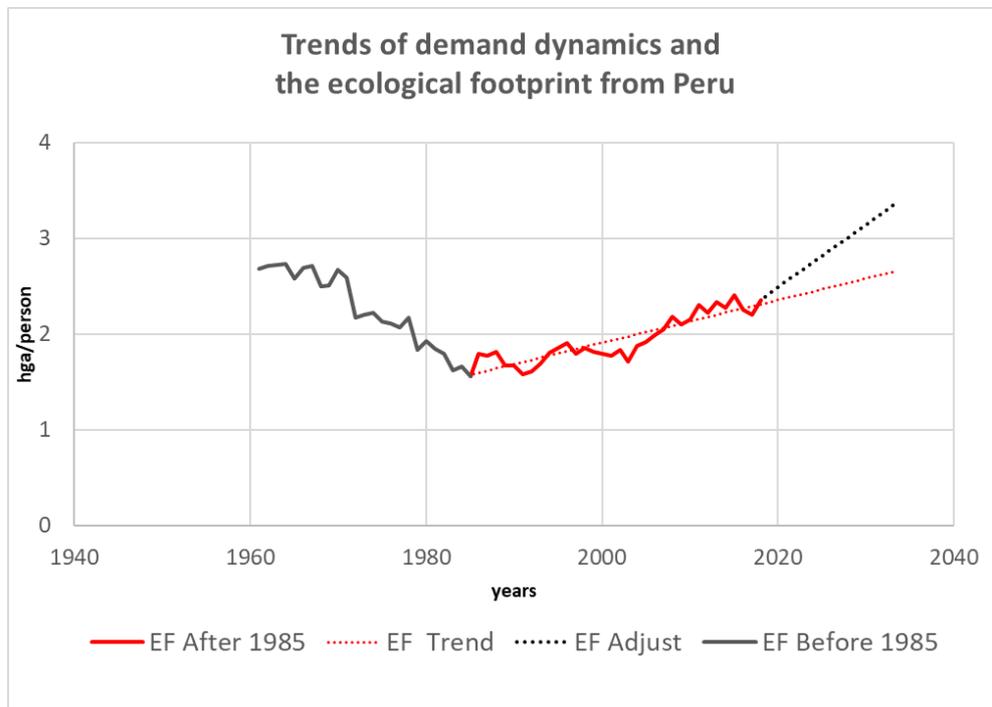
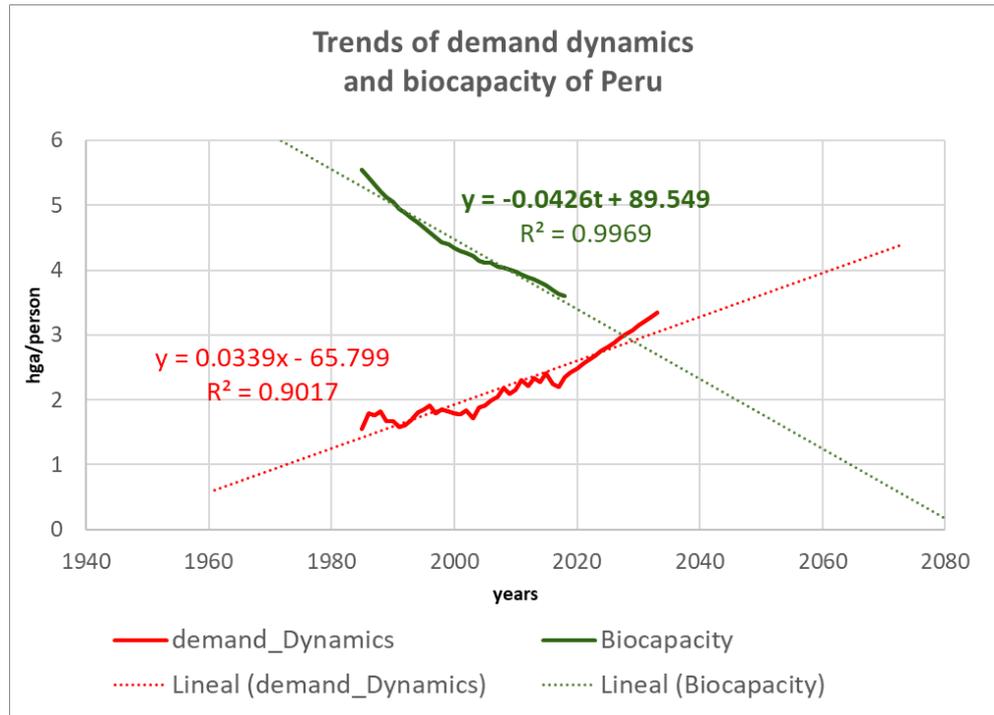


Figura 51

Ajuste de la tendencia de la biocapacidad y la dinámica de demanda de recursos de Perú

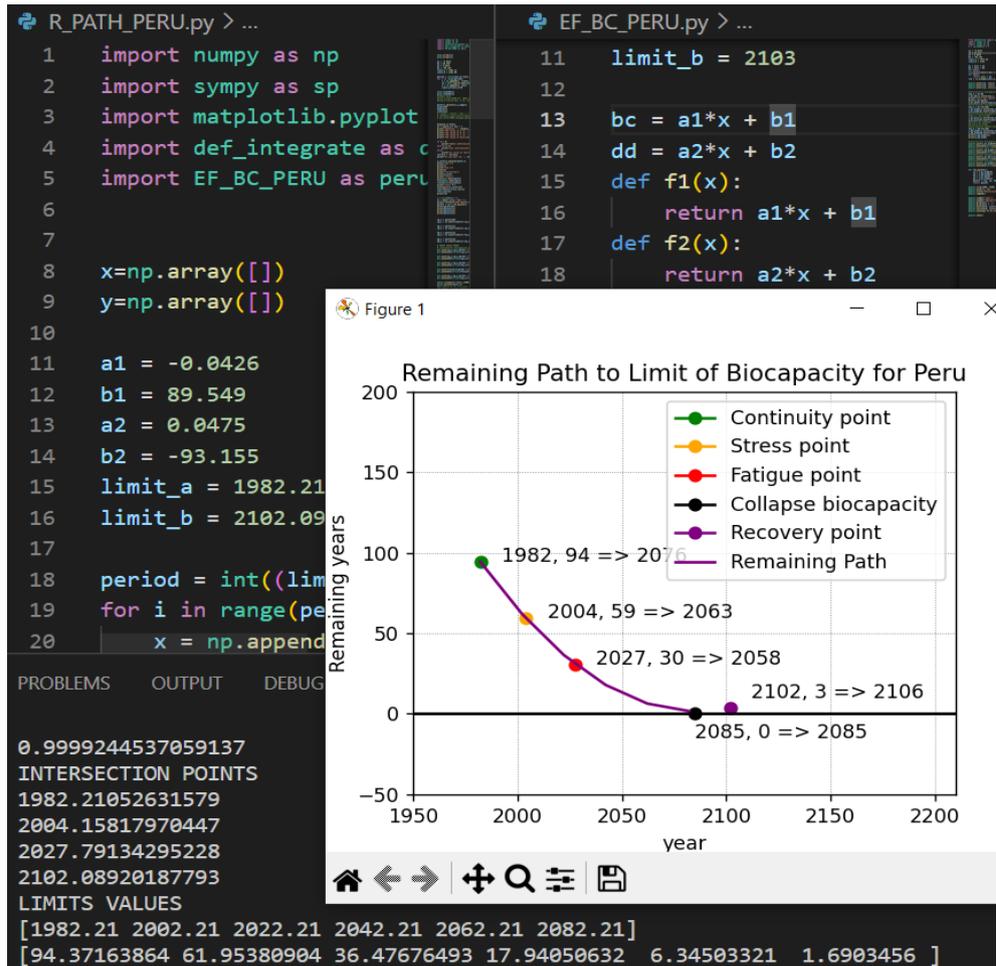


Las función de la dinámica de demanda de recursos del Perú  $F_{demand\_Dynamics}(t)$  y la función de biocapacidad del Perú  $F_{biocapacity}(t)$  son graficadas en color rojo y verde respectivamente. Ambas funciones tienen una ecuación lineal y son proyectadas sus tendencias. Ver Figura 51.

En la Figura 51 se observa el gráfico realizado en Microsoft Excel. Sin embargo, es necesario usar la tecnología de Python para agilizar el proceso especificado en el cuarto objetivo específico de esta investigación: aplicar el modelo matemático Remaining Path mediante la realización de pruebas con data a nivel nacional y mundial, en este caso, para Perú. Entonces, la ecuación de la dinámica de demanda de recursos y la ecuación de la biocapacidad son ingresadas al programa diseñado en Python. Ver la Figura 52.

### Figura 52

Entorno de Python y ejecución del fichero `R_PATH_PERU.py`



Con el objetivo de definir la dinámica de demanda de recursos, los registros para la huella ecológica fueron sometidos a un proceso de ajuste en función a los factores de la dinámica de demanda de recursos detallados en el apartado 5.1.2. En la Figura 53 se muestra que se graficó con una línea continua de color rojo la ecuación de la dinámica de demanda de recursos en el Perú.

$$F_{demand\_Dynamics}(t) = 0.0339t - 65.799$$

Así mismo, en la Figura 53 se muestra que la ecuación de la biocapacidad de Perú fue graficada con una línea continua de color verde, de acuerdo a la siguiente ecuación:

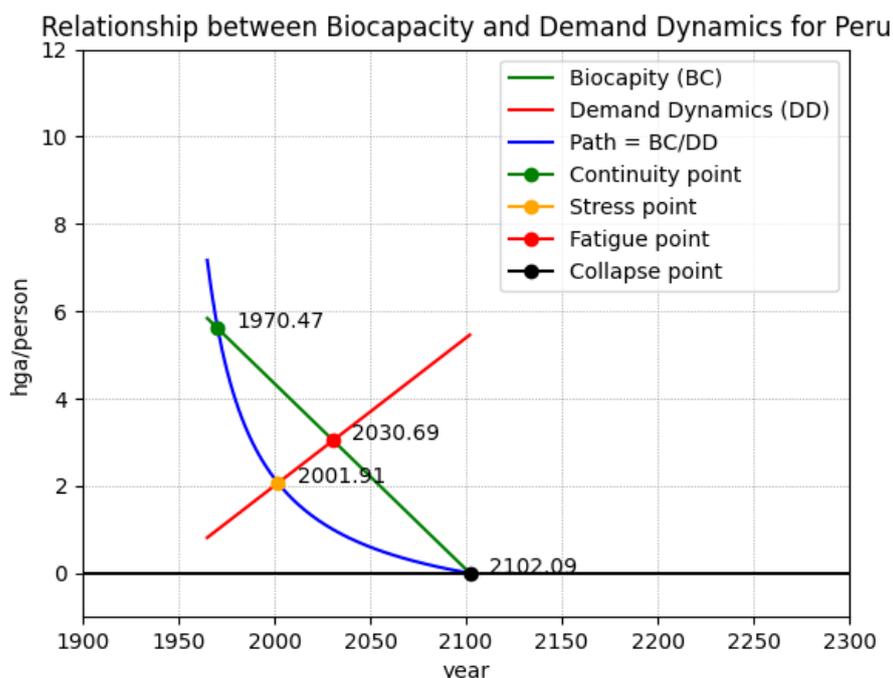
$$F_{biocapacity}(t) = -0.0426t + 89.549$$

Mientras que la relación entre biocapacidad y la dinámica de demanda, denominada como Path, se graficó con una línea continua de color azul, tal como se aprecia en la Figura 53.

$$Path(t) = \frac{-0.0426t + 89.549}{0.0339t - 65.799}$$

**Figura 53**

*Relación entre la dinámica de demanda de recursos y biocapacidad de Perú*



Al ejecutar el fichero R\_PATH\_PERU.py de Python, se pone en marcha la ejecución del código escrito para automatizar el modelo matemático construido en esta investigación: Remaining Path, versión 1.0. Para ejecutar este programa se debe ingresar la ecuación de las funciones  $F\_demand\_Dynamics(t)$  y  $F\_biocapacity(t)$ . Al ejecutar el programa se muestra dos gráficos: relación entre la dinámica de demanda de recursos y biocapacidad para Perú (Figura 53) y la función Remaining Path que muestra el límite de biocapacidad para Perú (Figura 54).

En la Figura 53 se observa que el punto de continuidad de la biocapacidad (*continuity point*, de color verde) se ubica en el año 1970, cuando la demanda de recursos por parte de la población de Perú era aproximadamente 0.99 gha per cápita, mientras que se tenía a disposición cerca de 5.60 gha per cápita por parte de la biocapacidad.

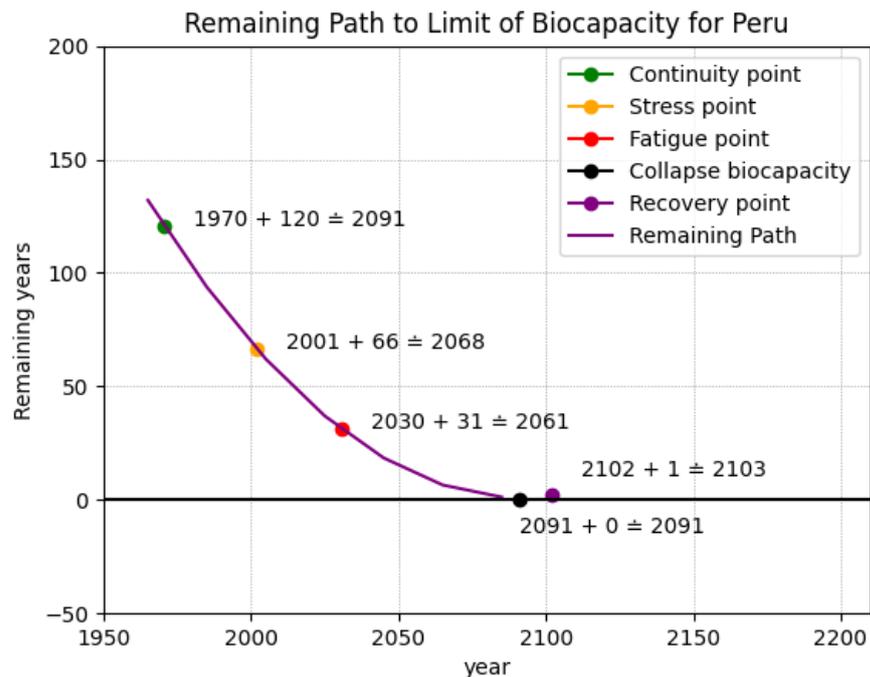
Así mismo, en la Figura 53, se observa que el punto de estrés de la biocapacidad (*stress point*, de color naranja) se ubica en el año 2001, cuando la demanda de recursos por parte de la población de Perú era aproximadamente 2.06 gha per cápita, mientras que se tenía a disposición cerca de 4.26 gha per cápita por parte de la biocapacidad. En la Figura 53, se observa que el punto de fatiga de la biocapacidad (*fatigue point*, de color rojo) se ubica en el año 2030, cuando la demanda de recursos por parte de la población de Perú y los recursos disponibles por parte de la biocapacidad serán el mismo valor, aproximadamente 3.04 gha per cápita.

Finalmente, en la misma Figura 53, se observa que el punto de colapso de la biocapacidad (*collapse point*, de color negro) se ubica en el año 2102, cuando la demanda de recursos por parte de la población de Perú es cerca de 5.45 gha per cápita, mientras que la disponibilidad de recursos se aproximará a 0 gha per cápita por parte de la biocapacidad.

En la Figura 54, se observa el resultado de ejecutar la función Remaining Path hasta el año 2102, año el que la tendencia de la biocapacidad en el Perú se acerca a cero, porque no puede existir una biocapacidad negativa. De acuerdo a este gráfico, los recursos disponibles de la biocapacidad en el Perú desde el año 1970 hasta el año 2102, serían consumidos por la población peruana en un plazo aproximado de 120 años: se agotarían en el año 2091.

#### **Figura 54**

*Remaining Path para el límite de biocapacidad para Perú*



Del mismo modo, en el Figura 54 se observa que los recursos disponibles de la biocapacidad en el Perú desde el año 2001 hasta el año 2102, serían consumidos por la población peruana en un plazo aproximado de 66 años: se agotarían en el año 2068.

Mientras que, los recursos disponibles de la biocapacidad en el Perú desde el año 2030 hasta el año 2102, serían consumidos por la población peruana en un plazo aproximado de 31 años: se agotarían en el año 2061. Ver la Figura 54.

En la Figura 54 es posible ver que los recursos disponibles de la biocapacidad en el Perú desde el año 2091 hasta el año 2102, serían consumidos por la humanidad en un plazo aproximado de cero años; es decir, se agotarían el mismo año.

Es interesante notar que los recursos disponibles de la biocapacidad en el Peru se incrementarán a partir del año 2102, teniendo una duración de un año, es decir, la población de Perú podría volver a contar con recursos hasta el año 2103. Probablemente, esta tendencia de crecimiento de la biocapacidad de Perú puede deberse a los resultados positivos de la puesta en marcha de los sistemas de

recuperación de biocapacidad detallados en el apartado 5.1.3 de esta investigación. Ver la Figura 54.

Se puede observar que el tiempo límite para la extinción de la biocapacidad es variable y se hace más corto a medida que el año de evaluación sea mayor.

**A. Estado de los factores de la dinámica de demanda de recursos en Perú**

El resultado obtenido del tiempo límite de extinción de la biocapacidad se relaciona directamente con los factores de la dinámica de demanda de recursos en Perú, los cuales se configuran de la siguiente manera:  $SDI = 0.71$ ,  $HDI = 0.76$ ,  $CPI = 0.36$  y  $ILI = 0.60$ .

De manera general, el estado actual de los factores de la dinámica de demanda de recursos Perú tiene un valor de 0.60 en una escala de 0 hasta 1. Este valor indica que la dinámica de la demanda de recursos de Perú tiene se ubica ligeramente sobre el valor medio de la escala, es decir, 0.60. Este valor indica que el nivel de consumo de recursos tiene una tendencia a continuar creciendo pero con una grave tendencia a no proteger la biocapacidad del país puesto que el índice de percepción de corrupción de Perú es demasiado bajo.

$$Factor\_demand\_Dynamics = (SDI + HDI + CPI + ILI) * \frac{1}{4}$$

$$Factor\_demand\_Dynamics = (0.71 + 0.76 + 0.36 + 0.60) * \frac{1}{4}$$

$$Factor\_demand\_Dynamics = (2.43) * \frac{1}{4}$$

$$Factor\_demand\_Dynamics = 0.60$$

A continuación se muestran los valores de cada uno de los cuatro factores de la dinámica de demanda de recursos en el Perú:

*a. Factores de desarrollo sostenible*

El valor de  $SDI$  es igual a 0.71, representa un valor superior al valor medio: indica que en Perú se está cumpliendo de

manera esperada los ODS (objetivos de desarrollo sostenible). Se necesita continuar con la esta política para erradicar la pobreza y conservar la biocapacidad de Perú.

$$SDI = \frac{SPI}{100} = \frac{71.66}{100}$$
$$SDI = 0.71$$

*b. Factores de desarrollo humano*

El valor de *HDI* es igual a 0.76, representa un valor superior al valor medio de la escala: indica que el desarrollo humano en Perú puede no está en condiciones de garantizar salud, educación y alfabetización para la población y por tanto, la biocapacidad puede estar en riesgo si la población no respalda las políticas económicas y ambientales.

$$HDI = 0.76$$

*c. Factores de percepción de corrupción*

El valor de *CPI* es igual a 0.36, representa un valor muy bajo: indica que la percepción de corrupción se encuentra en niveles críticos. Es necesario priorizar la erradicación de la corrupción. Los niveles de corrupción altos ponen en riesgo la biocapacidad de Perú porque los ecosistemas son vulnerables a negociaciones ilícitas como actividades de minería ilegal, tala ilegal de bosques, tráfico de fauna silvestre, entre otros.

$$CPI = 0.36$$

*d. Factor de nivel de ingresos*

El valor de *ILLUM* es igual a 0.60, representa un valor intermedio en la escala: el nivel de ingresos en Perú asegura una capacidad de adquisición de recursos creciente, teniendo tendencias peligrosas del consumo exagerado de recursos.

$$ILLUM = 0.60$$

**B. Estado de los sistemas de restauración de biocapacidad en Perú**

Es importante destacar que el resultado obtenido del tiempo límite de extinción de la biocapacidad se fundamenta en el estado actual de los sistemas de restauración de biocapacidad que se han puesto en marcha Perú, que se configuran de la siguiente manera:  $FRI = 0.05$ ,  $WAI = 0.46$ ,  $EPI = 0.73$  y  $WAI = 0.52$ .

El estado actual de los sistemas de restauración de biocapacidad en Perú tiene un valor de 0.44 en una escala de 0 hasta 1. Este valor indica que la biocapacidad de Perú tiene una fuerza de restauración que está por debajo del valor medio de la escala.

En estas circunstancias, el tiempo límite de extinción de la biocapacidad tendrá una tendencia a disminuir en vista que la fuerza de la dinámica de demanda de recursos se ubica ligeramente sobre el valor medio de la escala de 0 a 1, es decir, 0.60, pero con una notable percepción de corrupción muy alta.

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (FRI + WAI + EPI + WAI) * \frac{1}{4}$$

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (0.05 + 0.46 + 0.73 + 0.52) * \frac{1}{4}$$

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (1.76) * \frac{1}{4}$$

$$S_{biocapacity\_Restoration} = 0.44$$

A continuación se muestran los valores de cada uno de los cuatro sistemas de restauración de biocapacidad:

a. *Sistemas de restauración de bosques*

El valor de  $FRI$  es igual a 0.05, representa un valor muy cercano a al valor mínimo: indica una gran debilidad de la puesta en marcha de los sistemas de restauración de bosques en Perú. Se necesita de manera urgente que las políticas ambientales de Perú prioricen los sistemas de restauración de bosques

$$FRI = \frac{TCG}{TCL}$$

$$FRI = \frac{191,000}{3,530,000}$$

$$FRI = 0.05$$

*b. Sistemas de disponibilidad de agua*

El valor de *WAI* es igual a 0.46, representa un valor muy cercano a al valor medio de la escala: indica que la puesta en marcha de los sistemas de restauración de bosques en Perú está teniendo resultados regulares que necesitan ser optimizados.

$$WAI = \left[ DWM + \left( \frac{WRM}{100} \right) \right] * \frac{1}{2}$$

$$WAI = \left[ 51\% + \left( \frac{41}{100} \right) \right] * \frac{1}{2}$$

$$WAI = [51\% + 41\%] * \frac{1}{2}$$

$$WAI = [92\%] * \frac{1}{2} = 46\%$$

$$WAI = 0.46$$

*c. Sistemas de protección del entorno*

El valor de *EPI* es igual a 0.73, representa un valor que se aproxima al valor ideal: indica que la puesta en marcha de los sistemas de protección del entorno en Perú está obteniendo los resultados esperados y podría continuar mejorando. Es necesario impulsar la creación y gestión eficiente de las áreas protegidas terrestres y marinas para garantizar en el futuro la disponibilidad de toda la riqueza biológica del país.

$$EPI = \left[ \left( 1 - \frac{WGI}{1400} \right) + \frac{PAI}{33.28} + \left( 1 - \frac{CEI}{30} \right) \right] * \frac{1}{3}$$

$$EPI = \left[ \left( 1 - \frac{270}{1400} \right) + \frac{16.81}{33.28} + \left( 1 - \frac{3.1}{30} \right) \right] * \frac{1}{3}$$

$$EPI = (0.80 + 0.50 + 0.89) * \frac{1}{3}$$

$$EPI = 0.73$$

*d. Sistemas de transición energética*

El valor de *ETI* es igual a 0.52, representa un valor intermedio en la escala: significa que la puesta en marcha

de los sistemas de transición energética en el Perú está en una etapa intermedia, es decir: aún no se ha consolidado. Impulsar la capacidad instalada de generación de energía renovable es una tarea prioritaria. Así mismo, se debe continuar impulsando el acceso a cocinas con energía limpia.

$$ETI = \left( \frac{RCI}{1000} + CCI \right) * \frac{1}{2} = \left( \frac{191}{1000} + 85.5\% \right) * \frac{1}{2}$$

$$ETI = (0.191 + 0.855) * \frac{1}{2} = (1.046) * \frac{1}{2}$$

$$ETI = 0.52$$

#### 5.1.6. Remaining Path en el mundo

Para determinar el tiempo límite de la extinción de la biocapacidad del Perú se utilizó la base de datos disponible en la página web oficial de *Global Footprint Network*. Esta base de datos cuenta con registros desde el año 1961 hasta el año 2018 para la biocapacidad y la huella ecológica. Ver Apéndice D.

Con el objetivo de definir la dinámica de demanda de recursos, los registros para la huella ecológica fueron sometidos a un proceso de ajuste en función a los factores de la dinámica de demanda de recursos detallados en el apartado 5.1.2. En la Figura 55 se muestra que se graficó con una línea continua de color rojo la ecuación de la dinámica de demanda de recursos en el mundo.

$$F\_demand\_Dynamics(t) = 0.0105t - 18.157$$

Así mismo, en la Figura 55 se muestra que la ecuación de la biocapacidad de Perú fue graficada con una línea continua de color verde, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F\_biocapacity(t) = -0.019t + 39.924624$$

Mientras que la relación entre biocapacidad y la dinámica de demanda, denominada como Path, se graficó con una línea continua de color azul, tal como se aprecia en la Figura 53.

$$Path(t) = \frac{-0.019t + 39.924624}{0.0105t - 18.157}$$

En la Figura 55 se observa que el punto de continuidad de la biocapacidad (*continuity point*, de color verde) se ubica en el año 1824, cuando la demanda de recursos por parte de la población del mundo era aproximadamente 1.00 gha per cápita, mientras que se tenía a disposición cerca de 5.25 gha per cápita por parte de la biocapacidad.

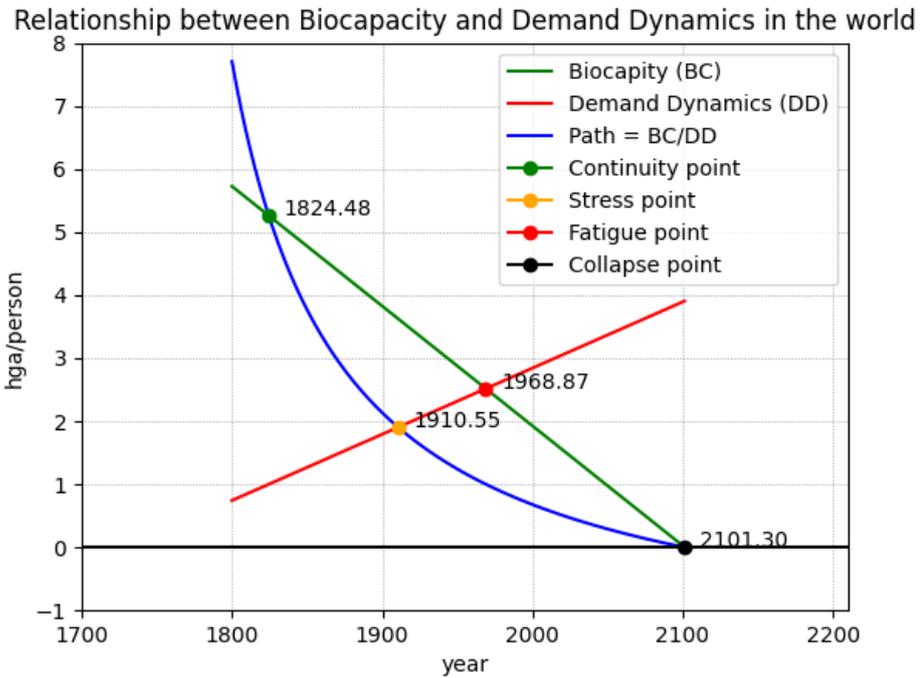
Así mismo, en la Figura 55, se observa que el punto de estrés de la biocapacidad (*stress point*, de color naranja) se ubica en el año 1910.55, cuando la demanda de recursos por parte de la población del mundo era aproximadamente 1.90 gha per cápita, mientras que se tenía a disposición cerca de 3.62 gha per cápita por parte de la biocapacidad.

En la Figura 55, se observa que el punto de fatiga de la biocapacidad (*fatigue point*, de color rojo) se ubica en el año 1968.87, cuando la demanda de recursos por parte de la población del mundo y los recursos disponibles por parte de la biocapacidad serán el mismo valor, aproximadamente 2.51 gha per cápita.

Finalmente, en la misma Figura 55, se observa que el punto de colapso de la biocapacidad (*collapse point*, de color negro) se ubica en el año 2101.3, cuando la demanda de recursos por parte de la población del mundo es cerca de 3.90 gha per cápita, mientras que la disponibilidad de recursos se aproximará a 0 gha per cápita por parte de la biocapacidad.

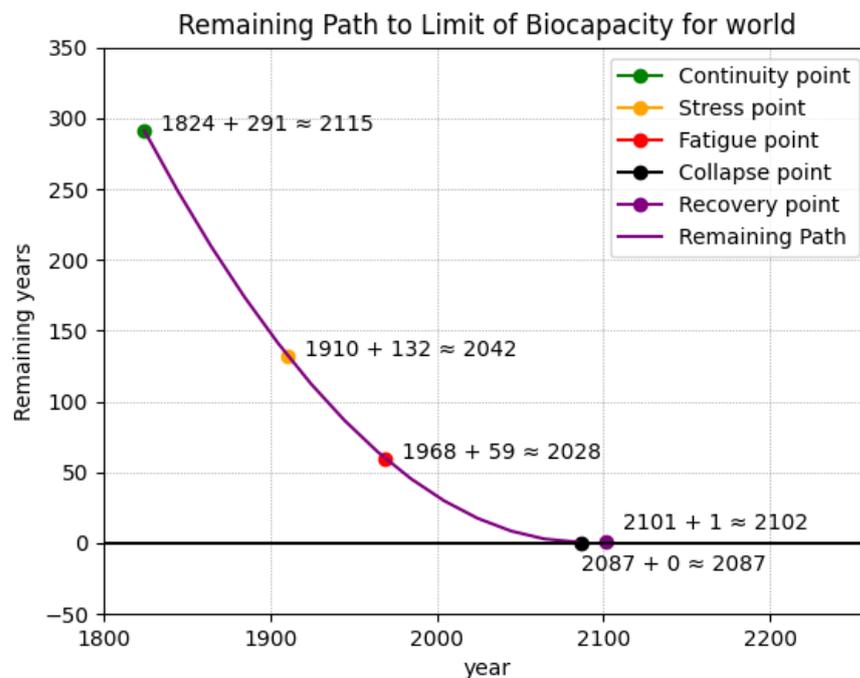
**Figura 55**

*Relación entre dinámica de demanda de recursos y biocapacidad en el mundo*



**Figura 56**

*Remaining Path para el límite de biocapacidad en el mundo*



En la Figura 56, se observa el resultado de ejecutar la función Remaining Path hasta el año 2101, año el que la tendencia de la biocapacidad en el mundo se acerca a cero, porque no puede existir

una biocapacidad negativa. De acuerdo a este gráfico, los recursos disponibles de la biocapacidad en el mundo desde el año 1824 hasta el año 2101, serían consumidos por la población mundial en un plazo aproximado de 291 años: se agotarían en el año 2115.

Del mismo modo, en el Figura 56 se observa que los recursos disponibles de la biocapacidad en el mundo desde el año 1910 hasta el año 2101, serían consumidos por la población mundial en un plazo aproximado de 132 años: se agotarían en el año 2042.

Mientras que, los recursos disponibles de la biocapacidad en el mundo desde el año 1968 hasta el año 2101, serían consumidos por la población mundial en un plazo aproximado de 59 años: se agotarían en el año 2028. Ver la Figura 56.

En la Figura 56 es posible ver que los recursos disponibles de la biocapacidad en el mundo desde el año 2087 hasta el año 2101, serían consumidos por la humanidad en un plazo aproximado de cero años; es decir, se agotarían el mismo año.

Es interesante notar que los recursos disponibles de la biocapacidad en el mundo se incrementarán a partir del año 2101, teniendo una duración de un año, es decir, la población del mundo podría volver a contar con recursos hasta el año 2101. Probablemente, esta tendencia de crecimiento de la biocapacidad del mundo puede deberse a los resultados positivos de la puesta en marcha de los sistemas de recuperación de biocapacidad detallados en el apartado 5.1.3 de esta investigación. Ver la Figura 56.

Se puede observar que el tiempo límite para la extinción de la biocapacidad es variable y se hace más corto a medida que el año de evaluación sea mayor.

#### **A. *Estado de los factores de la dinámica de demanda de recursos en el mundo***

El resultado obtenido del tiempo límite de extinción de la biocapacidad se relaciona directamente con los factores de la dinámica de demanda de recursos en el mundo, los cuales se configuran así: SDI = 0.67, HDI = 0.73, CPI = 0.42 y ILI = 0.57.

De manera general, el estado actual de los factores de la dinámica de demanda de recursos Perú tiene un valor de 0.60 en una escala de 0 hasta 1. Este valor indica que la dinámica de la demanda de recursos de Perú tiene se ubica ligeramente sobre el valor medio de la escala, es decir, 0.60. Este valor indica que el nivel de consumo de recursos tiene una tendencia a continuar creciendo pero con una grave tendencia a no proteger la biocapacidad del país puesto que el índice de percepción de corrupción de Perú es demasiado bajo.

$$Factor\_demand\_Dynamics = (SDI + HDI + CPI + ILI) * \frac{1}{4}$$

$$Factor\_demand\_Dynamics = (0.67 + 0.73 + 0.42 + 0.57) * \frac{1}{4}$$

$$Factor\_demand\_Dynamics = (2.39) * \frac{1}{4}$$

$$Factor\_demand\_Dynamics = 0.59$$

A continuación se muestran los valores de cada uno de los cuatro factores de la dinámica de demanda de recursos:

*a. Factores de desarrollo sostenible*

El valor de *SDI* es igual a 0.67, representa un valor superior al valor medio: indica que en el mundo se está cumpliendo de manera esperada los ODS (objetivos de desarrollo sostenible). Se necesita continuar con la esta política para erradicar la pobreza y conservar la biocapacidad del mundo.

$$SDI = \frac{SPI}{100}$$

$$SDI = \frac{67.55}{100}$$

$$SDI = 0.67$$

*b. Factores de desarrollo humano*

El valor de *HDI* es igual a 0.73, representa un valor superior al valor medio de la escala: indica que el desarrollo humano en el mundo puede no está en condiciones de garantizar salud, educación y alfabetización para la población y por

tanto, la biocapacidad puede estar en riesgo si la población no respalda las políticas económicas y ambientales sustentables.

$$HDI = 0.73$$

*c. Factores de percepción de corrupción*

El valor de *CPI* es igual a 0.42, representa un valor muy bajo: indica que la percepción de corrupción se encuentra en niveles críticos. Es necesario priorizar la erradicación de la corrupción. Los niveles de corrupción altos ponen en riesgo la biocapacidad del mundo porque los ecosistemas son vulnerables a negociaciones ilícitas, incumplimiento de la legislación que tolera la continuidad de actividades de minería ilegal, tala ilegal de bosques, tráfico de fauna silvestre, entre otros.

$$CPI = 0.57$$

*d. Factor de nivel de ingresos*

El valor de *ILLUM* es igual a 0.60, representa un valor intermedio en la escala: el nivel de ingresos en el mundo asegura una capacidad de adquisición de recursos creciente, teniendo tendencias peligrosas del consumo exagerado de recursos.

$$ILLUM = 0.57$$

**B. Estado de los sistemas de restauración de biocapacidad en el mundo**

Es importante destacar que el resultado obtenido del tiempo límite de extinción de la biocapacidad se fundamenta en el estado actual de los sistemas de restauración de biocapacidad que se han puesto en marcha en el mundo, que se configuran de la siguiente manera: *FRI* = 0.05, *WAI* = 0.46, *EPI* = 0.73 y *WAI* = 0.52.

El estado actual de los sistemas de restauración de biocapacidad en Perú tiene un valor de 0.44 en una escala de 0 hasta 1. Este valor indica que la biocapacidad del mundo tiene una fuerza de restauración que está por debajo del valor medio de la escala.

En estas circunstancias, el tiempo límite de extinción de la biocapacidad tendrá una tendencia a disminuir en vista que la fuerza de la dinámica de demanda de recursos se ubica ligeramente sobre el valor medio de la escala de 0 a 1, es decir, 0.60, pero con una notable percepción de corrupción muy alta.

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (FRI + WAI + EPI + WAI) * \frac{1}{4}$$

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (0.05 + 0.46 + 0.73 + 0.52) * \frac{1}{4}$$

$$S_{biocapacity\_Restoration} = (1.76) * \frac{1}{4}$$

$$S_{biocapacity\_Restoration} = 0.44$$

A continuación se muestran los valores de cada uno de los cuatro sistemas de restauración de biocapacidad:

*a. Sistemas de restauración de bosques*

El valor de *FRI* es igual a 0.05, representa un valor muy cercano a al valor mínimo: indica una gran debilidad de la puesta en marcha de los sistemas de restauración de bosques en el mundo. Se necesita de manera urgente que las políticas ambientales de Perú prioricen los sistemas de restauración de bosques

$$FRI = \frac{TCG}{TCL}$$

$$FRI = \frac{191,000}{3,530,000}$$

$$FRI = 0.05$$

*b. Sistemas de disponibilidad de agua*

El valor de *WAI* es igual a 0.46, representa un valor muy cercano a al valor medio de la escala: indica que la puesta en marcha de los sistemas de restauración de bosques en el mundo está teniendo resultados regulares que necesitan ser optimizados.

$$WAI = \left[ DWM + \left( \frac{WRM}{100} \right) \right] * \frac{1}{2}$$

$$WAI = \left[ 51\% + \left( \frac{41}{100} \right) \right] * \frac{1}{2} = [51\% + 41\%] * \frac{1}{2}$$

$$WAI = [92\%] * \frac{1}{2}$$

$$WAI = 46\% = 0.46$$

c. *Sistemas de protección del entorno*

El valor de *EPI* es igual a 0.73, representa un valor que se aproxima al valor ideal: indica que la puesta en marcha de los sistemas de protección del entorno en el mundo está obteniendo los resultados esperados y podría continuar mejorando. Es necesario impulsar la creación y gestión eficiente de las áreas protegidas terrestres y marinas para garantizar en el futuro la disponibilidad de toda la riqueza biológica del país.

$$EPI = \left[ \left( 1 - \frac{WGI}{1400} \right) + \frac{PAI}{33.28} + \left( 1 - \frac{CEI}{30} \right) \right] * \frac{1}{3}$$

$$EPI = \left[ \left( 1 - \frac{270}{1400} \right) + \frac{16.81}{33.28} + \left( 1 - \frac{3.1}{30} \right) \right] * \frac{1}{3}$$

$$EPI = (0.80 + 0.50 + 0.89) * \frac{1}{3}$$

$$EPI = 0.73$$

d. *Sistemas de transición energética*

El valor de *ETI* es igual a 0.52, representa un valor intermedio en la escala: significa que la puesta en marcha de los sistemas de transición energética en el mundo está en una etapa intermedia, es decir: aún no se ha consolidado. Impulsar la capacidad instalada de generación de energía renovable es una tarea prioritaria. Así mismo, se debe continuar impulsando el acceso a cocinas con energía limpia.

$$ETI = \left( \frac{RCI}{1000} + CCI \right) * \frac{1}{2}$$

$$ETI = \left( \frac{191}{1000} + 85.5\% \right) * \frac{1}{2}$$

$$ETI = (0.191 + 0.855) * \frac{1}{2}$$

$$ETI = (1.046) * \frac{1}{2}$$

$$ETI = 0.52$$

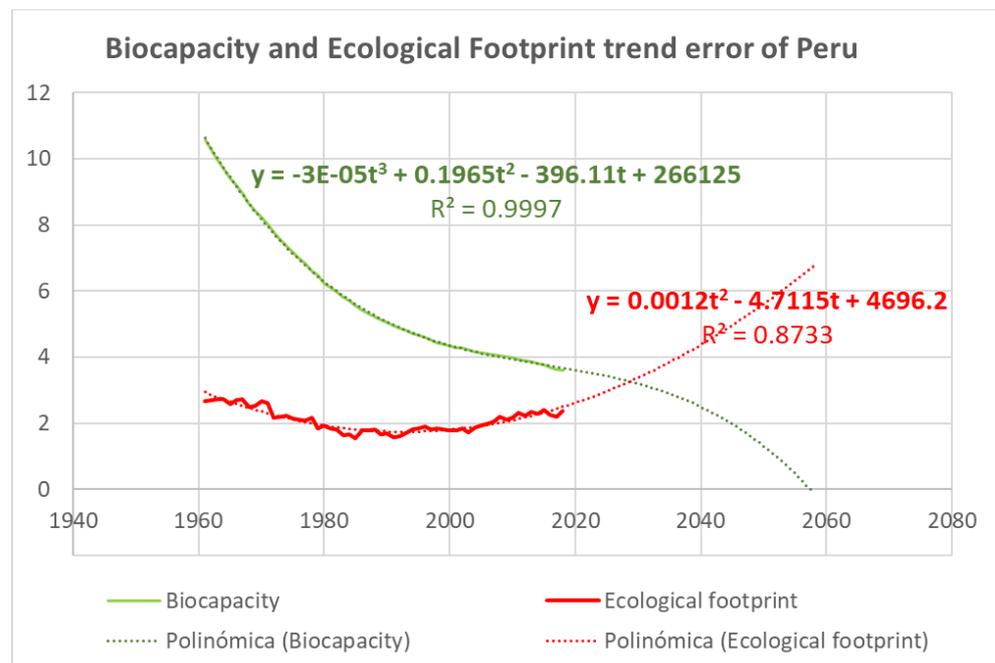
### 5.1.7. Tendencias usando el método tradicional de análisis de datos

La base de datos publicada por la Global Footprint Network presenta registros de la huella ecológica y biocapacidad en el periodo comprendido entre 1961 y 2018.

Esta información fue descargada desde internet para posteriormente ser exportada al formato de Microsoft Excel. Después de ser sometida toda esta información al cálculo de tendencia se obtiene una ecuación de tercer grado para la tendencia de la biocapacidad en el Perú y una ecuación de segundo grado para la tendencia de la huella ecológica del Perú.

**Figura 57**

*Tendencia en la biocapacidad y huella ecológica de Perú de acuerdo a métodos tradicionales de extrapolación*



De acuerdo a la Figura 57; después extrapolar los registros de la biocapacidad en un periodo futuro de 40 años: hasta el año 1968, es posible observar que el punto de fatiga del sistema, es decir, el momento en que la tendencia de la curva de la biocapacidad y la curva de la huella ecológica del Perú se aproxima al año 2030, alcanzando un valor superior a 3 gha per cápita. Así mismo, aproximadamente el año 2058 la curva de la biocapacidad del Perú se aproxima a cero: la biocapacidad de Perú se extingue cerca a este año. Luego de extrapolar los registros de la huella ecológica en un periodo futuro de 40 años, se observa que el año 2058 la huella ecológica per cápita es aproximadamente de 7 gha.

Es importante destacar que la data publicada por la Global Footprint Network acerca de las tendencias de reserva y déficit de biocapacidad por persona en relación con la huella ecológica, muestra registros comprendidos entre el periodo de 1961 y 2018.

Haciendo uso de los métodos tradicionales de extrapolación de datos, estos registros generan una tendencia polinómica de tercer grado para la curva de tendencia de la biocapacidad del Perú y una tendencia polinómica de segundo grado para la curva de tendencia de la huella ecológica del Perú.

El futuro proyectado de acuerdo a estas tendencias es insostenible y exagerado, porque el resultado esperado para el fin de la biocapacidad en el Perú sería cerca al año 2058. De acuerdo a esta información, todos los proyectos o inversiones que se están ejecutando en el Perú dejarían de servir en apenas 35 años; incluso, la continuidad de la existencia de la población peruana finalizaría el año 2058.

## **5.2. Discusión de resultados**

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos afirmar que el modelo matemático Remaining path logró determinar la relación entre el tiempo límite de extinción de la biocapacidad y la dinámica de demanda de recursos por la población. En los dos ensayos realizados en esta investigación, que consistieron en aplicar el modelo matemático Remaining en el contexto de

Perú y en el contexto mundial, se obtuvieron resultados que reducen en gran medida el grado de incertidumbre acerca del tiempo límite de la extinción de la biocapacidad en relación a la dinámica de demanda de recursos por la población.

La data publicada por la Global Footprint Network acerca de la huella ecológica por persona en el contexto mundial, muestra una tendencia negativa de la biocapacidad a partir del año 1972. Es interesante notar que los últimos 51 años, la población mundial consume más recursos de lo que la biocapacidad soporta. Estos resultados guardan relación con Syrovátka (2020) que afirma que la metodología de la huella ecológica muestra que la biocapacidad territorial de algunos países presenta un déficit o saldo negativo, lo cual implica (insostenibilidad). Esta situación puede ser comprendida y anticipada con el modelo matemático Remaining Path, mediante la comparación iterativa entre las curvas de biocapacidad y dinámica de demanda de recursos en intervalos de tiempo controlados.

Algunos países cuentan con valores de biocapacidad y huella ecológica a nivel de estados o municipios. Sin embargo, es importante distinguir que, generalmente, las poblaciones no se desarrollan de acuerdo a las divisiones territoriales establecidas por cada país, sino, se desarrollan en torno a los accidentes geográficos de cada territorio, como son los valles, cuencas hidrográficas, tierras fértiles, entre otras que permitan abastecer de recursos a los habitantes. Es importante notar que Hori et al. (2023), proponen la relación entre biocapacidad y huella ecológica con una resolución de un kilómetro cuadrado, permite un análisis equilibrado de las cargas ambientales que puede ser flexible y en lugar de centrarse en los límites territoriales administrativos puede ser usado a escala del río o la comunidad en sí misma. El tiempo límite de extinción de la biocapacidad estima el tiempo que un país dispone para aprovechar en posicionar su competitividad, realizando ajustes en la dinámica de demanda de recursos y poniendo en acción las estrategias de mejora de los sistemas de restauración de la biocapacidad. Estas dos acciones en conjunto fomentan un futuro sostenible para garantizar un desarrollo económico sostenible. Al respecto, Gabbi et al. (2021), afirman que el crecimiento económico no puede conseguirse dejando de lado los límites

ecológicos y; en tal sentido, proponen un nuevo indicador de crecimiento por biocapacidad: BAG (*Biocapacity Adjusted Growth*), el cual permite evaluar los patrones de desarrollo de un país en función de la sostenibilidad.

Horsburgh et al. (2022), señalan que, la metodología de la huella ecológica no considera dentro de los seis tipos de suelo a las turberas. Los autores señalan que la degradación de la turberas en Escosia está erosionando la biocapacidad del país y al mismo tiempo, aumentando su déficit ecológico en un 40%. Así mismo, concluyen que la restauración de las turberas puede proporcionar una mitigación significativa que es económicamente eficiente para combatir los gases de efecto invernadero. Es importante destacar la opinión de los miembros de una comunidad mestiza de la amazonía peruana, Schulz et al. (2019) registraron la opinión de los miembros de una comunidad de pobladores mestizos en Perú, los cuales identificaron que la falta de estrategias de subsistencia y el crecimiento de la población hace que el uso de recursos naturales sea excesivo, es la amenaza más común para las turberas amazónicas.

Las condiciones futuras de la biocapacidad y la huella ecológica son importantes para trazar estrategias a nivel de gobiernos que se anticipen a los cambios. Para, Moros-Ochoa et al. (2022), estimaron, entre otros parámetros, que la biocapacidad per cápita hasta el año 2030 en cuanto a bosques será mayor en América del Sur, con un valor de 2.5 gha en comparación al valor menor a 0.2 gha de África y Asia que tendrán menor biocapacidad. En relación a la huella ecológica per cápita hasta el año 2030, estimaron que los mayores emisores de CO<sub>2</sub> serán América del Norte y Europa con valores de cercanos a 5 gha y 4.5 gha, respectivamente; mientras tanto, el menor emisor de CO<sub>2</sub> será África con un valor menor a 0,2 gha.

El *SDI* (*índice de cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible*) es un factor de conversión que realiza un ajuste a la curva de la huella ecológica para generar un panorama de cómo se comporta la dinámica de demanda de recursos de una determinada población, ya sea en el contexto mundial, de un país o de una ciudad en particular. Esta variable guarda relación con Wiedmann & Allen (2021), quienes consideran que un gran desafío para evaluar la sostenibilidad de las ciudades se relaciona con los métodos

utilizados para el evaluar el progreso y combinar los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con las métricas de huella de una manera que sea comparable, intuitiva y fácil de comunicar.

El *HDI (índice de desarrollo humano)* aporta mucha información en torno al conjunto de sus variables: salud, educación e ingresos. Se podría suponer que los países con mayor índice HDI son los países que más consumen y por lo tanto más contaminan indirectamente, pero la lectura opuesta es más probable: los países con menor índice HDI son vulnerables a contaminar sus ecosistemas; es este el sentido usado en este trabajo. Este índice hace posible que la huella ecológica se torne en la dinámica de demanda de recursos con el objetivo de anticiparse a los escenarios negativos en base a políticas económicas y ambientales. Esto guarda relación con Bilynkievycz dos Santos et al. (2017), mencionan que el HDI es un índice robusto que se caracteriza por presentar una gran previsibilidad y vulnerabilidad; es interesante notar que los autores afirman que la diferencia entre los valores reales y los valores previstos de este índice pueden servir para la toma de decisiones o para los cambios políticos y económicos.

El *ILI (índice de nivel de ingresos)* aporta información acerca de la dinámica de demanda de recursos por la población. Se puede analizar que los países con el índice más alto (*high income*) consumen demasiados recursos y por lo tanto, la biocapacidad de estos países experimenta una tendencia constante a disminuir. Sin embargo, los países con el índice menor (*low income*) son más vulnerables a ofrecer todos los recursos de sus ecosistemas con bajas restricciones ambientales o quizá sin ninguna restricción a corporaciones de capital extranjero. Entonces: los países con menor nivel de ingresos tienen mayor tendencia a reducir su biocapacidad. En concordancia, Ahmed et al. (2021), afirman que una de las posibles razones para que la relación entre PBI per cápita y biocapacidad per cápita sea representada en forma de U invertida en EKC, es que: con el aumento del crecimiento económico, también aumenta el apoyo a los movimientos favorables al medio ambiente.

El *CPI (índice de percepción de corrupción)* brinda una idea muy certera acerca de la dinámica de demanda de recursos por la población en un entorno con altos o bajos niveles de percepción de corrupción. Arminen & Menegaki

(2019), explican que existen países con economías muy hambrientas de energía que deben frenar la contaminación generada, posiblemente estos países no cuentan con acceso a energías renovables o que no cuentan con tecnología para generar energía limpia. Los autores destacan que Estados Unidos aún no ha ratificado el Protocolo de Kioto y que, por tanto, su progreso en términos de energía renovable se ha rezagado. Así mismo, los resultados obtenidos en la investigación indican que el clima parece tener mayor relación directa con el consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> que el nivel de corrupción.

*El FRI (índice de restauración de bosques)* valúa el valor de la variable que relaciona información importante acerca de la pérdida de cobertura arbórea y la ganancia de cobertura forestal. Los sistemas de restauración de bosques son importantes para garantizar la sostenibilidad de muchos ecosistemas y por lo tanto, los gobiernos de cada país deben definir estrategias con recursos suficientes para garantizar ganancias sustentables de bosques. Es interesante notar que los países latinoamericanos no destacan por haber conseguido ganancias considerables de bosques. Al respecto, Du et al. (2023), indican que más del 60% de la superficie forestal ganada en el mundo corresponden a los resultados obtenidos por Rusia, Canadá, Estados Unidos, Indonesia y China. El contraste con el caso de Perú es evidente, los sistemas de restauración de bosques aún no están puestos en marcha para obtener resultados adecuados, el FRI de Perú es igual a 0.05, es decir: por cada cinco hectáreas de cobertura arbórea ganada, noventa y cinco hectáreas de cobertura arbórea son perdidas. Así mismo, He et al. (2021), estudiaron la relación entre los patrones globales de respuesta de la vegetación y la disponibilidad de agua superficial y concluyeron que el tiempo de memoria de la vegetación tiende a ser más largo en biomas herbáceos, mientras que el tiempo de reacción de la planta es más largo en biomas con cubierta arbórea; es decir, existe una anticorrelación entre estas dos variables. Esto significa que los biomas herbáceos podrían ser más vulnerables a las perturbaciones de las aguas superficiales durante los cambios climáticos.

*El WAI (índice de disponibilidad de agua)* proporciona información importante para describir la biocapacidad del planeta, es necesario gestionar de manera

integral todo el ciclo hídrico y asegurarse de la calidad del agua. De acuerdo a Akhtar et al. (2021), la relación con el agua dulce y el consumo humano sigue siendo importante en todo el mundo, los autores afirman que el cálculo del WQI está sujeto a la subjetividad y por lo tanto es complicado tomar una metodología que pueda aplicarse a este estudio. Al respecto, después de estudiar 46 métodos del WQI, proponen la modificación del proceso de cálculo del WQI, cuantificando el nivel de incertidumbre y definiendo parámetros tanto para aguas superficiales y continentales, distinguiendo entre aguas para uso doméstico, industrial y de uso agrícola. En relación al agua como impulsor del desarrollo sostenible, Bozorgzadeh & Mousavi (2023), proponen un modelo de optimización para la asignación de agua intersectorial que utiliza los siguientes parámetros la tasa de crecimiento de las clases de trabajo, coeficiente de autosuficiencia para los productos estratégicos y el coeficiente de mejora de consumo de agua; el resultado de ejecutar el modelo denominado WCGD (Water-constrained green development, traducido como desarrollo verde con restricciones de agua) muestra que cambiando la tendencia de desarrollo WCGD y modificando las actividades existentes, es posible lograr políticas de asignación de agua sin efectos ambientales destructivos.

*El EPI (índice de protección del entorno)* ilustra la condición actual acerca de cómo los países gestionan las tres siguientes variables: generación de residuos, gestión de áreas naturales protegidas y generación de CO<sub>2</sub>. En relación a la generación de residuos, Ndiribe (2023) propone el modelo NFWR para realizar el ajuste natural de la reducción de los desechos generados, bajo un componente cardinal EPCD que identifica los procesos de extracción, producción, consumo y eliminación de los desechos; al no existir métricas para regular la generación de residuos a lo largo de la cadena de desechos, es importante que el modelo NFWR-EPCD cuente con métricas precisas que relacionen las WEP (plantas de conservación de residuos en energía) con la sobreproducción, consumo insuficiente, eliminación adecuada del producto. Respecto a la gestión de áreas naturales protegidas, Zeng et al. (2023) hallaron que el 30% de la fauna que evaluaron tienen menos del 10% de su hábitat adecuado protegido en reservas naturales; afirman que las

especies con hábitats limitados que son excluidas de los parques naturales tienden a estar en mayor riesgo de extinción; finalmente, afirman que el área de territorio necesario para proteger el hábitat de especies es pequeña en términos absolutos: por ejemplo, en Indonesia es posible reservar 330 kilómetros cuadrados para salvaguardar el hábitat de 53 especies que carecen de cobertura de áreas protegidas. En relación a la generación de CO<sub>2</sub>, Meng et al. (2023) distinguen los emisores de carbono entre el norte global, que comprende a los países desarrollados; y el sur global, que comprende a los países en desarrollo. Los autores señalan que de 2004 a 2007, la relación industrial entre el comercio del sur global y norte global incidieron entre el 75% y 84% de las emisiones netas de CO<sub>2</sub>, debido a los menores costos de producción de las fabricas de India y China que pretende disminuir a cero sus emisiones antes del 2060. Para Shah et al. (2023), proponen poner en práctica técnicas de recolección exitosa de CO<sub>2</sub> que sean rentables, sin embargo, justifican que el avance lento de estas tecnologías puede deberse en parte a los riesgos e incertidumbres en cuanto a tecnología y economía.

*El ETI (índice de transición energética)* relaciona el uso de nuevas fuentes de energía con la economía. Sarpong et al. (2023), observaron que los impuestos ambientales, la energía renovable y el acceso a combustibles y tecnologías limpias para cocinar, disminuyen la contaminación ambiental en las economías E7 (China, Turquía, India, Rusia, Brasil, Indonesia y México), mientras que la urbanización y el crecimiento de la población tienen una relación positivamente significativa con las emisiones de estos países. Para Jabin et al. (2022), recomiendan que es necesario brindar acceso a combustible limpio y tecnologías nuevas para el uso de cocinas en los países con ingresos medio bajo. Así mismo, concluyen que las cocinas ubicadas lejos de las viviendas reducen la frecuencia de nacimientos de niños con bajo peso y niños en etapa gestacional de bajo tamaño en Bangladesh. Sin embargo, Sun et al. (2023), hallaron que el financiamiento verde tiene un ligero impacto en el coeficiente de contaminación ambiental en China, es decir, el aumentar el consumo de energía renovable en 1%, se puede disminuir las emisiones CO<sub>2</sub> en 0.103%; así mismo, los autores afirman que la reducción de

emisiones CO2 es más efectiva en las regiones desarrolladas de su país y por lo tanto, las personas de estas regiones tienen mayor acceso al financiamiento verde.

## Conclusiones

Se logró construir el modelo matemático *Remaining Path*, versión 1.0, el cual determina el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.

Se analizaron las principales variables que definen la dinámica de demanda de recursos por parte de la población, las cuales son: índice de objetivos de desarrollo sostenible, índice de desarrollo humano, índice de percepción de la corrupción; e índice de nivel de ingresos.

Se analizaron los principales sistemas de restauración para evitar la extinción de la biocapacidad, los cuales son: sistemas de restauración de bosques, sistemas de disponibilidad de agua, sistemas de protección del entorno y sistemas de transición energética.

El modelo matemático se construyó mediante el uso de las técnicas de análisis, correlación, dispersión y tendencia de datos; haciendo uso de la tecnología de Microsoft Excel, Python y las librerías Matplotlib, NumPy y Sympy para automatizar los procesos de análisis matemático y cálculo integral que se aplicaron.

Se utilizó el modelo matemático construido en el presente trabajo de investigación para medir el tiempo límite de extinción de la biocapacidad en Perú y en el mundo, con data obtenida de las bases de datos publicadas por instituciones especializadas, obteniendo resultados importantes.

## Recomendaciones

Validar el modelo matemático *Remaining Path*, versión 1.0, que fue construido en el presente trabajo de investigación con el objetivo de mejorar la fiabilidad de los resultados.

Construir una metodología que proponga alternativas para controlar las cuatro variables que definen la dinámica de demanda de recursos por parte de la población.

Crear una metodología que proponga una configuración óptima para fomentar una gestión sostenible de los cuatro sistemas de restauración que evitan la extinción de la biocapacidad.

Realizar investigaciones nacionales para generar una base de datos abierta con registros de biocapacidad y huella ecológica que puedan ser usados en la aplicación del modelo matemático *Remaining Path* a nivel de Perú y sus regiones. Mediante el acceso a bases de datos de registros de biocapacidad y huella ecológica de cada país o ciudad, aplicar el modelo matemático *Remaining Path* en cada país y ciudad del mundo.

## Referencias bibliográficas

- Ahmed, T., Mazibar Rahman, M., Aktar, M., Das Gupta, A., & Zoynul Abedin, M. (2021). The impact of economic development on environmental sustainability: evidence from the Asian region. *Environment, Development and Sustainability*, 32.
- Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Idayu Ahmad, M., Umar, K., Md Yusuff, M. S., Talha Anees, M., . . . Ali Almanasir, K. Y. (2021). Modification of the Water Quality Index (WQI) Process for Simple Calculation Using the Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Method: A Review. *Water*, 905.
- Ali, S., Malik, T. N., & Raza, A. (2020). Risk-Averse Home Energy Management System. *IEEE Access*, 8, 91779-91798. doi:10.1109/ACCESS.2020.2994462.
- Arminen, H., & Menegaki, A. (2019). Corruption, climate and the energy-environment-growth nexus. *Energy Economics*, 621 - 634.
- Aslan, R. (2017). *God, a human history*. New York: Random House.
- Bares, M. (1989). *La búsqueda documental en el contexto telemático: modalidades de automatización y utilización de base de datos*. Madrid: Díaz de Santos S.A.
- Bilynkievycz dos Santos, C., Pedroso, B., Margarete Guimaraes, A., Ribeiro Carvalho, D., & Alberto Pilatti, L. (2017). Forecasting of Human Development Index of Latin American Countries Through Data Mining Techniques. *IEEE Latin America Transactions*, 1747-1753.
- Black, J., Hashimzade, N., & Myles, G. (2012). *Oxford Dictionary of Economics* (Fourth edition 2012 ed.). Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Borda Pérez, M. (2013). *El proceso de investigación, visión general de su desarrollo*. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.
- Bozorgzadeh, E., & Mousavi, S. (2023). Water-constrained green development framework based on economically-allocable water resources. *Nature*, 15.
- Cañadas Osinski, I., & San Luis Costas, C. (2018). *Análisis de datos en investigación. Primeros pasos*. Alicante, España: Universitas Miguel Hernández.
- Cheng, J., He, S., & Yang, K. (2010). Assessment System for Water Conservation Society based on Water Footprint. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 4.

- Comunidad Andina. (2009). *Huella ecológica y biocapacidad en la Comunidad Andina*. Lima: Global Footprint Network.
- Cook, M. (2012). *Una breve historia de la humanidad*. Barcelona: Antoni Bosch.
- da Veiga, J. (2017). *Sustentabilidade: a legitimação de um novo valor*. São Paulo: SENAC.
- Dasgupta, P., Raven, P., & McIvor, A. (2019). *Biological extinction: new perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Díaz Narváez, V. P. (2009). *Metodología de la investigación científica y bioestadística para profesionales y estudiantes de ciencias de la salud*. Santiago de Chile, Chile: Ril editores.
- Du, Z., Yu, L., Yang, J., Coomes, D., Kanniah, K., Fu, H., & Gong, P. (2023). Mapping Annual Global Forest Gain From 1983 to 2021 With Landsat Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4195-4204.
- Dumitran, G. E., Vuta, L. I., & Diminescu, M. A. (2019). Ecological Footprints in Romania – urban versus rural area. *International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 439-443.
- Eppen, G., Gould, F., Schmidt, C., Moore, J., & Weatherford, L. (1998). *Construcción de Modelos para la toma de Decisiones con Hojas de Cálculo Electrónicas*. México: Prentice-Hall.
- Gabbi, G., Massimo, M., Patrizi, N., Puselli, F. M., & Bastianoni, S. (2021). The biocapacity adjusted economic growth. Developing a new indicator. *Ecological Indicators*, 1-7.
- Gao, J., & Tian, M. (2015). Analysis of over-consumption of natural resources and the ecological trade deficit in China based on ecological footprints. *Ecological Indicators*, 1-6.
- García Morales, L. (2020). *Filosofía de la restauración, más allá de las cosas*. Norderstedt: Books on Demand.
- Goldin, I. (2014). *Is the Planet Full?* Oxford: Oxford University Press.
- Gómez, M. M. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- Grande Esteban, I. (2006). *Conducta real del consumidor y marketing efectivo*. Madrid: ESIC.

- Guo, H., Xin, X., Pei, S., Dong, S., & Wu, D. (2018). Ecological Footprint Calculation of Beijing Based on Net Primary Productivity and its Comparison with Traditional Models. *7th International Conference on Agro-geoinformatics*, 1-4.
- Guo, J., Wei, Z., Xie, X., Ren, J., & Zhou, H. (2022). Dynamic change and driving force of natural capital in Qinghai Province based on the three-dimensional ecological footprint, China. *Ecological Indicators*, 1-15.
- Hardy, M., & Bryman, A. (2004). *Handbook of Data Analysis*. London: SAGE Publications Ltd.
- He, Q., Lu, H., Yang, K., Zhen, L., Yue, S., Li, Y., & Entekhabi, D. (2021). Global Patterns of Vegetation Response to Short-Term Surface Water Availability. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8273-8286.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill Education.
- Hight, D. (1977). *A concept of limits*. New York: Dover Publications.
- Hori, K., Shirahama, S., Hashimoto, S., Saito, O., Matsui, T., & Haga, C. (2023). Development of a method for downscaling ecological footprint and biocapacity to a 1-km square resolution. *Sustainability Science*, 1594-1568.
- Horsburgh, N., Tyler, A., Mathieson, S., Wackernagel, M., & Lin, D. (2022). Biocapacity and cost-effectiveness benefits of increased peatland restoration in Scotland. *Journal of Environmental Management*, 9.
- Hunter Jr., M., P. Gibbs, J., & Popescu, V. (2021). *Fundamentals of Conservation Biology*. Wiley: Oxford.
- Jabin, N., Salam, M., Rahman, M. M., Sharna, T., Franklin, M., Ahmed, A., . . . Islam, T. (2022). Social inequality influences the impact of household air pollution on birth outcomes. *Science of the Total Environment*, 7.
- Jiang, S., Lu, C., Zhang, S., Lu, X., Tsai, S.-B., Wang, C.-K., . . . Lee, C.-H. (2019). Prediction of Ecological Pressure on Resource-Based Cities Based on an RBF Neural Network Optimized by an Improved ABC Algorithm. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 47423-47436.
- Jiménez-Ottalengo, R., & Carreras-Zamacona, M. T. (2005). *Metodología para la Investigación en Ciencias de lo Humano*. México D.F., México: Publicaciones Cruz O., S.A.

- Justin, K., Alessandro, G., Sarah, R., Anders, R., & Mathis, W. (2008). *Guidebook to the National Footprint Accounts*. Oakland: Global Footprint Network.
- Kalman, D. (2023). *Elementary Mathematical Models*. Providence: American Mathematical Society.
- Korkut Pata, U., Tevfik Kartal, M., Sunday Adebayo, T., & Ullah, S. (2023). Enhancing environmental quality in the United States by linking biomass energy consumption and load capacity factor. *Geoscience Frontiers*, 1-11.
- Kumar Tiwari, A., Kocoglu, M., Jeelanie Banday, U., & Awan, A. (2022). Hydropower, human capital, urbanization and ecological footprints nexus in China and Brazil: evidence from quantile ARDL. *Environmental Science and Pollution Research*, 68923-68940.
- Lin, D., Hanscom, L., Martindill, J., Borucke, M., Cohen, L., Galli, A., . . . Wackernagel, M. (2018). *Working Guidebook to the National Footprint Accounts*. Oakland,: Global Footprint Network.
- Lin, D., Hanscom, L., Murthy, A., Galli, A., Evans, M., Neill, E., . . . Wackernagel, M. (2018). Ecological Footprint Accounting for Countries: Updates and Results of the National Footprint Accounts, 2012–2018. *Resources*, 1-22.
- Lozano Núñez, C., Lozano Núñez, P., Mercado Guillén, A., Lozano Núñez, D., & Lozano Núñez, H. (2007). *La tesis universitaria, de maestría y doctorado en contabilidad, administración, economía y educación*. Lima: Pedro Demetrio Lozano Núñez.
- Marazzi, L. (2017). *An Analysis of Mathis Wackernagel and William Rees's: Our Ecological Footprint Reducing Human Impact on the Earth*. London: Macat International Ltd.
- Mathis, W., & William E., R. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing human impact on the earth*. Philadelphia: New Society Publishers.
- Meng, J., Huo, J., Zhang, Z., Liu, Y., Mi, Z., Guan, D., & Feng, K. (2023). The narrowing gap in developed and developing country emission intensities reduces global trade's carbon leakage. *Nature Communications*, 10.
- Monroe, J. S., Wicander, R., & Pozo, M. (2008). *Geología, dinámica y evolución de la Tierra*. Madrid: Parainfo.

- Moros-Ochoa, M. A., Castro-Nieto, G. Y., Quintero-Español, A., & Llorente-Portillo, C. (2022). Forecasting Biocapacity and Ecological Footprint at a Worldwide Level to 2030 Using Neural Networks. *Sustainability*, 2-14.
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Naciones Unidas. (2018). *Marco de indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
- Nagypál, V., Ördög, D., László, Z., & Mikó, E. (2019). Factors affecting water use and water footprint of dairy farms. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 5.
- Ndiribe, C. (2023). The nature fit concept of waste reduction: Prospects for engineering a clean future,. *Resources, Environment and Sustainability*, 9.
- Organización Internacional del Trabajo. (2017). *Objetivos de Desarrollo Sostenible: Manual de referencia Sindical sobre la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo.
- Ortiz Valencia, P. A., Ramírez Echavarría, J. L., & Cardona Rendón, L. (2011). *Modelo Matemático y Control de un Sistema de Fluidos*. Medellín: Textos Académicos.
- Pearce, I. (2022). *Teoria geral do desenvolvimento sustentável: conciliando desenvolvimento, Ambiente e Justiça*. Porto Alegre: Agora.
- Pianegonda, A., Favargiotti, S., & Ciolli, M. (2022). Rural–Urban Metabolism: A Methodological Approach for Carbon-Positive and Circular Territories. *Sustainability*, 1-16.
- PNUMA. (2004). *ILAC 2004 Indicadores Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible: Indicadores de seguimiento*. San José de Costa Rica: Naciones Unidas.
- Pourakbari-Kasmaei, M., Lehtonen, M., Contreras, J., & Sanches Mantovani, J. R. (Febrero de 2020). Carbon Footprint Management: A Pathway toward Smart Emission Abatement. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(20), 935-948.

- Pourakbari-Kasmaei, M., Rider, M., & Mantovani, J. (2014). An unequivocal normalization-based paradigm to solve dynamic economic and emission active-reactive OPF (optimal power flow). *Energy*, 554-566.
- Qamar, U., & Summair Raza, M. (2023). *Data science concepts and techniques with applications*. Springer.
- Quarteroni, A., & Gervasio, P. (2020). *A Primer on Mathematical Modelling*. Cham: Springer.
- Quiroga Martínez, R. (2007). *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Quiroga Martínez, R. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Reddy, R., Almeida, L., Santos, P. M., & Tovar, E. (2020). Comparing the Ecological Footprint of Intersection Management Protocols for Human/Autonomous Scenarios. *IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1-6.
- Reston, G. (2007). *Mundo Maya, claves para entender una civilización fascinante*. Madrid: Ediciones Nowtilus.
- Riera, P., García, D., Kristrom, B., & Braanlund, R. (2008). *Manual de Economía Ambiental y de los recursos naturales*. Madrid: Parainfo.
- Rodríguez Rodríguez, C., Breña Oré, J., & Esenarro Vargas, D. (2021). *Las variables en la metodología de la investigación científica*. Alicante, España: 3 ciencias.
- Ross, S. (2005). *Introductory Statistics*. Elsevier Inc.
- Sachsman, D., Freedman, E., & Shipley Hiles, S. (2021). *Communicating Endangered Species, Extinction, News and Public Policy*. New York: Routledge.
- Salafranca Cosialls, L., Sierra Olivera, V., Núñez Peña, M., Solanas Pérez, A., & Leiva Ureña, D. (2005). *Análisis estadístico mediante aplicaciones informáticas, Spss, Statgraphics, Minitab y Excel*. Barcelona, España: Publicaciones i Edicions de la Universitat de Barcelona.

- Sánchez, J., Domínguez, R., León, M., Samaniego, J., & Sunkel, O. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad, 70 años de pensamiento de la CEPAL*. Santiago: CEPAL.
- Sarpong, K., Xu, W., Gyamfi, B., & Ofori, E. (2023). Can environmental taxes and green-energy offer carbon-free E7 economies? An empirical analysis in the framework of COP-26. *Environmental Science and Pollution Research*, 51726–51739.
- Schulz, C., Brañas, M. M., Núñez Pérez, C., Del Aguila Villacorta, M., Laurie, N., Lawson, I. T., & Roucoux, K. H. (2019). Uses, cultural significance, and management of peatlands in the Peruvian Amazon: Implications for conservation. *Biological Conservation*, 189-198.
- Shah, B., Shah, M., Shah, V., & Prajapati, M. (2023). An Anatomized study on the progress and prospects of CO<sub>2</sub> utilization technology. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*.
- Sokolowski, A. (2021). *Understanding Physics Using Mathematical Reasoning: A Modeling Approach for Practitioners and Researchers*. Houston: Springer.
- Somani, A., & Chandra Deka, G. (2018). *Big data analytics, tools and technology for effective planning*. Taylor & Francis Group.
- Sun, Y., Bao, Q., & Taghizadeh-Hesary, F. (2023). Green finance, renewable energy development, and climate change: evidence from regions of China. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8.
- Syrovátka, M. (2020). On sustainability interpretations of the Ecological Footprint. *Ecological Economics*, 1-10.
- Terhemba Iorember, P., Iormom, B., Paul Jato, T., & Abbas, J. (2022). Understanding the bearable link between ecology and health outcomes: the criticality of human capital development and energy use. *Heliyon*, 1-10.
- Thornbush, M. J. (2021). *The Ecological Footprint as Sustainability Metric Implications for Sustainability*. Toronto: SpringerBriefs in Environmental Science.
- Wang, P., Cao, Y., & Ding, Z. (2018). Resources Planning Strategies for Data Center Microgrid Considering Water Footprints. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 6.

- Washington, H. (2013). *Human Dependence on Nature: How to help solve the environmental crisis*. New York: Routledge.
- Wiedmann, T., & Allen, C. (2021). City footprints and SDGs provide untapped potential for assessing city sustainability. *Nature Communications*, 10.
- Yu, G., Liu, J., & Pan, A. (2020). Role transformation of power enterprises under energy security strategy of China. *CIREN 2020 Berlin Workshop*, 683-686. doi:10.1049/oap-cired.2021.0191
- Zeng, Y., Senior, R., Crawford, C., & Wilcove, D. (2023). Gaps and weaknesses in the global protected area network for safeguarding at-risk species. *Science Advances*, 11.
- Zhiyong Tian, B. L., & Zheng, F. (2010). Research on Logistics Carbon Footprint Analysis System. *IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*, 1109 - 1112.

## Apéndice

### Apéndice A: Matriz de consistencia

“Construcción del modelo matemático Remaining Path para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad”						
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Criterio de valoración	Instrumento
General	General	General				
¿Es posible construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad?	Construir un modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.	Sí, es posible construir el modelo matemático para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad, analizando los factores que determinan la dinámica de demanda de recursos y los sistemas de restauración de la biocapacidad; utilizando las	V1: Construcción del modelo matemático ‘ <i>Remaining Path</i> ’ para determinar el tiempo límite de extinción de la biocapacidad.	Factores de demanda de dinámica de recursos	SDGI: Índice de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible	Estadística Reportes Registros Bases de datos
					HDI: Índice de desarrollo humano	
					CPI: Índice de percepción de corrupción	
					ILI: Índice de nivel de ingresos	
Específicos	Específicos			Sistemas de restauración de biocapacidad	FRI: Índice de restauración de bosques	Estadística Reportes Registros Bases de datos
					WAI: Índice de disponibilidad de agua y saneamiento	
					EPI: Índice de protección del entorno	
					ETI: Índice de transición energética	
				Herramientas y métodos	Análisis descriptivo de datos, correlación de datos, dispersión de datos y tendencia de datos	Técnicas estadísticas

<p>a. ¿Cuáles son los principales factores que definen la dinámica de demanda de recursos por la población?</p> <p>b. ¿Cuáles son los principales sistemas de restauración para evitar la extinción de la biocapacidad?</p> <p>c. ¿Qué herramientas y métodos se deben de utilizar para la construcción del modelo matemático?</p>	<p>a. Analizar los principales factores que definen la dinámica de demanda de recursos por parte de la población.</p> <p>b. Analizar los principales sistemas de recuperación para evitar la extinción de la biocapacidad.</p> <p>c. Seleccionar las herramientas y métodos necesarios para construir el modelo matemático.</p> <p>d. Aplicar el modelo matemático Remaining Path mediante la realización de pruebas con data a nivel nacional y mundial.</p>	<p>técnicas de análisis, correlación, dispersión y tendencia de datos; haciendo uso de la tecnología de Microsoft Excel, Python y las librerías Matplotlib, NumPy y Sympy para automatizar los procesos de análisis matemático y cálculo integral que se aplicaron.</p>			Análisis matemático Cálculo integral	Métodos matemáticos
					Microsoft Excel 2021	Hoja de cálculo
					Python 3.11.2	Lenguaje de programación
					Matplotlib 3.7.0 NumPy 1.24.2 Sympy 1.11.1	Librerías para Python
					Visual Studio Code 1.79	Editor de código
<b>Metodología</b>						
Método	Cuantitativo					
Alcance	Descriptivo, propositivo					
Diseño	No experimental					
Población	La población del presente trabajo de investigación está representada por la publicación de información en todos los países.					

Muestra	La muestra del presente trabajo de investigación está representada por la información descargada en marzo de 2023 desde la página de Global Footprint Network. Representa la relación entre la huella ecológica y la biocapacidad (gha/persona); periodo 1961-2018; tanto para Perú, el mundo y otros países; disponible en <a href="https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&amp;type=BCtot,EFtot">https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&amp;type=BCtot,EFtot</a>
Técnicas e instrumentos de recolección de datos	<p>Técnicas de recolección de datos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A. Análisis descriptivo</li> <li>B. Correlación de datos</li> <li>C. Dispersión de datos</li> <li>D. Tendencia de datos</li> </ul> <p>Instrumentos de recolección de datos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A. Hoja de cálculo Microsoft Excel, versión LTSC Standard 2021</li> <li>B. Lenguaje de programación Python, versión 3.11.2, publicada el 08/02/2023</li> <li>C. Librería Matplotlib: versión 3.7.0, publicada el 13/02/2023.</li> <li>D. Librería NumPy: versión 1.24.2, publicada el 05/02/2023.</li> <li>E. Librería Sympy: versión 1.11.1, publicada el 31/02/2022.</li> <li>F. Editor de código Visual Studio Code, versión 1.79, publicada en mayo de 2023.</li> </ul>

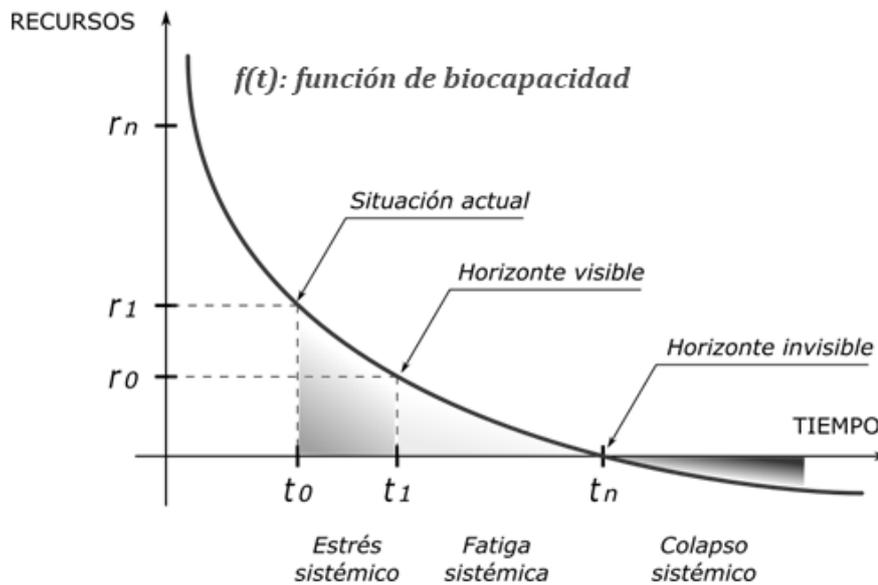
## Apéndice B: Tendencias de la biocapacidad

Como se aprecia en la *Figura 1*, los indicadores ambientales mencionados en los párrafos anteriores nos dan un valor en un tiempo estático  $t_0$  y quizá podemos atrevernos a deducir una posible disminución de la biocapacidad en un tiempo cercano  $t_1$ , es decir, somos conscientes que la biocapacidad fue mayor en el pasado: presenta una tendencia de estrés sistémico.

Es muy importante determinar la duración del diferencial de tiempo comprendido en el intervalo  $(t_1, t_n)$  porque este es el plazo que tenemos para poner en marcha los sistemas de restauración de biocapacidad antes de que esta se extinga o presente un colapso sistémico como se aprecia en el intervalo  $(t_n, \infty)$ .

Figura 1

Tendencia al colapso sistémico de la biocapacidad



En la *Figura 2* se representa el comportamiento de la biocapacidad después de la puesta en marcha de las acciones paliativas que solo podrían asegurar una dinámica constante de la demanda de recursos por la población, es decir se mantendría la biocapacidad como un sistema en fatiga como se aprecia en el intervalo  $(t_1, t_n)$ .

Sin embargo, estas acciones no garantizan que los sistemas de restauración de biocapacidad puedan tener éxito en el futuro y que posiblemente puedan estar presentando una tendencia a un colapso sistémico, es decir el intervalo  $(t_n, \infty)$  presenta un alto grado de incertidumbre y entropía.

Figura 2

Tendencia a la fatiga sistémica de la biocapacidad

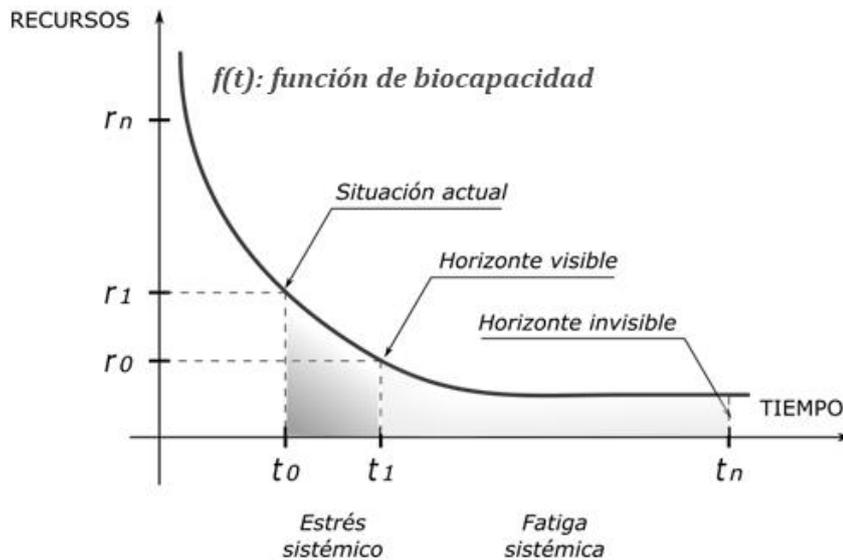
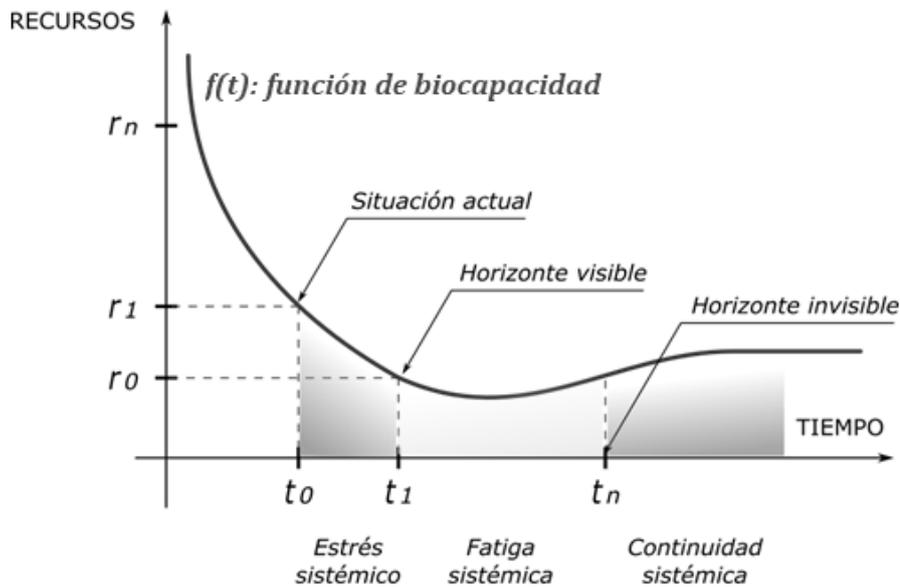


Figura 3

Tendencia a la continuidad sistémica de la biocapacidad



A continuación, en la Figura 3 se determina la duración del diferencial de tiempo comprendido en el intervalo  $(t_1, t_n)$  y en este periodo se pone en marcha la configuración óptima de los sistemas de restauración de la biocapacidad para adoptar hábitos de consumo sostenibles que permitan lograr la continuidad sistémica, tal como se aprecia en el intervalo  $(t_n, \infty)$ .



## Apéndice C: Perú - Base de datos de biocapacidad y huella ecológica

Fuente:

*Global Footprint Network*

Enlace: <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFCtot>

Tipo: *Ecological Footprint vs Biocapacity (gha per person)*

Filtro: *Peru*

Periodo: *1961 – 2018*

Consultado: *26/03/2023*

Short Name	year	Record	Built-up Land	Carbon	Cropland	Fishing Grounds	Forest Products	Grazing Land	Total
Peru	1961	BiocapPerCap	0.056570176	0	0.288042579	0.609176988	8.382205725	1.233191228	10.5691867
Peru	1961	EFCconsPerCap	0.056570176	0.129946826	0.310033545	0.741234828	0.199579242	1.238429027	2.675793643
Peru	1962	BiocapPerCap	0.055053378	0	0.292338539	0.591064182	8.149360757	1.196524456	10.28434131
Peru	1962	EFCconsPerCap	0.055053378	0.165973292	0.311561071	0.762413888	0.201776995	1.213167194	2.709945819
Peru	1963	BiocapPerCap	0.04695898	0	0.27474286	0.573490426	7.910688137	1.164818742	9.970699145
Peru	1963	EFCconsPerCap	0.04695898	0.242820031	0.297874316	0.743647053	0.201204673	1.186154306	2.718659359
Peru	1964	BiocapPerCap	0.044471489	0	0.278135378	0.556744515	7.68446798	1.130806056	9.694625419
Peru	1964	EFCconsPerCap	0.044471489	0.257492501	0.306401385	0.794103355	0.199970315	1.129767501	2.732206545
Peru	1965	BiocapPerCap	0.041749701	0	0.261748753	0.540558919	7.468625557	1.097931426	9.410614357
Peru	1965	EFCconsPerCap	0.041749701	0.282791049	0.320937848	0.608160281	0.202136325	1.120323883	2.576099086
Peru	1966	BiocapPerCap	0.047330494	0	0.280486334	0.524385715	7.276070149	1.065081964	9.193354655

Peru	1966	EFConsPerCap	0.047330494	0.32292298	0.332063309	0.697490108	0.194716085	1.097380996	2.69190397
Peru	1967	BiocapPerCap	0.047658631	0	0.275595296	0.509488835	7.07359242	1.03482485	8.941160032
Peru	1967	EFConsPerCap	0.047658631	0.288230865	0.337708074	0.778772694	0.194016686	1.064910583	2.711297532
Peru	1968	BiocapPerCap	0.042142945	0	0.241168549	0.494344135	6.870275261	1.007400151	8.655331042
Peru	1968	EFConsPerCap	0.042142945	0.243464962	0.310905592	0.680292853	0.204678496	1.019546763	2.501031611
Peru	1969	BiocapPerCap	0.046259673	0	0.261248225	0.479847132	6.66193734	0.977857406	8.427149776
Peru	1969	EFConsPerCap	0.046259673	0.277639041	0.328580171	0.659531857	0.196262481	0.999796088	2.50806931
Peru	1970	BiocapPerCap	0.048139026	0	0.273592905	0.46662233	6.483482431	0.950907217	8.222743909
Peru	1970	EFConsPerCap	0.048139026	0.315214982	0.321541862	0.803547324	0.198830011	0.986752507	2.674025711
Peru	1971	BiocapPerCap	0.046926997	0	0.260275635	0.452597713	6.318628343	0.922327124	8.000755812
Peru	1971	EFConsPerCap	0.046926997	0.350043927	0.314458921	0.724772115	0.209475812	0.948195073	2.593872844
Peru	1972	BiocapPerCap	0.03965537	0	0.238321344	0.440061626	6.155867474	0.898502728	7.772408541
Peru	1972	EFConsPerCap	0.03965537	0.349598449	0.28440437	0.376898502	0.209720335	0.913214247	2.173491272
Peru	1973	BiocapPerCap	0.03907497	0	0.23192181	0.428655644	5.985398452	0.875214386	7.560265261
Peru	1973	EFConsPerCap	0.03907497	0.464202857	0.250433759	0.349047711	0.205167029	0.889403265	2.19732959
Peru	1974	BiocapPerCap	0.038809025	0	0.224189068	0.416072183	5.835227955	0.849521907	7.363820137
Peru	1974	EFConsPerCap	0.038809025	0.469184762	0.275851178	0.366245529	0.215924001	0.856775199	2.222789694
Peru	1975	BiocapPerCap	0.038625641	0	0.21791349	0.404581301	5.687574298	0.826060219	7.174754949
Peru	1975	EFConsPerCap	0.038625641	0.483978843	0.302335332	0.259646913	0.217201032	0.826769518	2.128557279
Peru	1976	BiocapPerCap	0.03816112	0	0.215564383	0.393689746	5.529711296	0.803822215	6.980948759
Peru	1976	EFConsPerCap	0.03816112	0.475082376	0.276691873	0.296492399	0.234291272	0.792011202	2.112730242

Peru	1977	BiocapPerCap	0.037033842	0	0.211414889	0.384121432	5.387742807	0.784285959	6.804598929
Peru	1977	EFConsPerCap	0.037033842	0.444584998	0.284979886	0.29898115	0.218965859	0.783587131	2.068132865
Peru	1978	BiocapPerCap	0.035233209	0	0.198996686	0.374699832	5.236070016	0.765049261	6.610049005
Peru	1978	EFConsPerCap	0.035233209	0.395239079	0.255499638	0.528122699	0.201878601	0.750827396	2.166800622
Peru	1979	BiocapPerCap	0.036579951	0	0.203505166	0.365993944	5.099319392	0.747273878	6.452672331
Peru	1979	EFConsPerCap	0.036579951	0.331111136	0.271611079	0.246483794	0.203428809	0.740507214	1.829721982
Peru	1980	BiocapPerCap	0.03236229	0	0.178043223	0.357913553	4.936950369	0.730775612	6.236045047
Peru	1980	EFConsPerCap	0.03236229	0.418847235	0.277445517	0.252986379	0.215092742	0.731887774	1.928621937
Peru	1981	BiocapPerCap	0.035899529	0	0.194053261	0.34958415	4.816841352	0.713768922	6.110147214
Peru	1981	EFConsPerCap	0.035899529	0.420135362	0.299761576	0.168027752	0.197557925	0.718762146	1.840144289
Peru	1982	BiocapPerCap	0.037400157	0	0.200085857	0.339707217	4.704798373	0.693602539	5.975594144
Peru	1982	EFConsPerCap	0.037400157	0.408571475	0.291600327	0.158669275	0.190045015	0.707532426	1.793818676
Peru	1983	BiocapPerCap	0.032342016	0	0.171186386	0.33086997	4.59057955	0.675558951	5.800536872
Peru	1983	EFConsPerCap	0.032342016	0.36097388	0.271713887	0.103229727	0.176974231	0.673970118	1.619203859
Peru	1984	BiocapPerCap	0.038553418	0	0.202091002	0.321358415	4.474261612	0.656138584	5.69240303
Peru	1984	EFConsPerCap	0.038553418	0.341306472	0.281150326	0.167245669	0.173868281	0.663130496	1.665254661
Peru	1985	BiocapPerCap	0.038896074	0	0.199856875	0.312553083	4.363227686	0.63816016	5.552693878
Peru	1985	EFConsPerCap	0.038896074	0.312830928	0.262662392	0.128105583	0.171040737	0.641081889	1.554617603
Peru	1986	BiocapPerCap	0.041188786	0	0.208456768	0.304416813	4.248547663	0.621547803	5.424157832
Peru	1986	EFConsPerCap	0.041188786	0.362076287	0.321491301	0.205921595	0.191795758	0.666397428	1.788871153
Peru	1987	BiocapPerCap	0.043384664	0	0.216104516	0.29728789	4.159354814	0.606992213	5.323124097

Peru	1987	EFConsPerCap	0.043384664	0.36504563	0.33601564	0.180670992	0.196810061	0.646517392	1.76844438
Peru	1988	BiocapPerCap	0.044579004	0	0.217775292	0.290206953	4.075137471	0.592534598	5.220233318
Peru	1988	EFConsPerCap	0.044579004	0.359304303	0.312273755	0.302467204	0.19198335	0.607945961	1.818553577
Peru	1989	BiocapPerCap	0.045731834	0	0.219220319	0.283654374	3.991612807	0.579155768	5.119375102
Peru	1989	EFConsPerCap	0.045731834	0.298153422	0.274431874	0.283918777	0.180614387	0.584689353	1.667539647
Peru	1990	BiocapPerCap	0.035473241	0	0.171329677	0.276213265	3.904323903	0.667853589	5.055193675
Peru	1990	EFConsPerCap	0.035473241	0.286965992	0.253035596	0.329525563	0.168029478	0.6026423	1.67567217
Peru	1991	BiocapPerCap	0.034886888	0	0.167651302	0.270886579	3.817592428	0.654974242	4.945991439
Peru	1991	EFConsPerCap	0.034886888	0.287079749	0.254758504	0.246506511	0.16456103	0.592419464	1.580212146
Peru	1992	BiocapPerCap	0.029390492	0	0.140592892	0.268212919	3.791930168	0.648509622	4.878636092
Peru	1992	EFConsPerCap	0.029390492	0.313354553	0.273420198	0.258767024	0.158633076	0.579328731	1.612894074
Peru	1993	BiocapPerCap	0.034760558	0	0.163550213	0.262523251	3.71755735	0.634752626	4.813143997
Peru	1993	EFConsPerCap	0.034760558	0.294038009	0.29144195	0.335951937	0.174110509	0.558416426	1.688719388
Peru	1994	BiocapPerCap	0.03791936	0	0.187370902	0.257409696	3.64892634	0.601128177	4.732754474
Peru	1994	EFConsPerCap	0.03791936	0.277582523	0.324824539	0.422185475	0.186607211	0.555671027	1.804790135
Peru	1995	BiocapPerCap	0.037768151	0	0.190290125	0.252372957	3.578949702	0.592192836	4.651573772
Peru	1995	EFConsPerCap	0.037768151	0.354236842	0.305154975	0.415609836	0.163571646	0.573530409	1.84987186
Peru	1996	BiocapPerCap	0.04124124	0	0.210768159	0.247436162	3.507256844	0.583380293	4.590082698
Peru	1996	EFConsPerCap	0.04124124	0.366978217	0.338178739	0.437832668	0.156311775	0.567659842	1.908202481
Peru	1997	BiocapPerCap	0.041144524	0	0.212230906	0.242907452	3.435412468	0.575423864	4.507119214
Peru	1997	EFConsPerCap	0.041144524	0.346790714	0.339290489	0.346500498	0.166535868	0.55790106	1.798163153

Peru	1998	BiocapPerCap	0.041473137	0	0.218329872	0.238881421	3.371268792	0.568562409	4.438515631
Peru	1998	EFConsPerCap	0.041473137	0.418702006	0.358510265	0.305572004	0.181955449	0.544028607	1.850241467
Peru	1999	BiocapPerCap	0.046320317	0	0.246680132	0.235317727	3.304446124	0.562716347	4.395480647
Peru	1999	EFConsPerCap	0.046320317	0.37576303	0.359385896	0.297736199	0.172564509	0.564926527	1.816696479
Peru	2000	BiocapPerCap	0.047911995	0	0.262063349	0.232288973	3.248248551	0.558075644	4.348588512
Peru	2000	EFConsPerCap	0.047911995	0.328159673	0.362706455	0.319468945	0.170835602	0.561498645	1.790581315
Peru	2001	BiocapPerCap	0.048579931	0	0.257422682	0.229451205	3.200237726	0.553828072	4.289519616
Peru	2001	EFConsPerCap	0.048579931	0.316817257	0.36751243	0.337858603	0.156899517	0.549574269	1.777242008
Peru	2002	BiocapPerCap	0.055390848	0	0.266068063	0.227015233	3.173985079	0.550491245	4.272950467
Peru	2002	EFConsPerCap	0.055390848	0.359214125	0.381595778	0.318715577	0.167626451	0.554504317	1.837047095
Peru	2003	BiocapPerCap	0.054837247	0	0.263521702	0.223833064	3.129484205	0.545282029	4.216958248
Peru	2003	EFConsPerCap	0.054837247	0.359282779	0.366132112	0.23647474	0.16010388	0.538421964	1.715252722
Peru	2004	BiocapPerCap	0.054282121	0	0.255002692	0.221331125	3.078836792	0.541666256	4.151118987
Peru	2004	EFConsPerCap	0.054282121	0.388345946	0.361520481	0.366197633	0.172537679	0.537426417	1.880310277
Peru	2005	BiocapPerCap	0.054086133	0	0.264965109	0.218705964	3.042329449	0.537661974	4.11774863
Peru	2005	EFConsPerCap	0.054086133	0.405761983	0.388678422	0.354397868	0.176072319	0.537956323	1.916953048
Peru	2006	BiocapPerCap	0.057534611	0	0.284672109	0.21630745	3.015139488	0.534188473	4.10784213
Peru	2006	EFConsPerCap	0.057534611	0.432710154	0.399444596	0.378119532	0.183611063	0.532357328	1.983777283
Peru	2007	BiocapPerCap	0.055152914	0	0.27452587	0.214098079	2.983797621	0.531130464	4.058704948
Peru	2007	EFConsPerCap	0.055152914	0.495658795	0.405344772	0.376284167	0.19088159	0.529078401	2.052400639
Peru	2008	BiocapPerCap	0.05928305	0	0.296327745	0.212791871	2.947457503	0.530273621	4.046133791

Peru	2008	EFConsPerCap	0.05928305	0.561573618	0.41211845	0.438180791	0.185410906	0.525739002	2.182305817
Peru	2009	BiocapPerCap	0.058664254	0	0.299089171	0.211053525	2.913011234	0.528305797	4.010123981
Peru	2009	EFConsPerCap	0.058664254	0.560490021	0.414731883	0.372906616	0.171405822	0.522727443	2.100926039
Peru	2010	BiocapPerCap	0.061185882	0	0.309076338	0.208811163	2.882941964	0.525031738	3.987047086
Peru	2010	EFConsPerCap	0.061185882	0.668761377	0.449633379	0.277365752	0.178587122	0.518214823	2.153748336
Peru	2011	BiocapPerCap	0.060776608	0	0.304413932	0.206788848	2.842057243	0.522263191	3.936299823
Peru	2011	EFConsPerCap	0.060776608	0.698715913	0.437720507	0.415398862	0.184854771	0.51050394	2.307970601
Peru	2012	BiocapPerCap	0.062342317	0	0.31802027	0.204272215	2.792875345	0.518198114	3.895708261
Peru	2012	EFConsPerCap	0.062342317	0.691165754	0.466888277	0.303860823	0.182195299	0.515119403	2.221571873
Peru	2013	BiocapPerCap	0.062252791	0	0.31692992	0.202545393	2.75864604	0.513896781	3.854270925
Peru	2013	EFConsPerCap	0.062252791	0.709600142	0.455699894	0.426223964	0.177284191	0.504282856	2.335343838
Peru	2014	BiocapPerCap	0.069835561	0	0.314244244	0.200754139	2.719950661	0.509352022	3.814136626
Peru	2014	EFConsPerCap	0.069835561	0.703353829	0.461036272	0.369000735	0.181419421	0.49071285	2.275358668
Peru	2015	BiocapPerCap	0.078510648	0	0.31768894	0.198584806	2.672136866	0.503848007	3.770769267
Peru	2015	EFConsPerCap	0.078510648	0.704198058	0.474320383	0.485210737	0.179943196	0.481064872	2.403247894
Peru	2016	BiocapPerCap	0.072390497	0	0.311082512	0.196098501	2.620867077	0.497539771	3.697978359
Peru	2016	EFConsPerCap	0.072390497	0.707165061	0.452592517	0.366293115	0.177984007	0.475412007	2.251837204
Peru	2017	BiocapPerCap	0.07416934	0	0.312189991	0.193320326	2.565298825	0.490491003	3.635469484
Peru	2017	EFConsPerCap	0.07416934	0.666640191	0.486048065	0.334279154	0.1594562	0.476919744	2.197512694
Peru	2018	BiocapPerCap	0.080884704	0	0.330647258	0.190246216	2.511773341	0.482691394	3.596242913
Peru	2018	EFConsPerCap	0.080884704	0.67949614	0.497538245	0.46420106	0.165833495	0.469493455	2.357447099

#### Apéndice D: World - Base de datos de biocapacidad y huella ecológica

Fuente: *Global Footprint Network*

Enlace: <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFCtot>

Tipo: *Ecological Footprint vs Biocapacity (gha per person)*

Filtro: *World*

Periodo: *1961 – 2018*

Consultado: *13/03/2023*

year	countryName	record	cropLand	grazingLand	forestLand	fishingGround	builtupLand	carbon	value
1961	World	BiocapPerCap	0.471736197	0.477855089	1.812764526	0.360253322	0.027315843	0	3.149924976
1961	World	EFConsPerCap	0.471736197	0.263727821	0.426056185	0.093878823	0.027315843	0.994391345	2.277103934
1962	World	BiocapPerCap	0.477943808	0.469171884	1.777277991	0.352989115	0.028127619	0	3.105510417
1962	World	EFConsPerCap	0.477943808	0.261271494	0.421569905	0.096409039	0.028127619	1.018198991	2.303520369

1963	World	BiocapPerCap	0.474250318	0.459991171	1.739196652	0.345810364	0.028289918	0	3.047538423
1963	World	EFConsPerCap	0.474250318	0.26178793	0.417479497	0.097742617	0.028289918	1.069135151	2.348684781
1964	World	BiocapPerCap	0.477281436	0.451605206	1.704897102	0.338811897	0.028978127	0	3.001573768
1964	World	EFConsPerCap	0.477281436	0.254984944	0.424121896	0.09406415	0.028978127	1.117176427	2.396608124
1965	World	BiocapPerCap	0.475674602	0.443617876	1.669230398	0.33179274	0.029337182	0	2.949652797
1965	World	EFConsPerCap	0.475674602	0.256638014	0.420271545	0.099425717	0.029337182	1.153520944	2.434865722
1966	World	BiocapPerCap	0.492049026	0.434855194	1.636412173	0.324417381	0.03103479	0	2.918768564
1966	World	EFConsPerCap	0.492049026	0.249969044	0.418631906	0.104016509	0.03103479	1.193206875	2.488906342
1967	World	BiocapPerCap	0.491497422	0.426946185	1.602044576	0.317525611	0.031556053	0	2.869569848
1967	World	EFConsPerCap	0.491497422	0.250164575	0.41621693	0.109089046	0.031556053	1.202661144	2.501185171
1968	World	BiocapPerCap	0.496372324	0.420102249	1.565208797	0.310262043	0.032255632	0	2.824201046
1968	World	EFConsPerCap	0.496372324	0.245221736	0.412140167	0.113457575	0.032255632	1.247742595	2.547190514
1969	World	BiocapPerCap	0.495690377	0.410456822	1.5263304	0.303288963	0.032518486	0	2.768285048
1969	World	EFConsPerCap	0.495690377	0.240018878	0.407907073	0.110907637	0.032518486	1.313032135	2.600074099
1970	World	BiocapPerCap	0.498011025	0.400861272	1.494849102	0.297069598	0.033443409	0	2.724234406
1970	World	EFConsPerCap	0.498011025	0.234035692	0.409430898	0.110140415	0.033443409	1.414726169	2.699789607
1971	World	BiocapPerCap	0.502445539	0.394026347	1.464066532	0.290294429	0.034524507	0	2.685357354
1971	World	EFConsPerCap	0.502445539	0.234322908	0.40663189	0.105794091	0.034524507	1.447600003	2.731319269
1972	World	BiocapPerCap	0.480810594	0.387290751	1.43498598	0.284404588	0.033699915	0	2.621191829
1972	World	EFConsPerCap	0.480810594	0.235364675	0.399372663	0.108084681	0.033699915	1.493486012	2.750818377
1973	World	BiocapPerCap	0.499692327	0.381376398	1.403968049	0.279186591	0.035536476	0	2.599759842

1973	World	EFConsPerCap	0.499692327	0.230123749	0.404101844	0.110086408	0.035536476	1.560107676	2.839648314
1974	World	BiocapPerCap	0.476256085	0.374495819	1.377502205	0.273149974	0.034568967	0	2.53597305
1974	World	EFConsPerCap	0.476256085	0.230572727	0.397468207	0.110416113	0.034568967	1.511038389	2.760317803
1975	World	BiocapPerCap	0.473470921	0.367868546	1.351267805	0.267758532	0.035034556	0	2.49540036
1975	World	EFConsPerCap	0.473470921	0.236151245	0.381204701	0.102922731	0.035034556	1.466896031	2.695679883
1976	World	BiocapPerCap	0.484033368	0.360415912	1.320446361	0.262701985	0.036301991	0	2.463899618
1976	World	EFConsPerCap	0.484033368	0.230147494	0.388916682	0.103403791	0.036301991	1.530473981	2.773279298
1977	World	BiocapPerCap	0.478895126	0.354724955	1.294839245	0.258436108	0.0365503	0	2.423445734
1977	World	EFConsPerCap	0.478895126	0.227015185	0.384334901	0.09804569	0.0365503	1.555964128	2.780807746
1978	World	BiocapPerCap	0.498737708	0.34951272	1.266862537	0.254182007	0.038492749	0	2.407787721
1978	World	EFConsPerCap	0.498737708	0.222213992	0.384764518	0.096112689	0.038492749	1.557706339	2.7980259
1979	World	BiocapPerCap	0.486979505	0.344329773	1.240806616	0.250274339	0.038122395	0	2.360512629
1979	World	EFConsPerCap	0.486979505	0.223639336	0.38619132	0.09491901	0.038122395	1.590697532	2.82055147
1980	World	BiocapPerCap	0.47320239	0.340364929	1.222043062	0.246598679	0.037565089	0	2.319774149
1980	World	EFConsPerCap	0.47320239	0.223416414	0.376679726	0.095024161	0.037565089	1.51282509	2.718710912
1981	World	BiocapPerCap	0.484414961	0.335017709	1.199417927	0.242569936	0.039134154	0	2.300554687
1981	World	EFConsPerCap	0.484414961	0.22088642	0.366600351	0.09551909	0.039134154	1.430518673	2.637075246
1982	World	BiocapPerCap	0.499197864	0.328338914	1.174738893	0.237293368	0.040707762	0	2.280276801
1982	World	EFConsPerCap	0.499197864	0.216501377	0.357720119	0.094773514	0.040707762	1.36967678	2.578579207
1983	World	BiocapPerCap	0.487033377	0.322073263	1.152182004	0.232558498	0.040257085	0	2.234104227
1983	World	EFConsPerCap	0.487033377	0.213851178	0.364023311	0.092965604	0.040257085	1.334305147	2.53243595

1984	World	BiocapPerCap	0.511797246	0.315688424	1.128926918	0.227174064	0.042505593	0	2.226092246
1984	World	EFConsPerCap	0.511797246	0.209468122	0.368179279	0.093262786	0.042505593	1.3604048	2.58561708
1985	World	BiocapPerCap	0.520352574	0.310086925	1.106433995	0.222098559	0.043518665	0	2.202490718
1985	World	EFConsPerCap	0.520352574	0.20321959	0.36159326	0.092782504	0.043518665	1.359889942	2.581355803
1986	World	BiocapPerCap	0.513525583	0.303165568	1.088637644	0.217321536	0.043521494	0	2.166171826
1986	World	EFConsPerCap	0.513525583	0.198315627	0.364233488	0.095566829	0.043521494	1.362543128	2.577707109
1987	World	BiocapPerCap	0.510108617	0.298454098	1.06950711	0.213108014	0.043946171	0	2.135124009
1987	World	EFConsPerCap	0.510108617	0.195552251	0.366194043	0.098310408	0.043946171	1.388460292	2.602570828
1988	World	BiocapPerCap	0.485179045	0.29405374	1.052027104	0.208839012	0.042583436	0	2.082682337
1988	World	EFConsPerCap	0.485179045	0.193117652	0.364186236	0.100011858	0.042583436	1.426072719	2.611152825
1989	World	BiocapPerCap	0.497892026	0.289504667	1.034984634	0.20491207	0.044461206	0	2.071754604
1989	World	EFConsPerCap	0.497892026	0.191427376	0.362741312	0.097877195	0.044461206	1.435810004	2.63020842
1990	World	BiocapPerCap	0.508810213	0.282202748	1.022183497	0.200327718	0.046159677	0	2.059683853
1990	World	EFConsPerCap	0.508810213	0.190144947	0.359360323	0.093920925	0.046159677	1.428089073	2.6264847
1991	World	BiocapPerCap	0.48903138	0.276901049	1.004300951	0.197254778	0.044984696	0	2.012472854
1991	World	EFConsPerCap	0.48903138	0.191130293	0.337611223	0.091802082	0.044984696	1.420334514	2.574894407
1992	World	BiocapPerCap	0.486373913	0.278829841	1.001230303	0.198363572	0.045549337	0	2.010346966
1992	World	EFConsPerCap	0.486373913	0.189754753	0.327090802	0.09196038	0.045549337	1.410822888	2.551552073
1993	World	BiocapPerCap	0.476256747	0.272703382	0.985291121	0.194980094	0.045262699	0	1.974494043
1993	World	EFConsPerCap	0.476256747	0.18537804	0.317578251	0.091407779	0.045262699	1.394131948	2.510016505
1994	World	BiocapPerCap	0.48048926	0.270293257	0.970887125	0.192030754	0.046365023	0	1.960065419

1994	World	EFConsPerCap	0.48048926	0.185145171	0.313022418	0.094855683	0.046365023	1.388200097	2.508077448
1995	World	BiocapPerCap	0.466949565	0.266144588	0.956121193	0.189120147	0.045690458	0	1.924025951
1995	World	EFConsPerCap	0.466949565	0.181926845	0.314495673	0.097606239	0.045690458	1.409478564	2.516146125
1996	World	BiocapPerCap	0.483882204	0.262705919	0.940946182	0.186276484	0.047999578	0	1.921810367
1996	World	EFConsPerCap	0.483882204	0.177820253	0.307003309	0.09816648	0.047999578	1.421824239	2.536695253
1997	World	BiocapPerCap	0.485944301	0.260281389	0.925625405	0.183712613	0.048708121	0	1.904271828
1997	World	EFConsPerCap	0.485944301	0.173497136	0.310207659	0.09743464	0.048708121	1.426147501	2.541940963
1998	World	BiocapPerCap	0.484858155	0.258019071	0.911811678	0.181414125	0.049236729	0	1.885339759
1998	World	EFConsPerCap	0.484858155	0.172184723	0.303358327	0.096409033	0.049236729	1.408047371	2.514092773
1999	World	BiocapPerCap	0.486117032	0.254866728	0.896155912	0.179213642	0.049882645	0	1.866235959
1999	World	EFConsPerCap	0.486117032	0.170153088	0.304913061	0.095647336	0.049882645	1.383368048	2.490081592
2000	World	BiocapPerCap	0.48176756	0.252278042	0.881961355	0.177294935	0.050161075	0	1.843462968
2000	World	EFConsPerCap	0.48176756	0.168397659	0.310831863	0.093645675	0.050161075	1.409429862	2.514232166
2001	World	BiocapPerCap	0.486099317	0.249344863	0.869238062	0.17512845	0.051262906	0	1.831073597
2001	World	EFConsPerCap	0.486099317	0.165689149	0.297832791	0.093273825	0.051262906	1.415844521	2.510003828
2002	World	BiocapPerCap	0.480098695	0.245823498	0.861221647	0.173034611	0.051334269	0	1.81151272
2002	World	EFConsPerCap	0.480098695	0.163961797	0.301188716	0.092390354	0.051334269	1.422933727	2.51190644
2003	World	BiocapPerCap	0.477910866	0.240245652	0.847324091	0.170174927	0.051479108	0	1.787134644
2003	World	EFConsPerCap	0.477910866	0.161732806	0.302044564	0.093637694	0.051479108	1.486569162	2.57337231
2004	World	BiocapPerCap	0.49700592	0.233677171	0.831218681	0.167167595	0.053951631	0	1.783020998
2004	World	EFConsPerCap	0.49700592	0.159278831	0.303118058	0.095643508	0.053951631	1.551882944	2.660881085

2005	World	BiocapPerCap	0.490715294	0.2303699	0.818670516	0.164585529	0.053749458	0	1.758090697
2005	World	EFConsPerCap	0.490715294	0.156695368	0.304198399	0.093956907	0.053749458	1.599522658	2.69883925
2006	World	BiocapPerCap	0.490689741	0.227156003	0.808483216	0.162166816	0.054512009	0	1.743007784
2006	World	EFConsPerCap	0.490689741	0.155558165	0.295933217	0.093870059	0.054512009	1.647260276	2.737824246
2007	World	BiocapPerCap	0.490959739	0.223452611	0.797076038	0.159841877	0.055146615	0	1.726476879
2007	World	EFConsPerCap	0.490959739	0.153392576	0.295799014	0.091311561	0.055146615	1.694550918	2.781161794
2008	World	BiocapPerCap	0.504333544	0.220476243	0.784348831	0.159346081	0.057269256	0	1.725773956
2008	World	EFConsPerCap	0.504333544	0.150388627	0.278952533	0.088977154	0.057269256	1.694941878	2.774863571
2009	World	BiocapPerCap	0.49470175	0.217405038	0.772248041	0.157375502	0.056748133	0	1.698478465
2009	World	EFConsPerCap	0.49470175	0.150025003	0.264187039	0.086854116	0.056748133	1.640413283	2.692930435
2010	World	BiocapPerCap	0.502378397	0.214124894	0.761528886	0.155067277	0.05820364	0	1.691303094
2010	World	EFConsPerCap	0.502378397	0.144950416	0.278965637	0.08603782	0.05820364	1.741358705	2.811893274
2011	World	BiocapPerCap	0.509199233	0.209119778	0.748691315	0.152305182	0.059161812	0	1.67847732
2011	World	EFConsPerCap	0.509199233	0.143187364	0.282884166	0.085671866	0.059161812	1.756664571	2.836767291
2012	World	BiocapPerCap	0.496117441	0.205159894	0.733917369	0.149911685	0.057960004	0	1.643066393
2012	World	EFConsPerCap	0.496117441	0.14252827	0.278129563	0.085978384	0.057960004	1.717728212	2.778442613
2013	World	BiocapPerCap	0.514033757	0.202210722	0.723777017	0.148235224	0.060664801	0	1.648921521
2013	World	EFConsPerCap	0.514033757	0.140213184	0.278964419	0.088350549	0.060664801	1.726760468	2.808986436
2014	World	BiocapPerCap	0.513313265	0.200194522	0.713711938	0.14675696	0.061243126	0	1.63521981
2014	World	EFConsPerCap	0.513313265	0.139219508	0.278060179	0.091255723	0.061243126	1.690369145	2.773460585
2015	World	BiocapPerCap	0.512952327	0.196730036	0.702764148	0.145251358	0.061752002	0	1.619449871

2015	World	EFConsPerCap	0.512952327	0.137326977	0.273152466	0.089391698	0.061752002	1.651705082	2.726281604
2016	World	BiocapPerCap	0.513835812	0.194703169	0.692877402	0.143563481	0.062362666	0	1.607342529
2016	World	EFConsPerCap	0.513835812	0.135891014	0.277313694	0.088008884	0.062362666	1.61251572	2.689927105
2017	World	BiocapPerCap	0.523322759	0.194694038	0.682389681	0.142323582	0.063749605	0	1.606479666
2017	World	EFConsPerCap	0.523322759	0.134966539	0.275995178	0.089443293	0.063749605	1.672306317	2.759784038
2018	World	BiocapPerCap	0.513459898	0.192010759	0.67298738	0.140915777	0.063249947	0	1.582623761
2018	World	EFConsPerCap	0.513459898	0.134641397	0.284509151	0.089533721	0.063249947	1.689557142	2.77495091

## Apéndice E: Código fuente

A continuación se muestran las herramientas utilizadas

- *Lenguaje de programación Python, versión 3.11.2, publicada el 08/02/2023*
- *Librería Matplotlib: versión 3.7.0, publicada el 13/02/2023.*
- *Librería NumPy: versión 1.24.2, publicada el 05/02/2023.*
- *Librería Sympy: versión 1.11.1, publicada el 31/02/2022.*
- *Editor de código Visual Studio Code, versión 1.79, publicada en mayo de 2023.*

### **a) Fichero Demand Dynamics, cargado con los valores de las ecuaciones de la función de biocapacidad y la función de dinámica de demanda de recursos por parte de la población de Perú**

```
from matplotlib import pyplot
import numpy as np
import sympy as sp
x = sp.Symbol('x')

# biocapacity
a1 = -0.0426
b1 = 89.549
# demand Dynamics
a2 = 0.0339
b2 = -65.799
# limit
limit_a = 1965
limit_b = 2102.09

bc = a1*x + b1
dd = a2*x + b2
def f1(x):
    return a1*x + b1
def f2(x):
    return a2*x + b2
lim = np.arange(limit_a, limit_b, 1)
```

```

pyplot.plot(lim, [f1(i) for i in lim], color='green', label='Biocapacity (BC)')
pyplot.plot(lim, [f2(i) for i in lim], color='red', label='Demand Dynamics (DD)')
pyplot.plot(lim, [f1(i)/f2(i) for i in lim], color='blue', label='Path = BC/DD')

#intersection biocapacity and demand dynamics
new_1 = bc-dd
x_bc_dd=sp.solve(new_1, x)
print('valor del fpoint')
print(x_bc_dd[0])
y_bc_dd=bc.evalf(subs={x:x_bc_dd[0]})
#intersection biocapacity and path
new_2 = bc-(bc/dd)
x_bc_bcdd=sp.solve(new_2, x)
y_bc_bcdd=bc.evalf(subs={x:x_bc_bcdd[0]})
#intersection biocapacity and axis
#new_2 = bc-(bc/dd)
x_bc_axis=sp.solve(new_2, x)
y_bc_axis=bc.evalf(subs={x:x_bc_bcdd[1]})
#print(x_bc_bcdd[0])
#print(y_bc_bcdd)
#intersection demand dynamics and path
new_3 = dd-(bc/dd)
x_dd_bcdd=sp.solve(new_3, x)
y_dd_bcdd=dd.evalf(subs={x:x_dd_bcdd[1]})
print(x_dd_bcdd[1])
print(y_dd_bcdd)

#intersection biocapacity and path
pyplot.plot(x_bc_bcdd[0],y_bc_bcdd,marker ="o", color='green', label='Continuity
point')
pyplot.annotate(str(round(x_bc_bcdd[0],2)), xy=(x_bc_bcdd[0],y_bc_bcdd),
xytext=(x_bc_bcdd[0]+10,y_bc_bcdd))
#intersection path and demand dinamics
pyplot.plot(x_dd_bcdd[1],y_dd_bcdd,marker ="o", color='orange', label='Stress
point')
pyplot.annotate(str(round(x_dd_bcdd[1],2)), xy=(x_dd_bcdd[1],y_dd_bcdd),
xytext=(x_dd_bcdd[1]+10,y_dd_bcdd))
#intersection biocapacity and demand dinamics
pyplot.plot(x_bc_dd,y_bc_dd,marker ="o", color='red', label='Fatigue point')

```

```

pyplot.annotate(str(round(x_bc_dd[0],2)), xy=(x_bc_dd[0],y_bc_dd),
xytext=(x_bc_dd[0]+10,y_bc_dd))
#intersection biocapacity and axis
pyplot.plot(x_bc_bcdd[1],y_bc_axis,marker = "o", color='black', label='Collapse
point')
pyplot.annotate(str(round(x_bc_bcdd[1],2)), xy=(x_bc_bcdd[1],y_bc_axis),
xytext=(x_bc_bcdd[1]+10,y_bc_axis))

```

```

def rel_points():
    cp = x_bc_bcdd[0]
    sp = x_dd_bcdd[1]
    fp = x_bc_dd[0]
    ep = x_bc_bcdd[1]
    points = [cp, sp, fp, ep]
    return points

```

```

pyplot.xlim(1900, 2300)
pyplot.ylim(-1, 12)
pyplot.title("Relationship between Biocapacity and Demand Dynamics for Peru")
pyplot.legend()

```

```

pyplot.xlabel('year')
pyplot.ylabel('hga/person')
pyplot.grid(axis = 'y', color = 'gray', linestyle = 'dotted', linewidth=0.5)
pyplot.grid(axis = 'x', color = 'gray', linestyle = 'dotted', linewidth=0.5)
pyplot.axhline(0, color="black")
pyplot.axvline(0, color="black")
pyplot.savefig('EF_BC_PERU.png')

```

```

pyplot.show()

```

**b) Fichero Remaining Path, cargado con las variables que determinan el tiempo límite de extinción de la biocapacidad en Perú**

```

import numpy as np
import sympy as sp
import matplotlib.pyplot as plt
import def_integrate as defi
import EF_BC_PERU as peru
x=np.array([])
y=np.array([])

```

```

# biocapacity
a1 = -0.0426
b1 = 89.549
# demand Dynamics
a2 = 0.0339
b2 = -65.799
# limit
limit_a = 1965
limit_b = 2102.09

a1 = -0.0426
b1 = 89.549
a2 = 0.0475
b2 = -93.155
limit_a = 1982.21
limit_b = 2102.09

period = int((limit_b-limit_a)/20)+1
for i in range(period):
    x = np.append(x, [limit_a])
    ny = defi.search_Years(a1,b1,a2,b2,limit_a, limit_b) - limit_a
    y = np.append(y, [ny])
    limit_a=limit_a+20

x=np.float64(x)
y=np.float64(y)
#sample data
#x=np.array([2088.07, 2054.16, 2018, 1968.87, 1910.55, 1824.48])
#y=np.array([0.441, 6.13, 21, 58.93, 132.87, 289.02])

pol2=np.polyfit(x,y,deg=2)
a=pol2[0]
b=pol2[1]
c=pol2[2]
# r_path = a*x**2 + b*x + c
# fatigue=r_path.evalf(subs={x:1960})
# plt.plot(1960,fatigue,marker="o", color='green', label='Sustainability point')

```

```

d=pow(b,2)-4*a*c
ec = pow(a,2)+ b*x + c
print("equation: ", round(a, 4),"x2 ", round(b, 4), "x + ", round(c, 4))
print("the value of A is: ", a)
print("the value of B is: ", b)
print("the value of C is: ", c)
print("the value of Discriminant is: ", d)

```

```

if d > 0:
    print("doble intersección")
elif d == 0:
    print("una intersección")
else:
    print("no corta el eje")
vertice = -b/(2*a)
print("el eje está en: ", vertice)

```

```

y_cor2=np.polyval(pol2,x)
print("eje x")
print(x)
print("eje y")
print(y)
print("correction")
print(y_cor2)
print("roots")
print(np.roots(pol2))
finish=np.roots(pol2)
finish=int(finish[1])
print("valor R")
sse=sum((y-y_cor2)**2)
tse=(len(y)-1)*np.var(y)
r2=1-sse/tse
print(r2)

```

```

r = sp.Symbol('r')
ec = pow(r,2)*a + b*r + c
print("PUNTOS DE INTERSECCIÓN")
points = peru.rel_points()
print(points[0])

```

```

print(points[1])
print(points[2])
print(points[3])

cp_x = points[0]
cp_y = ec.evalf(subs={r:cp_x})

sp_x = points[1]
sp_y = ec.evalf(subs={r:sp_x})

fp_x = points[2]
fp_y = ec.evalf(subs={r:fp_x})

ep_x = points[3]
ep_y = ec.evalf(subs={r:ep_x})

# PRINT AXXIS POINT
# intersection biocapacity and path
plt.plot(cp_x,cp_y,marker="o", color='green', label='Continuity point')
plt.annotate(str(int(cp_x))+', '+str(int(cp_y))+', '=> '+str(int(cp_x+cp_y)),
xy=(cp_x,cp_y), xytext=(cp_x+10,cp_y))

plt.plot(sp_x,sp_y,marker="o", color='orange', label='Stress point')
plt.annotate(str(int(sp_x))+', '+str(int(sp_y))+', '=> '+str(int(sp_x+sp_y)),
xy=(sp_x,sp_y), xytext=(sp_x+10,sp_y))

plt.plot(fp_x,fp_y,marker="o", color='red', label='Fatigue point')
plt.annotate(str(int(fp_x))+', '+str(int(fp_y))+', '=> '+str(int(fp_x+fp_y)), xy=(fp_x,fp_y),
xytext=(fp_x+10,fp_y))

plt.plot(finish,0,marker="o", color='black', label='Collapse biocapacity')
plt.annotate(str(int(finish))+', '+str(0)+' => '+str(int(finish+0)), xy=(finish,0),
xytext=(finish,-15))

plt.plot(ep_x,ep_y,marker="o", color='purple', label='Recovery point')
plt.annotate(str(int(ep_x))+', '+str(int(ep_y))+', '=> '+str(int(ep_x+ep_y)),
xy=(ep_x,ep_y), xytext=(ep_x+10,10))

xs=np.linspace(x.min(),2200)

```

```

ys=np.polyval(pol2,xs)
#plt.plot(x,y,'o',x,y_cor2,'*',xs,ys,'--')
plt.plot(x, y_cor2, color='purple', label='Remaining Path')
print('valor de limites')
print(x)
print(y_cor2)
plt.title("Remaining Path to Limit of Biocapacity for Peru")
plt.legend()
plt.xlim(1950, 2210)
plt.ylim(-50, 200)
plt.xlabel('year')
plt.ylabel('Remaining years')
plt.grid(axis = 'y', color = 'gray', linestyle = 'dotted', linewidth=0.5)
plt.grid(axis = 'x', color = 'gray', linestyle = 'dotted', linewidth=0.5)
plt.axhline(0, color="black")
plt.axvline(0, color="black")
plt.savefig('R_PATH_PERU.png')

plt.show()

```