



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Escuela de Posgrado

Huella ecológica y su relación con PBI per cápita en los departamentos de Perú

Tesis

Para optar el Grado Académico de Doctora en Ciencias Ambientales

Autora

Angelica Roman Bustinza

Asesora

Dra. Lita Roman Bustinza

Huacho - Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

Doctorado en Ciencias Ambientales

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Angelica Roman Bustinza	42957018	16/04/26
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Lita Roman Bustinza	23860603	https://orcid.org/0000-0003-4271-4493
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS –POSGRADO-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Fredesvindo Fernandez Herrera	40588728	https://orcid.org/0000-0003-2973-7973
Angel Pedro Campos Julca	15733670	https://orcid.org/0000-0002-1418-6104
Pedro Jaimes Vasquez Medina	16562688	https://orcid.org/0000-0001-6241-5525
Roberto Hugo Tirado Malaver	44565193	https://orcid.org/0000-0002-4615-5310

ANGELICA ROMAN BUSTINZA 2026-009032

HUELLA ECOLÓGICA Y SU RELACIÓN CON PBI PER CÁPITA EN LOS DEPARTAMENTOS DE PERÚ

 DGI-POSGRADO 2026

 Dirección de Gestión de la Investigación-VRI 2026

 DIRECCION DE GESTION DE LA INVESTIGACION

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::1:3477059274

Fecha de entrega

9 feb 2026, 10:10 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 feb 2026, 10:30 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis_HE.pdf

Tamaño del archivo

1.3 MB

167 páginas

33.930 palabras

200.345 caracteres



Página 2 de 181 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:old::1:3477059274

20% Similitud general

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

Exclusiones

- ▶ N.º de fuente excluida
- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 10%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

Dedicatoria

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por concederme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este importante reto académico y personal.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y comprensión a lo largo de este proceso doctoral. Su confianza y aliento permanente fueron pilares fundamentales para seguir adelante aun en los momentos de mayor exigencia.

De manera especial, dedico este trabajo a quienes creen en la educación, la ciencia y el compromiso con el cuidado del medio ambiente, como caminos esenciales para el desarrollo sostenible del país y el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

Agradecimiento

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi asesora, Dra. Lita Roman Bustinza, por su valiosa orientación académica, rigor científico, paciencia y permanente disposición para guiar el desarrollo de esta investigación. Sus aportes y recomendaciones fueron determinantes para la consolidación del presente trabajo doctoral.

A las autoridades y docentes del programa de Doctorado en Ciencias Ambientales, por los conocimientos compartidos, el acompañamiento académico y la formación integral brindada a lo largo de mis estudios de posgrado.

Asimismo, agradezco a las instituciones públicas y fuentes oficiales de información que facilitaron el acceso a los datos necesarios para el análisis de la huella ecológica y el producto bruto interno per cápita en los departamentos del Perú, insumos fundamentales para el logro de los objetivos de esta investigación.

Índice

Dedicatoria.....	5
Agradecimiento.....	6
Resumen.....	15
Abstract.....	16
Introducción.....	17
Capítulo I. Planteamiento del Problema	20
1.1. Descripción de la Realidad Problemática	20
1.2. Formulación del Problema.....	22
1.2.1. Problema General.....	22
1.2.2. Problemas Específicos	22
1.3. Objetivos de la Investigación.....	22
1.3.1. Objetivo General.....	22
1.3.2. Objetivos Específicos.....	23
1.4. Justificación de la investigación	23
1.5. Delimitaciones del estudio.....	25
Capítulo II. Marco Teórico	28
2.1. Antecedentes de la investigación	28
2.1.1. Investigaciones internacionales	28

2.1.2. Investigaciones nacionales.....	33
2.2. Bases teóricas.....	38
2.2.1. Huella ecológica.....	38
2.2.2. PBI	40
2.2.3. Relación entre PBI y huella ecológica	41
2.2.4. Bases empíricas: el caso peruano.....	42
2.3. Bases filosóficas.....	42
2.3.1. Ética del desarrollo sostenible	43
2.3.2. Ontología del desarrollo y sostenibilidad	44
2.3.3. Epistemología de los indicadores económicos y ambientales	45
2.3.4. Filosofía del bienestar humano y calidad de vida	46
2.4. Definición de términos básicos.....	47
2.5. Hipótesis de investigación	51
2.5.1. Hipótesis general.....	51
2.5.2. Hipótesis Específicas	51
2.6. Operacionalización de variables	52
Capítulo III. Metodología	54
3.1. Diseño metodológico	54
3.2. Población y muestra.....	54

3.3. Técnicas de recolección de datos.....	55
3.3.1. Fuentes de datos.....	55
3.3.2. Procedimientos de recolección de datos	55
3.4. Técnicas para el procesamiento de la información.....	56
3.4.1. Análisis descriptivo.....	56
3.4.2. Análisis de correlación.....	57
3.4.3. Análisis de regresión.....	57
3.4.4. Análisis de clúster	58
3.4.5. Software utilizado	58
3.4.6. Consideraciones éticas	59
Capítulo IV. Resultados	60
4.1. Huella Ecológica y PBI de Perú.....	60
4.1.1. Componentes de Huella Ecológica de Perú	62
4.1.2. Relación entre PBI y los componentes de la Huella Ecológica de Perú	68
4.1.3. Prueba de normalidad	71
4.1.4. Clustering.....	73
4.1.5. Clústeres 1, 2 y 3.....	78
4.1.6. Correlación HE y PBI por clústeres.....	81
4.1.7. Regresión por clústeres con modelos lineales	85

4.1.8. Correlación de dimensiones de HE y PBI por clústeres	89
4.2. Huella Ecológica y PBI per cápita por departamento	94
4.2.1. Componentes de Huella Ecológica departamental	97
4.2.2. PBI per cápita por departamentos	109
4.2.3. Relación PBI con la Huella Ecológica (HE).....	115
4.2.4. Correlación entre PBI y los componentes de la Huella Ecológica de Perú	116
4.2.5. Correlación entre Huella Ecológica y Componentes del PBI	120
4.2.6. Componentes de la HE y Componentes del PBI	123
4.3. Clustering de Huella Ecológica y PBI por departamentos.....	128
4.3.1. Numero óptimo de clusters	128
4.3.2. Análisis de clusters de Huella Ecológica y PBI.....	130
4.3.3. Análisis Detallado del Clúster 3 (Moquegua: 2009–2016).....	132
4.3.4. Prueba de Normalidad departamental.....	137
4.3.5. Correlaciones de Clusters departamental.....	138
4.3.6. Modelos de regresión por clúster.....	142
4.3.7. Correlaciones de Componentes de Huella Ecológica y PBI per cápita	144
4.3.8. Correlaciones de Huella Ecológica y componentes de PBI per cápita	148
4.4. Contratación de Hipótesis	152
4.4.1. Contratación de Hipótesis específica (H1).....	152

4.4.2. Contrastación de Hipótesis específica (H2).....	152
4.4.3. Contrastación de Hipótesis específica (H3).....	153
4.4.4. Contrastación de Hipótesis específica (H4).....	153
4.4.5. Contrastación de Hipótesis específica (H5).....	153
4.4.6. Contrastación de Hipótesis específica (H6).....	154
4.4.7. Contrastación de Hipótesis general (H)	155
Capítulo V. Discusión.....	157
5.1. Discusión de resultados.....	157
5.1.1. Huella Ecológica vs. PBI per cápita (Clústeres 1–3).....	157
5.1.2. Huella ecológica vs. Componentes del PBI por clusters	158
Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones.....	160
5.1. Conclusiones.....	160
5.2. Recomendaciones	161
Referencias.....	163

Índice de tablas

Tabla 1 Comparación general entre componentes de Huella Ecológica de Perú	66
Tabla 2 Correlación de Pearson Huella ecológica y PBI por clústeres.....	81
Tabla 3 Relación entre Huella Ecológica y PBI per cápita por clústeres	82
Tabla 4 Regresión por clústeres con modelos lineales ($y = a + bx$)	85
Tabla 5 Comparación entre clústeres	87
Tabla 6 Síntesis comparativa del PBI con cada componente	93
Tabla 7 Huella ecológica departamental por año.....	98
Tabla 8 Huella Ecológica por departamentos de Perú	103
Tabla 9 PBI per cápita por departamentos de Perú.....	109
Tabla 10 departamentos con mayor PBI y mayor HE	115
Tabla 11. Departamentos con menor PBI y menor HE	116
Tabla 12 Coeficientes de Correlación de Pearson de componentes de Huella ecológica con PBI per cápita.....	117
Tabla 13 Correlación entre Huella Ecológica y Componentes del PBI.....	120
Tabla 14 Correlaciones Positivas Más Fuertes	121
Tabla 15 Correlaciones Positivas Moderadas y Débiles.....	122
Tabla 16 Correlaciones Negativas o No Significativas	123
Tabla 17 Componentes de la HE y Componentes del PBI	123
Tabla 18 PBI per cápita y el componente principal de la Huella Ecológica de Moquegua.....	134
Tabla 19 Contraste entre Clúster 3 (Moquegua) y Clúster 1 (Ej. Huancavelica/Apurímac)	135
Tabla 20 Tabla Regresiones de cluster ($y = a + bx$)	143

Índice de Figuras

Figura 1 Relación entre Huella Ecológica y PBI per cápita de Perú	60
Figura 2 Componentes de la Huella Ecológica del Perú.....	64
Figura 3 Correlaciones entre Huella Ecológica y PBI per cápita de Perú	68
Figura 4. Histograma con curva normal de residuos	71
Figura 5 Gráfico Q-Q de residuos.....	72
Figura 6 Número óptimo de clúster Método Elbow	74
Figura 7 Numero óptimo de cluster de Silhouette	75
Figura 8 Dendrograma de dimensiones: Huella ecológica y PBI	77
Figura 9 Gráfico de clustering jerárquico (HE vs. PBI per cápita, Perú 1961–2021)	78
Figura 10 Regresiones de HE y PBI por clusters.....	88
Figura 11 Correlación de dimensiones de HE y PBI por clústeres.....	90
Figura 12 Diagrama de relación de Huella ecológica y PBI.....	95
Figura 13 Diagrama de caja de Huella Ecológica por año.....	99
Figura 14 Huella Ecológica por componentes	101
Figura 15 Diagrama de caja de Huella Ecológica por departamento.....	106
Figura 16 Diagrama de caja del PBI per cápita (2009–2016).....	112
Figura 17 Coeficientes de correlación de Pearson entre el PBI per cápita y componentes de la Huella Ecológica.....	117
Figura 18 Numero óptimo de clusters, método Elbow	128
Figura 19 Dendrograma	129
Figura 20 Hierarchical clustering.....	129

Figura 21 Histograma con Ajuste Normal departamental	137
Figura 22 Gráfico Q-Q Normal departamental	137
Figura 23 Correlaciones de Variables Huella Ecológica y PBI_pc por cluster	139
Figura 24 Regresiones de Variables por Clusters	142
Figura 25 Correlaciones de Componentes de Huella Ecológica y PBI per cápita	144

Resumen

Esta tesis examina la relación entre las dimensiones de la huella ecológica y el PBI per cápita en los 24 departamentos del Perú durante el período 2009-2016. El objetivo principal consiste en determinar cómo el crecimiento económico per cápita influye en la presión ambiental medida por componentes como área de cultivo, pastoreo, bosques, huella de carbono y áreas urbanas.

Metodología. La investigación adopta un enfoque cuantitativo no experimental, correlacional-explicativo y longitudinal, analizando datos oficiales del Ministerio del Ambiente y el INEI. Se procesaron 192 observaciones (24 departamentos $\times$ 8 años) mediante análisis multivariante exploratorio, incluyendo técnicas de clustering para identificar patrones territoriales similares en variables ambientales y económicas. **Resultados.** Los hallazgos revelan una correlación positiva moderada y significativa entre la huella ecológica total y el PBI per cápita ($r = +0.44$, $p < .001$), confirmando que mayores niveles económicos se asocian con mayor impacto ambiental.

Específicamente, las correlaciones por dimensión son: área de cultivo ($r=0.35$), pastoreo ($r=0.56$), bosques ($r=0.48$), huella de carbono ($r=0.53$) y áreas urbanas ($r=0.44$), todas con $p < 0.001$. **Conclusiones.** Un incremento en el PBI per cápita eleva los cinco componentes de la huella ecológica, con la huella de carbono y el área de bosques como principales debido a su alto valor promedio y disparidad regional. Las políticas de sostenibilidad deben priorizar la mitigación de emisiones de carbono y la gestión forestal sostenible para equilibrar desarrollo económico y preservación ambiental en contextos departamentales peruanos.

Palabras clave: Huella ecológica, PBI per cápita, departamentos Perú, correlación ambiental, sostenibilidad regional.

Abstract

This thesis examines the relationship between the dimensions of the ecological footprint and GDP per capita in the 24 departments of Peru during the period 2009-2016. The main objective is to determine how economic growth per capita influences environmental pressure as measured by components such as cropland, grazing, forests, carbon footprint, and urban areas.

Methodology. The research adopts a non-experimental, correlational-explanatory and longitudinal quantitative approach, analyzing official data from the Ministry of the Environment and the INEI. A total of 192 observations (24 departments $\times$ 8 years) were processed through exploratory multivariate analysis, including clustering techniques to identify similar territorial patterns in environmental and economic variables. **Results.** The findings reveal a moderate and significant positive correlation between the total ecological footprint and GDP per capita ($r = +0.44$, $p < .001$), confirming that higher economic levels are associated with greater environmental impact. Specifically, the correlations by dimension are: crop area ($r=0.35$), grazing ($r=0.56$), forests ($r=0.48$), carbon footprint ($r=0.53$) and urban areas ($r=0.44$), all with $p < 0.001$. **Conclusions.** An increase in GDP per capita raises the five components of the ecological footprint, with the carbon footprint and forest area as the main ones due to their high average value and regional disparity. Sustainability policies must prioritize carbon emission mitigation and sustainable forest management to balance economic development and environmental preservation in Peruvian departmental contexts.

Keywords: Ecological footprint, GDP per capita, departments Peru, environmental correlation, regional sustainability.

Introducción

El crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental constituyen dos pilares esenciales para el desarrollo de los países en el siglo XXI. En las últimas décadas, el modelo de desarrollo global ha impulsado incrementos significativos en la producción, el consumo y la urbanización, lo que ha llevado a una presión creciente sobre los ecosistemas y los recursos naturales. Este fenómeno ha motivado la necesidad de medir con mayor precisión el impacto humano sobre el ambiente, así como de comprender las interrelaciones entre las dinámicas económicas y los límites biofísicos del planeta. Entre los diversos indicadores existentes, la huella ecológica se ha consolidado como uno de los más utilizados para evaluar la sostenibilidad ambiental, ya que incorpora una perspectiva integral de la demanda humana de recursos naturales en relación con la biocapacidad del entorno (Global Footprint Network, 2022).

La HE permite estimar el área de terreno y agua necesaria para producir los bienes y servicios consumidos por una población, así como para absorber los residuos generados, especialmente las emisiones de dióxido de carbono. De esta manera, la huella ecológica se convierte en una herramienta clave para los análisis territoriales y para la formulación de políticas públicas orientadas al uso eficiente de los recursos. Investigaciones recientes destacan su utilidad para diagnosticar patrones de consumo, presiones ambientales y desigualdades territoriales en materia de sostenibilidad (Alruweili, 2023; Magazzino, Mele & Schneider, 2024).

En paralelo, el Producto Bruto Interno per cápita continúa siendo el indicador económico más recurrente para observar el nivel de bienestar material, desarrollo y capacidad productiva de una sociedad. Diversos estudios señalan que, si bien el crecimiento económico contribuye a mejorar la calidad de vida, también puede estar vinculado a la intensificación de las presiones

ambientales cuando no existe una adecuada gestión sostenible de los recursos. Esta relación ha sido ampliamente estudiada a través de la Hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK), que plantea que la degradación ambiental aumenta en las primeras etapas del crecimiento económico, para luego disminuir una vez alcanzado cierto nivel de desarrollo debido a la incorporación de tecnologías limpias, regulaciones y cambios en los patrones de consumo (Gómez-Zaldívar & Martínez-Zarzoso, 2021). Sin embargo, estudios recientes cuestionan la universalidad de dicha hipótesis, mostrando que en muchos contextos la relación entre crecimiento económico y huella ecológica permanece positiva y significativa incluso en países de ingresos medios y altos (Shahbaz et al., 2022; Solarin et al., 2021).

En el caso del Perú, país caracterizado por una fuerte heterogeneidad económica, productiva y territorial, el análisis de la relación entre huella ecológica y PBI per cápita adquiere una especial relevancia. La estructura productiva de los departamentos presenta marcadas diferencias asociadas a actividades como agricultura, pesca, minería, manufactura, comercio y servicios, lo cual genera impactos ambientales diferenciados y dinámicas económicas heterogéneas (Jara Montesinos, 2023; Taneo & Ruiz-Rincón, 2022). Estos contrastes territoriales obligan a abordar la sostenibilidad desde una perspectiva subnacional que permita identificar patrones diferenciados de presión ecológica y desarrollo económico en las regiones. De hecho, diversos análisis indican que las zonas con mayor dinamismo económico tienden a mostrar huellas ecológicas más elevadas debido al incremento de la actividad productiva, la demanda energética, el transporte y el consumo urbano (Chávez-Cortés, 2021; Liu et al., 2021).

En este contexto, la presente investigación busca profundizar en la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú durante el período 2009–2016,

utilizando datos oficiales del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2018) y del Instituto Nacional de Estadística e Informática. El análisis se realiza mediante técnicas estadísticas como correlaciones, regresiones lineales y agrupamientos (clustering), permitiendo identificar patrones territoriales y asociaciones entre la intensidad de uso de recursos naturales y el nivel de desarrollo económico. Asimismo, se examinan los componentes específicos de la huella ecológica, como huella de carbono, tierras de pastoreo, áreas de cultivo, zonas de pesca o áreas urbanas, para identificar los sectores o actividades productivas que generan mayor presión ambiental a nivel departamental.

Finalmente, el análisis de la relación entre huella ecológica y PBI per cápita contribuye a la agenda de desarrollo sostenible del Perú, especialmente en el marco de los compromisos climáticos nacionales (NDC), la transición energética, la reducción de emisiones y la gestión sostenible del territorio. Al identificar clusters, patrones productivos y relaciones significativas entre variables económicas y ambientales, esta investigación aporta evidencia para el diseño de políticas públicas que favorezcan un crecimiento económico ambientalmente responsable, que incorpore criterios de innovación, eficiencia energética, ordenamiento territorial y protección de ecosistemas estratégicos.

De este modo, la investigación procura contribuir al debate sobre sostenibilidad territorial y políticas económicas en el Perú, brindando evidencia empírica desagregada que apoye decisiones de planificación regional, gestión ambiental y desarrollo sostenible. Asimismo, pretende aportar con un diagnóstico riguroso que permita visibilizar riesgos ecológicos ocultos detrás del crecimiento económico y ofrecer una base para diseñar estrategias de desarrollo más equilibradas bajo los principios de eficiencia, equidad y conservación del capital natural.

Capítulo I. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción de la Realidad Problemática

La conexión entre el desarrollo económico y su implicación en el medio ambiente ha constituido un tema de interés creciente a nivel internacional. En el caso peruano, la heterogeneidad en la geografía y la heterogeneidad socioeconómica en los 24 departamentos del Perú permite contar con un espacio ideal para materializar un análisis de la relación entre ambos elementos. La huella ecológica representa un indicador que estima la exigencia que ejerce la población humana sobre los recursos naturales del planeta, la cual se encuentra expresada en superficie biológicamente productiva. Huella ecológica es la cantidad de impacto medioambiental soportado por la huella de los seres humanos. El PBI per cápita es un indicador que estima el grado de desarrollo económico de una región y se expresa a través de la cuantía de bienes y servicios elaborados por persona en un lapso de tiempo específico.

La problemática radica en el crecimiento de una evidencia que va en el sentido de dar cuenta de una relación positiva entre el crecimiento económico e incremento de la huella ecológica. A medida que el crecimiento económico permite un desenvolvimiento de sectores productivos y el gasto que ello supone, esto lleva a un incremento de la exigencia de los recursos naturales del planeta, así como a una mayor emisión de gases de efecto invernadero, entre otros impactos negativos. Por otra parte, también puede afirmarse que la relación no es lineal ni homogénea, ya que su dinámica puede ser muy distinta para diferentes contextos y actividades productivas.

El término de huella ecológica es un concepto que tiene una relevancia particular en este sentido, a la hora de saber si el aprovechamiento de los recursos en un determinado departamento es superior o inferior al potencial biológico para regenerarlos. Tal consideración adquiere especial valor en el caso del Perú, dado que los recursos naturales se distribuyen en la geografía del país de una forma no homogénea y en algunos casos como el de la Amazonía esta característica es relevante para la regulación sistemática y mundial del clima en cuanto que en otras zonas se dan índices de estrés ecológico relativamente elevados. La falta de la gestión de los recursos naturales no solo incide en la pérdida de la biodiversidad, sino que pone en riesgo la seguridad alimentaria, la disponibilidad de los recursos hídricos de calidad o la resiliencia ante los efectos del cambio climático.

La problemática de la realidad consiste en la creciente evidencia que pone de manifiesto la correlación que existe entre el crecimiento económico y la huella ecológica que va en aumento. En el momento en que los países y las regiones aumentan el crecimiento económico tienden a incrementar el consumo de los recursos naturales y la producción de gases de efecto invernadero. Se podría argumentar que esta relación no es lineal ni homogeneizante como podemos observar en sus patrones diferenciadores en función del contexto y en torno a sectores productivos.

Por este motivo, el análisis exploratorio de la relación huella ecológica versus P.B.I per cápita departamental necesita de una identificar tendencias y patrones en la regulación entre el desarrollo económico y los efectos medioambientales en torno a diferentes capas de nuestro país, pero además a través del análisis del procesamiento de los sectores productores se relaciona no solamente en términos de la huella ecológica departamental.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es la relación entre el área de cultivos y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?
- ¿Cuál es la relación entre el área de pastoreo y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?
- ¿Cuál es la relación entre el área de bosques y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?
- ¿Cuál es la relación entre las zonas de pesca y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?
- ¿Cuál es la relación entre la huella de carbono y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?
- ¿Cuál es la relación entre las áreas urbanas y el PBI per cápita en los departamentos del Perú?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Determinar la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la relación entre el área de cultivos y el PBI per cápita en los departamentos del Perú
- Determinar la relación entre el área de pastoreo y el PBI per cápita en los departamentos del Perú
- Determinar la relación entre el área de bosques y el PBI per cápita en los departamentos del Perú
- Determinar la relación entre las zonas de pesca y el PBI per cápita en los departamentos del Perú
- Determinar la relación entre la huella de carbono y el PBI per cápita en los departamentos del Perú
- Determinar la relación entre las áreas urbanas y el PBI per cápita en los departamentos del Perú

1.4. Justificación de la investigación

El estudio de la relación entre la huella ecológica y el Producto Bruto Interno per cápita para los distintos departamentos del Perú tiene una gran valía y es necesario en el marco de los crecientes problemas de desarrollo sostenible que presenta la sociedad mundial contemporánea. Por un lado, el contexto de un país diverso y en vías de desarrollo como el Perú hace que sea conveniente saber cómo las diferentes capacidades económicas influyen sobre el medio ambiente, y por el otro, tal conocimiento cobra mayor relevancia en un contexto como el peruano caracterizado por su gran diversidad económica, social y ambiental, tal como nos define como un país con distintas realidades regionales. Aprovechando estos motivos, el objetivo de esta

investigación es contribuir a un cierto entendimiento de esas relaciones que se argumenta en una serie de propósitos que exponen la necesidad e importancia de dicho análisis.

Incongruencia entre crecimiento económico y sostenibilidad medioambiental. La necesidad de compatibilizar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente ha sido evidente de manera creciente en la última década donde la preocupación social ha ido en aumento, de modo tal que especialmente en los países en vías de desarrollo y también en el Perú son evidentes las hipótesis de una economía que prioriza el crecimiento económico en el corto plazo, lo cual ha ejercido sobre el medio ambiente una presión grande que afecta a los recursos naturales y ecosistemas.

Diversidad regional en el Perú. La diversidad geográfica y socioeconómica del Perú permite que estos efectos ambientales del crecimiento económico sean distintos en los departamentos; la realización del análisis a nivel de los departamentos permite identificar patrones y tendencias claras en el tratamiento de los mismos, lo que puede llegar a ser de gran utilidad para la elaboración de políticas públicas más eficaces en función de las realidades locales. El presente estudio se justifica por la necesidad de abordar:

La contribución al conocimiento científico. Por medio de este estudio se espera contribuir al conocimiento de la relación entre el desarrollo económico y la huella ecológica en un contexto que continúa enfrentando grandes circunstancias en relación con la diversidad biológica y cultural, como corresponde al caso del Perú. Los resultados así obtenidos podrán ser contrastados con el trabajo previo hecho en países que tengan unas condiciones medioambientales distintas, con el objetivo de buscar patrones de tipo global y regional.

Implicaciones para la agenda de desarrollo sostenible. La investigación que se plantea se enmarca dentro de la senda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, en concreto aquellos vinculados con la reducción de la pobreza, la protección de la riqueza medioambiental y la construcción de sociedades más justas y equitativas. La razón de ser de la investigación se basa en la necesidad de comprender las relaciones entre el desarrollo económico y la huella ecológica a nivel regional en el Perú.

1.5. Delimitaciones del estudio

La presente investigación se encontró delimitada en el sentido de su aproximación, espacio, tiempo y variables. Las delimitaciones fueron establecidas para asegurar un análisis que sea claro y manejable al propósito de estudiar con claridad la relación que existe entre la huella ecológica y el Producto Bruto Interno per cápita en los departamentos del Perú. Las delimitaciones se establecieron para asegurar la transparencia metodológica del estudio y a su vez asegurar que sus resultados estuvieran alcanzables dentro de los recursos que se disponían.

Delimitación temática

Este estudio se centró en la relación entre las dos variables de interés, es decir, la huella ecológica como indicador de sostenibilidad ambiental y el PBI per cápita como indicador de la sostenibilidad de la producción económica en el Perú. Estas dos variables se analizaron con el objetivo de mirar la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita a través de establecer, correlaciones, tendencias y patrones que expliquen cómo la producción económica afecta la sostenibilidad ambiental de los departamentos del Perú. El estudio excluye otros indicadores económicos o ambientales con el objetivo de evitar la dispersión del análisis, aunque los reconocemos como posibles líneas de investigación futura.

Delimitación espacial

El ensayo se circunscribió a los 24 departamentos del Perú. A su vez este enfoque departamental permitió observar las propias disparidades regionales que puedan existir en la relación entre las variables de estudio. La provincia o el distrito son espacios que no analizaremos por la falta de información desagregada o a las complejidades que esto conlleva.

Delimitación temporal

Se estableció un período que nos permitió observar tendencias a medio plazo y a largo plazo, donde la selección del período depende de la posibilidad de obtener información confiable y comparable para las variables de interés (huella ecológica y PBI per cápita).

Delimitación conceptual

El concepto de huella ecológica se entendió como el indicador que mide la cantidad de tierra y agua biológicamente productiva que son necesarias para permitir ya sea el estilo de vida actual de la humanidad o los actuales patrones de consumo.

Delimitación de alcance del estudio

El alcance del estudio se limitó únicamente a la identificación y al análisis de patrones y correlaciones; de hecho, que nuestro objetivo ni siquiera fue el de establecer relaciones causales absolutas, sino que nos concentramos en la interrelación entre el desarrollo económico y las distintas dimensiones en las que se puede construir el impacto ambiental; interrelaciones que pueden verse determinadas por los múltiples factores que la condicionan: políticas gubernamentales, cambios tecnológicos o dinámicas sociales. Los resultados están orientados a describir el contexto analizado y extraer conclusiones, se ofrecerán recomendaciones generales basadas en los resultados obtenidos.

Limitaciones del estudio

El estudio reconoce ciertas limitaciones que podrían poner en entredicho los resultados encontrados. En primer lugar, la disponibilidad y calidad de los datos, específicamente para la huella ecológica a nivel departamental, podría representar una limitación, es posible que se recurra a la estimación o la interpolación en caso de no encontrarse datos específicos. En segundo lugar, el análisis de carácter cuantitativo y la utilización de un período de tiempo relativamente reciente podría provocar que no se identifiquen tendencias de largo plazo.

Las delimitaciones propuestas ofrecen un marco de referencia amplio y manejable para el abordaje de la relación existente entre huella ecológica y PBI per cápita en el Perú.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Investigaciones internacionales

Quispe Mamani et al. (2023) tuvieron como objetivo examinar la relación entre el crecimiento económico y la degradación ambiental en el Perú durante el periodo 1990–2019, a partir de un modelo econométrico de regresión. El estudio se sustenta en los planteamientos de la bioeconomía de Georgescu-Roegen, quien sostiene que el crecimiento económico, desde una perspectiva ambiental, tiende a generar mayores presiones sobre los ecosistemas, más que soluciones a los problemas ambientales. Metodología. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental de alcance descriptivo y correlacional. Para el análisis empírico se utilizaron datos secundarios obtenidos de la base de datos del Banco Mundial, los cuales permitieron estimar un modelo de regresión orientado a evaluar la incidencia de variables asociadas a la degradación ambiental sobre el crecimiento económico en el contexto peruano. Los resultados evidenciaron que el consumo de energía constituye la variable con mayor capacidad explicativa del crecimiento económico, seguido por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). En conjunto, los indicadores de degradación ambiental explican el 24 % de la variación del crecimiento económico. Asimismo, el modelo estimado no presentó problemas de heterocedasticidad ni autocorrelación, y las variables analizadas mostraron niveles de significancia estadística inferiores al 5 %. De acuerdo con las estimaciones, un incremento en las emisiones de CO₂ se asocia con un aumento aproximado del 19 % en el PBI per cápita, mientras que un mayor consumo de energía se relaciona con un incremento cercano al 20 %. Finalmente, los autores concluyen que existe una relación directa y estadísticamente significativa entre el

crecimiento económico y la degradación ambiental en el Perú, lo que confirma la hipótesis planteada y refuerza la necesidad de analizar el crecimiento económico considerando sus impactos ambientales (p. 2, 14).

He et al. (2024) tuvieron como propósito analizar las variaciones espaciotemporales de la seguridad ecológica y examinar los factores que influyen en su dinámica, considerando que este análisis resulta fundamental para armonizar el desarrollo económico con la sostenibilidad ecológica a nivel regional. Metodología. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo mediante un flujo de trabajo sistemático. Se perfeccionó el modelo de huella ecológica, se diseñaron indicadores para la evaluación de la seguridad ecológica y se estableció una clasificación de sus niveles. A partir de ello, se evaluaron diversos índices, entre ellos el índice de presión ecológica, la intensidad de la huella ecológica, el índice de diversidad de la huella ecológica y el índice de coordinación ecológica-económica. El estudio se desarrolló en la provincia de Hubei y sus ciudades, abarcando el periodo comprendido entre los años 2000 y 2020. Los resultados evidenciaron que, durante el periodo de análisis, la huella ecológica per cápita presentó un incremento del 47,11%, mientras que la capacidad de carga ecológica per cápita aumentó en un 2,71%. Asimismo, el déficit ecológico per cápita se incrementó en un 51,72%. Para el año 2020, todas las ciudades de la provincia se encontraban en condición de déficit ecológico, observándose una distribución espacial caracterizada por niveles más elevados en la zona central y menores en las regiones oriental y occidental. Los autores concluyen que la aplicación del modelo mejorado de huella ecológica permitió identificar con mayor precisión los cambios espaciotemporales y estructurales de la huella ecológica y de la capacidad de carga

ecológica en la provincia de Hubei. Este enfoque facilitó una comprensión integral de la relación entre presión ambiental y desarrollo económico, aportando evidencia relevante para la planificación territorial sostenible (pp. 1–11).

Jiang et al. (2025) tuvieron como finalidad examinar la evolución espacio-temporal de la seguridad ecológica y la sostenibilidad, así como identificar los principales factores socioeconómicos que inciden en la huella ecológica de la aglomeración urbana de Guanzhong, en la provincia de Shaanxi. Metodología. El estudio empleó un enfoque cuantitativo y prospectivo, utilizando una huella ecológica tridimensional mejorada en combinación con el modelo STIRPAT no lineal extendido. A partir de este modelo, se realizaron proyecciones de crecimiento poblacional y urbanización bajo distintos escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP1–SSP5), lo que permitió evaluar los efectos de dichas variables sobre la dinámica de la huella ecológica y la capacidad de carga ambiental de la región analizada. Los resultados evidenciaron que, durante el periodo de estudio, la huella ecológica en la región de Guanzhong se incrementó aproximadamente 4,3 veces, mientras que la capacidad de carga ecológica mostró una tendencia decreciente, generando un marcado déficit ecológico. Aunque se identificaron avances limitados en el desarrollo coordinado entre economía y medio ambiente, los niveles generales de seguridad ecológica y sostenibilidad permanecieron en valores bajos. Los autores concluyen que la tasa de urbanización, el crecimiento poblacional y el producto interno bruto per cápita constituyen los principales determinantes del aumento de la huella ecológica en la aglomeración urbana de Guanzhong. No obstante, se observa que la urbanización y la estructura industrial desempeñan un rol relevante en la atenuación del déficit

de capital ecológico, lo que resalta la importancia de políticas de planificación urbana e industrial orientadas a la sostenibilidad ambiental (pp. 1,10).

Guevara Mamani et al. (2023) tuvieron como objetivo evaluar el nivel de contaminación por metales pesados, específicamente plomo y arsénico, en el suelo del botadero de residuos sólidos de Mollebamba, perteneciente a la Municipalidad de Acobamba, en la región Huancavelica, considerando el riesgo potencial para la salud pública asociado a la acumulación de dichos contaminantes. Metodología. La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo y observacional. El procesamiento de los datos se realizó mediante el software estadístico SPSS versión 24, con un nivel de confianza del 95 %. La recolección de muestras se efectuó mediante sondeo manual a una profundidad de 40 cm, registrándose parámetros ambientales como temperatura y humedad relativa con un equipo multiparámetro. Las muestras de suelo fueron analizadas en un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad, siguiendo los procedimientos establecidos para la determinación de concentraciones de metales pesados. Los resultados evidenciaron que las concentraciones de plomo en los seis puntos de muestreo oscilaron entre 2,50 y 4,90 mg/kg, valores que se ubicaron por debajo del Límite Máximo Permisible establecido en los Estándares de Calidad Ambiental para suelo. En contraste, las concentraciones de arsénico superaron el límite normativo en dos de los puntos evaluados, con excedentes del 20,80 % y 37,50 %, mientras que en los cuatro puntos restantes los niveles se mantuvieron dentro de los rangos permitidos. Se concluye que, si bien la presencia de plomo en el área de estudio no representa un riesgo ambiental significativo al encontrarse por debajo de los límites normativos, la detección de concentraciones elevadas de arsénico en determinados

sectores del botadero constituye una fuente potencial de impacto ambiental y sanitario. Estos hallazgos ponen de relieve la necesidad de una gestión adecuada de los residuos sólidos y del control de la contaminación del suelo como componentes relevantes para la sostenibilidad ambiental (p. 72).

Lyu et al. (2024) tuvieron como propósito desarrollar un análisis integral de las relaciones sinérgicas entre el uso del agua en la agricultura, las emisiones de carbono y el estado del ecosistema, con el fin de comprender la dinámica conjunta de la huella hídrica, la huella de carbono y la huella ecológica en la llanura del norte de China. Metodología. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, basado en la formulación de indicadores de la familia de huellas ambientales. Se aplicó el método de coeficientes de abajo hacia arriba propuesto por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para evaluar los cambios espaciales y temporales de las huellas hídrica, de carbono y ecológica en la región de estudio durante el periodo 2003–2020. Adicionalmente, se construyó un modelo de acoplamiento y coordinación con el objetivo de analizar el grado de interrelación y coherencia entre las tres huellas consideradas. Los resultados evidenciaron que la huella ecológica de la llanura del norte de China presentó una evolución con una tendencia de tipo “M” a lo largo del periodo analizado. Asimismo, la estructura del uso del suelo se mantuvo relativamente constante, registrándose variaciones poco significativas en la proporción de las distintas categorías de huella ecológica. Por otro lado, el grado de acoplamiento entre las huellas hídrica, de carbono y ecológica fue elevado, lo que refleja una interacción significativa entre estos componentes ambientales. Los autores concluyen que la magnitud de la huella ecológica en sus diferentes categorías no

experimentó cambios sustanciales y que la estructura del uso del suelo en la llanura del norte de China se mantuvo estable en el tiempo. Estos resultados ponen de manifiesto la estrecha interdependencia entre el uso de recursos hídricos, las emisiones de carbono y la presión ecológica, aportando evidencia relevante para el diseño de estrategias de gestión ambiental integradas (pp. 1–14).

2.1.2. Investigaciones nacionales

Jara Montesinos (2023) tuvo como propósito central analizar la existencia de relaciones de causalidad y estimar el efecto del crecimiento económico sobre la degradación ambiental en el Perú, considerando un enfoque regional y un periodo de análisis comprendido entre los años 2003 y 2016. Metodología. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, sustentado en el marco teórico de la Curva de Kuznets Ambiental, la cual plantea una relación funcional entre el crecimiento económico y la presión ambiental. Para el análisis empírico, se emplearon modelos econométricos de datos de panel, específicamente los modelos de corrección de errores vectoriales (VECM) y los modelos autorregresivos de rezagos distribuidos (ARDL), con el fin de identificar la direccionalidad causal y cuantificar el impacto del PBI per cápita sobre la huella ecológica per cápita a nivel regional. Los resultados evidenciaron la existencia de una relación causal unidireccional que se origina en el PBI per cápita y se dirige hacia la huella ecológica per cápita. En el modelo lineal de la Curva de Kuznets Ambiental, se estimó que un incremento de mil soles en el PBI per cápita genera un aumento de aproximadamente 0.15 hectáreas globales en la huella ecológica per cápita en el largo plazo. En el caso del modelo cuadrático, dicho incremento se asoció con un aumento cercano a 0.27 hectáreas globales, mientras que en el modelo cúbico el impacto ascendió a alrededor de 0.31 hectáreas globales en

el mismo horizonte temporal. Se concluye que el crecimiento económico, medido a través del PBI per cápita, ejerce un efecto directo y significativo sobre la huella ecológica per cápita en el Perú. En particular, bajo la especificación lineal de la Curva de Kuznets Ambiental, se confirma la presencia de una relación causal positiva de largo plazo, lo que sugiere que el aumento de la actividad económica regional ha contribuido al incremento de la presión ambiental durante el periodo analizado (pp. 9–75).

Sumalive Velásquez (2022) tuvo como objetivo analizar la relación existente entre la degradación ambiental y el producto bruto interno (PBI) en el Perú durante el periodo comprendido entre los años 2004 y 2019, con el propósito de verificar la presencia de una asociación estadísticamente significativa entre ambas variables. Metodología. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicando el método deductivo y un diseño de tipo correlacional. La técnica empleada fue el análisis documental, utilizando fichas técnicas como instrumentos para la recopilación y sistematización de la información secundaria. Posteriormente, los datos consolidados fueron sometidos a procedimientos de análisis estadístico y econométrico con el fin de evaluar la relación entre el crecimiento económico y los indicadores de degradación ambiental. Los resultados obtenidos evidenciaron que, durante el periodo de estudio, el crecimiento económico del país se asoció de manera negativa con diversos indicadores de degradación ambiental, tales como las emisiones de sustancias agotadoras de la capa de ozono, las emisiones de dióxido de carbono y dióxido de azufre, así como la reducción de la cobertura boscosa. En particular, la dinámica de la deforestación sugiere que, en el largo plazo, podría observarse un comportamiento consistente con la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental, aunque con

rezagos temporales significativos en la recuperación de los bosques. Se concluye que el crecimiento del PBI en el Perú ha ejercido una presión considerable sobre el medio ambiente durante el periodo 2004–2019, manifestándose en el deterioro de diversos componentes ambientales. Si bien algunos resultados sugieren una posible tendencia de recuperación ambiental a largo plazo, especialmente en el caso de la cobertura forestal, los autores resaltan la necesidad de fortalecer la aplicación de políticas y marcos normativos orientados a reducir la degradación ambiental y promover un desarrollo económico sostenible (pp. 14, 94).

Rumaja Albitez (2023) se propuso cuantificar la huella ecológica del Perú correspondiente al año 2017, considerando las 24 regiones del país, mediante la aplicación de métodos de regresión y análisis correlacional, con el fin de evidenciar las diferencias territoriales en los niveles de presión ambiental. Metodología. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño estratégico, no experimental, de corte transeccional y alcance correlacional. La información utilizada fue de tipo secundario y provino de fuentes oficiales, específicamente del Instituto Nacional de Estadística e Informática y del Sistema Nacional de Información Ambiental, lo que permitió estimar la huella ecológica y la población regional. El procesamiento y análisis de los datos se efectuaron empleando los programas SPSS versión 22 y Microsoft Excel, herramientas que facilitaron la generación de tablas, gráficos y la selección del modelo estadístico más adecuado para la estimación de la huella ecológica. Los resultados obtenidos permitieron estimar la huella ecológica de las 24 regiones del Perú para el año 2017, alcanzándose un promedio nacional de 2,09 hectáreas globales per cápita. Este valor fue contrastado con la estimación realizada por la Global Footprint Network, la cual reportó un valor

de 2,20 hectáreas globales per cápita, evidenciándose una elevada consistencia entre ambas mediciones. A nivel regional, Lima registró la mayor huella ecológica per cápita, seguida por Arequipa, mientras que Huancavelica y Cajamarca presentaron los valores más reducidos. Se concluye que la huella ecológica promedio del Perú en el año 2017 se situó en 2,09 hectáreas globales per cápita, estimada mediante el método de mínimos cuadrados. Asimismo, al compararse este valor con la biocapacidad nacional reportada por la Global Footprint Network, estimada en 3,64 hectáreas globales per cápita, se infiere que, en términos agregados, el país mantiene un patrón de consumo compatible con la sostenibilidad ambiental (pp. 12, 92)

Ezquerria Delgado (2023) tuvo como finalidad evaluar los impactos ambientales generados en el campus Capanique II de la Universidad Privada de Tacna, mediante la estimación de la huella ecológica, con el propósito de identificar el nivel de presión ambiental asociado a las actividades universitarias. Metodología. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicando la metodología propuesta por López y Blanco, adaptada al contexto universitario. El procedimiento metodológico comprendió el cálculo directo de la huella ecológica a partir de información institucional sobre consumo de recursos, así como estimaciones indirectas obtenidas mediante la aplicación de encuestas y la caracterización de residuos sólidos en aquellas categorías donde no se contaba con datos primarios. Este enfoque permitió una evaluación integral de las distintas fuentes de impacto ambiental. Los resultados evidenciaron que las emisiones totales de dióxido de carbono generadas por el campus ascendieron a 483,29 toneladas, distribuidas principalmente entre el espacio construido, el consumo de electricidad, la gestión de residuos sólidos, la movilidad, el uso de papel y el

consumo de agua. Para compensar dichas emisiones, se estimó la necesidad de 58,82 hectáreas de superficie biológicamente productiva, lo que equivale a una huella ecológica de 0,03 hectáreas globales por persona al año, valor inferior al promedio registrado en otras universidades peruanas. Se concluye que la huella ecológica del campus Capanique II supera el área física ocupada por la universidad, lo que evidencia una brecha entre la capacidad del espacio y la presión ambiental generada por sus actividades. Esta situación refleja la insostenibilidad del actual patrón de consumo institucional y resalta la necesidad de implementar estrategias de gestión ambiental orientadas a la reducción de la huella ecológica (pp. 13, 75).

Pinedo et al. (2023) tuvieron como finalidad analizar el nivel de huella ecológica generado por los estudiantes de una universidad pública situada en la ciudad de Huacho, Perú, con el propósito de dimensionar la presión ambiental asociada a sus comportamientos y estilos de vida. Metodología. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño descriptivo. La muestra estuvo integrada por 20 estudiantes de la Escuela Profesional de Educación Inicial. La técnica empleada para la recolección de datos fue la encuesta, utilizando un cuestionario cuya validez fue establecida mediante juicio de expertos, alcanzando un nivel de concordancia total. La confiabilidad del instrumento se evaluó a través del coeficiente Alfa de Cronbach, obteniéndose un valor de 0,616, considerado adecuado para investigaciones de carácter exploratorio. Los resultados mostraron que los estudiantes evaluados presentaron niveles elevados de huella ecológica. El puntaje máximo registrado fue de 435 puntos, equivalente a un rango estimado de entre 6,0 y 7,8 hectáreas, mientras que el puntaje mínimo alcanzó 195 puntos, correspondiente a una huella ecológica situada entre 4,0 y 6,0 hectáreas. Estos hallazgos

evidencian una presión ambiental significativa, atribuible a los patrones de consumo y hábitos cotidianos de los estudiantes. Se concluye que la huella ecológica generada por los estudiantes de Educación Inicial de la universidad pública de Huacho es considerablemente elevada, lo cual refleja la presencia de estilos de vida poco sostenibles. En este sentido, los autores destacan la necesidad de promover prácticas y comportamientos ambientalmente responsables como estrategia para reducir la presión ecológica tanto a nivel individual como colectivo (pp. 8, 14).

2.2. Bases teóricas

La base teórica del estudio se fundamenta en la integración de los conceptos de huella ecológica y Producto Bruto Interno (PBI) per cápita, contextualizados en el análisis de la sostenibilidad ambiental en los departamentos del Perú. A continuación, se presentan las principales teorías y enfoques que sustentan la investigación:

2.2.1. Huella ecológica

La huella ecológica es un indicador de sostenibilidad ambiental que mide la cantidad de recursos naturales necesarios para satisfacer las demandas humanas y compara este consumo con la capacidad biológica del planeta para regenerar dichos recursos (Global Footprint Network, 2023). Este concepto permite evaluar el impacto ambiental generado por una población o región y proporciona un marco para medir la sostenibilidad en términos cuantitativos.

El Ministerio del Ambiente (2022) define la huella ecológica como un indicador del impacto ambiental generado por la demanda humana que se hace de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, relacionándola con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar sus recursos. Tanto la Huella Ecológica (que representa la demanda de recursos) como la Biocapacidad (que representa la disponibilidad de recursos) se expresan en unidades

denominadas hectáreas globales (hag), siendo 1 hag la capacidad productiva de 1 hectárea de tierra de producción media mundial. Se calcula en función de los siguientes componentes:

Área para absorción del carbono.

Calculada como la cantidad de terreno forestal requerido para absorber las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles, cambios en los usos del suelo y procesos químicos, excepto la porción absorbida por los océanos. Estas emisiones son el único producto residual incluido en la Huella Ecológica.

Área de las tierras de pastoreo.

Calculada a partir del área que utiliza el ganado para carne, lácteos, piel y lana.

Área forestal.

Calculada a partir de la cantidad de madera, leña y pulpa que consume anualmente cada país.

Área de las zonas pesqueras.

Calculada a partir de la producción primaria estimada requerida para sostener las capturas de pescado y marisco, basada en los datos de captura de 1.439 especies marinas diferentes y más de 268 especies de agua dulce.

Área de los cultivos.

Calculada a partir del área utilizada para producir alimentos y fibra para consumo humano, alimento para el ganado, cultivos oleaginosos y caucho.

Área de la tierra urbanizada.

Calculada a partir del área de tierra ocupada por infraestructuras humanas, incluyendo el transporte, viviendas, estructuras industriales y presas para energía hidroeléctrica.

En el contexto de los departamentos peruanos, donde se observa una diversidad ecológica y social significativa, la huella ecológica es un instrumento clave para entender las dinámicas territoriales del consumo de recursos naturales. (Rumaja Albitez, 2023) indica que es necesario “mitigar el incremento de la huella ecológica, generación de residuos sólidos y calentamientos global en los departamentos del país”.

2.2.2. PBI

Producto Bruto Interno (PBI).

Es el indicador de resultados económicos más utilizado. El producto bruto interno a precios de mercado representa el resultado final de la actividad de producción de las unidades residentes. Puede definirse de tres maneras: El PBI es igual a la suma de los valores añadidos brutos de los distintos sectores institucionales o distintas industrias (ramas de actividad), aumentada en los impuestos, menos las subvenciones, sobre los productos. El PBI es igual a la suma de las utilidades finales interiores de bienes y servicios (consumo final efectivo, formación bruta de capital), más las exportaciones, menos las importaciones de bienes y servicios. El PBI es igual a la suma de los empleos de la cuenta de generación del ingreso de la economía (remuneración de los asalariados, otros impuestos, menos las otras subvenciones, sobre la producción, excedente bruto de explotación e ingreso mixto de la economía). (INEI, 2024)

PIB per cápita.

Es el promedio de Producto Bruto por cada persona. Se calcula dividiendo el PIB total por la cantidad de habitantes de la economía. (Ministerio de Economía y Finanzas, 2024). Según

Sumalive Velásquez (2022) indica que “hay un impacto negativo del crecimiento económico del país sobre la degradación ambiental, originada por sustancias agotadoras de la capa de ozono, emisiones de dióxido de carbono, disminución de bosques y emisiones de dióxido de azufre, en el período 2004-2019”. Sin embargo, este vínculo no es lineal, ya que factores como la transición hacia economías basadas en servicios y las políticas de sostenibilidad pueden moderar esta relación.

En el caso de Perú, estudios recientes han evidenciado que los factores que influyen en la contaminación del aire en Perú durante el periodo 1970-2020, son: la densidad poblacional, el parque automotor, la producción de los sectores agropecuario, construcción y energía que explican en 99.14% a la contaminación del aire. Además, el parque automotor, la producción de los sectores agropecuario, construcción y energía influyen de manera directa en la contaminación del aire, mientras que la densidad poblacional influye de manera indirecta. (Guevara Mamani et al., 2023, p. 82)

2.2.3. Relación entre PBI y huella ecológica

La literatura sugiere que la relación entre el desarrollo económico y el impacto ambiental sigue el modelo de la Curva de Kuznets Ambiental (EKA, por sus siglas en inglés). Esta teoría plantea que, en las etapas iniciales del desarrollo económico, el impacto ambiental tiende a aumentar; sin embargo, a medida que las economías se desarrollan, se generan recursos y tecnologías que permiten una mayor eficiencia en el uso de los recursos y una reducción en la huella ecológica. Según Fernández Vega (2024) “Perú se encuentra en la etapa inicial, mostrando una relación positiva entre la contaminación ambiental y el crecimiento económico de la Curva de Kuznets” (p. 113).

En el contexto peruano, la heterogeneidad territorial y la centralización del desarrollo económico generan variaciones significativas en la relación entre el PBI per cápita y la huella ecológica. Pongo Águila (2022) evidencian que “los efectos del cambio climático en el Perú están generando grandes daños, particularmente, en la actividad agrícola y en la actividad pesquera, las mismas que vienen sufriendo, asimismo, grandes pérdidas económicas para estos sectores” (p. 2).

2.2.4. Bases empíricas: el caso peruano

El Perú es un país caracterizado por su diversidad geográfica, económica y social, lo que resulta en una amplia variabilidad en los niveles de desarrollo económico y la huella ecológica entre sus departamentos. Según datos recientes, los departamentos con actividades económicas intensivas, como la minería, presentan huellas ecológicas más elevadas, mientras que aquellos con economías agrícolas o rurales tienden a tener impactos ambientales menores (INEI, 2024). Asimismo, la Fundación Vida Saludable (FVS) indican que “un consumo tan exacerbado de planetas solo puede ir ligado a un alejamiento de la aceptación del cambio climático, sus causas antropogénicas y sus consecuencias inmediatas” (FVS, 2022, p. 48).

Además, el crecimiento económico en el país no siempre ha estado acompañado por una mejora en los indicadores de sostenibilidad, lo que subraya la necesidad de políticas públicas que integren objetivos económicos y ambientales para garantizar un desarrollo sostenible a nivel regional (Ministerio del Ambiente, 2022)

2.3. Bases filosóficas

La relación entre la huella ecológica y el Producto Bruto Interno (PBI) per cápita involucra un análisis que trasciende los indicadores económicos y ambientales para abordar

principios filosóficos relacionados con el desarrollo sostenible, la justicia ambiental y el bienestar humano. Estas bases filosóficas se articulan en torno a enfoques éticos, ontológicos y epistemológicos que orientan el estudio de la interacción entre las actividades.

2.3.1. Ética del desarrollo sostenible

La ética del desarrollo sostenible encuentra uno de sus principales fundamentos en el informe *Nuestro futuro común* de la Comisión Brundtland, el cual plantea la necesidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las capacidades de las generaciones futuras. No obstante, enfoques críticos recientes advierten sobre las limitaciones de ciertos modelos de sostenibilidad asociados al crecimiento económico. En este sentido, Gudynas y Benalcázar (2024) señalan que prácticas como la mercantilización de bienes y servicios ambientales o la noción de minería sostenible responden a una concepción de sostenibilidad débil, caracterizada por su subordinación a la expansión económica. Dicho enfoque se sustenta en una intensa apropiación de los recursos naturales, cuyos impactos se asumen como mitigables mediante soluciones tecnológicas o mecanismos de gestión, tales como la responsabilidad social empresarial, sin cuestionar las causas estructurales del deterioro ambiental.

Desde la filosofía ambiental contemporánea, se propone una visión alternativa que cuestiona el predominio del antropocentrismo en los modelos de desarrollo. Al respecto, Auccatoma Tinco (2023) plantea una perspectiva filosófica de carácter humanista y biocéntrico, orientada a contrarrestar la dominación y explotación tanto de la naturaleza como del ser humano. Esta postura enfatiza que reflexionar sobre la degradación ambiental implica reconocer la interdependencia entre la humanidad y su entorno natural, advirtiendo que una concepción

exclusivamente economicista, centrada en la acumulación de capital, reduce a la naturaleza a una mercancía y profundiza las desigualdades socioambientales.

En el contexto de los departamentos del Perú, marcados por significativas brechas socioeconómicas y ambientales, resulta pertinente adoptar una aproximación filosófica basada en la justicia ambiental. Este enfoque, desarrollado por Ortiz Sánchez et al. (2022), propone analizar las problemáticas ambientales a partir de cuatro dimensiones interrelacionadas: distribución, participación, reconocimiento y capacidades. Dichas dimensiones permiten evaluar de manera integral los desafíos asociados a la resiliencia frente al cambio climático y evidencian la interdependencia entre los espacios urbanos y rurales, superando la dicotomía tradicional que resulta insuficiente para explicar la complejidad de los procesos ecológicos que sostienen la vida en los territorios.

Desde esta perspectiva, la filosofía de la justicia ambiental ofrece un marco interpretativo que permite comprender las desigualdades ambientales no solo como fallas técnicas o económicas, sino como dilemas éticos que demandan la formulación e implementación de políticas públicas orientadas a la equidad territorial, la redistribución de beneficios y cargas ambientales, y la promoción de un desarrollo verdaderamente sostenible.

2.3.2. Ontología del desarrollo y sostenibilidad

La ontología del desarrollo, concebida como el análisis del ser en su vínculo con el progreso humano y su interacción con el entorno natural, constituye un pilar filosófico fundamental para la comprensión de las dinámicas entre crecimiento económico y sostenibilidad ambiental. Desde esta perspectiva, resulta imprescindible cuestionar y reformular el concepto tradicional de desarrollo sostenible. Al respecto, Luzuriaga Vásconez y Bueno Sagbaicela (2024)

advierten que dicha noción encierra una tensión semántica y conceptual, al integrar términos de naturaleza contradictoria, lo que ha derivado en interpretaciones ambiguas y, en muchos casos, en la construcción de un discurso orientado a metas abstractas.

Los autores señalan que esta concepción dominante del desarrollo sostenible se sustenta en la aceptación implícita de la doctrina del crecimiento económico ilimitado, la cual asume que las demandas humanas pueden ser satisfechas de manera permanente sin considerar las restricciones ecológicas del planeta. En este marco, se evidencia una incompatibilidad estructural entre el desarrollo humano, entendido como expansión de la actividad económica, y la sostenibilidad ambiental, al priorizarse una visión prometeica del progreso que subestima los límites biofísicos de los ecosistemas.

Desde esta aproximación ontológica, el producto bruto interno per cápita y la huella ecológica no deben ser examinados de forma independiente ni reducidos a simples indicadores cuantitativos. Por el contrario, ambos deben interpretarse como componentes interrelacionados dentro de un sistema complejo de interacciones entre las dimensiones económicas, sociales y ecológicas. Este enfoque permite una comprensión más integral de los procesos de desarrollo regional en el Perú y sustenta la necesidad de replantear los modelos de crecimiento desde una perspectiva que reconozca la interdependencia entre los sistemas humanos y naturales.

2.3.3. Epistemología de los indicadores económicos y ambientales

Desde una aproximación epistemológica, indicadores como el producto bruto interno per cápita y la huella ecológica deben entenderse como construcciones analíticas que expresan determinados valores, supuestos y prioridades de la sociedad que los adopta. En este sentido, la selección y uso de dichos indicadores no es neutral, sino que responde a un posicionamiento

filosófico sobre qué dimensiones del desarrollo se consideran centrales para su evaluación y medición.

Al respecto, Guerrero de Lizardi (2022) sostiene que el principal límite del crecimiento económico radica en la biocapacidad del planeta, señalando que, desde hace varias décadas, la huella ecológica global ha superado de manera sostenida dicha capacidad. Esta situación pone en evidencia la insuficiencia de los enfoques que privilegian exclusivamente el crecimiento económico como indicador de progreso, y plantea la necesidad de replantear los marcos conceptuales desde los cuales se analiza el desarrollo.

En consecuencia, la utilización conjunta del PBI per cápita y la huella ecológica conlleva desafíos tanto metodológicos como éticos, los cuales requieren ser abordados mediante una reflexión epistemológica crítica. Este enfoque permite cuestionar los supuestos tradicionales del crecimiento ilimitado y promueve una comprensión más integral del desarrollo, orientada al reconocimiento de los límites ecológicos y a la sostenibilidad de los sistemas económicos y ambientales.

2.3.4. Filosofía del bienestar humano y calidad de vida

Desde una perspectiva orientada al bienestar humano, el análisis de la relación entre la huella ecológica y el producto bruto interno per cápita debe considerar su impacto efectivo sobre la calidad de vida de la población. En este marco, Carrasco et al. (2022) introducen el concepto de bienestar sostenible, el cual se entiende como la satisfacción de las necesidades humanas sin transgredir los límites ambientales. Esta concepción enfatiza que el desarrollo económico solo es socialmente deseable cuando se mantiene dentro de las capacidades ecológicas del entorno.

Bajo esta perspectiva filosófica, el incremento del PBI per cápita adquiere relevancia únicamente en la medida en que contribuya a disminuir la presión sobre los ecosistemas y a mejorar las condiciones de vida de la población. Este planteamiento resulta particularmente pertinente en contextos caracterizados por profundas desigualdades sociales y territoriales, como el caso peruano, donde el crecimiento económico no siempre se traduce en bienestar generalizado ni en sostenibilidad ambiental.

En conjunto, las bases filosóficas que sustentan el análisis de la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú se apoyan en principios éticos, ontológicos y epistemológicos que destacan la necesidad de un desarrollo sostenible, equitativo y centrado en el bienestar humano. Este enfoque integrador permite comprender de manera más amplia las interacciones entre las dimensiones económica y ambiental, y resalta la urgencia de replantear los modelos de desarrollo vigentes desde una perspectiva ética y orientada a la sostenibilidad.

2.4. Definición de términos básicos

Huella de carbono

La huella de carbono se refiere al volumen de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generado principalmente por el consumo de combustibles fósiles. En el marco de las cuentas de la huella ecológica, dichas emisiones se expresan como la superficie biológicamente productiva necesaria para su absorción. Este componente se integra a la huella ecológica debido a que representa un uso competitivo del espacio bioproductivo, dado que la acumulación de CO₂ en la atmósfera constituye una forma de deuda ecológica. Habitualmente, la huella de carbono se cuantifica en toneladas de CO₂ emitidas anualmente (Global Footprint Network, 2023).

Huella ecológica

La huella ecológica es un indicador que estima la extensión de tierra y agua biológicamente productiva requerida para generar los recursos que consume una persona, población o actividad, así como para asimilar los residuos producidos, considerando la tecnología y los sistemas de gestión vigentes. Este indicador se expresa generalmente en hectáreas globales y puede traducirse también en el número de planetas necesarios para sostener determinados niveles de consumo. Dado el carácter global del comercio, la huella ecológica incorpora superficies productivas ubicadas tanto dentro como fuera del territorio analizado, y suele referirse específicamente a la huella del consumo (Global Footprint Network, 2023).

Estándares de huella ecológica

Los estándares de huella ecológica comprenden un conjunto de lineamientos metodológicos que regulan los procedimientos, las fuentes de información y los criterios de reporte empleados en los estudios de huella. Estos estándares, establecidos por el Comité de Estándares de la Global Footprint Network, buscan garantizar la transparencia, la confiabilidad y la comparabilidad de los resultados entre investigaciones realizadas a nivel internacional (Global Footprint Network, 2023).

Hectárea global (gha)

La hectárea global constituye la unidad de medida utilizada en las cuentas de huella ecológica y biocapacidad. Representa una hectárea biológicamente productiva con una productividad promedio mundial para un año específico. Esta unidad permite comparar diferentes tipos de superficies productivas, considerando sus variaciones de rendimiento

biológico. Dado que la productividad global puede fluctuar con el tiempo, el valor de la hectárea global puede presentar ligeras variaciones interanuales (Global Footprint Network, 2023).

Tierras de cultivo

Las tierras de cultivo corresponden al tipo de uso del suelo con mayor nivel de bioproductividad y están destinadas a la producción de alimentos, fibras, insumos para la alimentación animal, cultivos oleaginosos y caucho. En los cálculos actuales de la huella ecológica, este componente incluye los productos agrícolas utilizados directa o indirectamente para el consumo humano y animal, aunque aún no incorpora plenamente los efectos de la degradación del suelo derivados de prácticas agrícolas insostenibles (Global Footprint Network, 2023).

Tierras forestales

Las tierras forestales cumplen una doble función dentro de la huella ecológica: por un lado, suministran productos forestales como madera, pulpa y leña; y por otro, actúan como sumideros de carbono al absorber las emisiones de CO₂ provenientes del uso de combustibles fósiles. Este último aspecto conforma el componente de huella de carbono, que actualmente representa la mayor proporción de la huella ecológica global, incluyendo además el carbono incorporado en bienes importados (Global Footprint Network, 2023).

Tierras de pastoreo

Las tierras de pastoreo son superficies destinadas a la crianza de ganado para la obtención de carne, productos lácteos, cuero y lana. La huella asociada a este tipo de uso del suelo se calcula comparando la disponibilidad de alimento para el ganado con los requerimientos totales

del mismo, asumiendo que la diferencia es cubierta por los pastizales disponibles en el territorio analizado (Global Footprint Network, 2023).

Zonas de pesca

La huella de las zonas de pesca se determina a partir de estimaciones de la captura máxima sostenible de diversas especies marinas. Estas capturas se transforman en equivalentes de producción primaria, considerando los niveles tróficos de las especies, y se relacionan con la superficie de las plataformas continentales. El cálculo incluye tanto la pesca destinada al consumo directo como aquella utilizada para la alimentación en sistemas de acuicultura (Global Footprint Network, 2023).

Terreno edificado

El terreno edificado comprende las áreas ocupadas por infraestructura humana, tales como viviendas, sistemas de transporte, instalaciones industriales y embalses destinados a la generación de energía hidroeléctrica. Este tipo de superficie suele reemplazar terrenos previamente productivos, especialmente tierras agrícolas, lo que incrementa la presión sobre la biocapacidad disponible (Global Footprint Network, 2023).

Planeta(s) equivalente(s)

El concepto de planetas equivalentes expresa la relación entre la huella ecológica per cápita de una población y la biocapacidad per cápita disponible a nivel global. Este indicador permite estimar cuántos planetas Tierra serían necesarios si toda la humanidad adoptara los patrones de consumo de un individuo o país determinado. En 2023, la huella ecológica promedio mundial superó la capacidad biológica del planeta, evidenciando un escenario de sobregiro ecológico (Global Footprint Network, 2023).

Producto Bruto Interno (PBI)

El producto bruto interno es un indicador macroeconómico que representa el valor monetario de los bienes y servicios finales producidos dentro de las fronteras de una economía durante un período específico. El término “producto” alude al valor agregado generado, “interno” se refiere a la producción realizada dentro del territorio nacional, y “bruto” indica que no se consideran las variaciones de inventarios ni la depreciación del capital (Ministerio de Economía y Finanzas, 2024).

2.5. Hipótesis de investigación

2.5.1. Hipótesis general

Existe relación significativa entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

2.5.2. Hipótesis Específicas

1. Existe relación significativa entre el área de cultivos y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.
2. Existe relación significativa entre el área de pastoreo y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.
3. Existe relación significativa entre el área de bosques y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.
4. Existe relación significativa entre las zonas de pesca y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

5. Existe relación significativa entre la huella de carbono y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.
6. Existe relación significativa entre las áreas urbanas y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

2.6. Operacionalización de variables

Variable 1. Huella Ecológica

Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
La huella ecológica es un indicador de sostenibilidad ambiental que mide la cantidad de recursos naturales necesarios para satisfacer las demandas humanas y compara este consumo con la capacidad biológica del planeta para regenerar dichos recursos (Global Footprint Network, 2023)	La huella ecológica muestra variaciones en los departamentos. Es una herramienta que permite tomar conciencia de nuestras actividades sobre el planeta tierra y reducir los impactos que pudieran generar nuestras acciones.	Área de Cultivos	Producción agrícola per cápita (toneladas/hectárea)
			Consumo de alimentos per cápita (kilogramos/año)
			Rendimiento agrícola promedio (toneladas/hectárea)
			Uso de fertilizantes y pesticidas (kilogramos/hectárea)
		Área de Pastoreo	Densidad de ganado (número de animales/hectárea)
			Producción de productos ganaderos per cápita (kilogramos/año)
			Degradación del suelo en áreas de pastoreo (índice de calidad del suelo)
		Área de Bosques	Capacidad de absorción de carbono de los bosques (toneladas de CO ₂ /hectárea)
			Tasa de deforestación (hectáreas/año)
			Producción maderera sostenible (metros cúbicos/hectárea)
		Zonas de Pesca	Producción pesquera sostenible (toneladas/año)
			Esfuerzo pesquero (número de embarcaciones y jornadas de pesca)
			Estado de las poblaciones de peces (porcentaje de especies en niveles sostenibles)
		Huella de Carbono	Emisiones de CO ₂ per cápita (toneladas métricas/persona/año)
			Intensidad de carbono de la energía (gramos de CO ₂ /kilovatio-hora)
			Huella de carbono por producto (kilogramos de CO ₂ -eq/unidad)
			Emisiones de transporte (gramos de CO ₂ /km recorrido)
		Áreas Urbanas	Densidad poblacional urbana (habitantes/hectárea)
			Tasa de expansión urbana (hectáreas/año)
			Consumo energético urbano per cápita (kilovatios-hora/año)
			Producción de residuos sólidos urbanos (kilogramos/habitante/día)

Variable 2. PBI per cápita

Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
El PIB per cápita es el promedio de Producto Bruto por cada persona. Se calcula dividiendo el PIB total por la cantidad de habitantes de la economía. Son doce las actividades económicas preponderantes en el PBI. (Ministerio de Economía y Finanzas, 2024).	El Producto Bruto Interno del país se calcula por tres métodos: Producción, Ingreso y Gasto. Sin embargo, a nivel departamental, debido a limitaciones en la disponibilidad de información, solamente se realiza la estimación por el método de la Producción, valorado a precios corrientes y constantes de 2007.	Agricultura, Ganadería, Caza y Silvicultura	Producción agrícola
			Producción pecuaria
			Valor agregado bruto sectorial
		Pesca y Acuicultura	Captura pesquera
			Producción acuícola
			Exportaciones pesqueras
		Extracción de Petróleo, Gas y Minerales	Producción minera
			Producción de hidrocarburos
			Precio internacional de commodities
		Manufactura	Índice de Producción Industrial (IPI)
			Exportaciones manufactureras
			Utilización de capacidad instalada
		Electricidad, Gas y Agua	Producción eléctrica (GWh).
			Cobertura de servicios básicos
			Consumo energético
		Construcción	Consumo interno de cemento
			Inversión pública y privada en infraestructura
			Permisos de construcción
		Comercio	Ventas al por menor y mayor
			Índice de Precios al Consumidor (IPC)
			Apertura de nuevos establecimientos comerciales
		Transporte, Almacén., Correo y Mensajería	Movilización de pasajeros y carga
			Volumen de exportaciones e importaciones
			Inversiones en logística
		Alojamiento y Restaurantes	Tasa de ocupación hotelera
			Índice de consumo en restaurantes
			Ingreso por turismo
		Telecom. y Otros Serv. de Información	Suscripciones de servicios de telecomunicaciones
			Producción de contenido digital
			Velocidad y cobertura de internet.
		Administración Pública y Defensa	Gasto público
			Índice de empleo público
			Cumplimiento de metas de política pública
		Otros Servicios	Consumo de servicios profesionales
			Número de empresas de servicios
			Aporte al empleo total

Capítulo III. Metodología

La metodología propuesta estuvo orientada a proporcionar un análisis riguroso y sistemático de la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú. La combinación de enfoques descriptivos, correlacionales y longitudinales permitió generar evidencia sólida para informar la toma de decisiones en materia de sostenibilidad y desarrollo regional.

3.1. Diseño metodológico

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en el análisis de datos numéricos y en la aplicación de métodos estadísticos para examinar la relación entre la huella ecológica (HE) y el PBI per cápita (PBI_pc) en los departamentos del Perú.

El diseño es de tipo no experimental, correlacional-explicativo y longitudinal, pues se analizan relaciones entre variables sin manipulación de datos, y se emplea información para el período 2009–2016, lo que permite observar patrones y variaciones en el tiempo.

Asimismo, se incorpora un análisis multivariante exploratorio, basado en técnicas de clusterización, para identificar patrones territoriales y grupos de departamentos con características ambientales y económicas similares.

3.2. Población y muestra

La población estuvo compuesta por los 24 departamentos del Perú, para los cuales se dispone de datos oficiales del Ministerio del Ambiente y del INEI.

La muestra corresponde al total de observaciones disponibles para dichos departamentos durante el período 2009–2016, generando un conjunto de 192 observaciones (24 departamentos $\times$ 8 años). Por lo tanto, se trabaja con una muestra censal, sin selección aleatoria.

3.3. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos para la investigación sobre la relación entre la huella ecológica y el Producto Bruto Interno (PBI) per cápita en los departamentos del Perú se basará en técnicas que prioricen la validez, confiabilidad y disponibilidad de la información. Debido a la naturaleza del estudio, se utilizarán datos secundarios provenientes de fuentes oficiales y reconocidas que garanticen su calidad y pertinencia para el período 2017-2024.

3.3.1. Fuentes de datos

Los datos se obtuvieron de fuentes secundarias oficiales:

Ministerio del Ambiente (MINAM): Reporte “Huella Ecológica del Perú 2009–2016”.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI): PBI departamental por sectores económicos.

Global Footprint Network (HE 1961-2021 de Perú).

Banco Central de Reserva del Perú (BCRP): PBI per cápita de Perú.

Todos los datos fueron validados, homogéneos y comparables entre sí.

3.3.2. Procedimientos de recolección de datos

Identificación de fuentes confiables.

Se realizó una revisión exhaustiva de fuentes primarias y secundarias para identificar aquellas que ofrezcan datos confiables, actualizados y desagregados a nivel departamental. Se priorizarán fuentes oficiales y bases de datos abiertas que permitan la replicabilidad del estudio.

Organización y sistematización de la información.

La información recopilada fue organizada en una base de datos estructurada, clasificando las variables principales (huella ecológica y PBI per cápita) y secundarias (factores contextuales) por departamento y año. Se utilizaron herramientas como hojas de cálculo (Microsoft Excel) para el procesamiento preliminar de los datos.

Verificación de calidad de los datos.

Se evaluó la coherencia y la validez de los datos mediante revisiones cruzadas con múltiples fuentes, identificando posibles inconsistencias, valores atípicos o datos faltantes. Los datos fueron estandarizados, utilizando métricas consistentes para el PBI per cápita y hectáreas globales para la huella ecológica), lo que permitió su comparación y análisis estadístico.

3.4. Técnicas para el procesamiento de la información

El análisis de la relación entre la huella ecológica y el Producto Bruto Interno (PBI) per cápita en los departamentos del Perú requiere la aplicación de técnicas estadísticas que permitió describir, explorar y explicar las interacciones entre las variables principales. Las técnicas seleccionadas se enfocaron en garantizar la validez, confiabilidad y precisión de los resultados, permitiendo identificar patrones, relaciones y tendencias a lo largo del período 2009-2016.

3.4.1. Análisis descriptivo

El análisis descriptivo constituye el punto de partida del procesamiento de los datos y tiene como objetivo caracterizar las variables principales en términos de su distribución, variabilidad y comportamientos regionales.

Medidas de tendencia central y dispersión. Se calcularon la media, mediana de la huella ecológica y el PBI per cápita, así como la desviación estándar, el rango y el coeficiente de variación, para evaluar la dispersión y la consistencia de los datos en los departamentos.

Representación gráfica. Se utilizaron diagramas de barras, gráficos de dispersión y mapas temáticos para visualizar la distribución geográfica de las variables, facilitando la identificación de patrones regionales.

3.4.2. Análisis de correlación

Para evaluar la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita, se aplicaron coeficientes de correlación.

Coefficiente de correlación de Pearson. Esta técnica se empleó para analizar la relación lineal entre las variables, siempre y cuando los datos cumplan con los supuestos de normalidad.

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Donde r mide la dirección y la magnitud de la relación entre el PBI per cápita y la huella ecológica.

Coefficiente de correlación de Spearman. En caso de que los datos no sigan una distribución normal, se empleará este coeficiente, que evalúa la relación monotónica entre las variables utilizando rangos en lugar de valores absolutos.

3.4.3. Análisis de regresión

Para identificar y cuantificar el efecto del PBI per cápita sobre la huella ecológica, se aplicaron modelos de regresión lineal.

Regresión lineal simple. Este modelo evaluó si el PBI per cápita tiene un impacto directo sobre la huella ecológica. La ecuación utilizada fue:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

Donde Y representa la huella ecológica, X el PBI per cápita, β_0 la ordenada al origen, β_1 el coeficiente de pendiente, y ϵ el término de error.

3.4.4. Análisis de clúster

Con el fin de identificar agrupaciones de departamentos con características similares en términos de huella ecológica y PBI per cápita, se utilizará el análisis de clúster.

Método de conglomerados jerárquicos. Se empleará el método hierarchical clustering para agrupar departamentos en función de su proximidad estadística, utilizando medidas de distancia euclidiana.

Numero óptimo de clústeres. Métodos que permiten clasificar a los departamentos en un número de grupos, basándose en sus valores de huella ecológica y PBI per cápita.

La selección de estas técnicas estadísticas permitirá analizar de manera rigurosa y sistemática la relación entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú, identificando patrones, relaciones y tendencias con un enfoque científico. La integración de análisis descriptivos, correlacionales, de regresión y de clúster garantizará la validez y la relevancia de los hallazgos obtenidos.

3.4.5. Software utilizado

El procesamiento y análisis estadístico se realiza con:

RStudio (R). Paquetes: tidyverse, factoextra, ggplot2, cluster, stats.

Excel (para limpieza de datos).

3.4.6. Consideraciones éticas

El estudio utiliza únicamente datos secundarios públicos, por lo que no involucra riesgos éticos ni requiere consentimiento informado. Se garantiza la transparencia, reproducibilidad y trazabilidad de todos los procedimientos.

Capítulo IV. Resultados

4.1. Huella Ecológica y PBI de Perú

La Huella Ecológica es una medida de la superficie de tierra y agua biológicamente productiva que un individuo, población o actividad requiere para producir todos los recursos que consume y absorber los residuos que genera, utilizando la tecnología y las prácticas de gestión de recursos vigentes. Generalmente se mide en hectáreas globales.

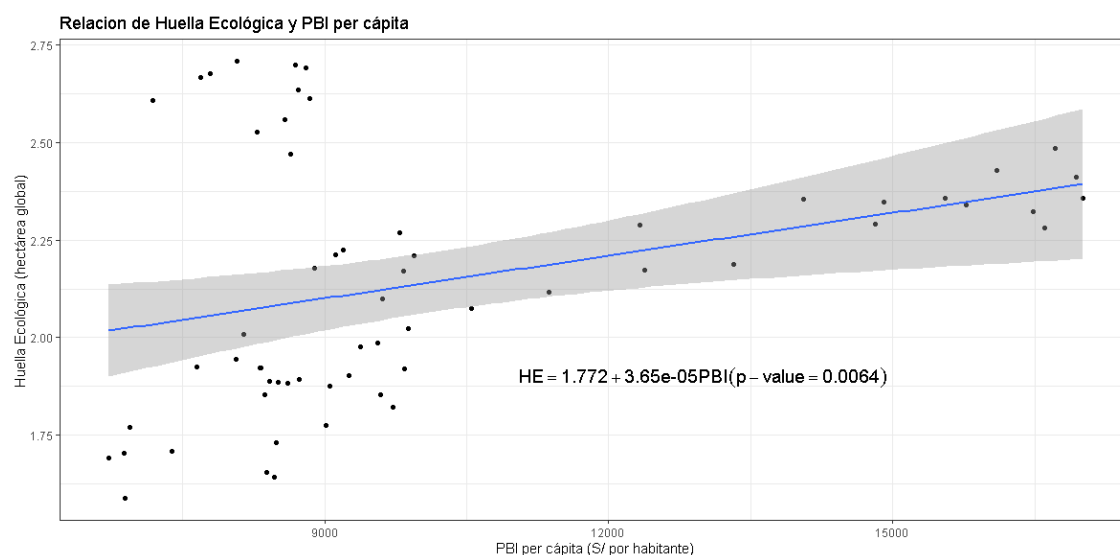
Los datos de PBI per cápita (1961- 2021) de Perú es tomado de BCR:

<https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/anuales/resultados/PD39594DA/html>

Huella Ecológica de Perú es tomado de Global Footprint Network:

<https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=170&type=BCpc,EFCpc>

Figura 1 Relación entre Huella Ecológica y PBI per cápita de Perú



Análisis de la Figura 1: Relación entre Huella Ecológica y PBI per cápita (1961–2021)

La figura1 muestra un diagrama de dispersión que representa la relación entre el Producto Bruto Interno per cápita (PBI pc), expresado en soles por habitante, y la Huella Ecológica (HE), medida en hectáreas globales por persona, para un periodo de 61 años. Además, se incluye una línea de regresión lineal con banda de confianza del 95%, permitiendo visualizar la tendencia y la significancia del modelo.

1. Tendencia general

La pendiente positiva de la línea de regresión indica una relación directamente proporcional entre ambas variables: A medida que aumenta el PBI per cápita, también tiende a incrementarse la Huella Ecológica. Esto sugiere que el crecimiento económico está asociado a un mayor consumo de recursos y presión ambiental.

2. Modelo de regresión estimado

El modelo mostrado en la figura es:

$$HE = 1.772 + 0.0000365 \cdot PBI \quad (p\text{-value}=0.0064)$$

Interpretación: Intercepto (1.772): representa la HE estimada cuando el PBI per cápita es cero. Aunque no tiene un significado práctico directo, sirve para ajustar la recta. Coeficiente del PBI (3.65×10^{-5}): por cada 1000 soles adicionales de PBI per cápita:

$\Delta HE \approx 0.0365$ hectáreas globales. Lo cual es un cambio relevante considerando que los valores de HE suelen oscilar entre 1 y 4.

3. Significancia estadística

El p-valor = 0.0064 indica que: La relación entre PBI per cápita y HE es estadísticamente significativa ($\alpha = 0.05$). Existe evidencia suficiente para afirmar que el PBI per cápita explica parte de la variación en la Huella Ecológica a lo largo del tiempo.

4. Distribución de los datos

Se observa alta dispersión entre 1961 y aproximadamente el año 2000, lo que puede indicar variaciones económicas y ambientales fuertes. En años más recientes (parte derecha del gráfico), se ve una ligera estabilización, aunque la tendencia ascendente se mantiene. No se observan valores atípicos extremos, pero sí heterogeneidad, característica común en series largas y variables socioambientales.

5. Implicaciones ambientales y económicas

La figura sugiere que: El crecimiento económico sostenido incrementa la presión sobre los ecosistemas, probablemente debido a: mayor consumo de energía, expansión de infraestructura, incremento del transporte, mayor demanda de bienes intensivos en recursos.

Este patrón coincide con investigaciones globales que relacionan desarrollo económico con incrementos en emisiones, uso de materiales y degradación ecológica.

Conclusión

El análisis gráfico revela una relación positiva y significativa entre PBI per cápita y Huella Ecológica en el periodo 1961–2021. Esto respalda la hipótesis de que, en este intervalo histórico, el crecimiento económico estuvo acompañado de un mayor impacto ambiental, coherente con las teorías de metabolismo socioeconómico y sostenibilidad.

4.1.1. Componentes de Huella Ecológica de Perú

Tierras de cultivo (TC).

Las tierras de cultivo son el tipo de uso del suelo más bioproductivo y consisten en áreas destinadas a la producción de alimentos y fibra para consumo humano, piensos para el ganado, cultivos oleaginosos y caucho. Debido a la falta de conjuntos de datos globalmente consistentes,

los cálculos actuales de la Huella de Tierras de Cultivo aún no consideran hasta qué punto las técnicas agrícolas o las prácticas agrícolas insostenibles pueden causar la degradación a largo plazo del suelo. La Huella de Tierras de Cultivo incluye los productos agrícolas destinados a la alimentación animal y acuícola, así como los utilizados para la producción de fibras y materiales.

Productos forestales (PF).

Se calcula con base en la cantidad de madera, pulpa, productos de madera y leña que consume un país anualmente.

Huella de Carbono (HC).

Representa las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la quema de combustibles fósiles. La Huella de Carbono también incluye el carbono incorporado en los bienes importados. Está representada por el área necesaria para secuestrar estas emisiones de carbono. El componente de Huella de Carbono de la Huella Ecológica se calcula como la cantidad de tierra forestal necesaria para absorber estas emisiones de dióxido de carbono. Actualmente, la Huella de Carbono es la porción más grande de la Huella de la humanidad.

Tierras de pastoreo (TP).

Las tierras de pastoreo se utilizan para la cría de ganado para la producción de carne, lácteos, cuero y lana. La huella de pastoreo se calcula comparando la cantidad de alimento disponible para el ganado en un país con la cantidad de alimento necesaria para todo el ganado en ese año. Se asume que el resto de la demanda de alimento proviene de las tierras de pastoreo.

Zonas de Pesca (ZP).

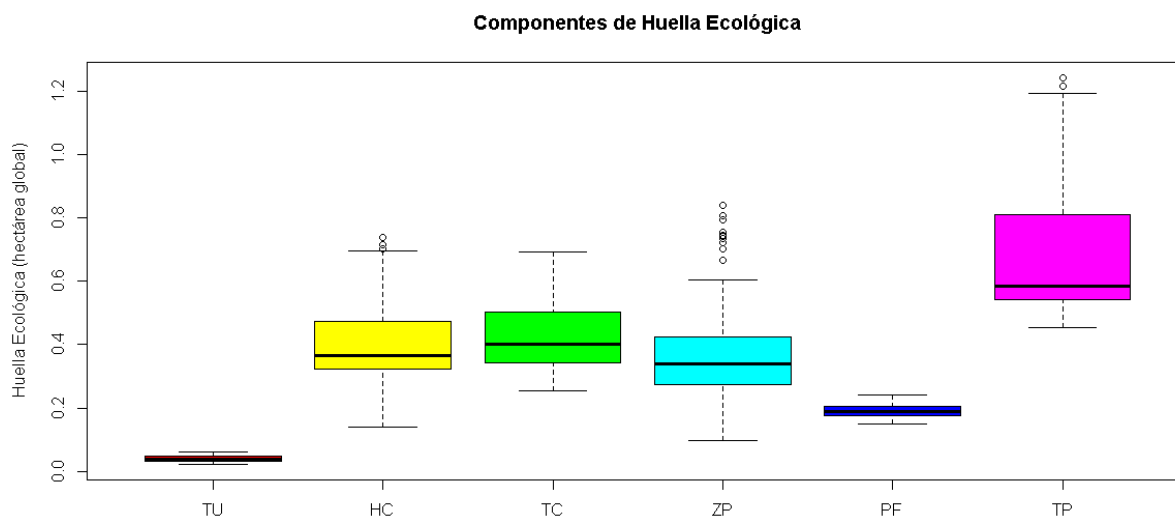
Las zonas de pesca se calculan con base en estimaciones de la captura máxima sostenible para diversas especies de peces. Estas estimaciones de captura sostenible se convierten en una

masa equivalente de producción primaria basada en los niveles tróficos de las distintas especies. Esta estimación de la producción primaria máxima aprovechable se divide posteriormente entre las áreas de la plataforma continental del mundo. Se incluye el pescado capturado y utilizado en mezclas de piensos para la acuicultura.

Terreno Urbanizado (TU).

La huella urbanizada se calcula con base en la superficie de terreno ocupada por infraestructuras humanas (transporte, vivienda, estructuras industriales y embalses hidroeléctricos). El suelo urbanizado puede ocupar lo que anteriormente habría sido tierra de cultivo.

Figura 2 Componentes de la Huella Ecológica del Perú



Nota. TU= Terreno urbanizado, HC=Carbon, TC=Tierras de cultivo, ZP=Zonas de pesca, PF=Productos forestales, TP=Tierras de pastoreo, HE= Huella Ecológica, PBI = PBI per cápita.

Análisis de la Figura: Componentes de la Huella Ecológica del Perú (1961–2021)

La figura muestra un diagrama de caja (boxplot) para los seis componentes de la Huella Ecológica (HE) a lo largo del periodo 1961–2021. Este tipo de gráfico permite comparar visualmente la distribución, variabilidad y presencia de valores atípicos dentro de cada componente.

1. Huella de Carbono (HC)

Es uno de los componentes más elevados e importantes en la composición de la HE del Perú a lo largo del periodo. Presenta una mediana alrededor de 0.55–0.60 hectáreas globales, siendo el segundo valor más alto después de Tierras de Pastoreo. La amplitud del rango intercuartílico (IQR) sugiere una variabilidad moderada, reflejando cambios históricos en consumo energético, emisiones de CO₂ y uso de combustibles fósiles. Se observan algunos valores atípicos (outliers), que probablemente corresponden a años de cambios abruptos en la economía o energía (crisis petroleras, industrialización, reformas).

2. Tierras de Pastoreo (TP)

Es el componente más alto entre todos los analizados. Presenta una mediana cercana a 0.70–0.80 gha, la más elevada del conjunto. Muestra variabilidad considerable, con valores que superan 1.0 gha en algunos años. La importancia de TP indica la relevancia histórica del sector ganadero, actividades pecuarias y uso de tierras para pastos.

3. Tierras de Cultivo (TC)

Presenta una mediana alrededor de 0.50 gha, con rangos relativamente estables. Su IQR estrecho indica que la demanda de tierras agrícolas ha sido más estable a lo largo del tiempo.

Oscilaciones moderadas reflejan cambios en la productividad agrícola, expansión o contracción de áreas cultivables.

4. Zonas de Pesca (ZP)

Muestra una distribución con presencia notable de muchos valores atípicos, lo que evidencia la volatilidad de la actividad pesquera peruana. La mediana se ubica alrededor de 0.35–0.40 gha, con un rango amplio. Esto coincide con la alta variabilidad histórica de la pesca industrial, afectada por: El fenómeno El Niño y La Niña, Cambios regulatorios, Variaciones en captura de anchoveta.

5. Productos Forestales (PF)

Es uno de los componentes más bajos. Mediana aproximadamente de 0.10–0.12 gha. La baja variabilidad indica que la explotación forestal y el consumo de madera se mantienen relativamente constantes. Componente pequeño pero ambientalmente relevante en la Amazonía peruana.

6. Terreno Urbanizado (TU)

Es el componente más pequeño de toda la HE. Presenta valores muy bajos (≈ 0.02 – 0.04 gha). Esto es coherente con: el tamaño relativo de las áreas urbanas respecto al territorio total, y la densidad urbana elevada en ciudades como Lima, que reduce el requerimiento de terreno per cápita.

7. Comparación general entre componentes

Tabla 1 Comparación general entre componentes de Huella Ecológica de Perú

Componente	Nivel relativo	Variabilidad	Comentario principal
TP	Más alto	Alta	Ganadería y uso de pastos predominantes
HC	Alto	Media–alta	Importancia del consumo energético
TC	Medio	Media	Agricultura estable a lo largo del tiempo
ZP	Medio-bajo	Muy alta	Altamente influenciado por cambios ambientales
PF	Bajo	Baja	Aprovechamiento forestal constante
TU	Muy bajo	Muy baja	Pequeño requerimiento de suelo urbano per cápita

8. Integración global: $HE = TU + HC + TC + ZP + PF + TP$

Los resultados muestran que los componentes que más contribuyen a la Huella Ecológica total en Perú son: Tierras de Pastoreo (TP), Huella de Carbono (HC), Tierras de Cultivo (TC)

Esto indica que los sectores con mayor presión ambiental son: Ganadería y pastizales, Uso de energía y emisiones de CO₂ y Agricultura tradicional

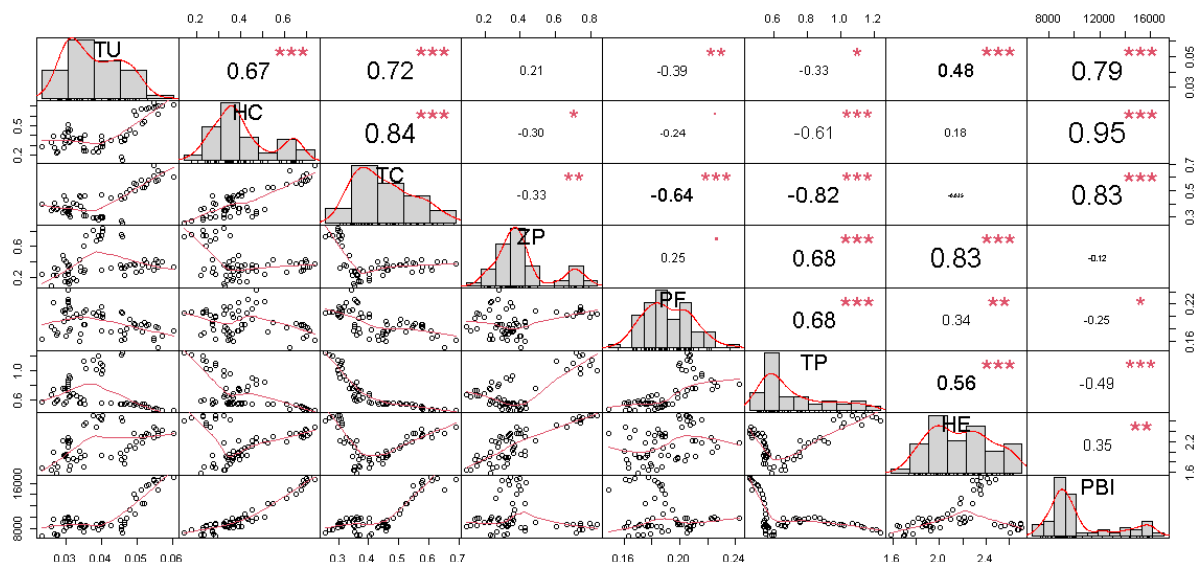
Mientras que el impacto es mucho menor en: Urbanización, Productos forestales y Pesca (aunque muy variable).

Conclusión

La figura 2 revela que la estructura de la Huella Ecológica del Perú entre 1961 y 2021 está dominada por los componentes asociados a la producción agropecuaria y el uso de energía, lo que coincide con la composición económica y ambiental del país durante este periodo. La variabilidad en algunos componentes, especialmente pesca y carbono, refleja la sensibilidad del país a cambios climáticos, económicos y productivos.

4.1.2. Relación entre PBI y los componentes de la Huella Ecológica de Perú

Figura 3 Correlaciones entre Huella Ecológica y PBI per cápita de Perú



Análisis de la Figura: Correlaciones entre Huella Ecológica y PBI per cápita (1961–2021)

Relación entre PBI y los componentes de la Huella Ecológica

1. PBI y Terreno Urbanizado (TU)

Coefficiente: 0.79***. Correlación positiva fuerte y altamente significativa.

Conforme aumenta el PBI per cápita, también incrementa el nivel de urbanización.

Esto refleja la expansión urbana, mayor infraestructura, crecimiento de ciudades y demanda de suelo construido asociada al desarrollo económico.

2. PBI y Huella de Carbono (HC)

Coefficiente: 0.95***. Es la correlación más fuerte en toda la matriz.

A mayor PBI per cápita, mayores emisiones y consumo energético, reflejando:
Industrialización, Mayor uso de combustibles fósiles, Expansión del transporte y electricidad,
Crecimiento productivo dependiente de energía no renovable.

Confirma que el factor energético es el principal motor del impacto ambiental del
crecimiento económico peruano en 1961–2021.

3. PBI y Tierras de Cultivo (TC)

Coeficiente: 0.83***. Correlación positiva fuerte y altamente significativa.

El crecimiento económico está asociado a mayor demanda de tierras productivas, ya sea
por: expansión agrícola, intensificación productiva y aumento en consumo alimentario per
cápita.

4. PBI y Zonas de Pesca (ZP)

Coeficiente: -0.12^* . Correlación negativa débil y No significativa.

No hay una relación estadística clara y confiable entre el PBI per cápita y la Huella de
Zonas de Pesca en este periodo.

5. PBI y Productos Forestales (PF)

Coeficiente: -0.25^* . Correlación negativa débil y significativa.

Refleja que el aumento del PBI se acompaña de mayor presión sobre recursos forestales:
mayor demanda de madera, uso de biomasa, expansión de actividades extractivas ligadas al
crecimiento económico.

Coherente con cambios en la Amazonía peruana desde los años 70.

6. PBI y Tierras de Pastoreo (TP)

Coeficiente: -0.49^{***} . Correlación negativa moderada y significativa.

La tendencia parece ser que un mayor PBI se asocia con una menor Huella de Tierras de Pastoreo.

7. PBI y Huella Ecológica Total (HE)

Coeficiente: 0.35***. Correlación positiva moderada y muy significativa.

La Huella Ecológica total tiene una relación positiva moderada con el PBI per cápita. Esto confirma que el patrón de crecimiento económico en Perú (1961-2021) ha estado fuertemente acoplado a un aumento de la presión sobre los recursos naturales y la capacidad ecológica (una mayor Huella Ecológica).

Conclusión: Relación PBI–Huella Ecológica

El PBI se relaciona positiva y fuertemente con la mayoría de componentes de la HE (HC, TC, TU). La Huella de Carbono es el factor más sensible al crecimiento económico. Las tierras de pastoreo tienen una relación inversa y moderada con el PBI. Las Zonas de Pesca muestran una relación negativa, reflejando presión ambiental, sobreexplotación o cambios estructurales del sector pesquero.

La Huella Ecológica total aumenta moderadamente con el PBI, lo que evidencia que el desarrollo económico peruano ha estado acompañado de un incremento en la demanda de recursos naturales y ecosistemas.

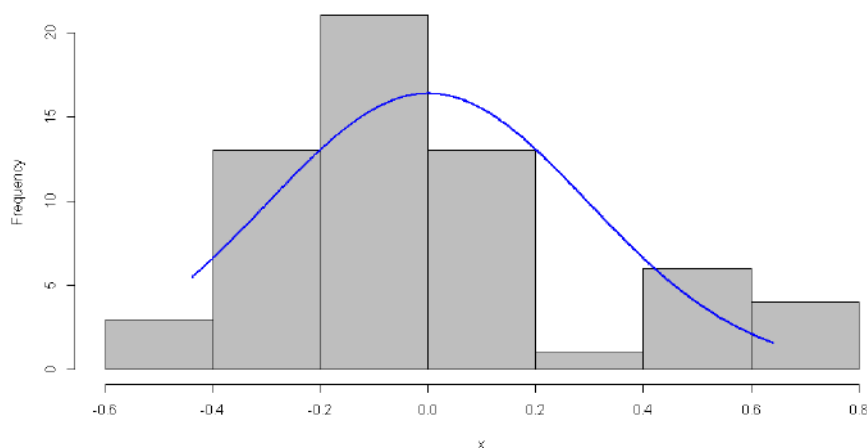
Estos resultados indican que el crecimiento económico (medido por el PBI per cápita) en Perú durante el periodo analizado está fuertemente impulsado y es dependiente de la expansión de la infraestructura (TU), la intensificación de la agricultura (TC), y principalmente, por actividades con altas emisiones de carbono (HC). Esto subraya un patrón de desarrollo que

impone una moderada demanda sobre los ecosistemas (HE), lo que plantea desafíos de sostenibilidad.

4.1.3. Prueba de normalidad

Los residuos del modelo $HE \sim PBI$ para Perú (1961–2021, $n=61$) muestran una distribución aproximadamente normal en el centro, pero con desviaciones claras en las colas, especialmente en la cola superior.

Figura 4. Histograma con curva normal de residuos



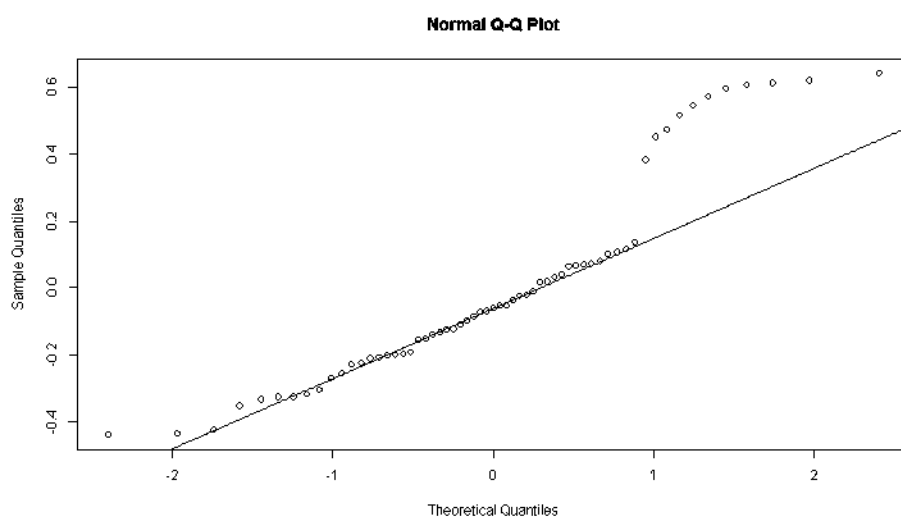
Análisis de Histograma con curva normal (Figura 4)

Esta figura se utiliza para evaluar la suposición de que los errores (residuos) del modelo están normalmente distribuidos. El histograma de los residuos, con la curva normal superpuesta, presenta una forma aproximadamente acampanada y relativamente simétrica alrededor de cero, pero con cierta discrepancia en las colas respecto de la curva teórica.

La distribución de las barras del histograma se aproxima razonablemente a la curva de densidad normal. La distribución de los residuos es aproximadamente simétrica y la mayor concentración de datos se encuentra alrededor del valor cero, que es una característica de una distribución normal para los residuos.

Conclusión: Basado únicamente en la inspección visual de este histograma, se podría inferir que la suposición de normalidad de los residuos es plausible para el modelo de regresión lineal. Esto sugiere que, aunque la normalidad es razonable como aproximación global, existen valores extremos que generan desviaciones respecto del modelo normal ideal.

Figura 5 Gráfico Q-Q de residuos



Análisis de Gráfico Q-Q (Fig23)

En el Q-Q plot, la mayoría de puntos centrales se alinean bastante bien con la recta teórica, lo que sugiere que, en el rango medio, la distribución de residuos es cercana a la normal. Sin embargo, los puntos de cuantiles altos se curvan sistemáticamente por encima de la recta y se separan de ella, lo que indica colas más pesadas o asimetría en los valores grandes (posibles outliers o mala especificación del modelo en esos años). El gráfico Q-Q muestra que, aunque la mayoría de los residuos en el centro siguen un patrón normal, la distribución tiene colas pesadas o una asimetría positiva debido a la presencia de valores atípicos (outliers) positivos muy marcados.

Conclusión

En conjunto, ambos gráficos indican que la suposición de normalidad de los residuos es moderadamente aceptable en el centro de la distribución, pero no se cumple perfectamente debido a problemas en las colas (particularmente la superior).

4.1.4. *Clustering*

Son técnicas no supervisadas cuya finalidad es encontrar patrones o grupos (clusters) dentro de un conjunto de observaciones. Las particiones se establecen de forma que las observaciones que están dentro de un mismo grupo son similares entre ellas y distintas a las observaciones de otros grupos. Se trata de un método no supervisadas, ya que el proceso ignora la variable respuesta que indica a que grupo pertenece realmente cada observación (si es que existe tal variable). Esta característica diferencia al clustering de las técnicas estadísticas conocidas como análisis discriminante, que emplean un set de entrenamiento en el que se conoce la verdadera clasificación.

Se han desarrollado multitud de variantes y adaptaciones de sus métodos y algoritmos. Pueden diferenciarse tres grupos:

Partitioning Clustering: Este tipo de algoritmos requieren que el usuario especifique de antemano el número de clusters que se van a crear (K-means, K-medoids, CLARA).

Hierarchical Clustering: Este tipo de algoritmos no requieren que el usuario especifique de antemano el número de clusters. (agglomerative clustering, divisive clustering).

Métodos que combinan o modifican los anteriores (hierarchical K-means, fuzzy clustering, model based clustering y density based clustering).

4.1.4.1. Número óptimo de clústeres

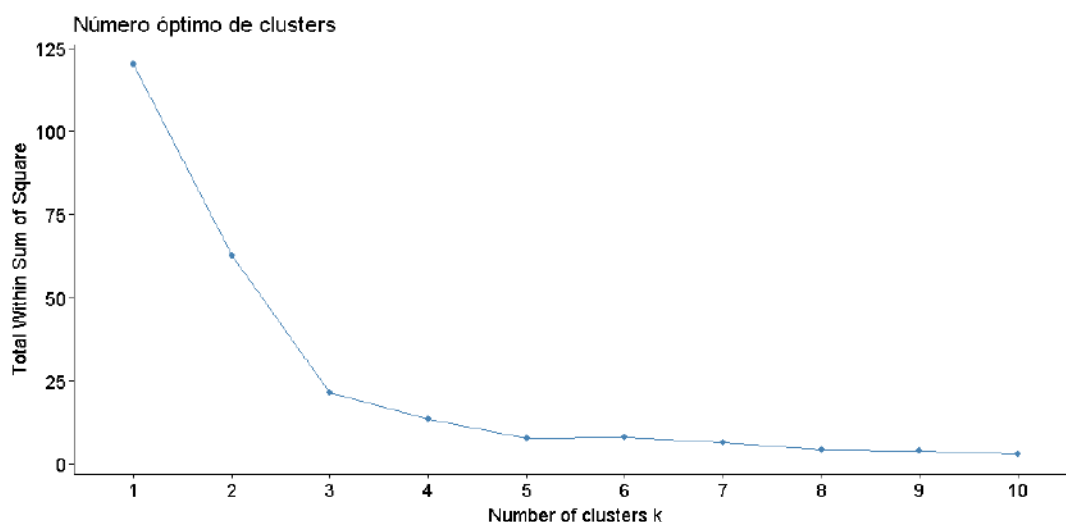
Determinar el número óptimo de clusters es uno de los pasos más complicados a la hora de aplicar métodos de clustering, sobre todo cuando se trata de partitioning clustering, donde el número se tiene que especificar antes de poder ver los resultados.

No existe una forma única de averiguar el número adecuado de clusters. Es un proceso bastante subjetivo que depende en gran medida del tipo de clustering empleado y de si se dispone de información previa sobre los datos con los que se está trabajando, por ejemplo, estudios anteriores pueden sugerir o acotar las posibilidades. A pesar de ello, se han desarrollado varias estrategias que ayudan en el proceso.

Método Elbow

El método Elbow sigue una estrategia comúnmente empleada para encontrar el valor óptimo de un parámetro. La idea general es probar un rango de valores del parámetro en cuestión, representar gráficamente los resultados obtenidos con cada uno e identificar aquel punto de la curva a partir del cual la mejora deja de ser sustancial (principio de verosimilitud).

Figura 6 Número óptimo de clúster Método Elbow

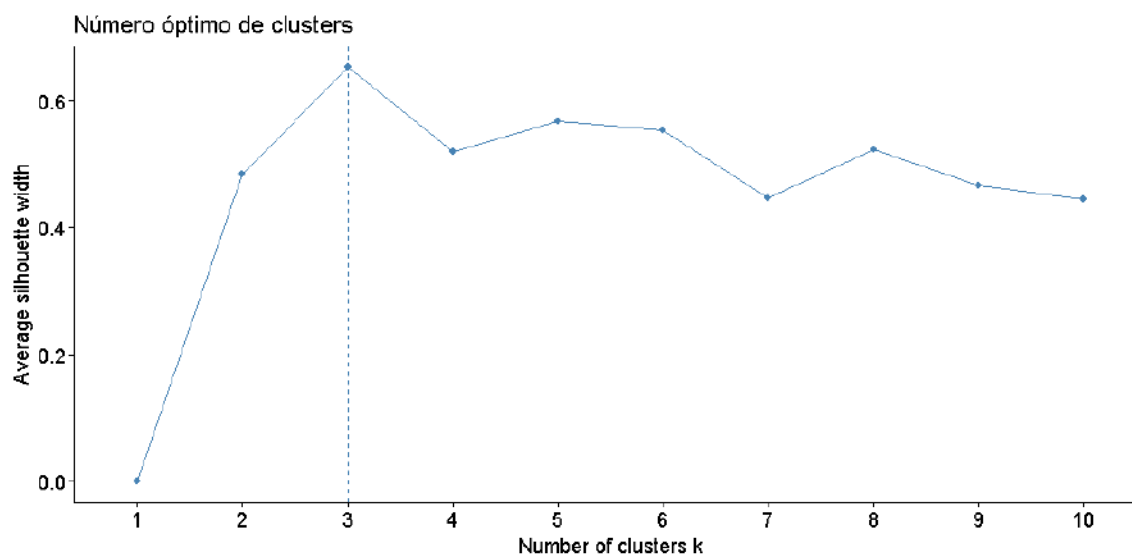


Nota. La curva indica que a partir de 3 clúster la mejora es mínima.

Método de Average silhouette

El método de average silhouette es muy similar al de Elbow, con la diferencia de que, en lugar minimizar el total inter-cluster sum of squares (wss), se maximiza la media de los silhouette coefficient (si). Este coeficiente cuantifica cómo de buena es la asignación que se ha hecho de una observación comparando su similitud con el resto de observaciones de su cluster frente a las de los otros clusters. Su valor puede estar entre -1 y 1, siendo valores altos un indicativo de que la observación se ha asignado al cluster correcto.

Figura 7 Numero óptimo de cluster de Silhouette



Nota. El método de average silhouette considera como número óptimo de clústeres de 3.

Otros métodos

Existen otros métodos para identificar el número óptimo de clusters. En R la función NbClust() incorpora 30 índices distintos, dando la posibilidad de calcularlos todos en un único

paso. Esto último es muy útil, ya que permite identificar el valor en el que coinciden más índices, aportando seguridad de que se está haciendo una buena elección.

Entre todos los índices:

1 propusieron 2 como el mejor número de clústeres

17 propusieron 3 como el mejor número de clústeres

1 propuso 4 como el mejor número de clústeres

2 propusieron 5 como el mejor número de clústeres

1 propuso 8 como el mejor número de clústeres

5 propusieron 10 como el mejor número de clústeres

Conclusión: Según la regla de la mayoría, el mejor número de clústeres es 3

4.1.4.2. Hierarchical clustering.

Es una alternativa a los métodos de partitioning clustering que no requiere que se pre-especifique el número de clusters. Los métodos que engloba el hierarchical clustering se subdividen en dos tipos dependiendo de la estrategia seguida para crear los grupos:

Agglomerative clustering (bottom-up): el agrupamiento se inicia en la base del árbol, donde cada observación forma un cluster individual. Los clusters se van combinando a medida que la estructura crece hasta converger en una única "rama" central.

Divisive clustering (top-down): es la estrategia opuesta al agglomerative clustering, se inicia con todas las observaciones contenidas en un mismo cluster y se suceden divisiones hasta que cada observación forma un cluster individual.

En ambos casos los resultados pueden representarse de forma muy intuitiva en una estructura de árbol llamada dendrograma. En esta investigación se abarca únicamente métodos de hierarchical clustering de tipo agglomerative.

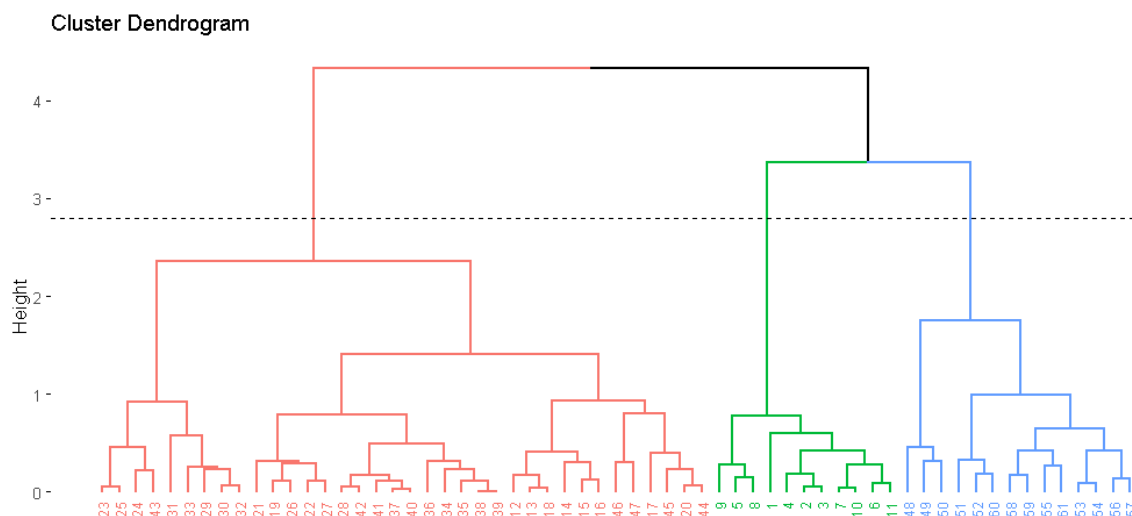
4.1.4.3. Dendrograma

Se dispone de 61 datos en un espacio de dos dimensiones: Huella ecológica y PBI, se aplica el método de hierarchical clustering para intentar reconocer los grupos.

Al aplicar hierarchical clustering empleando como medida de similitud la distancia euclídea y linkage complete, se obtiene el siguiente dendrograma.

Además de representar en un dendrograma la similitud entre observaciones, se tiene que poder identificar el número de clusters creados y qué observaciones forman parte de cada uno. Si se realiza un corte horizontal a una determinada altura del dendrograma, el número de ramas que sobrepasan (en sentido ascendente) dicho corte se corresponde con el número de clusters.

Figura 8 Dendrograma de dimensiones: Huella ecológica y PBI

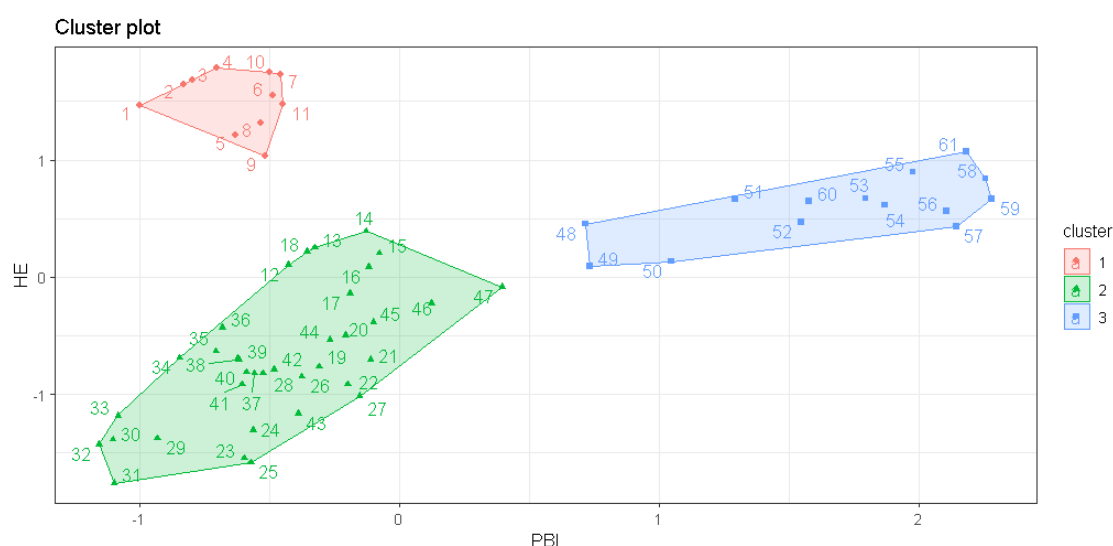


Nota. Si se realiza el corte a la altura de 2.8, se obtienen 3 clusters. La altura de corte controla el número de clusters obtenidos.

4.1.4.4. PCA.

Una forma menos frecuente de representar los resultados de un hierarchical clustering es combinándolos con una reducción de dimensionalidad por PCA. Primero se calculan las componentes principales, se representan las observaciones en un scatterplot empleando las dos primeras componentes y finalmente se colorean los clusters formando polígonos.

Figura 9 Gráfico de clustering jerárquico (HE vs. PBI per cápita, Perú 1961–2021)



Nota. Las componentes principales Huella ecológica y PBI

4.1.5. Clústeres 1, 2 y 3

La figura 9 presenta la distribución de 61 observaciones anuales correspondientes al período 1961–2021, ubicadas en un espacio bidimensional definido por la Huella Ecológica (HE) y el Producto Bruto Interno per cápita (PBI) expresado en soles por habitante. Para identificar patrones temporales y estructurales en la relación entre ambas variables, se aplicó un método de agrupamiento jerárquico (hierarchical clustering), cuyos resultados se representan mediante tres clústeres diferenciados en el gráfico.

4.1.5.1. Identificación general de los clústeres.

El análisis jerárquico segmenta los 61 años en tres grupos claramente diferenciados, que reflejan distintas etapas del desempeño económico (PBI per cápita) y el impacto ambiental asociado (HE):

Clúster 1 (rojo): HE y PBI bajos

Ubicado en la parte superior izquierda del gráfico.

Incluye valores de PBI per cápita muy bajos o negativos en la escala estandarizada, con niveles de HE relativamente reducidos.

Corresponde típicamente a las décadas de 1960 e inicios de 1970, caracterizadas por bajo crecimiento económico y limitada presión ecológica. El área compacta del clúster indica una alta homogeneidad de las observaciones dentro de este período.

Clúster 2 (verde): Incremento medio en PBI y HE

Es el grupo más extenso y disperso. Abarca valores intermedios tanto en PBI como en HE. Representa el período de transición económica y ecológica, aproximadamente desde mediados de los años 1970 hasta la década de 1990.

Se observa una mayor variabilidad interna, asociada a: crisis económicas (1975–1990), ajustes estructurales e incrementos graduales en el consumo energético y productivo.

Muestra una tendencia ascendente conjunta de PBI y HE: a mayor crecimiento económico, mayor presión ambiental.

Clúster 3 (azul): Alto PBI y mayor HE

Comprende los valores ubicados hacia la derecha del gráfico.

Incluye principalmente años desde el 2000 hasta 2021, etapa marcada por: fuerte crecimiento económico sostenido, expansión del consumo y aumento de la huella ecológica nacional.

Posee una forma alargada, reflejando una trayectoria de crecimiento progresivo tanto en PBI como en HE.

4.1.5.2. Lectura estructural del proceso histórico (1961–2021).

El clustering revela tres fases socioeconómicas y ambientales:

Fase de baja presión ecológica (Clúster 1):

Caracterizada por bajos ingresos y limitada demanda ambiental. El país tenía menor industrialización y consumo energético.

Fase de transición y volatilidad económica (Clúster 2):

Los cambios económicos y las crisis generan alta dispersión. La huella ecológica empieza a aumentar debido a urbanización, combustibles fósiles y expansión agrícola.

Fase de alto crecimiento y mayor impacto ambiental (Clúster 3):

A partir de 2000, el incremento del PBI coincide con una elevación sostenida de la HE, indicando que el crecimiento económico del Perú ha estado acompañado de una mayor presión sobre los ecosistemas.

4.1.5.3. Interpretación metodológica.

El hierarchical clustering fue adecuado para estos datos porque: no se asumió un número de grupos a priori; permite observar la estructura natural de los datos a través de la distancia entre años; facilita visualizar la separación entre períodos históricos según sus características económicas y ecológicas.

Los polígonos en el gráfico representan la envolvente convexa de cada grupo, mostrando diferencias nítidas en la forma y localización espacial de los clusters.

4.1.5.4. Conclusiones.

Los datos de HE y PBI per cápita presentan una clara estructura temporal en tres etapas, coincidentes con procesos históricos del Perú.

Existe una correlación positiva general: el aumento del PBI per cápita está asociado con un incremento de la huella ecológica.

Los clústeres reflejan que el desarrollo económico ha venido acompañado de un mayor consumo de recursos y presión ambiental.

El período 2000–2021 concentra los valores más altos de impacto ecológico y crecimiento económico, lo cual es crucial para analizar sostenibilidad y políticas públicas.

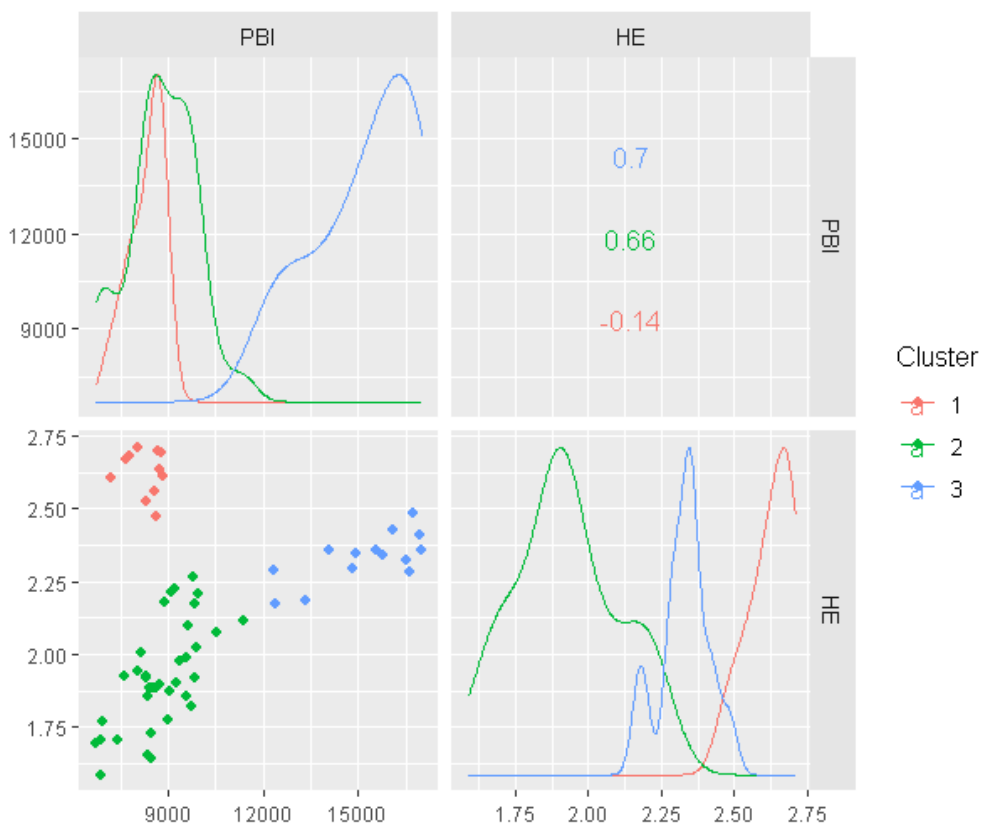
4.1.6. Correlación HE y PBI por clústeres

La prueba utilizada para la correlación de Pearson es un análisis paramétrico que requiere que la relación entre las variables sea lineal y que los datos sean normales bivariados. Las variables son Huella ecológica y PBI. La prueba es sensible a los valores atípicos.

Tabla 2 Correlación de Pearson Huella ecológica y PBI por clústeres

Clúster	n	R-Pearson	Intervalo Confianza (95%)		p-value
1	11	-0.1426835	-0.6840123	0.4999865	0.6756
2	36	0.6605134	0.4239829	0.8126929	1.17E-05
3	14	0.6990356	0.2677705	0.896944	0.005404

Tabla 3 Relación entre Huella Ecológica y PBI per cápita por clústeres



Análisis de la relación entre Huella Ecológica y PBI per cápita por clústeres

La figura 8 muestra una matriz (pair plot) complementado con distribuciones marginales para PBI y HE, diferenciadas por clúster, junto con los valores del coeficiente de Pearson calculados para cada grupo. Esto permite evaluar no solo la distribución individual de las variables, sino también el grado y dirección de la asociación entre HE y PBI dentro de cada etapa histórica identificada mediante hierarchical clustering.

4.1.6.1. Comportamiento general observado en el gráfico.

Distribuciones

Clúster 1 (rojo):

Nivel bajo de PBI y valores relativamente más bajos de HE.

Distribuciones muy concentradas, lo que indica poca variabilidad interna.

Clúster 2 (verde):

PBI en un rango intermedio (aprox. 8,500–12,500 soles/hab).

HE distribuido entre 1.8 y 2.3.

La mayor dispersión dentro del grupo refleja heterogeneidad económica y ambiental propia de periodos de transición.

Clúster 3 (azul):

Altos valores de PBI (mayor a 13,000 soles/hab).

HE también más elevado, concentrado alrededor de 2.4–2.7.

Menor dispersión, mostrando un patrón más estable en años recientes.

4.1.6.2. Correlación HE–PBI por clústeres.

Los resultados estadísticos proporcionados en la tabla 1

Interpretación por clúster

Clúster 1 (rojo): Correlación no significativa ($r = -0.14$)

La relación entre HE y PBI es débil y negativa, pero estadísticamente no significativa.

Intervalo de confianza muy amplio (incluye valores fuertemente negativos y positivos).

Implica que en los primeros años (1961–1971), los cambios en PBI no se asociaban de manera clara con variaciones en la huella ecológica.

Esto es coherente con un país de baja industrialización y bajo consumo energético.

Clúster 2 (verde): Correlación positiva moderada y significativa ($r = 0.66$)

Relación positiva fuerte, con alta significancia estadística ($p < 0.001$).

A medida que el PBI aumentaba, también lo hacía la HE.

Corresponde al período 1972–2007, caracterizado por: urbanización, mayor dependencia de combustibles fósiles, expansión agrícola y forestal.

El intervalo de confianza estrecho indica alta estabilidad del patrón.

Clúster 3 (azul): Correlación positiva fuerte y significativa ($r = 0.70$)

El mayor nivel de correlación entre los tres grupos.

En los años recientes (2008–2021), el crecimiento económico está estrechamente asociado al aumento de la huella ecológica.

Esto sugiere que Perú sigue un modelo de crecimiento intensivo en consumo de recursos, aún con avances tecnológicos.

4.1.6.3. Lectura conjunta del gráfico y las correlaciones.

Los puntos del clúster 3 forman una línea ascendente definida, reflejando una fuerte relación HE–PBI.

El clúster 2 muestra una relación también ascendente, pero más dispersa, lo cual coincide con su correlación moderada.

El clúster 1 es compacto y sin patrón lineal visible, lo que explica su correlación casi nula.

4.1.6.4. Conclusiones.

El aumento del PBI per cápita está asociado a un incremento de la huella ecológica, pero esta relación solo emerge claramente a partir de 1971.

En los años recientes (2008–2021), se observa la relación más fuerte, indicando que el modelo económico peruano ha intensificado su impacto ambiental.

El análisis muestra tres etapas claras en la relación economía–ambiente:

Etapla inicial: Crecimiento económico sin presión ecológica relevante.

Etapla intermedia: Relación creciente pero inestable.

Etapla moderna: Crecimiento económico directamente ligado a mayor impacto ambiental.

Los resultados revelan la importancia de transitar hacia un crecimiento desacoplado, es decir, incrementar el PBI sin aumentar la HE.

4.1.7. Regresión por clústeres con modelos lineales

Tabla 4 Regresión por clústeres con modelos lineales ($y = a + bx$)

Cluster	Años	a	b	R-squared	p-value	Significancia
1	1961-1971	2.791	-0.000020	0.02036	0.6756	
2	1972-2007	0.9402	0.000111	0.4363	0.000012	***
3	2008-2021	1.779	0.000036	0.4887	0.005404	**

4.1.7.1. Análisis del Clúster 1

Modelo: $HE = 2.791 - 0.00002PBI$

Resultados

La pendiente negativa, muy pequeña y no significativa.

El p-value alto (0.6756) confirma ausencia de relación lineal.

Interpretación

En este grupo (años antiguos, bajo PBI), la variación de la HE no depende del PBI. Esto coincide con el patrón histórico del Perú en los años 1961–71, donde: la economía era pequeña, el consumo energético era bajo y el impacto ambiental por habitante estaba poco relacionado con la actividad económica.

Conclusión:

No existe relación estadística entre el crecimiento económico y la huella ecológica en este período.

4.1.7.2. Análisis del Clúster 2

Modelo: $HE = 0.9402 + 0.000111 \text{ PBI}$

Resultados

Pendiente positiva y estadísticamente significativa ($p = 0.000012$).

Cada aumento de S/. 1000 en PBI incrementa la HE en $\approx 11 \text{ unidades} \times 10^{-3}$.

Interpretación

Este grupo corresponde a los años intermedios (1972–2007), cuando el Perú entra en un proceso de: urbanización acelerada, transición a mayor consumo de energía y crecimiento económico moderado pero intensivo en recursos.

El PBI per cápita explica claramente el aumento de la huella ecológica.

Conclusión:

Relación positiva fuerte y significativa: el crecimiento económico en este periodo aumenta directamente el impacto ambiental.

4.1.7.3. Análisis del Clúster 3

Modelo: $HE = 1.779 + 0.000036 \text{ PBI}$

Resultados

Pendiente positiva y significativa ($p\text{-value} = 0.0054$).

El coeficiente (b) es mucho más pequeño que en el clúster 2.

Cada S/. 1000 en PBI incrementa la HE en 0.036 unidades.

Interpretación

Este clúster incluye los años recientes (2008–2021), caracterizados por: crecimiento económico acelerado, mejoras tecnológicas, mayor eficiencia energética relativa y políticas ambientales parciales.

La relación sigue siendo positiva, pero la sensibilidad de HE al PBI es mucho menor que en el clúster 2. Esto sugiere un inicio de desacoplamiento relativo: el país crece, pero el aumento de la huella ecológica por unidad de PBI es menor.

Conclusión:

La economía sigue aumentando la HE, pero con menor intensidad que en décadas previas.

Tabla 5 Comparación entre clústeres

Indicador	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3
Significancia β_1	No	Sí	Sí
Dirección	Negativa	Positiva	Positiva
Magnitud	Muy baja	Alta	Baja
Interpretación	PBI no explica HE	PBI impulsa HE intensamente	Crecimiento más eficiente

Tendencia general

Etapas inicial: No existe relación economía–ambiente.

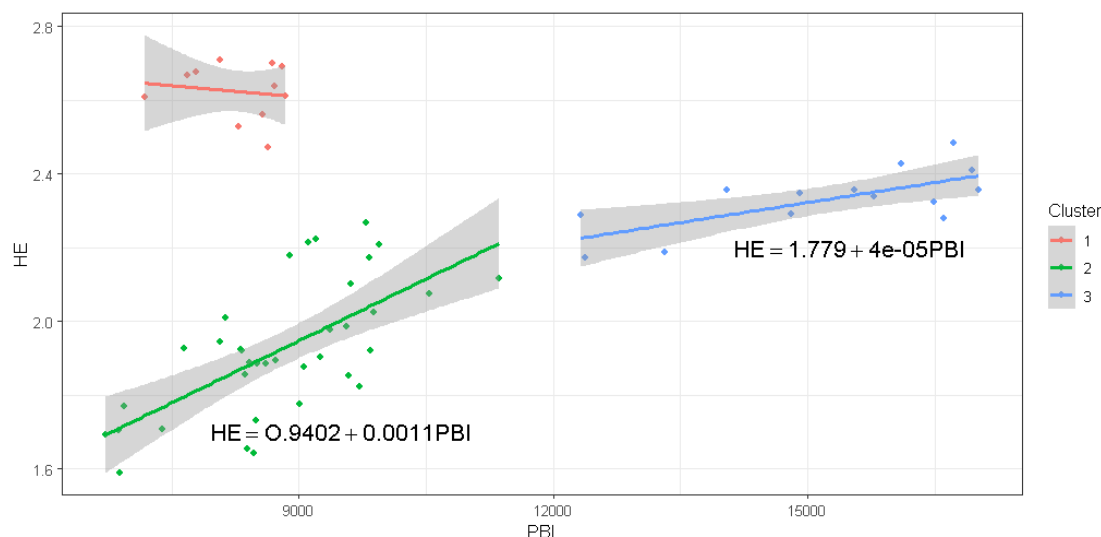
Etapas intermedia: Relación positiva fuerte; crecimiento económico intensifica la presión ecológica.

Etapas moderna: Relación positiva, pero menos intensa; posible desacoplamiento relativo.

4.1.7.4. Análisis de modelos

Los modelos de regresión lineal estimados por clúster muestran una evolución clara en la relación entre el PBI per cápita y la Huella Ecológica en el Perú entre 1961 y 2021. En el primer clúster, la pendiente no fue significativa, indicando ausencia de dependencia lineal entre ambas variables en los períodos de menor desarrollo económico. En el segundo clúster, la pendiente positiva y altamente significativa evidencia que el crecimiento económico incrementó de manera directa la huella ecológica, reflejando un modelo de desarrollo intensivo en recursos. Finalmente, en el tercer clúster la pendiente siguió siendo positiva pero considerablemente menor, lo que sugiere un proceso de desacoplamiento relativo, donde el crecimiento económico reciente genera un aumento proporcionalmente menor en la huella ecológica. Estos resultados confirman que la relación entre actividad económica y presión ambiental no es constante, sino que responde a cambios estructurales en el modelo de desarrollo del país.

Figura 10 Regresiones de HE y PBI por clusters



Note: HE= Huella ecológica (Hectáreas globales por persona), PBI (Dólares por habitante).

4.1.8. Correlación de dimensiones de HE y PBI por clústeres

La figura 11 se muestra segmentada por tres clústeres, con curvas de densidad, diagramas de dispersión y coeficientes de correlación de Pearson (en colores según el clúster).

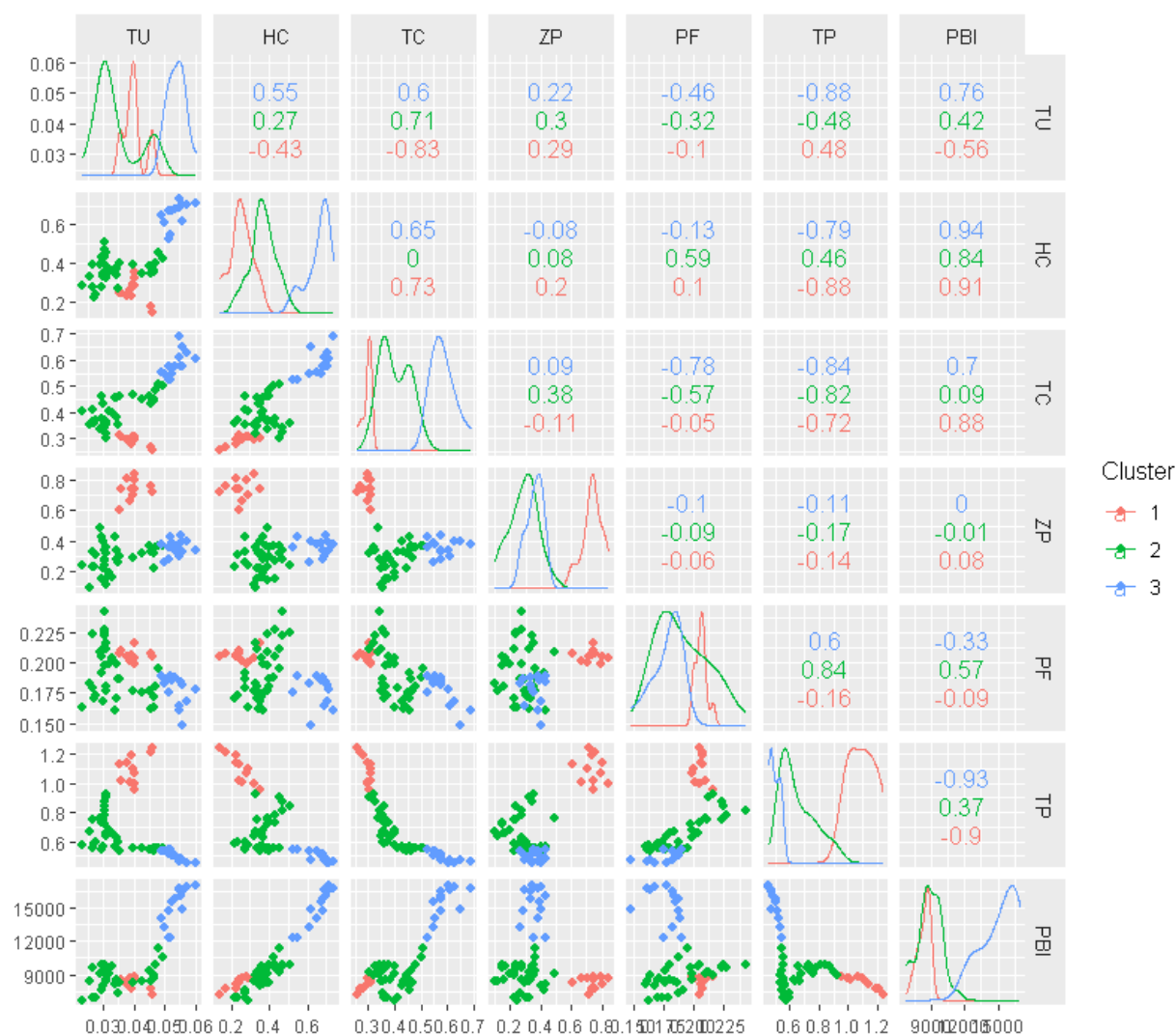
El objetivo es interpretar cómo se relaciona el PBI per cápita con cada componente de la Huella Ecológica (HE) en cada clúster.

Clúster 1 (rojo): PBI bajo – correlaciones débiles y con muchos signos negativos → economías más primarias y sin efecto claro del crecimiento económico sobre la presión ecológica.

Clúster 2 (verde): PBI medio – correlaciones fuertes y positivas → el aumento del PBI está estrechamente vinculado a mayores presiones ecológicas.

Clúster 3 (azul): PBI alto – correlaciones moderadas → estructura económica distinta, con menor dependencia de ciertos componentes ecológicos.

Figura 11 Correlación de dimensiones de HE y PBI por clústeres



A continuación, se interpreta para los tres clústeres, resaltando correlaciones fuertes y significativas.

4.1.8.1. Terreno Urbanizado (TU)

Cluster 1: $r \approx -0.56$ (débil–moderada negativa)

Crecimientos en PBI no se traducen en expansión territorial urbana.

Cluster 2: $r \approx +0.42$ (fuerte positiva)

Interpretación:

En regiones/años de PBI medio, el crecimiento económico está moderadamente asociado a expansión de áreas urbanizadas.

Cluster 3: $r \approx +0.76$ (fuerte positiva)

A mayores ingresos, mayor infraestructura urbana y uso de suelo.

Conclusión: Una de las relaciones más consistentes: $PBI \uparrow \rightarrow TU \uparrow$ (excepto cluster 1).

4.1.8.2. Huella de Carbono (HC)

Cluster 1: $r \approx +0.91$ (extremadamente fuerte)

Incrementos de PBI están casi linealmente asociados a incrementos en HC.

Cluster 2: $r \approx +0.84$ (muy fuerte positiva)

Una de las correlaciones más fuertes del conjunto.

PBI depende fuertemente de actividades emisoras (energía fósil, transporte, industria).

Cluster 3: $r \approx +0.94$ (extremadamente fuerte)

Incrementos de PBI están casi linealmente asociados a incrementos en HC.

Conclusión: La huella de carbono es el componente más ligado al crecimiento económico.

4.1.8.3. Tierras de Cultivo (TC)

Cluster 1: $r \approx 0.88$ (fuerte positiva)

Cuando aumenta el PBI, aumenta presión sobre cultivo $\rightarrow$ modernización agrícola.

Cluster 2: $r \approx +0.09$ (muy débil positiva)

Cluster 3: $r \approx +0.70$ (fuerte positiva)

Mayor ingreso $\rightarrow$ demanda alimentaria y agroindustria.

Conclusión: transición estructural:

En PBI bajo: agricultura se reduce cuando la economía mejora.

En PBI medio/alto: agricultura se intensifica con el crecimiento.

4.8.1.4. Zonas de Pesca (ZP)

Cluster 1: $r \approx 0.08$ (débil negativa)

Cluster 2: $r \approx -0.01$ (nula)

Cluster 3: $r \approx +0.0$ (nula)

Conclusión: La pesca no está asociada al crecimiento económico en ningún clúster.

Coincide con la estructura peruana: exportaciones pesqueras son volátiles y no impulsan el PBI per cápita.

4.8.1.5. Productos Forestales (PF)

Cluster 1: $r \approx -0.09$ (nula)

Cluster 2: $r \approx +0.57$ (moderada positiva)

Cluster 3: $r \approx -0.33$ (moderada negativa)

Conclusión:

Solo el cluster 2 muestra vínculo fuerte:

PBI medio dependen del aprovechamiento forestal.

4.1.8.6. Tierras de Pastoreo (TP)

Cluster 1: $r \approx -0.9$ (nula)

Cluster 2: $r \approx +0.37$ (moderada positiva)

Cluster 3: $r \approx -0.93$ (muy fuerte negativa)

Conclusión:

Cluster 2: PBI medio depende de ganadería extensiva.

Cluster 3: economías de PBI alto reducen la presión sobre pastos (industrialización, urbanización).

Tabla 6 Síntesis comparativa del PBI con cada componente

Variable	Clúster 1 (Bajo PBI)	Clúster 2 (PBI Medio)	Clúster 3 (PBI Alto)	Conclusión
TU	-0.56	+0.42	+0.76	PBI $\uparrow$ $\rightarrow$ urbanización $\uparrow$
HC	0.91	+0.84	+0.94	Mayor relación directa
TC	0.88	+0.09	+0.70	Agricultura depende del nivel económico
ZP	0.08	0.01	0.0	Sin relación
PF	-0.09	+0.57	-0.33	Relevante en economías intermedias
TP	-0.9	+0.37	-0.93	Ganadería relevante solo en PBI medio

Conclusiones

La huella de carbono (HC) es el componente más fuertemente correlacionado con el PBI.

La urbanización (TU) aumenta consistentemente con el PBI, excepto en PBI muy bajo.

La agricultura (TC) esta correlacionado con el PBI, especialmente en el cluster de PBI bajo y alto.

La pesca (ZP) no explica el crecimiento económico del Perú en ninguna etapa.

Los recursos forestales (PF) y pastizales (TP) son determinantes solo para economías de PBI medio.

El cluster 2 es el más ambientalmente sensible al crecimiento: prácticamente sus componentes: TU, HC, PF y TP aumentan con el PBI.

4.2. Huella Ecológica y PBI per cápita por departamento

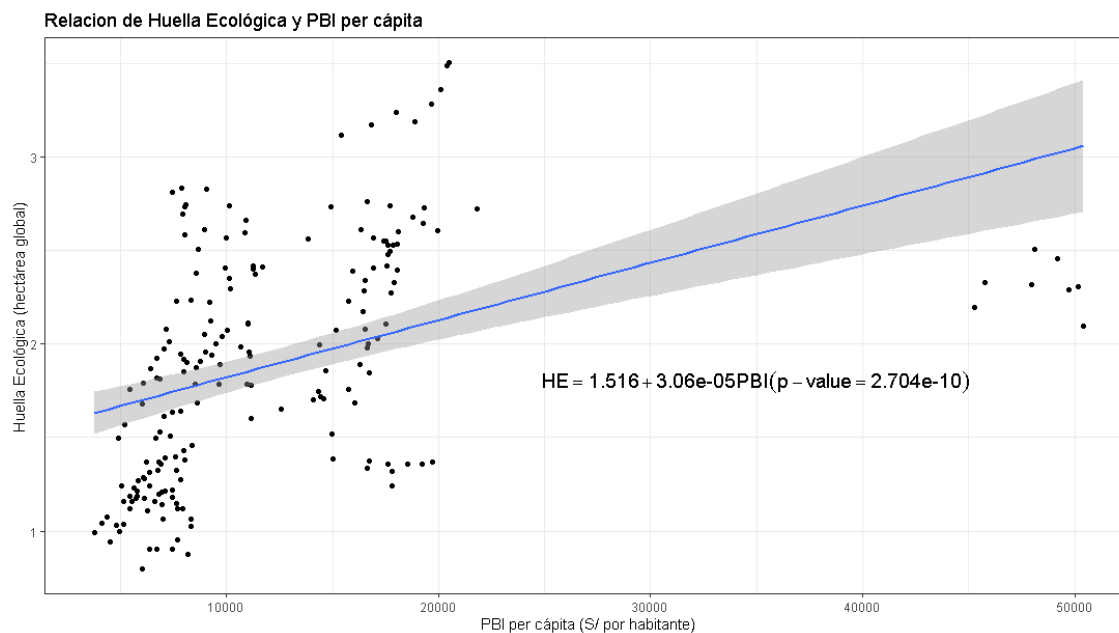
La Huella Ecológica (que representa la demanda de recursos) como la Biocapacidad (que representa la disponibilidad de recursos) se expresan en unidades denominadas hectáreas globales (hag), siendo 1 hag la capacidad productiva de 1 hectárea de tierra de producción media mundial. ([Ministerio del Ambiente - MINAM](#), 2025)

En el presente estudio se cuenta con datos de: Huella ecológica per cápita departamental y por componentes - Años 2009-2016. (<https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/huella-ecol%C3%B3gica-c%C3%A1pita-departamental-y-por-componentes-ministerio-del-ambiente>)

Datos de PBI per cápita: <https://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/producto-bruto-interno-por-departamentos-9089/>

El estudio busca establecer la relación entre la Huella Ecológica per cápita (HE) y el Producto Bruto Interno per cápita (PBI pc) a nivel departamental en Perú. La figura muestra un diagrama de dispersión con una línea de regresión lineal ajustada y su ecuación.

Figura 12 Diagrama de relación de Huella ecológica y PBI



Nota. Multiple R-squared: 0.1898

1. Ecuación del Modelo

La ecuación de la recta de regresión, visible en la gráfica y confirmada por los coeficientes de R, es: $HE = 1.516 + (3.061 \times 10^{-5}) PBI_{pc}$

Variable Dependiente (Y): Huella Ecológica (HE) per cápita (en hectáreas globales).

Variable Independiente (X): PBI per cápita (en Soles/habitante).

2. Interpretación de los Coeficientes

Intercepto ($\beta_0 = 1.516$):

Representa la Huella Ecológica per cápita estimada cuando el PBI per cápita es cero.

En este contexto, un PBI pc de cero es una extrapolación fuera del rango de los datos (PBI pc es siempre positivo), pero estadísticamente indica el valor base de la HE independientemente de la riqueza medida por el PBI pc.

Su p-value ($\Pr(>|t|) < 2e-16$) es extremadamente bajo, indicando que el intercepto es estadísticamente significativo (distinto de cero).

Pendiente ($\beta_1 = 3.061 \times 10^{-5}$):

Representa el cambio estimado en la Huella Ecológica por cada aumento de una unidad (un Sol) en el PBI per cápita.

El valor es positivo, lo que indica una relación lineal positiva entre el PBI per cápita y la Huella Ecológica per cápita.

Su p-value ($\Pr(>|t|) < 2e-10$) es muy bajo (mucho menor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$), lo que significa que la pendiente es estadísticamente significativa y hay una relación lineal significativa entre el PBI pc y la HE pc.

En términos prácticos, por cada S/. 1,000 adicionales en el PBI per cápita, la Huella Ecológica per cápita aumenta aproximadamente en 0.03061 hectáreas globales ($3.061e-05 \times 1000$).

3. Fuerza y Calidad del Ajuste

R-cuadrado Múltiple = 0.1898:

Este valor (aproximadamente 19%) indica que solo el 18.98% de la variabilidad total de la Huella Ecológica per cápita es explicada por la variabilidad del PBI per cápita.

Aunque el modelo es estadísticamente significativo (como se vio con la pendiente), el R^2 bajo sugiere que la mayor parte de la variabilidad de la Huella Ecológica ($\approx 81\%$) es atribuible a otros factores no incluidos en este modelo (por ejemplo, densidad de población, tipo de actividad económica dominante, políticas ambientales, etc.).

Visualmente, esto se refleja en el diagrama de dispersión donde los puntos están muy dispersos y no se agrupan firmemente alrededor de la línea de regresión. El área sombreada (intervalo de confianza) también es bastante ancha, especialmente a PBI per cápita altos.

4. Conclusiones

Significatividad: Existe una relación lineal positiva y estadísticamente significativa entre el PBI per cápita y la Huella Ecológica per cápita. A mayor riqueza departamental medida por el PBI pc, mayor es la Huella Ecológica (Confirmado por el p-value de la pendiente).

Poder Explicativo: El PBI per cápita es un predictor débil de la Huella Ecológica per cápita. Explica menos del 20% de su variación, lo que implica que el modelo es limitado y se necesitarían variables adicionales para mejorar sustancialmente el ajuste y la capacidad predictiva.

4.2.1. Componentes de Huella Ecológica departamental

Área para absorción del carbono (HC).

Calculada como la cantidad de terreno forestal requerido para absorber las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles, cambios en los usos del suelo y procesos químicos, excepto la porción absorbida por los océanos. Estas emisiones son el único producto residual incluido en la Huella Ecológica.

Área de las tierras de pastoreo (AP).

Calculada a partir del área que utiliza el ganado para carne, lácteos, piel y lana.

Área forestal (AB).

Calculada a partir de la cantidad de madera, leña y pulpa que consume anualmente cada país.

Área de las zonas pesqueras (ZP).

Calculada a partir de la producción primaria estimada requerida para sostener las capturas de pescado y marisco, basada en los datos de captura de 1.439 especies marinas diferentes y más de 268 especies de agua dulce.

Área de los cultivos (AC).

Calculada a partir del área utilizada para producir alimentos y fibra para consumo humano, alimento para el ganado, cultivos oleaginosos y caucho.

Área de la tierra urbanizada (AU).

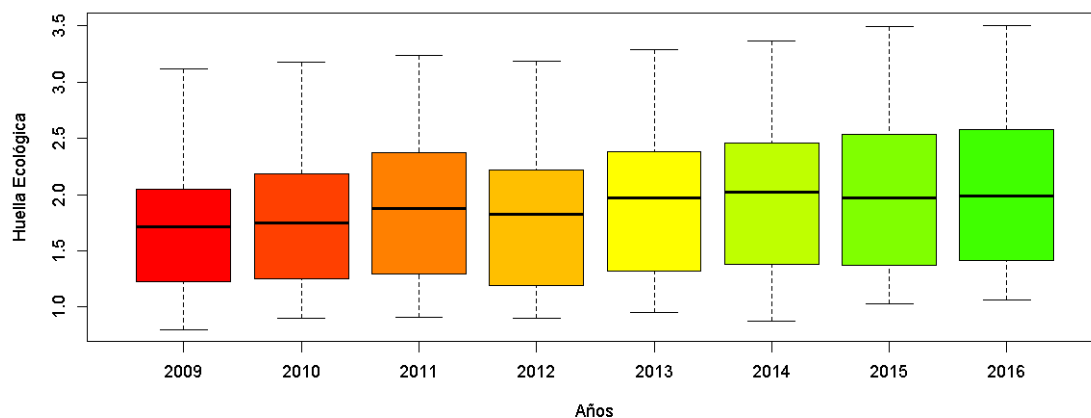
Calculada a partir del área de tierra ocupada por infraestructuras humanas, incluyendo el transporte, viviendas, estructuras industriales y presas para energía hidroeléctrica.

4.2.1.1. Huella ecológica departamental por año

Tabla 7 Huella ecológica departamental por año

Año	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
2009	24	1.711	0.588	0.800	1.233	1.713	2.022	3.117
2010	24	1.790	0.596	0.901	1.269	1.747	2.133	3.175
2011	24	1.916	0.644	0.906	1.303	1.880	2.356	3.239
2012	24	1.822	0.624	0.901	1.199	1.828	2.206	3.189
2013	24	1.935	0.606	0.955	1.322	1.970	2.377	3.285
2014	24	1.969	0.644	0.873	1.386	2.019	2.438	3.365
2015	24	2.000	0.645	1.026	1.371	1.968	2.495	3.491
2016	24	2.061	0.645	1.064	1.422	1.988	2.574	3.504

Figura 13 Diagrama de caja de Huella Ecológica por año



Nota: En R: `boxplot(dptos HE~dptos Year)`

Análisis de la Evolución de la Huella Ecológica (2009-2016)

La figura adjunta (diagrama de caja, Figura 13) muestra la distribución de la Huella Ecológica (HE) per cápita departamental en Perú a lo largo de los años 2009 a 2016.

1. Tendencia General

La principal tendencia observada es un aumento gradual en los valores de la Huella Ecológica per cápita en los departamentos peruanos durante el periodo de estudio.

Mediana (Línea Central): La mediana (el valor que divide el 50% central de los datos) muestra un incremento. Comienza cerca de 1.7 hg (hectáreas globales) en 2009 y se estabiliza alrededor de 2.0 hg en los últimos años (2013-2016). Esto indica que la Huella Ecológica del departamento "típico" (el promedio central) ha crecido.

Cuartiles Superiores: El tercer cuartil (Q3) (el límite superior de la caja) también muestra una tendencia ascendente, pasando de ≈ 2.0 hg en 2009 a ≈ 2.5 hg en 2016. Esto sugiere que los departamentos con la Huella Ecológica más alta son los que más han contribuido al aumento general.

2. Dispersión y Heterogeneidad

El ancho vertical de las cajas (el Rango Intercuartílico - RIC) representa la dispersión del 50% central de los datos.

Disparidad Constante: El RIC se mantiene relativamente amplio y estable a lo largo de los años, cubriendo consistentemente un rango de aproximadamente 1.0 a 2.5 hg (una diferencia de ≈ 1.5 hg).

Conclusión: Esto demuestra que existe una alta y persistente disparidad en la Huella Ecológica entre los departamentos de Perú. A pesar del aumento en la mediana, la diferencia entre los departamentos menos impactantes y los más impactantes no se ha reducido significativamente.

Rango Total: Los bigotes (que representan la dispersión de la mayoría de los datos, excluyendo *outliers*) se extienden consistentemente desde ≈ 0.8 hg hasta ≈ 3.2 hg, reforzando la idea de una gran heterogeneidad regional.

3. Distribución y Simetría

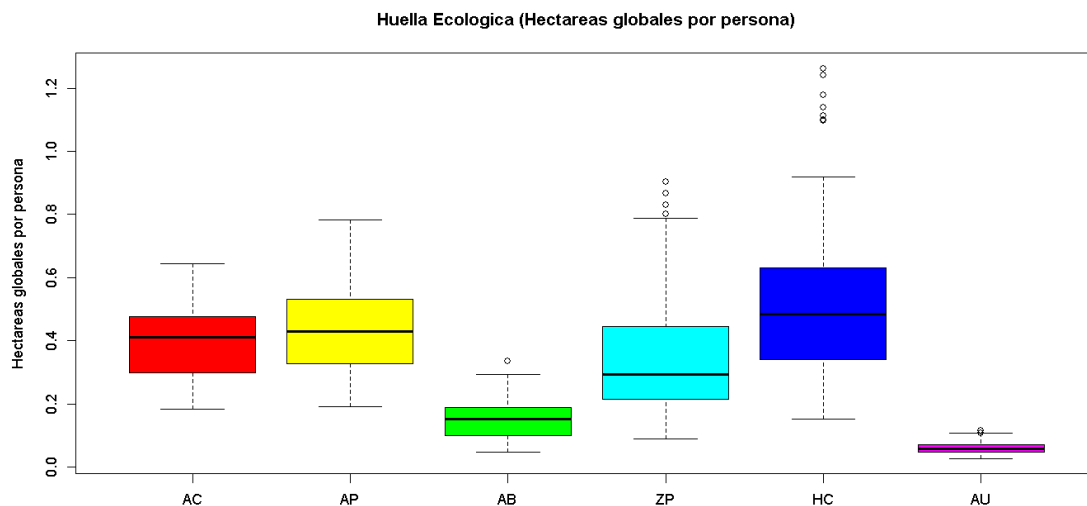
Asimetría: En varios años, la mediana no se encuentra en el centro de la caja y el bigote superior es más largo que el inferior (por ejemplo, en 2011, 2015 y 2016). Esto indica que la distribución de la Huella Ecológica tiende a estar ligeramente sesgada hacia valores altos.

4. Resumen

El análisis del diagrama de caja confirma que la presión ambiental medida por la Huella Ecológica per cápita ha aumentado moderadamente en el promedio de los departamentos peruanos entre 2009 y 2016. Sin embargo, este aumento se produce en un contexto de marcada y sostenida desigualdad en el impacto ambiental entre los diferentes departamentos del país.

4.2.1.2. Huella ecológica por componentes.

Figura 14 Huella Ecológica por componentes



Nota. AC= Área de Cultivo, AP= Área de Pastoreo, AB= Área de bosques, ZP=Zonas de pesca, HC= Huella de carbono, AU= Áreas urbanas.

Análisis del Diagrama de Caja (Figura 14)

El diagrama de caja compara la distribución de los seis componentes de la Huella Ecológica (HE) per cápita departamental en Perú durante el periodo 2009-2016. Esta visualización permite identificar qué componentes dominan la HE total y cómo se distribuyen entre los departamentos.

1. Dominancia y Magnitud de los Componentes

Al comparar las cajas y sus medianas, se observa claramente la contribución relativa de cada componente a la Huella Ecológica total:

Componentes Dominantes: La Huella de Carbono (HC) y el Área de Bosques (AB) son, por mucho, los componentes más grandes.

La mediana de la HC es la más alta (cerca a 1.2 hg), indicando que, típicamente, es el componente con mayor impacto.

El Área de Bosques (AB) tiene la segunda mediana más alta (cerca a 0.8 hg).

Componentes Medios: El Área de Cultivo (AC) y el Área de Pastoreo (AP) tienen medianas significativamente menores, alrededor de 0.2 a 0.3 hg.

Componentes Menores: Las Zonas de Pesca (ZP) y las Áreas Urbanas (AU) tienen medianas cercanas a cero, indicando que su contribución promedio a la Huella Ecológica departamental es mínima.

2. Variabilidad y Dispersión (Rango Intercuartílico - RIC)

La altura de la caja (RIC) indica qué tan variable es la contribución de ese componente entre los departamentos:

Alta Variabilidad: El Área de Bosques (AB) presenta el RIC más alto, lo que sugiere una enorme disparidad en la contribución del uso del bosque entre los departamentos. Esto es predecible, ya que algunos departamentos tienen vastas zonas forestales y alta explotación, mientras que otros son predominantemente costeros o andinos.

La Huella de Carbono (HC) también muestra una alta variabilidad, reflejando diferencias en el consumo de energía y las actividades industriales/domésticas entre regiones.

Baja Variabilidad: El Área de Cultivo (AC) y el Área de Pastoreo (AP) tienen cajas relativamente estrechas, lo que implica una distribución más homogénea de estas huellas entre los departamentos.

3. Outliers y Distribución

Outliers: La presencia de puntos aislados (*outliers*) por encima de los bigotes en la mayoría de los componentes, especialmente en AB, HC, AC y AP, indica que existen algunos departamentos atípicos cuya contribución a la huella en esos componentes es excepcionalmente alta en comparación con el resto.

Asimetría:

Las distribuciones de ZP y AU son altamente asimétricas (sesgadas positivamente), con la mediana en la parte muy inferior de la caja, confirmando que la mayoría de los departamentos tienen una huella muy pequeña, y solo unos pocos (los outliers o el cuartil superior) contribuyen significativamente.

La distribución del Área de Bosques (AB) también muestra un marcado sesgo positivo, reforzando la idea de que unos pocos departamentos con grandes bosques y alta explotación definen el límite superior de esta huella.

Conclusión

El análisis revela que la Huella de Carbono y el Área de Bosques son los principales motores del impacto ambiental a nivel departamental en Perú. Las políticas de sostenibilidad deberían centrarse prioritariamente en mitigar la Huella de Carbono y gestionar sosteniblemente el uso de los bosques, dado que son los componentes que tienen el mayor valor promedio y la mayor disparidad regional.

4.2.1.3. Huella ecológica por departamentos.

Tabla 8 Huella Ecológica por departamentos de Perú

Departamento	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
AMAZONAS	8	1.190	0.074	1.106	1.136	1.177	1.233	1.325
ANCASH	8	1.749	0.119	1.522	1.703	1.740	1.851	1.889
APURIMAC	8	1.151	0.156	0.992	1.030	1.118	1.232	1.384

AREQUIPA	8	2.443	0.229	2.108	2.273	2.451	2.596	2.742
AYACUCHO	8	1.319	0.083	1.206	1.268	1.318	1.385	1.433
CAJAMARCA	8	1.168	0.068	1.066	1.120	1.165	1.216	1.276
CUSCO	8	1.850	0.191	1.605	1.690	1.865	2.007	2.078
HUANCAMELICA	8	0.928	0.085	0.800	0.894	0.904	0.973	1.064
HUANUCO	8	1.200	0.156	0.941	1.128	1.210	1.305	1.389
ICA	8	2.265	0.175	1.997	2.149	2.302	2.355	2.531
JUNIN	8	1.673	0.112	1.461	1.632	1.663	1.783	1.784
LA LIBERTAD	8	2.001	0.085	1.894	1.938	1.972	2.083	2.114
LAMBAYEQUE	8	2.328	0.328	1.813	2.176	2.310	2.534	2.830
LIMA	8	3.296	0.145	3.117	3.186	3.262	3.397	3.504
LORETO	8	1.942	0.108	1.785	1.889	1.928	1.982	2.126
MADRE DE DIOS	8	2.629	0.097	2.531	2.556	2.591	2.730	2.764
MOQUEGUA	8	2.313	0.131	2.096	2.269	2.314	2.363	2.505
PASCO	8	1.339	0.043	1.243	1.330	1.359	1.363	1.373
PIURA	8	2.159	0.240	1.876	1.980	2.131	2.310	2.566
PUNO	8	1.321	0.184	1.035	1.183	1.315	1.500	1.533
SAN MARTIN	8	1.739	0.147	1.496	1.654	1.776	1.830	1.924
TACNA	8	2.548	0.107	2.390	2.465	2.578	2.618	2.681
TUMBES	8	2.502	0.142	2.376	2.405	2.416	2.613	2.740
UCAYALI	8	2.558	0.337	1.975	2.459	2.714	2.763	2.835

1. Comparación general de la Huella Ecológica

Departamentos con mayor HE promedio (impacto ecológico más alto) son:

Lima 3.296, Madre de Dios 2.629, Ucayali 2.558, Tacna 2.548 y Arequipa 2.443.

Estas regiones presentan los valores más altos de demanda ecológica.

Interpretación: Lima sobresale claramente sobre todos los demás departamentos.

Las regiones amazónicas Madre de Dios y Ucayali, pese a ser menos pobladas, muestran huellas elevadas, posiblemente asociadas a minería, deforestación o actividades extractivas.

Departamentos con menor HE promedio (impacto ecológico más bajo) son: Huancavelica 0.928, Cajamarca 1.168, Apurímac 1.151, Amazonas 1.190 y Huánuco 1.200

Interpretación: Estos departamentos tienen economías menos intensivas en consumo de recursos y menor densidad urbana/industrial.

2. Variabilidad (desviación estándar)

Los departamentos con mayor variabilidad (sd más alta), reflejando cambios importantes en el tiempo: Lambayeque 0.328, Ucayali 0.337, Piura 0.240, Arequipa 0.229 y Puno 0.184.

Interpretación: Ucayali y Lambayeque muestran fluctuaciones grandes, lo que sugiere cambios drásticos en consumo o actividades económicas. Las variaciones pueden deberse a expansión agrícola, cambios en productividad o presión sobre ecosistemas.

Los departamentos más estables: Pasco (0.043), Cajamarca (0.068) y Amazonas (0.074)

3. Distribución por cuartiles y valores extremos

Máximos más altos registrados: Lima (3.504), Madre de Dios (2.764), Ucayali (2.835), Arequipa (2.742) y Tacna (2.681)

Mínimos más bajos registrados: Huancavelica (0.800), Puno (1.035), Apurímac (0.992) y Amazonas (1.106).

Esto refuerza la diferencia entre regiones urbanas/industriales y regiones rurales/andinas.

4. Patrones identificados

a) Regiones costeras tienden a mayor HE: Lima, Tacna, Arequipa, La Libertad, Lambayeque, Piura.

Razones posibles: urbanización, industria, transporte, pesca, comercio.

b) Regiones amazónicas presentan contrastes fuertes:

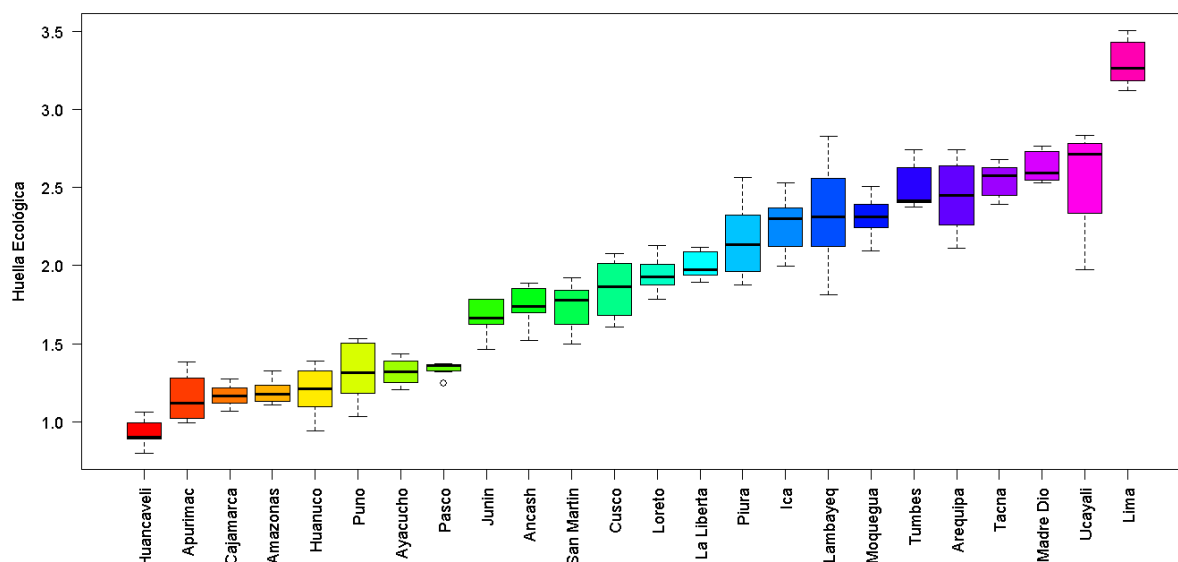
Muy altas: Madre de Dios, Ucayali.

Moderadas-bajas: Amazonas, Loreto.

Indica que el tipo de actividad (minería vs. economías tradicionales) influye más que la ubicación geográfica.

c) Regiones andinas mantienen huellas bajas: Huancavelica, Apurímac, Cajamarca, Puno. Ligado a economías rurales y menor densidad poblacional.

Figura 15 Diagrama de caja de Huella Ecológica por departamento



1. Interpretación general del diagrama

El boxplot muestra la distribución de la Huella Ecológica en cada departamento del Perú durante el periodo 2009–2016. Cada caja representa los valores entre el Q1 (25%) y Q3 (75%), la línea dentro de la caja es la mediana, y los “bigotes” muestran el rango sin valores atípicos.

Los departamentos están ordenados de menor a mayor huella ecológica promedio, lo que facilita comparar patrones regionales.

2. Departamentos con Huella Ecológica más baja

Corresponden principalmente a regiones andinas y amazónicas menos urbanizadas:

Huancavelica (el más bajo): Apurímac, Cajamarca, Amazonas y Huánuco.

Características en el boxplot: Las cajas son pequeñas → baja variabilidad anual.

Medianas bajas (<1.2). Poca presencia de valores atípicos.

Interpretación: Regiones con economías rurales y menor presión industrial, lo que se traduce en un consumo de recursos relativamente bajo.

3. Departamentos con Huella Ecológica moderada

Incluye regiones de sierra y selva con economías mixtas: Puno, Ayacucho, Pasco

Junín, San Martín, Cusco, Loreto

Características: Rangos intercuartílicos moderados. Medianas entre 1.4 y 1.9.

Algunas regiones como San Martín y Junín muestran variabilidad baja, indicando estabilidad en el consumo ecológico.

Interpretación: Niveles medios de presión ambiental por combinación de actividades agropecuarias, turismo, y expansión urbana moderada.

4. Departamentos con Huella Ecológica alta

Representan zonas con mayor actividad económica, urbana o extractiva:

La Libertad, Piura, Ica, Lambayeque, Moquegua, Tumbes, Arequipa

Características en el boxplot: Cajas más altas y dispersas. Las medianas oscilan entre ~2.0 y 2.6. Algunos departamentos muestran valores extremos (ej. Lambayeque).

Interpretación: Mayor intensidad industrial, agroexportadora, pesquera o minera, lo que eleva la demanda ecológica.

5. Departamentos con Huella Ecológica muy alta

Madre de Dios, Ucayali y Tacna

Observaciones: HE consistentemente alta en todo el periodo.

Bigotes extendidos → alta variabilidad (especialmente Ucayali).

Posibles causas: minería aurífera, deforestación, actividades extractivas, o expansión urbana.

6. Lima: el mayor valor de Huella Ecológica

Lima aparece claramente separada del resto: Mediana superior a 3.2. Rango intercuartílico estrecho → valores altos pero muy consistentes entre años. No presenta valores atípicos, lo cual es notable.

Interpretación: Como capital y principal centro económico, concentra la mayor parte del consumo energético, transporte, agua y bienes de la economía peruana.

7. Patrones clave observados en el boxplot

Aumento progresivo de HE de izquierda a derecha

El orden refleja una gradiente económica:

Andes rurales → selva intermedia → costa urbana → zonas extractivas → Lima metropolitana.

Departamentos con alta variabilidad: Lambayeque, Ucayali, Madre de Dios, Piura.

Indica fluctuaciones en uso de recursos, posiblemente asociadas a cambios en actividades económicas.

Departamentos con mucha estabilidad: Cajamarca, Amazonas, Pasco y Junín.

Valores similares entre años sugieren economías estables con poca expansión.

Outliers visibles: Huánuco, Puno y Lambayeque

Estos valores extremos pueden corresponder a picos en uso de recursos o cambios en la metodología de medición.

8. Conclusiones

Lima concentra la presión ecológica más alta del país.

Los departamentos andinos rurales presentan las huellas más bajas.

Regiones costeras y extractivas amazónicas muestran niveles altos de consumo ecológico.

Existe un patrón claro de gradiente económico–ambiental, donde la intensidad de actividad económica se correlaciona con la huella ecológica.

La variabilidad temporal refleja cambios económicos, industriales y ambientales propios de cada región.

4.2.2. PBI per cápita por departamentos

Tabla 9 PBI per cápita por departamentos de Perú

Departamento	n	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
AMAZONAS	8	6182.163	721.209	5051.700	5567.475	6429.600	6776.100	6933.300
ANCASH	8	15434.575	875.440	14448.300	14658.900	15354.100	16097.625	16724.000
APURIMAC	8	6221.663	3653.350	3765.900	4307.675	5247.400	5891.725	15012.000
AREQUIPA	8	17673.775	1810.627	15755.200	16826.175	17493.400	17696.350	21822.700
AYACUCHO	8	7048.850	881.324	5802.400	6287.425	7267.450	7714.050	8012.000
CAJAMARCA	8	7512.175	330.818	7010.100	7349.700	7551.450	7721.925	7937.300
CUSCO	8	14889.063	2207.259	11161.800	13727.825	15427.200	16649.775	17106.100
HUANCAVELICA	8	7380.163	904.765	6005.100	6643.200	7574.900	8197.175	8307.500
HUANUCO	8	5821.125	941.352	4496.800	5059.350	5921.200	6469.300	7106.000
ICA	8	16729.875	1366.591	14386.300	16126.550	17066.650	17800.850	18052.800
JUNIN	8	8879.713	1547.301	7073.100	7718.600	8499.800	9956.075	11140.100
LA LIBERTAD	8	10495.313	718.738	9280.500	9957.975	10856.450	11038.325	11132.100
LAMBAYEQUE	8	8165.163	803.968	6862.800	7560.875	8439.550	8733.300	9035.500
LIMA	8	18726.750	1853.713	15402.800	17717.925	19275.800	20191.125	20511.400
LORETO	8	8547.350	522.440	7835.600	8093.200	8618.850	8969.075	9239.000
MADRE DE DIOS	8	16737.088	1754.190	13845.400	15981.550	16785.500	17915.400	19312.900
MOQUEGUA	8	48330.188	1948.710	45261.400	47412.625	48650.950	49849.125	50437.400
PASCO	8	18004.150	1094.880	16619.400	17395.900	17812.950	18700.325	19691.000
PIURA	8	9414.850	789.151	8001.300	9030.825	9630.850	10017.600	10202.500
PUNO	8	6286.875	782.318	5121.800	5724.100	6389.950	6861.925	7368.200
SAN MARTIN	8	5930.775	685.882	4887.300	5381.225	6042.550	6484.525	6716.800

TACNA	8	18084.438	1248.594	15956.500	17525.775	17855.100	18904.075	19969.600
TUMBES	8	10932.463	609.841	9957.600	10687.800	11074.200	11291.350	11721.100
UCAYALI	8	7699.763	410.414	7057.600	7388.750	7891.700	8011.450	8094.700

Análisis del PBI per cápita por departamentos del Perú (2009-2016)

1. Visión general

El PBI per cápita muestra amplias diferencias entre departamentos, reflejando desigualdades en actividad económica, urbanización, recursos naturales y estructura productiva.

El PBI per cápita más alto del país durante 2009-2016 corresponde a Moquegua (más de S/ 48,000 por habitante en promedio).

El más bajo se observa en Huánuco, Amazonas, Apurímac, San Martín y Puno (entre S/ 5,000-6,500 por habitante).

Esto evidencia un país altamente heterogéneo en desarrollo económico regional.

2. Departamentos con mayor PBI per cápita

Moquegua 48,330 (muy alto). Dominio minero (Cu, Mo). Elevado ingreso por habitante. Alta variabilidad temporal (sd = 1,948)

Lima 18,726. Centro económico del país. Actividades de servicios, industria, comercio.

Arequipa 17,673

Madre de Dios 16,737. Actividades extractivas (oro). Amplia variabilidad

Ica 16,729. Agroindustria, minería y manufactura

Pasco 18,004. Minería como actividad dominante.

Interpretación

Las regiones con PBI más alto están vinculadas a: Minería metálica (Moquegua, Pasco, Madre de Dios). Centros urbano-industriales (Lima, Arequipa, Ica)

3. Departamentos con PBI per cápita medio (8,000 12,000)

Incluye mayormente regiones costañas y selva intermedia: La Libertad (10,495), Tumbes (10,932), Piura (9,415), Junín (8,879), Lambayeque (8,165) y Loreto (8,547).

Estas regiones combinan: agroindustria, comercio, pesca, servicios, minería secundaria

4. Departamentos con PBI per cápita bajo (< 8,000)

Principalmente regiones andinas: Huánuco (5,821), Amazonas (6,182), Apurímac (6,221) San Martín (5,930), Puno (6,286), Cajamarca (7,512), Ayacucho (7,048) y Huancavelica (7,380).

Estas regiones presentan: mayor ruralidad, menor industrialización, economías basadas en agricultura de subsistencia, menor inversión e infraestructura

5. Variabilidad (desviación estándar)

Demuestra qué regiones tuvieron cambios significativos en su producción por habitante.

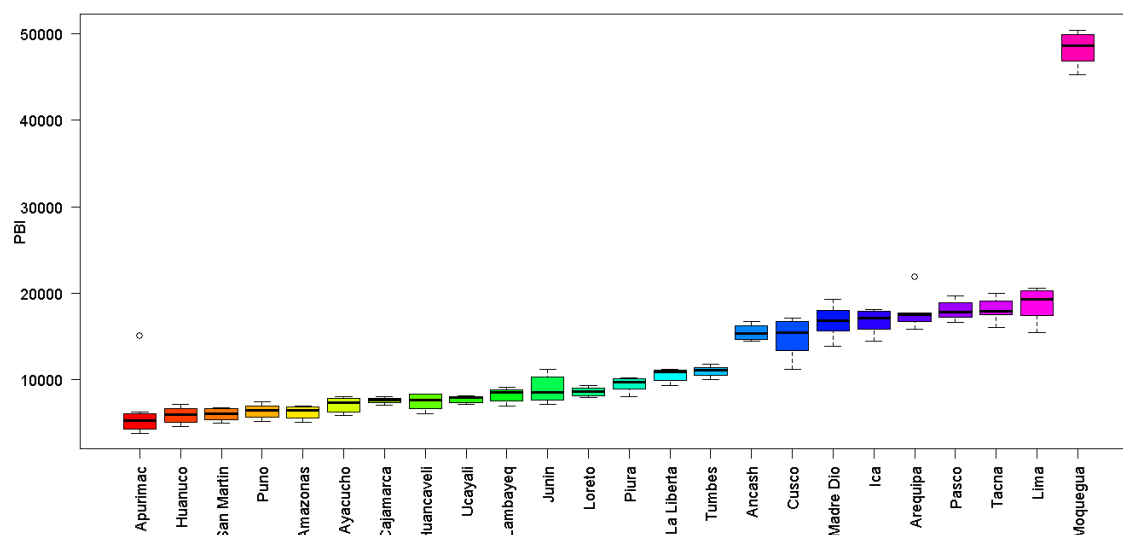
Altísima variabilidad: Apurímac (sd = 3,653), Moquegua (sd = 1,948), Madre de Dios (sd = 1,754), Lima y Arequipa (>1,800)

Indica: cambios fuertes en la producción minera, inversiones, fluctuaciones de precios de minerales.

Baja variabilidad: Cajamarca (330), Piura (789), San Martín (686) y Ucayali (410)

Indica: economías estables con crecimiento moderado o bajo.

Figura 16 Diagrama de caja del PBI per cápita (2009–2016)



Análisis del diagrama de caja del PBI per cápita (2009–2016)

El diagrama de caja compara la distribución del PBI per cápita en soles por habitante para cada uno de los 24 departamentos del Perú durante el periodo 2009–2016. Este tipo de gráfico permite observar tendencias centrales, dispersión, presencia de valores atípicos y diferencias estructurales entre regiones.

1. Tendencia general del país

A primera vista, se aprecia una alta heterogeneidad económica entre departamentos. Las diferencias son marcadas y persistentes, reflejando contrastes estructurales entre las regiones costeras, amazónicas y altoandinas.

La distribución general muestra:

Departamentos con muy bajos niveles de PBI per cápita, especialmente en la Amazonía y la sierra rural.

Departamentos intermedios, bastante estables y de variabilidad moderada.

Uno o dos departamentos con niveles excepcionalmente altos, que se separan visualmente del resto.

2. Departamentos de menor PBI per cápita

Se encuentran al extremo izquierdo del gráfico: Apurímac, Huánuco, Huancavelica, Amazonas, Puno, Cajamarca y San Martín.

Características observadas: Medianas bajas, alrededor de 4,000–6,000 soles por habitante. Baja variabilidad entre años, lo que sugiere crecimiento lento y estable. Indican persistencia de brechas históricas asociadas a menor dinamismo productivo, baja industrialización y alta ruralidad.

3. Grupo intermedio

Incluye: Ayacucho, Loreto, Ucayali, Lambayeque, Junín, Piura, La Libertad y Tumbes.

Rasgos principales: Medianas entre 6,000 y 10,000 soles. Dispersión moderada. Son regiones con actividades primarias relevantes (agricultura, pesca, comercio, extracción forestal y petrolera en algunos casos). Mejor desempeño relativo respecto al grupo inferior, pero aún por debajo del promedio nacional urbano.

4. Departamentos de PBI per cápita medio-alto

Aquí se encuentran: Ancash, Cusco, Moquegua (no el más alto en este gráfico, pero sí elevado), Arequipa, Tacna, Ica.

Observaciones: Medianas entre 12 000 y 18 000 soles. Mayor dispersión por presencia de actividades extractivas (minería, gas, agroindustria exportadora). Algunos presentan valores atípicos en ciertos años, lo que coincide con fluctuaciones del mercado minero (por ejemplo, Cusco y Ancash).

5. Departamento con PBI per cápita extremadamente alto

En el extremo derecho destaca claramente:

Moquegua. Mediana aproximadamente entre 45 000 y 50 000 soles por habitante.

Significativamente superior al resto del país. Esta separación extrema indica un outlier estructural, no un valor aislado.

Se explica por: Alta concentración de actividad minera de gran escala. Baja población relativa, lo que eleva el cálculo per cápita. Variaciones según producción anual de grandes operaciones mineras. La posición de Moquegua evidencia la enorme dependencia del sector minero en la configuración de la riqueza regional.

6. Presencia de valores atípicos

Algunos departamentos presentan puntos fuera de las cajas, especialmente: Cusco, Ancash y Arequipa, mostrando años con ingresos inusualmente altos vinculados a picos productivos. En departamentos de bajo PBI, casi no existen outliers, lo que muestra estabilidad, pero también estancamiento.

7. Interpretación territorial

El gráfico revela un patrón bien caracterizado en la economía peruana:

Costa sur → mayores ingresos (Ica, Arequipa, Tacna, Moquegua)

Sierra centro-sur y Amazonía → ingresos bajos (Huancavelica, Apurímac, Huánuco, Amazonas, Puno)

Costa norte y Sierra centro → nivel intermedio (Lambayeque, La Libertad, Piura, Junín)

Esta estructura coincide con: Distribución desigual de inversión pública y privada. Alta concentración de actividades extractivas en pocas regiones. Brechas históricas en infraestructura, educación y productividad laboral.

Conclusión

El diagrama de caja confirma la desigual distribución territorial del PBI per cápita en el Perú, con diferencias marcadas entre departamentos que se mantienen a lo largo del periodo 2009–2016. La presencia de Moquegua como valor extremadamente alto evidencia la dependencia minera y la baja diversificación productiva nacional. La mayoría de departamentos presenta niveles relativamente bajos y con variabilidad reducida, reflejando procesos de crecimiento moderado y estructuralmente limitado.

4.2.3. Relación PBI con la Huella Ecológica (HE)

Vinculando estos datos con la tabla previa de **Huella Ecológica**, se observan patrones importantes:

1. Los departamentos con mayor PBI per cápita suelen tener mayor HE

Ejemplos muy claros:

Tabla 10 departamentos con mayor PBI y mayor HE

Departamento	HE Promedio	PBI per cápita
Lima	3.296	18,726
Madre de Dios	2.629	16,737
Ucayali	2.558	7,699 (alto en HE por deforestación)
Tacna	2.548	18,084
Arequipa	2.443	17,673
Moquegua	2.313	48,330

Estos departamentos presentan: urbanización acelerada, actividad minera, industrias y comercio, alta demanda energética, mayor consumo de bienes

Conclusión:

Existe una relación positiva entre PBI per cápita y Huella Ecológica en la mayoría de departamentos.

2. Los departamentos con menor PBI per cápita tienden a tener menor HE

Ejemplos:

Tabla 11. Departamentos con menor PBI y menor HE

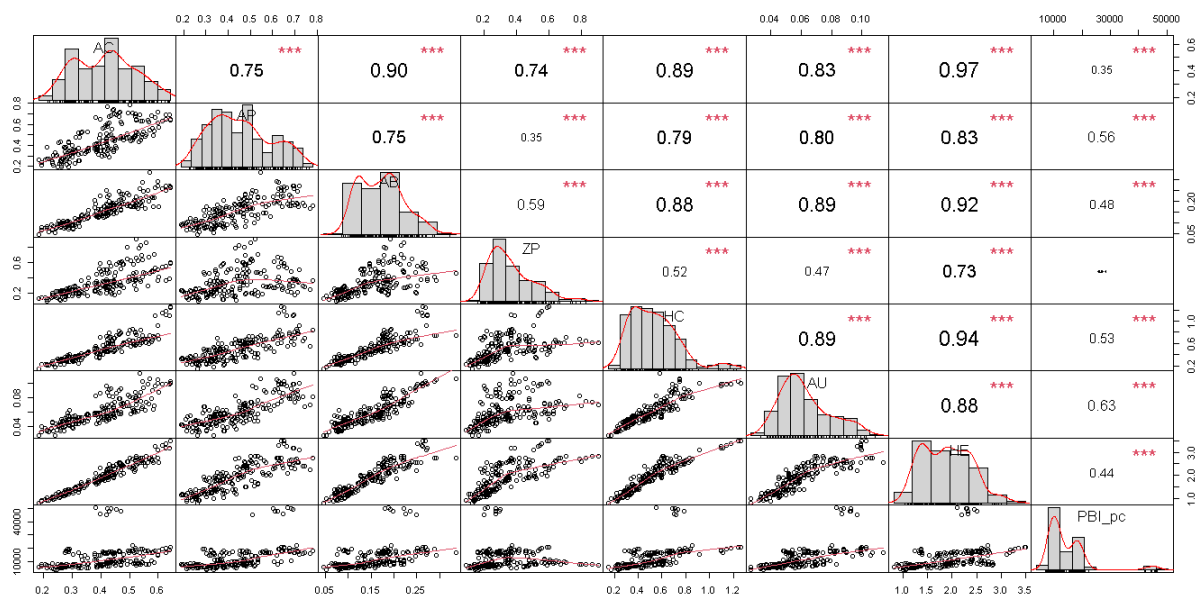
Departamento	HE promedio	PBI per cápita
Huancavelica	0.928	7,380
Apurímac	1.151	6,221
Amazonas	1.190	6,182
Puno	1.321	6,286
Ayacucho	1.319	7,048

Conclusión: Las regiones agrícolas y rurales muestran menor demanda ecológica debido a menor consumo energético y niveles de vida más austeros.

4.2.4. Correlación entre PBI y los componentes de la Huella Ecológica de Perú

Los coeficientes de correlación que relacionan el PBI per cápita con cada componente de la Huella Ecológica (HE) se encuentran en la última columna de la matriz.

Figura 17 Coeficientes de correlación de Pearson entre el PBI per cápita y componentes de la Huella Ecológica



Nota. AC= Área de Cultivo, AP= Área de Pastoreo, AB= Área de bosques, ZP=Zonas de pesca, HC= Huella de carbono, AU= Áreas urbanas. HE= Huella ecológica por departamento

Tabla 12 Coeficientes de Correlación de Pearson de componentes de Huella ecológica con PBI per cápita

Variable	Coefficiente de Correlación (r)	Significación Estadística	Interpretación (Fuerza y Dirección)
AC (Área de Cultivo)	0.35	*** (p < 0.001)	Correlación positiva débil . A medida que aumenta el PBI_pc, el Área de Cultivo tiende a aumentar ligeramente.
AP (Área de Pastoreo)	0.56	*** (p < 0.001)	Correlación positiva moderada . Existe una relación clara, aunque no muy fuerte, donde un mayor PBI_pc se asocia con una mayor Área de Pastoreo.

Variable	Coefficiente de Correlación (r)	Significación Estadística	Interpretación (Fuerza y Dirección)
AB (Área de Bosques)	0.48	*** (p < 0.001)	Correlación positiva moderada. Un PBI_pc más alto se relaciona con un Área de Bosques mayor.
ZP (Zonas de Pesca)	≈ 0.00	--	No hay correlación para este par de variables.
HC (Huella de Carbono)	0.53	*** (p < 0.001)	Correlación positiva moderada. Un mayor PBI_pc se asocia con una mayor Huella de Carbono.
AU (Áreas Urbanas)	0.63	*** (p < 0.001)	Correlación positiva moderada a fuerte. Es la correlación más alta reportada, indicando que el PBI_pc está más estrechamente relacionado con el tamaño de las Áreas Urbanas.

Análisis

Cinco componentes de correlaciones son positivas: Un aumento en el PBI_pc por departamento se asocia con un aumento en todos los componentes de la Huella Ecológica (AC, AP, AB, HC y AU).

Fuerza de la Correlación:

La relación más fuerte se observa con las Áreas Urbanas (AU) (r = 0.63).

Le siguen el Área de Pastoreo (AP) (r = 0.56) y la Huella de Carbono (HC) (r = 0.53).

La correlación más débil es con el Área de Cultivo (AC) (r = 0.35).

Significación: Todos los coeficientes de correlación reportados son altamente significativos (indicados por ***), lo que sugiere que es muy improbable que estas relaciones se deban al azar.

En general, la figura 17 sugiere que el desarrollo económico medido por el PBI per cápita está significativamente asociado a un mayor uso de recursos y espacio dentro de los departamentos, lo cual se refleja en mayores valores para los distintos componentes de la Huella Ecológica.

Huella Ecológica (HE) total y el PBI per cápita (PBI_pc) proporciona una conclusión clave sobre el desarrollo económico departamental en Perú.

Análisis de la Correlación $r = 0.44$ (***)

1. Dirección y Fuerza de la Correlación

Dirección Positiva: El signo positivo ($r = +0.44$) indica una relación directa. Esto significa que los departamentos con un mayor PBI per cápita (indicador de mayor riqueza y actividad económica) tienden a tener una mayor Huella Ecológica (indicador de mayor consumo de recursos y mayor impacto ambiental).

Fuerza Moderada: Un valor de 0.44 se clasifica como una correlación moderada. La relación es clara y existe, pero no es perfecta ni extremadamente fuerte. Esto sugiere que, si bien el desarrollo económico impulsa el consumo de recursos, hay otros factores (como la eficiencia en el uso de recursos, la estructura productiva, o la biocapacidad local) que también influyen en la Huella Ecológica de un departamento.

2. Significación Estadística (***)

Altamente Significativa: La notación (***) indica que el coeficiente es altamente significativo (generalmente $p < 0.001$). Esto es crucial, ya que significa que la probabilidad de observar esta correlación de 0.44 solo por azar es extremadamente baja. Se puede concluir con

un alto grado de confianza que la relación positiva entre PBI_pc y Huella Ecológica es una relación real y robusta en los datos.

4.2.5. Correlación entre Huella Ecológica y Componentes del PBI

La tabla 13 muestra los coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la Huella Ecológica (HE) total y el PBI per cápita desglosado por sus principales actividades económicas (componentes) en los departamentos de Perú (2009-2016).

El análisis revela qué sectores económicos están más fuertemente asociados al impacto ambiental medido por la HE.

Tabla 13 Correlación entre Huella Ecológica y Componentes del PBI

Variable	Media	Desviación Estándar	HE (correlación)	Intervalo de confianza del 95%
AGR	1010.06	449.29	-.19**	[-.32, -.05]
PES	90.61	154.12	.33**	[.19, .45]
EXT	3385.34	4111.67	.15*	[.01, .28]
MAN	1937.82	4017.97	.30**	[.16, .42]
ELE	271.22	463.45	-0.09	[-.23, .05]
CON	944.87	537.37	.38**	[.25, .49]
COM	1173.87	555.06	.91**	[.88, .93]
TRA	557.19	328.41	.78**	[.71, .83]
ALO	268.46	182.88	.72**	[.64, .78]
TEL	294.27	204.8	.80**	[.75, .85]
ADM	628.26	187.16	.50**	[.38, .60]
OTR	1990.22	1016.69	.77**	[.71, .83]

Nota. AGR=Agricultura, ganadería, caza y silvicultura, PES=Pesca y acuicultura, EXT=Extracción de petróleo, gas, minerales y servicios conexos, MAN=Manufactura, ELE=Electricidad, gas y agua, CON=Construcción, COM=Comercio, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas, TRA=Transporte, almacenamiento, correo y mensajería, ALO=Alojamiento y restaurantes, TEL=Telecomunicaciones y otros servicios de información, ADM=Administración pública y defensa, OTR=Otros Servicios, HE=Huella ecológica.

4.2.5.1. Correlaciones Positivas Más Fuertes (Mayor Presión Ambiental)

Las actividades con los coeficientes de correlación más altos tienen el vínculo más fuerte con una mayor Huella Ecológica.

Tabla 14 Correlaciones Positivas Más Fuertes

Componente	Coefficiente (r)	Interpretación
COM (Comercio, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas)	0.91**	Correlación extremadamente fuerte. El sector de Comercio, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas muestra la asociación más alta con la HE. Esto sugiere que las zonas con un alto PBI per cápita impulsado por el comercio (mayor movimiento de bienes, servicios y consumo) son las que ejercen la mayor presión sobre los recursos naturales.
TRA (Transporte, almacenamiento, correo y mensajería)	0.78**	Correlación muy fuerte. El sector Transporte, almacenamiento, correo y mensajería es el segundo más asociado. El transporte es un gran consumidor de combustibles fósiles, lo que impacta directamente en la Huella de Carbono (un componente clave de la HE).
TEL (Telecomunicaciones y otros servicios de información)	0.80**	Correlación muy fuerte. Este sector refleja la modernización y la densidad de servicios de información. Aunque no es directamente contaminante, su alta correlación puede estar ligada a la concentración de población e infraestructura urbana (alto consumo energético y de materiales) en los departamentos con mayor PBI per cápita.
ALO (Alojamiento y Restaurantes)	0.72**	Correlación fuerte. Esta actividad está ligada al turismo y la vida urbana, implicando alto consumo de energía, agua y generación de residuos, aumentando la HE.

Conclusión: Los sectores de Servicios (Comercio, Telecomunicaciones, Alojamiento) y la Logística (Transporte) son los principales impulsores del aumento de la Huella Ecológica en los departamentos con mayor PBI per cápita.

4.2.5.2. Correlaciones Positivas Moderadas y Débiles.

Tabla 15 Correlaciones Positivas Moderadas y Débiles

Componente	Coefficiente (r)	Interpretación
ADM (Administración Pública)	0.50**	Correlación moderada. El gasto público per cápita en administración también se asocia significativamente a una mayor HE, probablemente porque se concentra en capitales departamentales de mayor desarrollo.
CON (Construcción)	0.38**	Correlación moderada. La construcción consume grandes cantidades de recursos (cemento, acero, etc.) y genera residuos. Su relación moderada sugiere que el auge de la construcción está significativamente, aunque no tan fuertemente como el comercio, ligado al aumento de la HE.
PES (Pesca y Acuicultura)	0.33**	Correlación débil a moderada. Sugiere que los departamentos con alta actividad pesquera también tienden a tener una HE mayor, afectando principalmente el componente de Zonas de Pesca .
MAN (Manufactura)	0.30**	Correlación débil a moderada. La actividad industrial tiene una relación significativa pero no dominante con la HE total, en contraste con los servicios.
EXT (Extracción - Minería, Petróleo)	0.15*	Correlación débil. El sector extractivo, aunque ambientalmente intensivo, tiene una relación más débil con la HE total departamental. Esto puede deberse a que estas actividades se concentran geográficamente y tienen un impacto masivo pero localizado, sin correlacionarse tan fuertemente con la Huella Ecológica per cápita promedio del departamento como el consumo masivo.

4.2.5.3. Correlaciones Negativas o No Significativas

Tabla 16 Correlaciones Negativas o No Significativas

Componente	Coeficiente (r)	Interpretación
AGR (Agricultura)	-0.19**	Correlación negativa débil. Este es el único sector con una correlación negativa. Esto implica que los departamentos donde el PBI per cápita está más fuertemente impulsado por la Agricultura tienden a tener una Huella Ecológica ligeramente menor .
ELE (Electricidad, Gas y Agua)	-0.09	Correlación no significativa. La relación es muy cercana a cero y no es estadísticamente significativa (no tiene asteriscos), lo que indica que no hay una asociación lineal clara entre el PBI per cápita generado por este sector y la Huella Ecológica total.

4.2.5.4. Conclusión

La Huella Ecológica de los departamentos peruanos está impulsada principalmente por el consumo final y el soporte logístico (Comercio, Transporte y Servicios Urbanos), que reflejan la demanda de una población con mayor PBI per cápita. En contraste, la Agricultura es el único sector que parece tener un efecto ligeramente atenuador en la Huella Ecológica total.

4.2.6. Componentes de la HE y Componentes del PBI

Tabla 17 Componentes de la HE y Componentes del PBI

Componente del PBI (Fuente de Ingreso)	Coeficiente HE-PBI (r)	Componente de la HE (Impacto Ambiental)	Coeficiente HE-PBI_pc (r)	Vínculo Ambiental Implícito
COM (Comercio)	0.91**	AU (Áreas Urbanas)	0.63***	El alto comercio y consumo se asocian con la concentración de población y la expansión física de la ciudad para soportar esa actividad.
TRA (Transporte)	0.78**	HC (Huella de Carbono)	0.53***	El transporte es el principal emisor de gases de efecto

Componente del PBI (Fuente de Ingreso)	Coefficiente HE-PBI (r)	Componente de la HE (Impacto Ambiental)	Coefficiente HE-PBI _{pc} (r)	Vínculo Ambiental Implícito
				invernadero por el uso de combustibles, generando una fuerte Huella de Carbono.
TEL (Telecomunicaciones)	0.80**	AU (Áreas Urbanas)	0.63***	Las telecomunicaciones se concentran en zonas urbanas con mayor PBI, lo que implica una mayor demanda de energía e infraestructura dentro de la huella urbana.
ALO (Alojamiento y Restaurantes)	0.72**	HC (Huella de Carbono)	0.53***	Las actividades turísticas y de restauración tienen altos requerimientos de energía (calefacción/aire acondicionado) y generan residuos, impactando la Huella de Carbono y el Área de Vertederos (no mostrada).
AGR (Agricultura)	-0.19**	AC (Área de Cultivo)	0.36***	Contradicción Aparente: El PBI generado por la Agricultura tiene una correlación negativa con la HE total, mientras que el Área de Cultivo tiene una correlación positiva débil con el PBI _{pc} . Esto sugiere que el PBI generado por otros sectores "compensa" la huella del suelo.
EXT (Extracción)	0.15*	AP (Área de Pastoreo)	0.56***	Baja correlación con la HE total: La minería tiene un bajo r con la HE total, pero el PBI _{pc} se correlaciona fuertemente con el Área de Pastoreo. Esto indica que el alto PBI en departamentos mineros puede estar impulsando la demanda de carne y lácteos, afectando el Área de Pastoreo.

4.2.6.1. El Consumo Urbano es el Mayor Impulsor de la Huella

Los sectores con la correlación positiva más alta con la HE total son aquellos directamente relacionados con el consumo de bienes y servicios, y la logística urbana: Comercio ($r = 0.91$) y Transporte ($r = 0.78$).

Esto se alinea con la mayor correlación del PBI_pc con la Huella de Áreas Urbanas ($r = 0.63$) y la Huella de Carbono ($r = 0.53$).

Hallazgo: La Huella Ecológica en Perú no está impulsada principalmente por la producción primaria intensiva (como se podría asumir), sino por la fase de distribución, consumo y vida urbana en los departamentos más ricos.

4.2.6.2. Baja Correlación de la Extracción

El sector de Extracción (petróleo, gas, minería), aunque es un gran generador de PBI per cápita, muestra una correlación muy débil con la Huella Ecológica total ($r = 0.15$).

Posible Razón: La Minería tiende a ser un motor de ingresos per cápita concentrado (alto PBI_pc en pocos departamentos) pero no necesariamente un motor de la Huella Ecológica per cápita de consumo masivo o de uso de suelo a gran escala, como sí lo son las áreas urbanas.

4.2.6.3. La Paradoja Agrícola

La Agricultura (AGR) presenta la única correlación negativa con la HE total ($r = -0.19$).

Interpretación: Los departamentos cuya riqueza se basa fuertemente en la agricultura (que generalmente tienen un PBI_pc más bajo) tienden a tener una Huella Ecológica total ligeramente menor. Esto sugiere que las economías con un predominio de actividades agrarias tienen un menor impacto ambiental general en comparación con aquellas dominadas por los servicios y el consumo.

Este análisis refuerza la idea de que cualquier estrategia de mitigación de la Huella Ecológica en Perú debe enfocarse prioritariamente en la eficiencia energética del transporte y el diseño sostenible de las ciudades y los patrones de consumo.

4.2.6.4. Correlación No Significativa: Electricidad, Gas y Agua (ELE)

El coeficiente de correlación de Pearson para el sector Electricidad, Gas y Agua (ELE) con la Huella Ecológica (HE) total es $r = -0.09$, y no presenta asteriscos, lo que indica que no es estadísticamente significativo.

Este hallazgo es importante porque, a primera vista, la producción y el consumo de energía y agua parecen tener un impacto ambiental directo. Analicemos por qué la correlación con el PBI per cápita proveniente de este sector no es significativa:

1. Ausencia de Asociación Lineal

Un valor de $r \approx 0$ significa que no existe una asociación lineal clara entre el PBI per cápita generado específicamente por el sector ELE y la Huella Ecológica total de los departamentos. Es decir, que un aumento en la contribución económica de ELE no se traduce de manera predecible en un aumento o disminución de la HE total.

Intervalo de Confianza: El intervalo de confianza del 95% para r es amplio (dado como $[-0.23, 0.05]$), lo cual incluye el cero. Esto confirma formalmente la falta de significación estadística.

2. Naturaleza del Sector (Oferta vs. Demanda)

El sector ELE incluye la generación, distribución de energía, y el suministro de agua y gas. La falta de correlación puede deberse a la forma en que estos servicios se miden frente a la Huella Ecológica:

Generación de Energía Limpia (Biocapacidad): La generación de electricidad en Perú tiene una fuerte matriz hidroeléctrica. Una mayor producción de energía hidroeléctrica o de fuentes renovables (cuyos impactos ya están contabilizados en la Área de Bosques o Áreas de Cultivo por la infraestructura, pero no en la Huella de Carbono por la operación) podría mitigar la Huella de Carbono del departamento.

Distribución (Consumo de Huella de Carbono): La energía y el agua generados son consumidos por otros sectores (Manufactura, Comercio, Transporte, Hogares). Como vimos en el análisis anterior, es el Comercio ($r=0.91$) y el Transporte ($r=0.78$) los que tienen la mayor correlación con la HE total. Esto sugiere que la Huella de Carbono y de Recursos se atribuye mejor al consumidor final de la energía/agua que al sector que la produce y distribuye.

Costo de la Huella: Un PBI más alto de ELE en un departamento podría reflejar precios más altos o mayor eficiencia en el servicio, no necesariamente un mayor volumen de energía consumida que impacte la HE.

3. Contraste con el Componente Huella de Carbono (HC)

La Huella de Carbono (HC) es un componente clave de la HE que se mide por las emisiones derivadas del uso de energía. Previamente analizamos que:

HE total vs. PBI (Componente ELE): $r = -0.09$ (No significativo)

HC vs. PBI per cápita general: $r = 0.53$ (Significativo y Positivo)

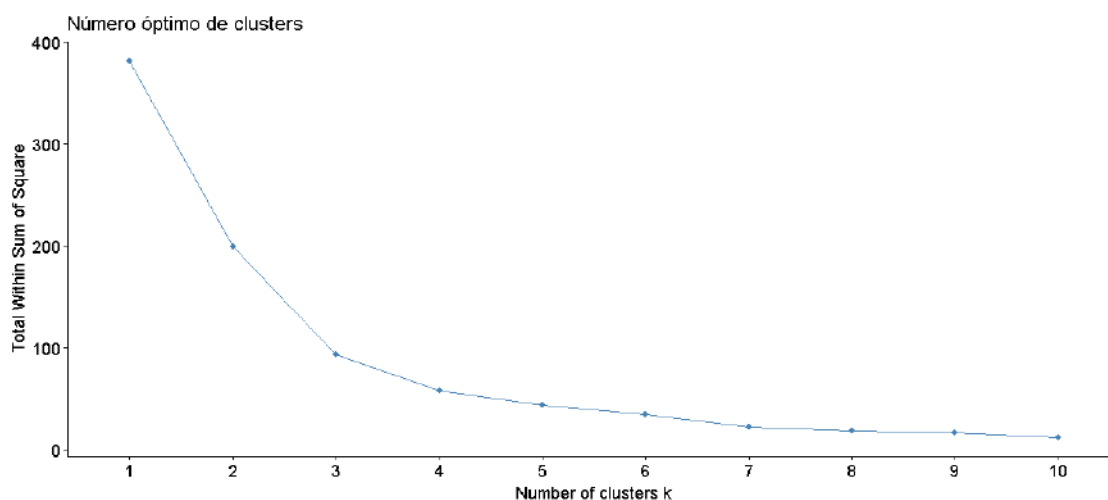
Este contraste indica que el PBI per cápita general (impulsado por Transporte y Comercio) es un buen predictor de la Huella de Carbono, pero el PBI generado específicamente por el sector ELE no lo es. Ello refuerza la idea de que la huella se origina en la demanda y el

uso final de la energía (por el transporte, la industria y los hogares) y no tanto en la actividad económica directa de las empresas de generación y distribución.

4.3. Clustering de Huella Ecológica y PBI por departamentos

4.3.1. Numero óptimo de clusters

Figura 18 Numero óptimo de clusters, método Elbow



Hay otros métodos para calcular el numero óptimo de clusters. Entre todos los índices:

5 propusieron 2 como el mejor número de clústeres

11 propusieron 3 como el mejor número de clústeres

1 propuso 4 como el mejor número de clústeres

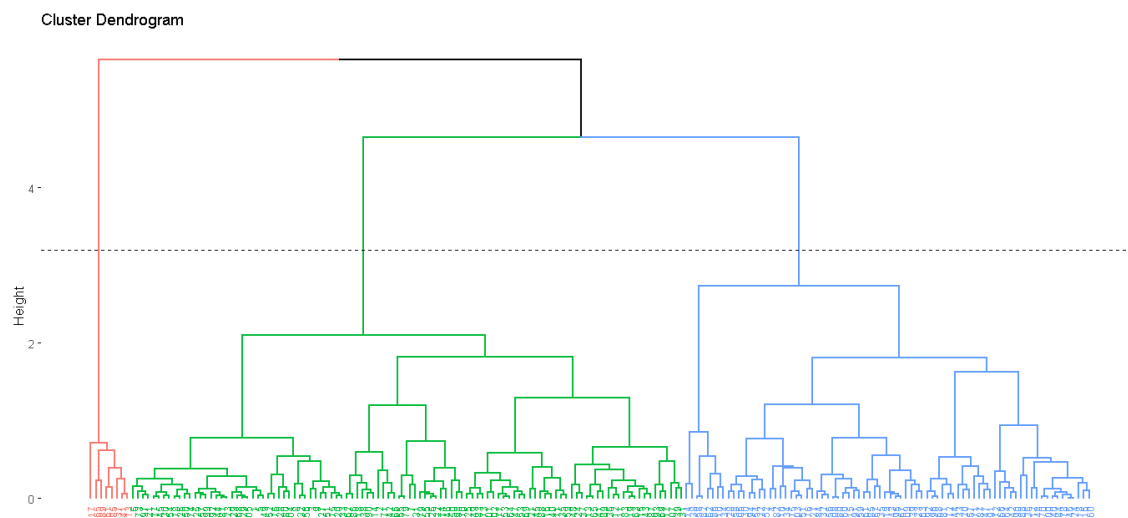
1 propuso 6 como el mejor número de clústeres

9 propusieron 9 como el mejor número de clústeres

Conclusión: Según la regla de la mayoría, el mejor número de clústeres es 3.

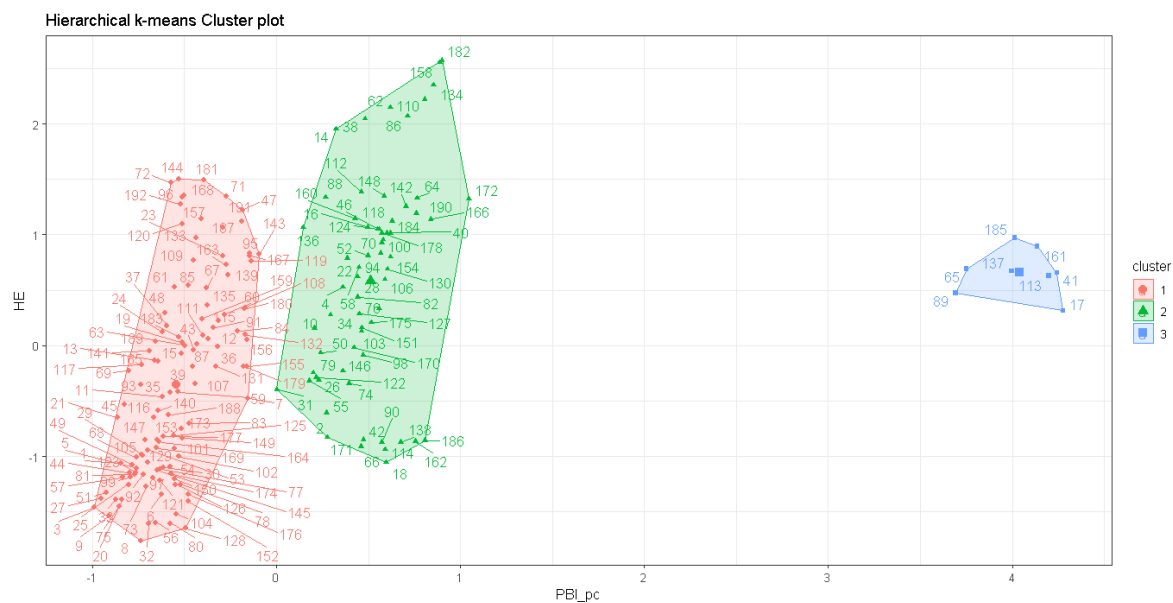
Según el Dendrograma (Figura 19) se obtienen 3 clusters.

Figura 19 Dendrograma



Aplicando Hierarchical clustering a los dos componentes principales se obtienen la districuion de los 192 datos en 3 cluster.

Figura 20 Hierarchical clustering



4.3.2. Análisis de clusters de Huella Ecológica y PBI

La figura 20 presenta la distribución de 192 observaciones (departamentos y años, 2009–2016) en un espacio bidimensional, revelando la relación entre el desarrollo económico (PBI_pc) y la presión ambiental (HE). La aplicación del clustering jerárquico divide estos datos en tres clústeres, lo que ayuda a identificar patrones estructurales en esta relación.

1. Relación General y Tendencia

El patrón general de los datos muestra una relación positiva entre la Huella Ecológica y el PBI per cápita, aunque con una dispersión considerable.

A medida que el PBI per cápita aumenta (eje X), la Huella Ecológica también tiende a aumentar (eje Y). Esta tendencia confirma el análisis de correlación previo ($r = 0.44$), sugiriendo que el crecimiento económico en el Perú, durante el período, se ha asociado a un mayor consumo de recursos.

2. Análisis de Clústeres

La agrupación jerárquica separa los departamentos y años en tres grupos (Clúster 1, 2 y 3) con características económicas y ambientales muy distintas:

A. Clúster 1: Baja Huella Ecológica y Bajo PBI per Cápita (El Extremo Inferior)

Ubicación: Concentrado en la esquina inferior izquierda del gráfico.

Características: Agrupa la mayoría de las observaciones con los valores más bajos tanto de PBI per cápita (posiblemente menos de 10,000 soles/habitante) como de Huella Ecológica (posiblemente menos de 2.0 gha/habitante).

Interpretación: Este clúster representa a los departamentos y años con economías menos desarrolladas, que ejercen una menor presión ambiental absoluta. Estas regiones podrían estar

dominadas por economías de subsistencia o actividades de baja intensidad de recursos (coherente con la correlación negativa débil de la Agricultura, AGR).

B. Clúster 2: Huella Ecológica Moderada y PBI per Cápita Medio-Alto (La Mayoría de la Distribución)

Ubicación: Se extiende a lo largo de la parte media del gráfico, abarcando una amplia gama de PBI per cápita (hasta alrededor de 20,000 soles/habitante) y Huella Ecológica (entre 2.0 y 3.0 gha/habitante).

Características: Es el clúster que mejor representa la tendencia central o la media de la relación. Muestra la mayoría de los casos donde un desarrollo económico intermedio se traduce en una huella ambiental moderada.

Interpretación: Este grupo probablemente incluye a las capitales departamentales menos desarrolladas y las economías regionales que están en crecimiento, con un equilibrio entre actividades de servicios (COM, TRA) y actividades primarias.

C. Clúster 3: Alta Huella Ecológica y Alto PBI per Cápita (Los Outliers Ambientales/Económicos)

Ubicación: Se encuentra en la esquina superior derecha del gráfico, e incluye los outliers o valores extremos.

Características: Posee los valores más altos de HE (superiores a 3.0 gha/habitante) y los valores más altos de PBI per cápita (algunos superando los 30,000 soles/habitante).

Interpretación: Este clúster representa a los departamentos (o años específicos) que combinan la máxima presión ambiental con el mayor desarrollo económico. Estos son probablemente departamentos con una fuerte actividad de servicios intensiva (Comercio,

Transporte, Telecomunicaciones, etc., con $r > 0.70$), o bien, aquellos con una muy alta actividad extractiva (aunque esta tenga una baja correlación con la HE total, su PBI per cápita sí es muy alto). Estos puntos representan los departamentos con mayor desafío de sostenibilidad.

3. Implicaciones Estructurales

El clustering demuestra que la relación HE-PBI_{pc} en Perú no es una simple línea, sino que está segmentada estructuralmente:

Dualidad Económica: Los clústeres reflejan una clara dualidad entre la base económica de bajo impacto/bajo ingreso (Clúster 1) y la base económica de alto impacto/alto ingreso (Clúster 3).

Transición de la Huella: El patrón sugiere que, para la mayoría de las observaciones, el desarrollo económico hasta cierto punto (transición del Clúster 1 al Clúster 2) implica un aumento predecible de la Huella Ecológica. Los valores extremos (Clúster 3) son los que distorsionan la tendencia y marcan la necesidad de políticas específicas de desacoplamiento en esos territorios.

4.3.3. Análisis Detallado del Clúster 3 (Moquegua: 2009–2016)

El Clúster 3 está ubicado en la esquina superior derecha del gráfico, caracterizándose por ser la región con la Huella Ecológica (HE) más alta y el Producto Bruto Interno per Cápita (PBI_{pc}) más alto del conjunto de datos.

1. PBI per Cápita Extremo (Efecto de la Extracción)

PBI_{pc}: Los puntos en este clúster alcanzan los valores más altos, superando probablemente los S/ 30,000 por habitante en algunos años.

Fuente: La razón principal de este PBI per cápita extraordinariamente alto en Moquegua es la actividad extractiva (EXT), específicamente la minería del cobre a gran escala.

Contexto: Los departamentos con alta actividad minera, a pesar de tener una población relativamente pequeña, ven inflado su PBI per cápita, creando estos valores atípicos de ingreso. Esto se alinea con el análisis previo: el sector EXT ($r=0.15$ con HE total) es un motor de ingreso extremo, aunque no sea el principal impulsor de la huella total del país.

2. Huella Ecológica Elevada (Consumo y Servicios)

HE: La Huella Ecológica en este clúster es consistentemente la más alta (superior a 3.0 gha/habitante).

Manejo: Aunque la minería causa impactos ambientales directos (uso de agua, contaminación del suelo), la alta Huella Ecológica *per cápita* se explica principalmente por el efecto riqueza en la población:

Alta Huella de Carbono (HC): El ingreso minero fomenta un mayor consumo per cápita de bienes y servicios (Comercio, Transporte) con fuerte intensidad de carbono.

Áreas Urbanas (AU) y Pastoreo (AP): El alto ingreso se traduce en una mayor demanda de infraestructura urbana y de productos de alto impacto, como carne (Pastoreo).

3. Implicación de la Desconexión

El caso de Moquegua ilustra una desconexión entre la fuente del PBI per cápita y el componente principal de la Huella Ecológica:

Tabla 18 PBI per cápita y el componente principal de la Huella Ecológica de Moquegua

Variable	Tipo de Impacto/Ingreso	Correlación con HE Total
PBI_pc (Fuente Minera)	Ingreso concentrado (EXT)	Débil ($r=0.15$)
HE Elevada	Impacto por consumo (COM/TRA/AU)	Fuerte

En Moquegua, el dinero generado por el sector de Extracción impulsa el gasto en sectores de Comercio ($r=0.91$) y Transporte ($r=0.78$), y estos últimos son los que generan la Huella Ecológica per cápita más alta. El alto PBI per cápita minero permite, e incluso fomenta, un estilo de vida de consumo intensivo de recursos, llevando a que el departamento tenga la peor combinación de alto ingreso y alto impacto ambiental.

El Clúster 3, dominado por Moquegua, representa el principal desafío de sostenibilidad del estudio. Muestra que el desarrollo económico basado en actividades extractivas puede generar un PBI per cápita extremo, pero si este ingreso no se gestiona bajo criterios de sostenibilidad, se traduce rápidamente en una Huella Ecológica igualmente extrema impulsada por el consumo y la logística.

El análisis comparativo se basa en las posiciones extremas en el gráfico de Huella Ecológica (HE) vs. PBI per Cápita (PBI_pc).

Tabla 19 Contraste entre Clúster 3 (Moquegua) y Clúster 1 (Ej. Huancavelica/Apurímac)

Característica	Clúster 3 (Moquegua)	Clúster 1 (Ej. Huancavelica/Apurímac)
Ubicación en el Gráfico	Superior Derecha (Outliers)	Inferior Izquierda (Base de la Distribución)
Nivel de PBI per Cápita	Extremadamente Alto (Impulsado por Minería)	Muy Bajo (Impulsado por Agricultura de Subsistencia)
Nivel de Huella Ecológica (HE)	Extremadamente Alta (> 3.0 gha/hab)	Muy Baja (< 2.0 gha/hab)
Correlación PBI vs. HE	Alto PBI per cápita genera HE alta.	Bajo PBI per cápita genera HE baja.
Principal Motor Económico	Extracción (Minería) y Servicios de Alto Consumo (COM, TRA, TEL).	AGRICultura, ganadería, caza y silvicultura.
Motor Principal de la HE	Consumo de Riqueza (Huella de Carbono y Áreas Urbanas).	Baja Demanda de Recursos (Limitado Consumo).

4.3.3.1. La Brecha Económica: Ingreso Concentrado vs. Ingreso Difuso.

Moquegua (Clúster 3): El alto PBI per cápita se explica por la riqueza concentrada generada por la minería. A pesar de los conflictos ambientales locales asociados a la minería, el gran flujo de ingresos infla el PBI_{pc}, creando una élite con alto poder adquisitivo que impulsa los sectores de Comercio ($r=0.91$) y Transporte ($r=0.78$).

Huancavelica/Apurímac (Clúster 1): El bajo PBI per cápita se debe a una economía difusa y de subsistencia dominada por la Agricultura, que tiene una correlación negativa con la Huella Ecológica total ($r = -0.19$). El bajo poder adquisitivo limita el consumo de bienes importados y energía, manteniendo la Huella Ecológica muy baja.

4.3.3.2. *La Brecha Ambiental: Lujo vs. Necesidad.*

Moquegua (Clúster 3): La alta Huella Ecológica es impulsada por el lujo y el consumo de bienes no esenciales. La demanda de altos niveles de energía, transporte individual y expansión de infraestructura urbana para servir a esta población con alto poder adquisitivo eleva la Huella de Carbono y las Áreas Urbanas a niveles extremos. El impacto es severo y está asociado al "derroche" económico.

Huancavelica/Apurímac (Clúster 1): La baja Huella Ecológica refleja la pobreza y la limitación de recursos. La Huella Ecológica es baja no por elección o eficiencia ecológica, sino por la falta de acceso a bienes y servicios intensivos en recursos (poca infraestructura, bajo consumo de energía y transporte). El impacto es bajo, pero está asociado a la privación económica.

4.3.3.3. *Conclusión: El Desafío del Desacoplamiento.*

El contraste es fundamental para la política pública:

Moquegua (Clúster 3): Necesita urgentemente políticas de desacoplamiento; es decir, medidas que permitan mantener el alto PBI per cápita mientras se reduce drásticamente la Huella Ecológica (ej. impuestos al carbono, inversión en transporte público eficiente).

Huancavelica/Apurímac (Clúster 1): Necesita políticas de desarrollo sostenible que permitan aumentar el PBI per cápita para mejorar la calidad de vida, pero asegurando que este crecimiento se logre con una Huella Ecológica mínima (ej. promoción de la agricultura sostenible, energía renovable distribuida).

4.3.4. Prueba de Normalidad departamental

Figura 21 Histograma con Ajuste Normal departamental

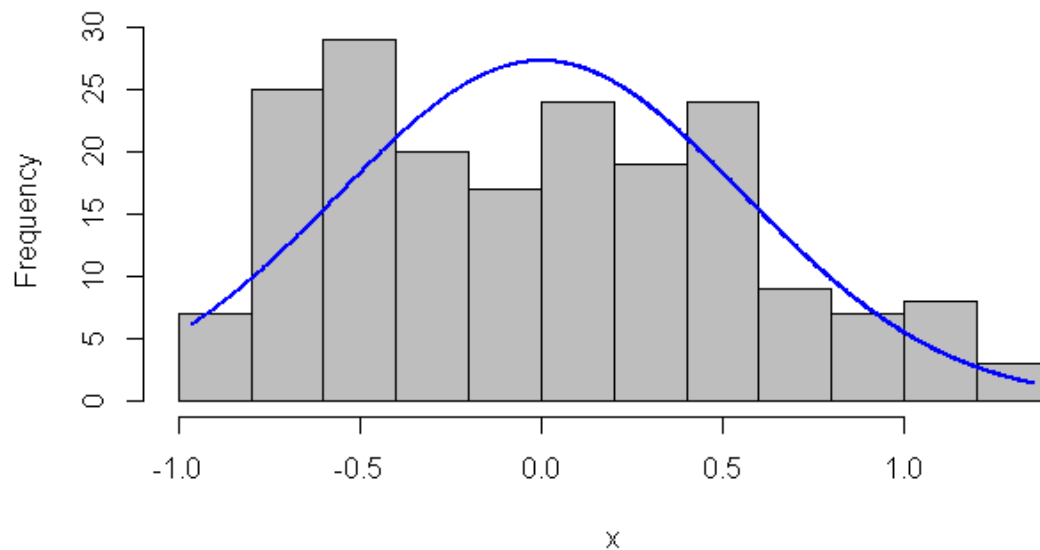
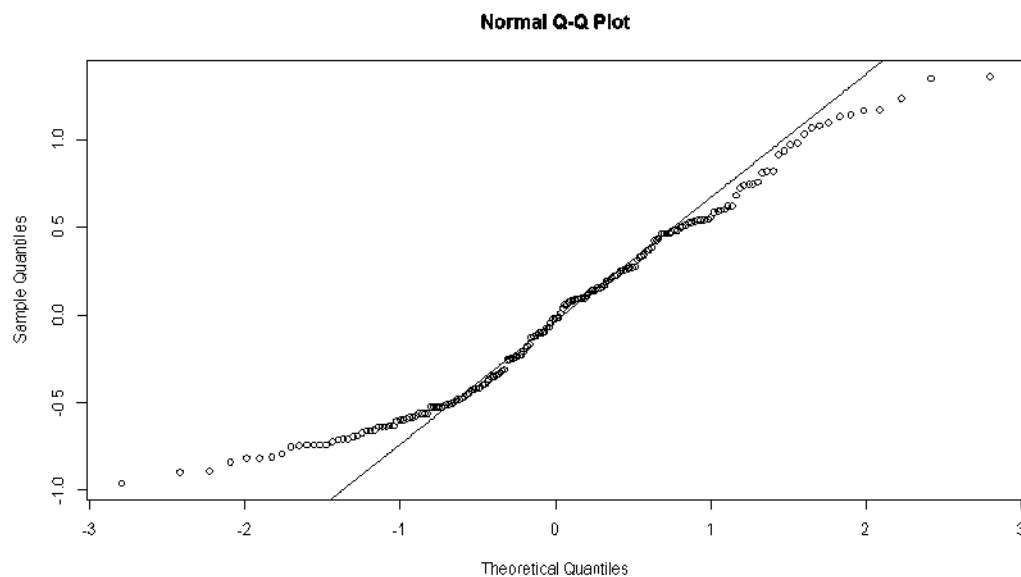


Figura 22 Gráfico Q-Q Normal departamental



Las pruebas visuales de normalidad para los residuos del modelo Huella Ecológica vs. PBI per cápita muestran resultados mixtos.

Gráfico Q-Q Normal

El gráfico Q-Q (Figura 22) presenta una desviación marcada en los extremos de la línea de referencia.

Los puntos centrales siguen la trayectoria teórica de la normalidad, pero se observa curvatura en las colas, lo que indica posible asimetría y colas más pesadas o ligeras respecto a una normal estándar. (Figura 22)

Histograma con Ajuste Normal

El histograma (Figura 21) muestra que la distribución de los residuos no es perfectamente simétrica y hay diferencias notables con la curva normal (línea azul).

El ajuste visual indica discrepancias en el centro y las colas, lo que sugiere leve falta de normalidad.

Interpretación y Recomendaciones

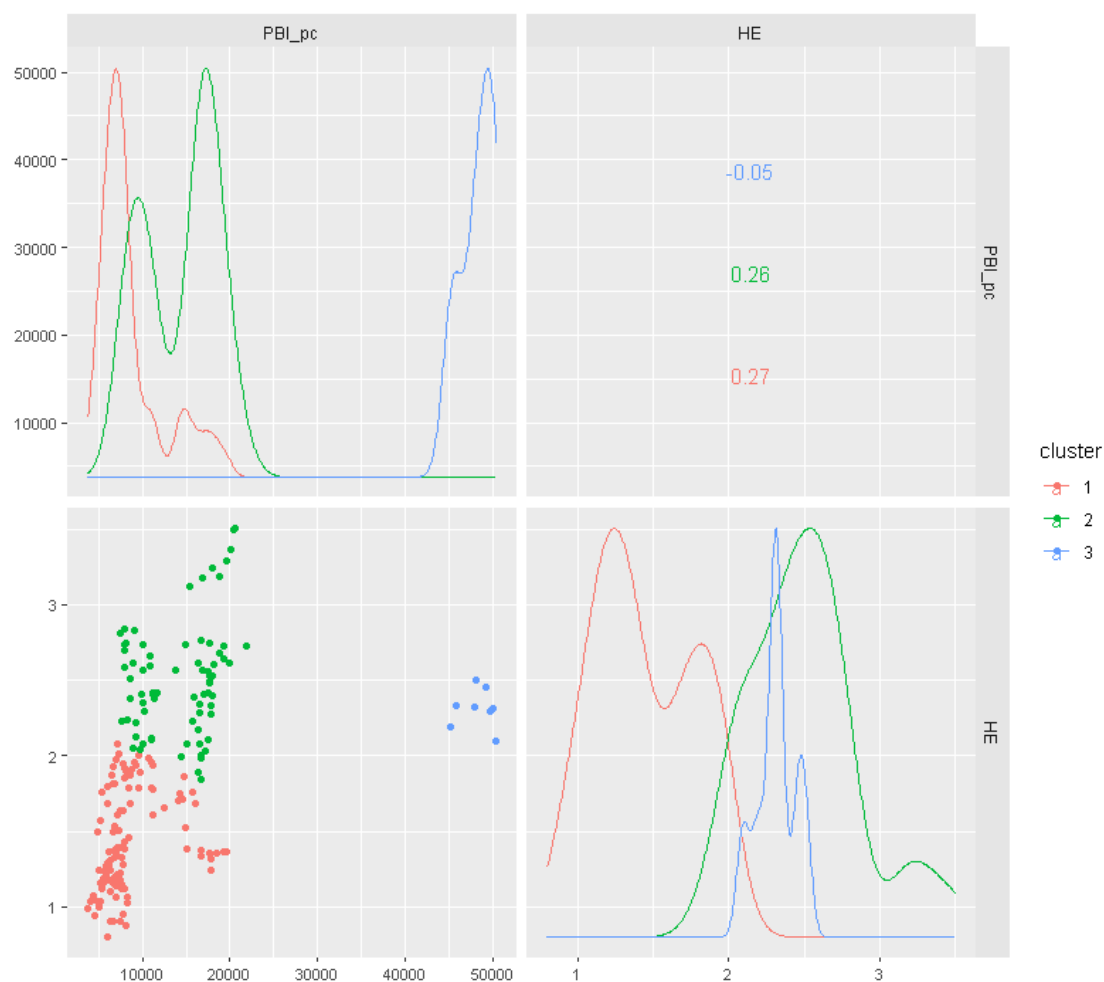
Ambos gráficos sugieren que los residuos del modelo lineal presentan alguna desviación de la normalidad, especialmente en los valores extremos.

En términos prácticos, pequeñas desviaciones pueden ser tolerables en modelos robustos, pero si se requiere mayor precisión en la inferencia (como pruebas de hipótesis o intervalos de confianza estrictos), es recomendable considerar métodos robustos o transformaciones.

4.3.5. Correlaciones de Clusters departamental

La figura 23 muestra un gráfico bivariado HE–PBI_pc complementado con distribuciones marginales (densidades) para cada variable y la agrupación de los 192 datos. Los datos corresponden a los 24 departamentos del Perú para el periodo 2009–2016. Diferenciadas por tres clústeres e incorporando el coeficiente general de correlación $r = 0.44$ ($p < .001$).

Figura 23 Correlaciones de Variables Huella Ecológica y PBI_pc por cluster



4.3.5.1. Distribuciones marginales por variable y clúster

PBI per cápita (PBI_pc)

Las densidades marginales superiores indican que los clústeres poseen perfiles económicos claramente diferenciados:

Clúster 1 (rojo): concentra departamentos con **PBI_pc bajo**, con distribuciones centradas por debajo de los 15 000 soles.

Clúster 2 (verde): agrupa departamentos con **PBI_{pc} medio**, mostrando gran dispersión y presencia de subgrupos internos.

Clúster 3 (azul): reúne departamentos con **PBI_{pc} alto**, con valores que superan ampliamente los 30 000 y se concentran alrededor de los 45 000 soles.

Huella Ecológica (HE)

Las distribuciones de HE también muestran diferencias marcadas:

Clúster 1 (rojo): presenta valores relativamente bajos de HE (alrededor de 1.3–2.0 gha/hab).

Clúster 2 (verde): posee valores medios (aprox. 1.8–2.6 gha/hab), con una distribución más amplia.

Clúster 3 (azul): aunque más compacto en tamaño, presenta valores elevados de HE (alrededor de 2.7–3.1 gha/hab).

Estas diferencias sugieren que los clústeres capturan adecuadamente patrones socioeconómicos y ecológicos diferenciados entre los departamentos.

4.3.5.2. Relación HE–PBI_{pc} por clúster (panel inferior izquierdo)

El panel de dispersión muestra la relación directa entre HE y PBI_{pc}:

Clúster 1 (rojo): exhibe una relación positiva moderada; los valores bajos de PBI_{pc} se asocian consistentemente con valores bajos de HE.

Clúster 2 (verde): presenta mayor variabilidad interna, pero mantiene una tendencia creciente entre PBI_{pc} y HE.

Clúster 3 (azul): aun cuando el número de observaciones es menor, se aprecia un patrón claro: los departamentos con mayor PBI per cápita presentan mayores niveles de Huella Ecológica, manteniendo la pendiente positiva.

En conjunto, la figura 23 respalda que la relación entre PBI_pc y HE es monótonamente creciente a través de los tres grupos, aunque con distintos rangos y dispersión, lo que indica diferencias estructurales entre tipos de departamentos.

4.3.5.3. Correlación global entre Huella Ecológica y PBI per cápita

El coeficiente de correlación de Pearson estimado para el total de los 192 datos es:

$$r = 0.44, \quad p < .001$$

Existe una correlación positiva moderada y estadísticamente significativa entre la Huella Ecológica total y el PBI per cápita, $r = 0.44, p < .001$.

Esto implica que, en promedio, a mayor nivel económico departamental, mayor presión ecológica per cápita, consistente con el planteamiento teórico del “crecimiento económico intensivo en recursos”.

4.3.5.4. Interpretación integrada (HE + PBI_pc + clústeres)

La figura 23 sugiere tres conclusiones principales:

Los clústeres representan distintos niveles de desarrollo económico, lo cual se refleja también en niveles diferenciales de Huella Ecológica.

La relación positiva entre PBI per cápita y Huella Ecológica se mantiene dentro de cada clúster, aunque con intensidades distintas.

La estructura de los datos no es homogénea, lo que implica que la relación HE–PBI_pc podría estar condicionada por características departamentales comunes a cada clúster (p. ej., urbanización, composición productiva, minería, industria o presencia de grandes ciudades).

En conjunto, la figura 23 respalda la idea de que el crecimiento económico está asociado a una mayor demanda de recursos y mayor impacto ambiental en el contexto peruano.

4.3.6. Modelos de regresión por clúster

El modelo lineal estimado para cada clúster evalúa cómo varía la Huella Ecológica (HE) en función del PBI per cápita (PBI_pc). Los coeficientes a y b permiten describir el nivel promedio de HE y su sensibilidad ante cambios en el ingreso. Además, el R^2 y el p-value indican el grado de ajuste y la significancia estadística del modelo.

Figura 24 Regresiones de Variables por Clusters

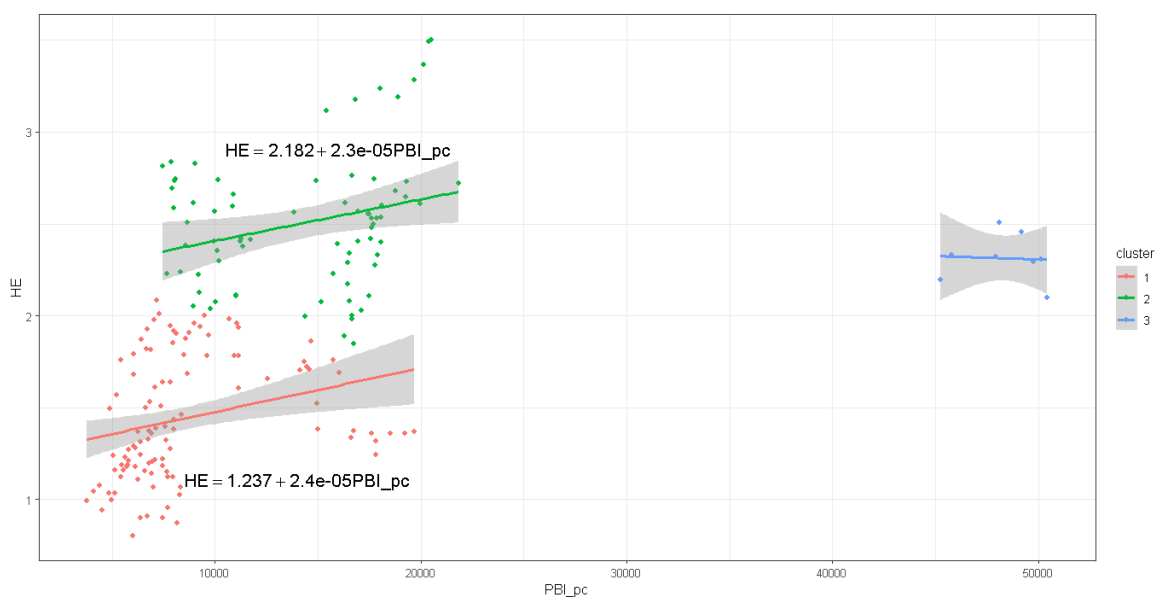


Tabla 20 Tabla Regresiones de cluster ($y = a + bx$)

Cluster	a	b	R-squared	p-value	Significancia
1	1.237	0.000024	0.07316	0.004638	**
2	2.182	0.000023	0.06577	0.02534	*
3	2.490	-0.000004	0.002975	0.8979	

Los resultados muestran tres formas distintas de relación entre economía y presión ambiental en el Perú:

Clúster 1 (bajo PBI)

El crecimiento económico incrementa la HE → relación positiva y significativa.

Clúster 2 (PBI intermedio–alto)

También hay relación positiva y significativa, aunque débil → crecimiento aún intensivo en recursos.

Clúster 3 (PBI alto)

No existe relación → los departamentos más desarrollados **desacoplan** crecimiento y huella ecológica.

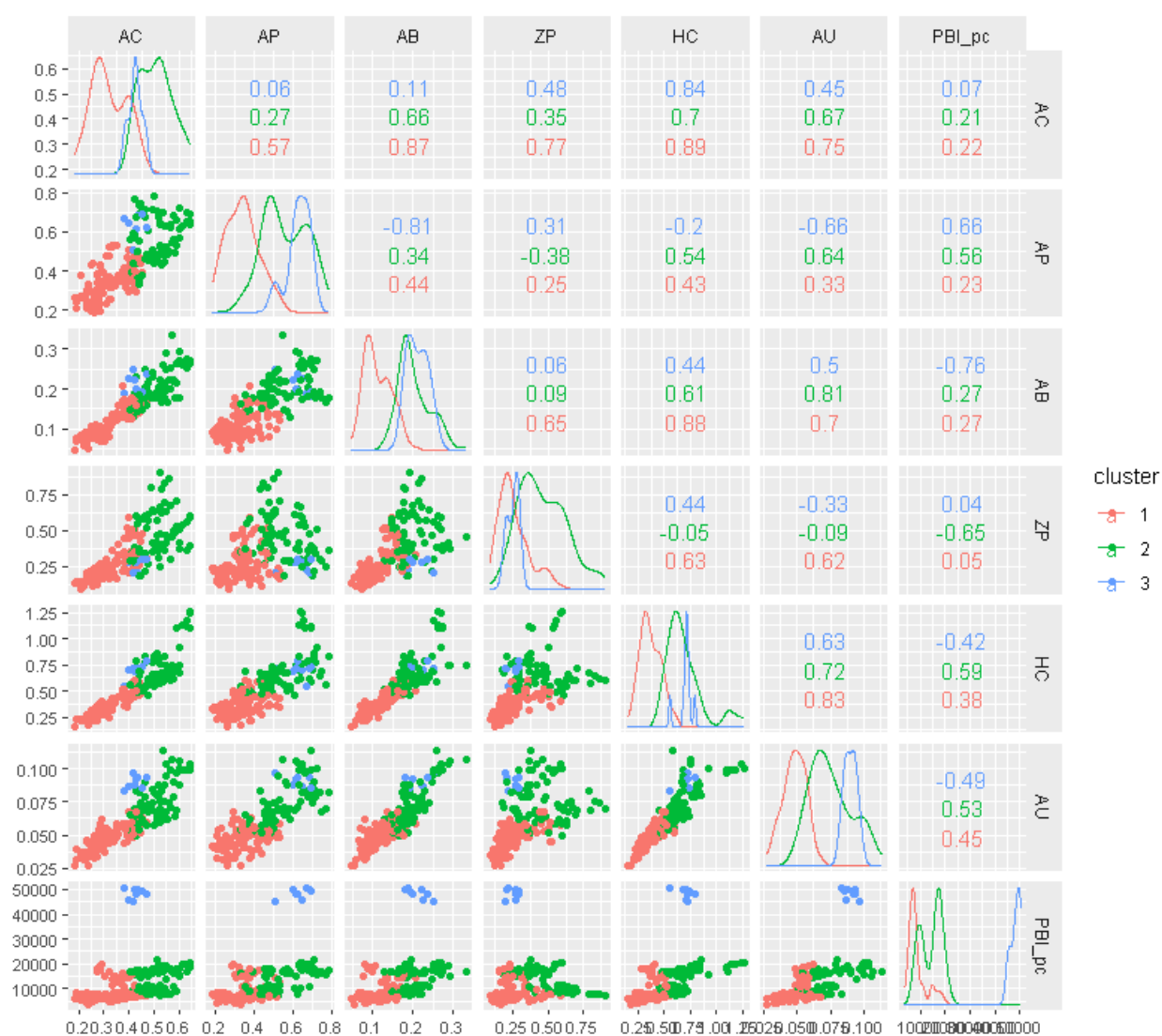
Conclusión

Los patrones encontrados indican que la relación entre PBI_pc y HE depende del estadio de desarrollo regional. Las regiones rezagadas y en transición muestran que aumentar el ingreso per cápita implica un aumento proporcional de la presión ecológica; sin embargo, las regiones de alto desarrollo logran sostener su crecimiento sin incrementar su huella, sugiriendo una mayor eficiencia ecológica y un potencial camino hacia el desarrollo sostenible.

4.3.7. Correlaciones de Componentes de Huella Ecológica y PBI per cápita

A continuación, se presenta un análisis completo, ordenado y apto para tesis de la figura de correlaciones entre los componentes de la Huella Ecológica (HE) y el PBI per cápita, diferenciados por clúster (Perú, 2009–2016, por departamentos).

Figura 25 Correlaciones de Componentes de Huella Ecológica y PBI per cápita



Los coeficientes de correlación permiten identificar patrones diferenciados en la relación entre el PBI per cápita y los componentes de la Huella Ecológica en los departamentos del Perú. Cada clúster representa un grupo de departamentos con estructura ecológica–económica similar.

4.3.7.1. Clúster 1: Relación económica-ecológica moderada y heterogénea

Correlaciones positivas moderadas para AC, AP, AB y HE (0.22–0.27).

Indican que un mayor PBI per cápita se asocia ligeramente con mayor demanda de áreas agrícolas, pastizales y bosques.

Áreas urbanas (AU) muestran la correlación más alta del clúster (0.45). Sugiere que el crecimiento económico se acompaña de expansión urbana.

Huella de carbono (HC) muestra correlación positiva moderada (0.38). Indica que, para este grupo de departamentos, mayores ingresos no necesariamente están acompañados de mayor emisión o consumo energético intensivo.

Caracterización del clúster. Departamentos con economías mixtas, moderado nivel de urbanización y patrones relativamente balanceados entre actividades primarias y crecimiento económico.

4.3.7.2. Clúster 2: Crecimiento económico asociado a mayor impacto ambiental

Correlaciones altas y positivas AP (0.56), HC (0.59), AU (0.53). Perfil típico de departamentos donde el crecimiento económico incrementa: La demanda de pastos y ganadería. El consumo energético (huella de carbono). La urbanización.

Zonas de pesca (ZP) presenta una correlación negativa fuerte (-0.65). Un mayor PBI per cápita se vincula con menor presión sobre áreas de pesca, posiblemente por diversificación económica fuera del sector extractivo marino.

Caracterización del clúster. Departamentos con crecimiento económico acelerado, expansión urbana y alto consumo energético. Su dinámica ecológica está marcada por actividades ganaderas y crecimiento urbano, más que por recursos forestales o pesqueros.

4.3.7.3. Clúster 3: Alta presión sobre bosques y ganadería con bajo vínculo económico

AP (pastizales) presenta la correlación positiva más alta del conjunto completo (0.66). En este clúster, el crecimiento económico está estrechamente vinculado a la ganadería y uso de pastos.

AB (bosques) muestra una correlación negativa muy alta (-0.76). Mayor PBI per cápita se relaciona con disminución de superficie forestal o menor dependencia forestal; podría reflejar: deforestación asociada a actividades agrícolas/ganaderas o un viraje económico hacia sectores con menor dependencia del bosque.

HC (-0.42) y AU (-0.49) son moderadamente negativas. Son departamentos con: Bajo nivel de urbanización, Bajo consumo energético per cápita, Economías más dependientes de actividades extensivas.

Caracterización del clúster. Departamentos predominantemente rurales, con fuerte dependencia de pastos y transformación de bosques, pero sin asociación clara entre desarrollo económico y mayor huella ecológica total ($HE \approx 0$).

4.3.7.4. Comparación entre los tres clústeres

Clúster 2 representa el patrón clásico de crecimiento económico → mayor impacto ecológico (AP, HC, AU moderados).

Clúster 1 muestra un patrón intermedio: aumento económico con expansión urbana, pero sin fuerte incremento de la huella de carbono.

Clúster 3 evidencia un patrón rural, donde sectores ganaderos y deforestación son más determinantes que la urbanización o el consumo energético.

Conclusiones

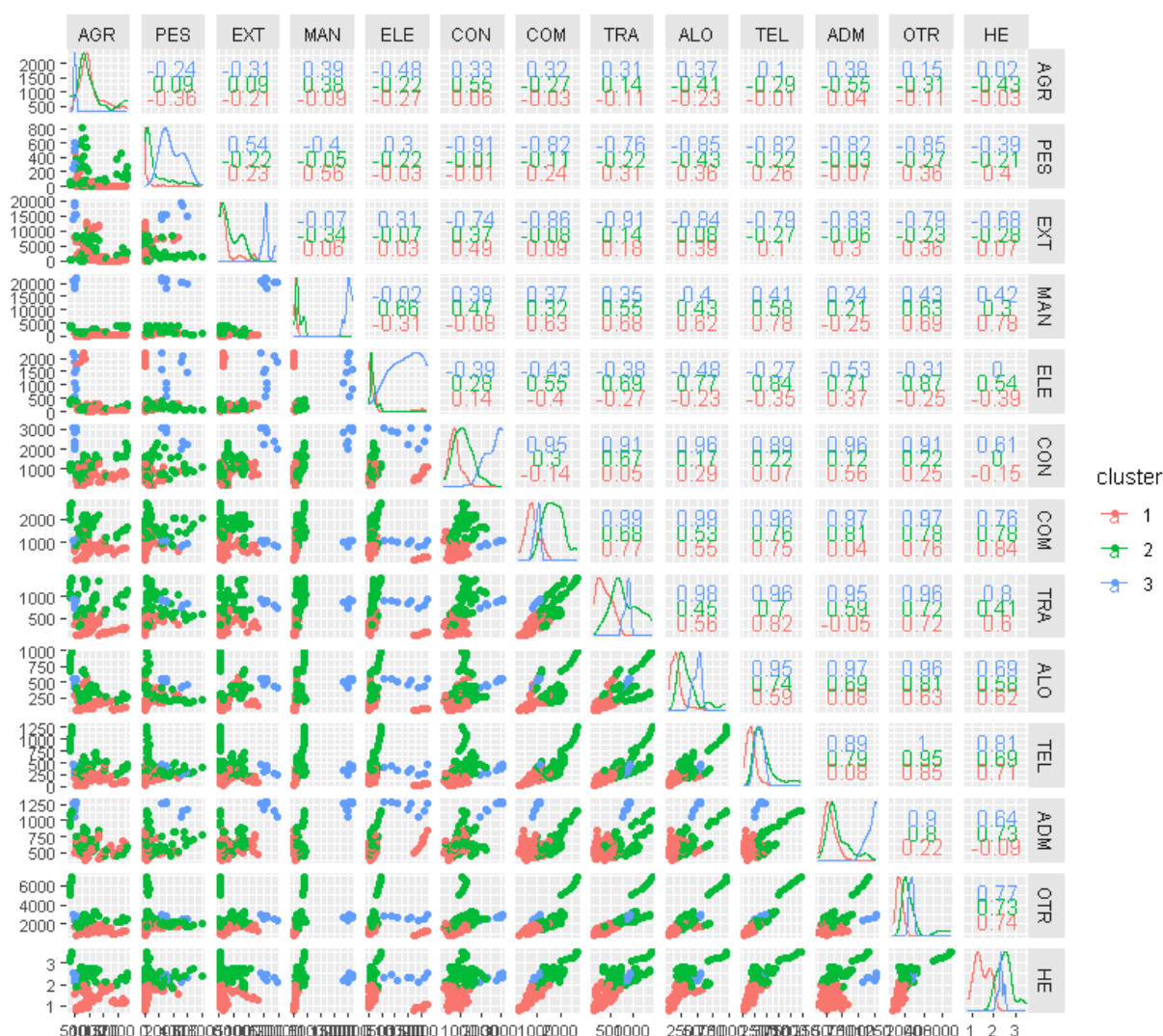
La relación PBI–Huella Ecológica no es uniforme en el Perú; depende del tipo de estructura productiva y ecológica del territorio.

Los componentes más sensibles al crecimiento económico son: Áreas urbanas (AU) Pastizales (AP) y Huella de carbono (HC).

La deforestación (AB) exhibe una asociación negativa fuerte en Moquegua, señalando conflictos entre crecimiento económico y conservación.

El incremento del PBI no siempre implica mayor HE total, especialmente en regiones rurales donde la presión ecológica se expresa de forma diferente.

4.3.8. Correlaciones de Huella Ecológica y componentes de PBI per cápita



4.3.8.1. Clúster 1: Economías diversificadas y fuertemente vinculadas a servicios y manufactura

Este clúster exhibe las correlaciones más altas y positivas entre HE y sectores económicos vinculados al comercio (0.84), manufactura (0.78), telecomunicaciones (0.71), transporte (0.60), alojamiento y restaurantes (0.62) y otros servicios (0.74). Esto indica que la huella ecológica departamental aumenta con la expansión de sectores urbanos, de servicios y

manufactura, los cuales requieren mayor consumo energético, movilidad, infraestructura y materiales.

La presencia de correlaciones negativas en electricidad-agua-gas ($ELE = -0.39$) y en agricultura ($AGR = -0.03$, prácticamente nula) sugiere que estos departamentos tienen estructuras económicas urbanas y terciarias, donde el efecto de la agricultura es marginal o compensado por prácticas más eficientes, y donde el sector eléctrico no constituye el principal origen de presión ecológica.

Caracterización del clúster. Departamentos con economías urbanas, donde la presión ecológica se concentra en el crecimiento del comercio, los servicios modernos, manufactura y transporte. Representan regiones dinámicas y diversificadas.

4.3.8.2. Clúster 2: Economías en transición con fuerte influencia de servicios y electricidad

En este clúster, la HE muestra correlaciones positivas importantes con comercio (0.78), telecomunicaciones (0.69), administración pública (0.73), alojamiento/restaurantes (0.58) y electricidad-gas-agua (0.54).

Este perfil sugiere departamentos con crecimiento económico basado en una economía de servicios, donde el aumento de la actividad en comercio, administración estatal y servicios informacionales se refleja en mayor presión ambiental.

Las correlaciones negativas en agricultura ($AGR = -0.43$) y extracción ($EXT = -0.28$) indican que estos departamentos, pese a su productividad económica, no basan su desarrollo en sectores primarios, sino en actividades más urbanas e institucionales. Esto coincide con

territorios que están transitando hacia economías más complejas, con mezcla de servicios tradicionales y modernos.

Caracterización del clúster. Economías urbanas intermedias en proceso de transición, donde la huella ecológica se incrementa por el crecimiento del comercio, los servicios públicos, las telecomunicaciones y el uso intensivo del sistema eléctrico.

4.3.8.3. Clúster 3: Economías rurales con fuerte relación entre HE y servicios básicos y transporte

En este clúster, las correlaciones más altas se observan en telecomunicaciones (0.81), transporte (0.80), otros servicios (0.77), comercio (0.76), y alojamiento/restaurantes (0.69). Este comportamiento indica que incluso en departamentos rurales, la expansión de servicios y el aumento de la movilidad generan impactos ecológicos significativos.

Las correlaciones fuertemente negativas con extracción ($EXT = -0.68$) indican que los departamentos con mayor actividad extractiva presentan menor huella ecológica total, probablemente porque parte de la extracción está orientada hacia exportación sin un incremento paralelo de consumo interno o urbanización.

El transporte ($TRA = 0.80$) y telecomunicaciones ($TEL = 0.81$) destacan como los principales motores de la presión ecológica del clúster, lo cual es consistente con territorios donde las distancias, la dispersión espacial y la conectividad definen la actividad económica y ambiental.

Caracterización del clúster. Departamentos rurales o semiurbanos, donde la huella ecológica se relaciona con servicios básicos y movilidad, mientras que la agricultura, pesca y extracción muestran asociaciones débiles o negativas.

4.3.8.4. Comparación entre clústeres

Clúster 1: HE está fuertemente asociada a actividades modernas: manufactura, comercio, servicios informacionales y transporte.

Clúster 2: HE se vincula con servicios públicos, electricidad y comercio, destacando una economía intermedia urbana.

Clúster 3: HE se relaciona principalmente con transporte, telecomunicaciones y servicios en regiones rurales; la extracción muestra correlación negativa fuerte.

Tendencias. El comercio, transporte, telecomunicaciones y otros servicios son los sectores que más consistentemente elevan la HE en los tres clústeres. La agricultura y la extracción presentan patrones negativos o débiles, indicando que la presión ecológica moderna en el Perú se explica más por urbanización, servicios y movilidad, que por actividades primarias tradicionales.

Conclusión

Los resultados muestran tres modelos territoriales diferenciados de relación económica-ecológica. En los departamentos más industrializados y urbanizados, la presión ecológica proviene principalmente del comercio, transporte y servicios. En los departamentos en transición, la electricidad y administración pública también juegan un rol central. En los departamentos rurales, la movilidad, turismo y telecomunicaciones son los principales impulsores de la HE. Estos hallazgos refuerzan que la sostenibilidad debe ser abordada territorialmente, atendiendo las particularidades económicas de cada clúster.

4.4. Contrastación de Hipótesis

4.4.1. Contrastación de Hipótesis específica (H1)

H1: Existe relación significativa entre el área de cultivos y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Correlación positiva débil. A medida que aumenta el PBI_pc, el Área de Cultivo tiende a aumentar ligeramente ($r=0.35$).

Contradicción Aparente: El PBI generado por la Agricultura tiene una correlación negativa con la HE total, mientras que el Área de Cultivo tiene una correlación positiva débil con el PBI_pc. Esto sugiere que el PBI generado por otros sectores "compensa" la huella del suelo (Tabla 17).

En consecuencia, se concluye que hay una correlación positiva débil. A medida que aumenta el PBI_pc, el Área de Cultivo tiende a aumentar ligeramente ($r=0.35$).

4.4.2. Contrastación de Hipótesis específica (H2)

H2: Existe relación significativa entre el área de pastoreo y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Correlación positiva moderada. Existe una relación clara, aunque no muy fuerte, donde un mayor PBI_pc se asocia con una mayor Área de Pastoreo ($r=0.56$)

Baja correlación con la HE total: La minería tiene un bajo r con la HE total, pero el PBI_pc se correlaciona fuertemente con el Área de Pastoreo. Esto indica que el alto PBI en departamentos mineros puede estar impulsando la demanda de carne y lácteos, afectando el Área de Pastoreo (Tabla 17).

En consecuencia, se concluye que hay una correlación una correlación positiva moderada. Existe una relación clara, aunque no muy fuerte, donde un mayor PBI per cápita se asocia con una mayor Área de Pastoreo ($r=0.56$)

4.4.3. Contrastación de Hipótesis específica (H3)

H3: Existe relación significativa entre el área de bosques y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Correlación positiva moderada. Un PBI per cápita más alto se relaciona con un Área de Bosques mayor ($r=0.48$).

En consecuencia, se concluye que hay una correlación positiva moderada. Un PBI per cápita más alto se relaciona con un Área de Bosques mayor ($r=0.48$).

4.4.4. Contrastación de Hipótesis específica (H4)

H4: Existe relación significativa entre las zonas de pesca y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Un valor de $r \approx 0$ significa que no existe una asociación lineal clara entre el PBI per cápita generado específicamente por zonas de pesca componente de la Huella Ecológica total de los departamentos.

En consecuencia, se concluye que no hay relación entre el componente de Huella ecológica, Zonas de pesca y PBI per cápita

4.4.5. Contrastación de Hipótesis específica (H5)

H5: Existe relación significativa entre la huella de carbono y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Correlación positiva moderada. Un mayor PBI_{pc} se asocia con una mayor Huella de Carbono ($r=0.53$).

El transporte es el principal emisor de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles, generando una fuerte Huella de Carbono (Tabla 17).

Las actividades turísticas y de restauración tienen altos requerimientos de energía (calefacción/aire acondicionado) y generan residuos, impactando la Huella de Carbono y el Área de Vertederos. (Tabla 17).

En consecuencia, se concluye que si hay relación ($r=0.53$) entre el componente de Huella ecológica, Huella de carbono y PBI per cápita

4.4.6. Contrastación de Hipótesis específica (H6)

H6: Existe relación significativa entre las áreas urbanas y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Correlación positiva moderada a fuerte. Es la correlación más alta reportada, indicando que el PBI_{pc} está más estrechamente relacionado con el tamaño de las Áreas Urbanas. ($r=0.63$).

El alto comercio y consumo se asocian con la concentración de población y la expansión física de la ciudad para soportar esa actividad. (Tabla 17)

Las telecomunicaciones se concentran en zonas urbanas con mayor PBI, lo que implica una mayor demanda de energía e infraestructura dentro de la huella urbana. (Tabla 17).

En consecuencia, se concluye que hay una correlación positiva moderada a fuerte. Es la correlación más alta reportada, indicando que el PBI_{pc} está más estrechamente relacionado con el tamaño de las Áreas Urbanas. ($r=0.63$).

4.4.7. Contrastación de Hipótesis general (H)

H: Existe relación significativa entre la huella ecológica y el PBI per cápita en los departamentos del Perú.

Este resultado refleja el dilema del desarrollo en Perú: el crecimiento económico (PBI_pc) está intrínsecamente ligado al aumento de la presión ambiental (HE). El desarrollo departamental, en el periodo de estudio (2009-2016), aún se basa en un modelo que incrementa la demanda de ecosistemas (cultivos, pastoreo, bosques, carbono) por habitante.

El coeficiente de correlación de Pearson estimado para el total de los 192 datos es:

$$r = 0.44, \quad p < .001$$

Existe una correlación positiva moderada y estadísticamente significativa entre la Huella Ecológica total y el PBI per cápita, $r = .44, p < .001$.

Esto implica que, en promedio, a mayor nivel económico departamental, mayor presión ecológica per cápita, consistente con el planteamiento teórico del “crecimiento económico intensivo en recursos”.

Las correlaciones más fuertes, como las de Áreas Urbanas (0.63) y Huella de Carbono (0.53), son los principales motores que empujan el valor total de la Huella Ecológica hacia arriba junto con el PBI per cápita.

Si solo existieran las correlaciones más débiles (como Área de Cultivo, 0.36), la correlación total r sería menor.

En síntesis, el PBI per cápita es un predictor significativo del tamaño de la Huella Ecológica en los departamentos, lo que subraya la necesidad de implementar políticas de

desacoplamiento del crecimiento económico de la degradación ambiental (por ejemplo, promoviendo la economía circular y la eficiencia energética).

Los sectores de Servicios (Comercio, Telecomunicaciones, Alojamiento) y la Logística (Transporte) son los principales impulsores del aumento de la Huella Ecológica en los departamentos con mayor PBI per cápita (Tabla 15).

La Huella Ecológica de los departamentos peruanos está impulsada principalmente por el consumo final y el soporte logístico (Comercio, Transporte y Servicios Urbanos), que reflejan la demanda de una población con mayor PBI per cápita. En contraste, la Agricultura es el único sector que parece tener un efecto ligeramente atenuador en la Huella Ecológica total (Tabla 16).

La Huella ecológica y PBI per cápita por clústeres) indican: Los clústeres representan distintos niveles de desarrollo económico, lo cual se refleja también en niveles diferenciales de Huella Ecológica. La relación positiva entre PBI per cápita y Huella Ecológica se mantiene dentro de cada clúster, aunque con intensidades distintas. La estructura de los datos no es homogénea, lo que implica que la relación HE–PBI_pc podría estar condicionada por características departamentales comunes a cada clúster (p. ej., urbanización, composición productiva, minería, industria o presencia de grandes ciudades).

Se concluye que existe una correlación positiva moderada y estadísticamente significativa entre la Huella Ecológica total y el PBI per cápita ($r = 0.44$).

Capítulo V. Discusión

5.1. Discusión de resultados

Los resultados de los análisis de correlación por clústeres permiten identificar patrones diferenciados en la relación entre el desempeño económico y la presión ambiental en los departamentos del Perú entre 2009 y 2016. En conjunto, estos hallazgos sugieren que existen trayectorias heterogéneas de desarrollo, donde la expansión del PBI per cápita y la estructura productiva se asocian de manera desigual con distintos componentes de la Huella Ecológica. Este comportamiento coincide con lo observado por autores recientes, quienes sostienen que los países y regiones en desarrollo presentan gradientes ambientales distintos según su estructura sectorial y su nivel de urbanización (Borghesi et al., 2022; Otero & Cruz, 2024).

5.1.1. *Huella Ecológica vs. PBI per cápita (Clústeres 1–3)*

Clúster 1: Desarrollo urbano-industrial con presión moderada

Este clúster muestra correlaciones positivas moderadas entre el PBI per cápita y Áreas de cultivo, Áreas de pastoreo, Áreas de bosques y Áreas Urbanizadas (0.22–0.45), sugiriendo que el crecimiento económico se acompaña de un uso creciente del territorio, especialmente urbano. La correlación negativa entre PBI per cápita y Huellas de carbono (–0.38) indica, sin embargo, cierto desacoplamiento entre actividad económica y huella de carbono. Esto concuerda con investigaciones que sostienen que regiones con infraestructura consolidada pueden mostrar mejoras en eficiencia energética sin reducir la demanda territorial total (Galli et al., 2023).

Clúster 2: Intensificación económica y alta presión sobre carbono y pastoreo

Este grupo presenta fuertes correlaciones positivas entre PBI per cápita y Área de Pastoreo (0.56), Huella de carbono (0.59) y Áreas urbanas (0.53), junto con una correlación

negativa marcada con Zonas de pesca (-0.65). Esto sugiere un patrón de crecimiento económico apoyado en actividades intensivas en energía y ganadería, acompañado de deterioro de las zonas de pesca. Este comportamiento coincide con estudios que documentan que regiones extractivas presentan aumentos directos en la presión ambiental (Rüttinger et al., 2022; Zeballos et al., 2023).

Clúster 3: Alta presión sobre bosques y bajo aporte económico

En este clúster destaca la correlación negativa extrema con Área de bosques (-0.76), indicando pérdida de bosques sin un aumento económico asociado. Este patrón concuerda con estudios sobre la Amazonía, donde la degradación ecológica no genera beneficios locales significativos (Ferrante & Fearnside, 2022).

5.1.2. Huella ecológica vs. Componentes del PBI por clusters

Clúster 1: Dominio del sector industrial y de servicios

Las correlaciones más fuertes corresponden a Manufactura (0.78), Comercio, mantenimiento, reparación de vehículos automotores y motocicletas (0.84), Telecomunicaciones y otros servicios de información (0.71) y Otros Servicios (0.74), indicando que comercio, manufactura y servicios generan un incremento significativo de la huella ecológica. Esta tendencia coincide con lo encontrado por Li et al. (2023).

Clúster 2: Servicios modernos y administración pública como impulsores de huella ecológica. Este clúster muestra fuertes correlaciones entre huella ecológica y Comercio, mantenimiento, reparación de vehículos automotores y motocicletas (0.78), Administración pública y defensa (0.73), Telecomunicaciones y otros servicios de información (0.69) y

Alojamiento y restaurantes (0.58), lo cual está alineado con investigaciones sobre el impacto ambiental de la economía digital y del sector público (Khan et al., 2022).

Clúster 3: Sectores intensivos en transporte y logística como principales presionadores

Aquí destacan Transporte, almacenamiento, correo y mensajería (0.80), Telecomunicaciones y otros servicios de información (0.81), Comercio, mantenimiento, reparación de vehículos automotores y motocicletas (0.76) y Alojamiento y restaurantes (0.69), representando territorios donde transporte, comercio y turismo impulsan la presión ecológica (Sharifi et al., 2024).

La integración de los dos conjuntos de correlaciones permite derivar tres patrones generales: La estructura productiva influye más que el nivel de ingreso en la presión ecológica. Los sectores comercio, transporte, telecomunicaciones y turismo son los principales impulsores de la Huella Ecológica. La pérdida de bosques no necesariamente genera bienestar económico en regiones con patrones extractivos.

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

1. La correlación entre huella ecológica y PBI per cápita ($r = +0.44$) indica que el crecimiento económico en ausencia de políticas verdes tiende a elevar la huella ecológica, aunque la relación varía por estructura productiva, urbanización y adopción tecnológica. Para Perú, las políticas sectoriales y territoriales que favorezcan la eficiencia y la descarbonización son claves para intentar desacoplar el crecimiento económico de la presión ecológica observada en los clústeres.
2. Existe una relación entre el PBI per cápita con 5 dimensiones de huella ecológica: Área de cultivo (0.35), Área de Pastoreo ($r=0.56$), Área de bosques (0.48), Huella de carbono (0.53), Áreas urbanas (0.44), significancia ($p < 0.001$). Un aumento en el PBI per cápita por departamento se asocia con un aumento en los cinco componentes de la Huella Ecológica.
3. Los sectores servicios, comercio, manufactura, transporte y telecomunicaciones son los que más contribuyen al incremento de la Huella ecológica. La deforestación en algunos territorios no está asociada con beneficios económicos locales. El crecimiento económico en Perú no está desacoplado de la presión ambiental.
4. La relación entre el PBI per cápita y los componentes de la Huella Ecológica en los departamentos del Perú presenta patrones diferenciados de acuerdo con el tipo de estructura productiva, nivel de urbanización y dinámica territorial.
5. El Clúster 1 muestra un patrón moderado, donde el crecimiento económico incrementa levemente la presión ambiental, con señales de desacoplamiento parcial respecto a la huella de carbono.

6. El Clúster 2 expresa el vínculo más fuerte entre crecimiento económico y aumento de impacto ecológico, especialmente por expansión urbana, intensificación ganadera y mayor consumo energético.
7. El Clúster 3 refleja un modelo rural donde el crecimiento económico se asocia a procesos de deforestación y expansión ganadera, pero no necesariamente a un aumento en la huella ecológica total ni en la huella de carbono.
8. Los resultados evidencian que no existe una única forma de relación entre crecimiento económico y sostenibilidad ecológica en el Perú; por el contrario, las trayectorias departamentales son diversas y requieren enfoques analíticos y de gestión adaptados territorialmente.

5.2. Recomendaciones

1. Implementar políticas diferenciadas por clúster considerando la estructura productiva regional.
2. Promover eficiencia energética en transporte, comercio y telecomunicaciones y fomentar economías locales basadas en conservación en territorios con pérdida de bosques.
3. Integrar la huella ecológica como indicador oficial para planificación territorial y fortalecer la fiscalización ambiental en sectores intensivos en carbono.
4. Diseñar incentivos para actividades de bajo impacto en turismo y servicios, asimismo implementar políticas diferenciadas por clúster, reconociendo que cada grupo de departamentos presenta dinámicas distintas de presión ecológica.

5. Fortalecer estrategias de eficiencia energética y movilidad sostenible en departamentos del Clúster 2, donde la huella de carbono está estrechamente vinculada al crecimiento económico.
6. Promover programas de gestión forestal sostenible y control de la deforestación en departamentos del Clúster 3, donde la pérdida de bosques constituye el principal impacto asociado al crecimiento económico.
7. Estimular prácticas agropecuarias sostenibles en los clústeres con alta correlación entre PBI per cápita y uso de pastos (Clúster 2 y 3), incorporando sistemas silvopastoriles, manejo de pasturas y restauración ecológica.
8. Desarrollar indicadores complementarios a la Huella Ecológica que permitan capturar de manera más precisa los impactos territoriales específicos, como huella hídrica, emisiones sectoriales o cambios de uso del suelo.
9. Fortalecer la planificación urbana sostenible en departamentos con expansión urbana acelerada (Clúster 2), priorizando transporte limpio, vivienda compacta y zonas verdes urbanas.
10. Integrar información ambiental y económica en los sistemas regionales de planificación, de manera que el crecimiento económico considere explícitamente límites ecológicos y servicios ecosistémicos.

Referencias

- Alruweili, S. (2023). The nonlinear relationship between economic growth and ecological footprint in Saudi Arabia: Evidence from the Environmental Kuznets Curve hypothesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(5), 6547–6562.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-22489-9>
- Auccatoma Tinco, R. (2023). Filosofía ambiental y el buen vivir en los estudiantes universitarios. *Investigación valdizana*, 17(4), 189-198.
<https://doi.org/10.33554/riv.17.4.1947>
- Borghesi, S., Letta, M., & Mortini, D. (2022). Income, inequality and environmental pressure. *Ecological Economics*, 195, 107–118.
- Carrasco, C., Elizalde Hevia, A., Giraldo, O. F., Gough, I., Hermesen, J. J., Koch, M., Sempere, J., & Steinberger, J. K. (2022). Diálogo sobre calidad de vida y necesidades humanas. *FUHEM Ecosocial*, 44. https://www.fuhem.es/wp-content/uploads/2022/07/DOSIER_Ecosocila-DIALOGO-SOBRE-CALIDAD-DE-VIDA-Y-NECESIDADES-HUMANAS.pdf
- Chávez-Cortés, M. (2021). Estructuras productivas y desempeño económico regional en América Latina. *Revista CEPAL*, 135, 105–124.
- Ezquerro Delgado, D. I. (2023). Huella Ecológica del campus Capanique II de la Universidad Privada de Tacna-2023 [Universidad Privada de Tacna].
<https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/3138/Ezquerro-Delgado-Daniela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fernández Vega, J. (2024). El crecimiento económico y la contaminación ambiental por las emisiones de CO2 en el Perú en el período 1990-2019. Una aplicación de la hipótesis de

- la Curva Medioambiental de Kuznets a la realidad nacional. [Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/12917>
- Ferrante, L., & Fearnside, P. M. (2022). Amazon deforestation and development contradictions. *Environmental Research Letters*, 17(4), 041002.
- FVS. (2022). Análisis y Perfiles de Huella Ecológica 2018 - 2021. https://www.vidasostenible.org/wp-content/uploads/2024/01/Analisis_perfiles_huella_ecologica_2018-2021_DEF.pdf
- Galli, A., Wackernagel, M., Iha, K., & Lazarus, E. (2023). Ecological footprint: Implications for sustainability transitions. *Sustainability Science*, 15(3), 915–928. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00738-y>
- Global Footprint Network. (2023). National footprint and biocapacity accounts. Footprint Data Foundation and distributed by Global Footprint Network. <https://data.footprintnetwork.org/>
- Gómez-Zaldívar, M., & Martínez-Zarzoso, I. (2021). Economic growth and environmental degradation revisited. *Environmental Economics and Policy Studies*, 23(4), 685–711.
- Gudynas, E., & Benalcázar, P. C. (2024). Desarrollo sostenible: condicionalidades antropocéntricas y alternativas biocéntricas sudamericanas. *Debates en Sociología*, 59, 19-42. <https://doi.org/10.18800/debatesensociologia.202402.001>
- Guerrero-de-Lizardi, C. (2022). Teorías del crecimiento cara a cara (Englobamiento estadístico: hacia una especificación general). *Revista Mexicana de Economía y Finanzas*, 17(3), 1-24. <https://doi.org/10.21919/remef.v17i3.694>

- Guevara Mamani, M., Calcina Álvarez, D. A., Huarca Flores, P., Marca Flores, O. H., Ramirez Benavides, C., & Ancco Torres, R. (2023). Los sectores económicos-sociales y la contaminación del aire en Perú, 1970-2020. *Revista Alfa*, 7(19), 72-87.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.199>
- He, N., Zhou, Z., Zhou, Y., Zhang, J., Chen, D., Cai, Y., Zhang, M., & Liang, X. (2024). Spatiotemporal changes and drivers of ecological security based on an improved ecological footprint model: the case of Hubei Province, China. *Environmental Research Letters*, 19(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad4b42>
- INEI. (2024). Perú: Producto Bruto Interno por Departamentos 2007-2023. INEI.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1995/libro.pdf
- Jara Montesinos, N. A. (2023). Crecimiento económico y degradación ambiental en el Perú, un análisis econométrico a nivel regional (Tesis). Universidad Ricardo Palma.
<https://hdl.handle.net/20.500.14138/5964>
- Jiang, R., Fei, L., & Kang, S. (2025). Analysis and prediction of urban agglomeration ecological footprint based on improved three-dimensional ecological footprint and shared socioeconomic pathways. *Ecological Indicators*, 170(September 2024), 113079.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113079>
- Khan, M., Ali, W., & Salem, S. (2022). Digital economy and environmental impacts. *Energy Economics*, 108, 105–257.
- Li, Y., Zhang, B., & Wang, S. (2023). Service-sector growth and ecological pressure. *Ecological Indicators*, 149, 110–213.

- Liu, Z., Lan, J., & Wang, S. (2021). Urbanization, industrial structure and ecological footprint: Evidence from developing economies. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124972.
- Luzuriaga Vásconez, W. G., & Bueno Sagbaicela, W. R. (2024). Insostenibilidad del desarrollo sostenible: Una mirada crítica al discurso oficial de Brundtland. *Revista Espiga*, 23(47), 249-288. <https://doi.org/10.22458/re.v23i47.5311>
- Lyu, K., Tian, J., Zheng, J., Zhang, C., & Yu, L. (2024). Evaluation of Water – Carbon – Ecological Footprint and Its Spatial–Temporal Changes in the North China Plain. *Land* 2024, 13, 1327, 13(1327), 1-17. <https://doi.org/10.3390/land13081327>
- Magazzino, C., Mele, M., & Schneider, N. (2024). Urbanization, governance and ecological footprint in China: A long-run analysis (1960–2019). *Journal of Cleaner Production*, 441, 140782. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140782>
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2024). Conoce los conceptos Básicos para comprender la economía del país. Ministerio de Economía y Finanzas. https://www.mef.gob.pe/en/?id=61:conoce-los-conceptos-basicos-para-comprender-la-economia-del-pais&option=com_content&language=en-GB&view=article&lang=en-GB
- Ministerio del Ambiente. (2022). Huella ecológica per cápita departamental y por componentes - Ministerio del Ambiente. <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/huella-ecológica-cápita-departamental-y-por-componentes-ministerio-del-ambiente>
- Ortiz Sánchez, I., Mayo D'Arrigo, M., Alvarez Cueva, J., Espinoza Bardales, C., Garaycochea Castañón, A., Illanes Calderón, C., Vivas Huaccho, D., Vásquez, P., & Ramos Díaz, L. (2022). Los retos de las ciudades del Perú frente al cambio climático. *Aproximaciones*

- desde la Justicia Ambiental. En INTE-PUCP. <https://doi.org/10.18800/978-9972-674-30-3.021>
- Otero, L., & Cruz, P. (2024). Economic heterogeneity and ecological impacts in Andean regions. *Latin American Journal of Development Studies*, 12(1), 66–92.
- Pinedo, S., Arévalo, Y., Ramirez, G., Silva, J., Alcedo, J., Bottoni, K., Mansilla, J., Zarate, H., & Dextre, L. (2023). Estimación de la huella ecológica de los estudiantes de la universidad pública de Huacho, Perú. *Revista Ciencia Agraria*, 2(1), 7-17.
<https://doi.org/10.35622/j.rca.2023.01.001>
- Pongo Águila, O. E. (2022). El cambio climático y el crecimiento de la economía peruana en el periodo 2015-2020. En Universidad Nacional Federico Villarreal.
<https://hdl.handle.net/20.500.13084/8651>
- Quispe Mamani, J., Aguilar Pinto, S., Quispe Layme, M., Quispe Layme, W., Mamani Flores, A., Incacutipa Limachi, D., Calcina Álvarez, D. A., & Gutierrez Toledo, G. P. (2023). Relationship Between Economic Growth and Environmental Degradation in Peru, Period 1990-2019. *Journal of Law and Sustainable Development*, 11(5), 1-20.
<https://doi.org/10.55908/sdgs.v11i5.1041>
- Rumaja Albitez, A. (2023). Estimación de la Huella Ecológica Perú – 2017. En Tesis. Tesis_Doctoral.
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rüttinger, L., Fink, T., & Simons, G. (2022). Carbon-intensive development pathways. *Climate Policy*, 22(2), 245–260.

- Shahbaz, M., Balsalobre-Lorente, D., & Sinha, A. (2022). Environmental sustainability and economic development: A global evidence. *Journal of Environmental Management*, 306, 114435.
- Sharifi, A., et al. (2024). Transport-driven ecological footprints in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 355, 120–455.
- Solarin, S. A., Bello, M. O., & Babatunde, M. M. (2021). The impacts of financial development, biocapacity and ecological footprint: Global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3335–3352.
- Sumalve Velásquez, F. R. (2022). Degradación Ambiental y el PBI en el Perú (Tesis_Maes). [https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7825/TESIS _SUMALAVE-MAESTRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7825/TESIS_SUMALAVE-MAESTRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Taneo, P., & Ruiz-Rincón, L. (2022). Estructura económica y efectos ambientales en territorios andinos. *Revista Andina de Ciencias Sociales*, 14(1), 22–40.
- Zeballos, J., Quispe, R., & Lavado, P. (2023). Economic development and environmental pressure in Peru. *Revista Peruana de Economía y Ambiente*, 5(2), 33–52.